

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і робототехнічних
систем



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
на тему “Модернізація електропривода гвинтового конвеєру
сипучих матеріалів”

Здобувача Борисовець С.В
4 курсу групи АЕМ-40
Керівник д.ф.т.н Шейда-Голбад К.А, доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

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

В.о завідувача кафедри АТЕіРС

Олексій Жигайло

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет

Кафедра
Ступінь вищої освіти
Спеціальність

Освітня програма

Комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім.
П.М.Платонова
Електромеханіки та мехатроніки
Перший
141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
Екоенергетика та інтелектуальна
електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕтаМ

д.т.н проф Петро Осадчук

« » 2026p.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Борисовця Сергія Валерійовича

1. Тема роботи Модернізація електропривода гвинтового конвеєру сипучих матеріалів
Затверджена наказом ОНТУ від 21.11.2025 наказ № 641-03
2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 12.06.2026
3. Вихідні дані роботи
Шнек силосу з приводом AIP90L4 2,2 кВт та редуктором NRV-090 потребує визначення параметрів керування через частотний перетворювач.
4. Перелік питань, які потрібно розробити
Розробка загальної та розрахунково-конструкторської частин, моделювання роботи привода на пеом, економічне обґрунтування ефективності модернізації та розробка заходів з охорони праці
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначення обов'язкових креслень кінематична схема та загальний вигляд розвантажувального шнека, принципова електрична схема модернізованого електропривода на базі ПЧ, імітаційна модель у середовищі Matlab/Simulink

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Теоретичний	Шейда-Голбад К.А		
Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина	Шейда-Голбад К.А		
Розділ 3. Моделювання роботи	Шейда-Голбад К.А		
4.Економічне обґрунтування	Шейда-Голбад К.А		
5. Охорона праці	Шейда-Голбад К.А		
6. Висновки	Шейда-Голбад К.А		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2026

Керівник

Шейда-Голбад К.А

Завдання прийняв до виконання

Борисовець С.В

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримав завдання та ознайомився з вимогами	13.12.2025	
2	Написав перший розділ із загальною частиною.	19.01.2026	
3	Виконав розрахунково-конструкторську частину.	12.02.2026	
4	Провів моделювання роботи електропривода на ПЕОМ.	31.03.2026	
5	Розрахував економічну ефективність модернізації	10.04.2026	
6	Розробив заходи з охорони праці.	17.04.2026	
7	Сформував результативну частину та висновки	06.05.2026	
8	Пройшов перевірку тексту на академічну доброчесність.	12.06.2026	
9	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	18.06.2026	
10	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	29.06.2026	

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 Борисовець С.В.

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1 Загальна частина.....	10
1.1 Опис технологічного процесу розвантаження матеріалів із силосу та транспортування зерна.....	10
1.2 Конструкція і технічні характеристики розвантажувального шнека...	12
1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода шнека на базі двигуна АІР112М4.....	13
1.4 Види та застосування транспортних машин для переміщення сипучих матеріалів.....	16
1.5 Обґрунтування вибору шнекового транспортера та необхідність модернізації його електроприводу.....	19
1.4 Види та застосування транспортних машин для переміщення сипучих матеріалів.....	20
1.5 Обґрунтування вибору шнекового транспортера та необхідність модернізації його електроприводу.....	23
Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина.....	25
2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода розвантажувального шнека.....	25
2.2 Енергетичний та кінематичний аналіз існуючого електропривода шнека.....	26
2.3 Обґрунтування та вибір елементів оновленого електромеханічного комплексу	28
2.4 Розрахунок і побудування механічної характеристики двигуна АІР90L4.	32
2.5 Кінематичний розрахунок привода	34
2.6 Розрахунок і вибір кабелю живлення електропривода шнека	39
2.7 Розрахунок і вибір апаратів захисту і управління електропривода (автоматичного вимикача та контактора).....	40
2.8 Схема релейно-контакторного управління електропривода шнека	42
2.9 Обґрунтування застосування ПЧ в електроприводі шнека на основі векторного керування без давача	44
2.10 Вибір ПЧ Altivar Machine ATV320 для двигуна електропривода шнека	47

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Вдосконалення електроприводу розвантажувального шнека силосу			
Розробив	Борисовець С.В.							
Керівник	Шейда Голбад К.А.							
Реценз.								
Консульт.								
					Літера			Аркуш
					у			5
								67
					ОНТУ			
					Гр, АЕМ-40			

2.11	Схема частотного керування електроприводом шнека системи ПЧ-АД	48
3	Моделювання роботи електропривода на пеом	51
3.1	Обґрунтування вибору середовища та опис математичної моделі	51
3.2	Розробка імітаційної моделі прямого пуску електропривода.....	51
3.3	Моделювання перехідних процесів при прямому пуску шнека.....	53
3.4	Моделювання пуску та регулювання швидкості двигуна електропривода шнека з ПЧ	53
4.	Економічне обґрунтування та розрахунок ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	56
4.1	Розрахунок капітальних інвестицій у модернізацію привода	56
4.2	Розрахунок економічного ефекту:.....	57
Розділ 5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
5.1	Аналіз факторів виробничої небезпеки при роботі з електроприводом шнека.....	58
5.2	Інженерні рішення для забезпечення безпеки персоналу та обладнання	60
5.3	Модернізація системи безпеки за рахунок функціоналу ПЧ та автоматики.....	61
5.4	Пожежна безпека та дії у надзвичайних ситуаціях.....	63
6	Результативна частина	65
6.1	Висновки і пропозиції за прийнятими в проєкті рішеннями.....	65
	Список використаних джерел	68

Вступ

В умовах сучасних ринкових відносин та жорсткої конкуренції в агропромисловому комплексі України першочерговим завданням підприємств є зниження собівартості продукції та підвищення надійності виробничих ліній. Елеватори та зерносховища (силоси) є критично важливими ланками логістичного ланцюга зберігання та переробки сільськогосподарської сировини. Безперебійність їхньої роботи напряму залежить від ефективності функціонування транспортно-технологічних систем, серед яких ключову роль відіграють розвантажувальні гвинтові конвеєри (шнеки). Забезпечення їхньої стабільної роботи є не лише технологічною, але й вагомим економічним завданням, оскільки простої обладнання через аварії призводять до значних фінансових втрат.

Шляхи підвищення економічної ефективності електроприводів технологічних механізмів сьогодні нерозривно пов'язані з їхньою комплексною автоматизацією та переходом на енергоощадні технології. Аналіз стану сучасних технологій створення та напрямків розвитку систем електроприводів свідчить про глобальну тенденцію відмови від нерегульованих систем на базі асинхронних двигунів з прямим пуском від мережі. Сучасний етап розвитку характеризується масовим впровадженням систем частотного керування (перетворювачів частоти), мікропроцесорної техніки та інтелектуальних систем захисту, які дозволяють гнучко керувати координатами електропривода, оптимізувати енергоспоживання та інтегрувати локальні механізми у загальнозаводські автоматизовані системи керування.

Незважаючи на доступність сучасних рішень, на багатьох вітчизняних підприємствах розвантажувальні шнеки силосів досі оснащені застарілими або нераціонально підібраними системами релейно-контакторного керування. Пряме ввімкнення асинхронних двигунів у мережу супроводжується значними пусковими струмами, що викликають просадки напруги та негативно впливають на якість електроенергії. Крім того, прямий пуск, особливо під навантаженням (завалом зерна), створює руйнівні динамічні удари у механічній передачі, що

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

призводить до передчасного зносу обладнання. Відсутність можливості регулювання швидкості обертання шнека унеможливорює точне дозування матеріалу, що змушує використовувати механічні засувки, знижуючи загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Виходячи з наведеного, модернізація системи автоматизації розвантажувального шнека шляхом впровадження регульованого електропривода за системою «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД) з одночасною оптимізацією кінематичної схеми є технічно та економічно доцільною. Це дозволить усунути ударні навантаження завдяки плавному пуску, розширити технологічні можливості вузла за рахунок регулювання продуктивності та подовжити міжремонтний інтервал експлуатації електромеханічної системи.

Актуальність теми. Вдосконалення електропривода розвантажувального шнека силосу шляхом переходу від нерегульованого прямого пуску до системи частотного керування з одночасною оптимізацією силових елементів є актуальним завданням, вирішення якого сприяє підвищенню енергоефективності, експлуатаційної надійності та якості технологічного процесу вивантаження сипучих матеріалів на підприємствах агропромислового сектору.

Об'єкт дослідження: електромеханічна система розвантажувального шнека силосу.

Предмет дослідження: процеси керування, режими роботи та енергетичні показники автоматизованого електропривода розвантажувального шнека силосу при використанні системи частотного керування.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка комплексного інженерного рішення для модернізації електропривода розвантажувального шнека силосу, що забезпечить підвищення його надійності, енергоефективності та можливість точного регулювання продуктивності на базі раціонально підібраного комплексу електромеханічного обладнання.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі вирішуються наступні завдання:

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1. Провести аналіз технологічного процесу розвантаження матеріалів із силосу та сформулювати технічні вимоги до автоматизованого електропривода.
2. Виконати розрахунок кінематичної схеми, визначити необхідну потужність на валу та здійснити обґрунтування вибору енергоефективного електродвигуна і мотор-редуктора.
3. Обґрунтувати вибір силового перетворювача частоти, апаратів захисту та комутації, а також розробити електричну принципову схему керування системою ПЧ-АД.
4. Створити математичну та імітаційну модель розробленого електропривода у програмному середовищі MATLAB/Simulink та дослідити його динамічні й механічні характеристики в режимах прямого пуску та частотного регулювання швидкості.
5. Розробити заходи з організації монтажу, технічного обслуговування та безпеки праці (охорони праці) й пожежної безпеки при експлуатації модернізованого обладнання.
6. Розрахувати капітальні інвестиції, річний економічний ефект та довести техніко-економічну доцільність впровадження розробленої системи.

Розділ 1 Загальна частина

1.1 Опис технологічного процесу розвантаження матеріалів із силосу та транспортування зерна

Шнекові (гвинтові) механізми мають глибоке історичне коріння та є одними з найдавніших пристроїв для переміщення речовин. Першим історично задокументованим прототипом сучасного шнекового конвеєра вважається водопідіймальна машина, винайдена видатним давньогрецьким вченим та інженером Архімедом у III столітті до н.е. [1]. Цей пристрій, відомий у науці як «гвинт Архімеда», спочатку розроблявся для зрошення сільськогосподарських угідь у долині Нілу та відкачування води з трюмів великих кораблів [2]. Конструктивно він складався з дерев'яного порожнистого циліндра, всередині якого був жорстко закріплений гвинт. Під час ручного обертання механізму вода порціями підіймалася по його витках вгору, як показано на рисунку 1.1 [3]

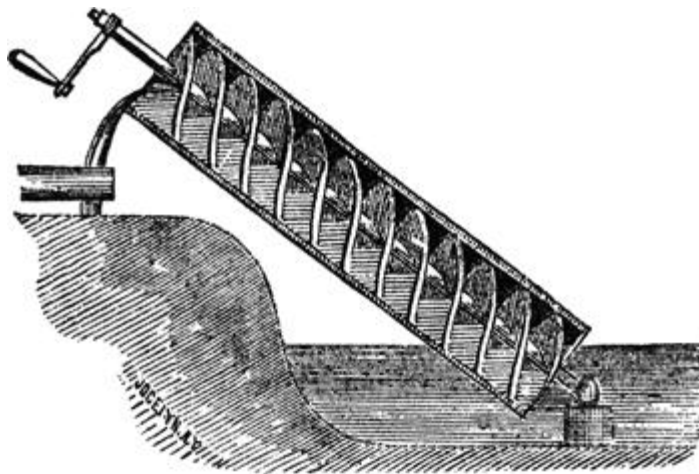


Рисунок 1.1 Гвинт Архімеда як історичний прототип сучасних шнекових механізмів

З розвитком промисловості у XVIII-XIX століттях принцип дії архімедового гвинта був адаптований інженерами для переміщення не лише рідин, а й сипучих, кускових та пастоподібних матеріалів. З появою механічного привода, а згодом - і застосуванням перших електродвигунів, гвинтові конвеєри стали невід'ємною частиною борошномельних підприємств, елеваторів та заводів з переробки зернових культур. Сьогодні розвантажувальні шнеки є одним із найбільш

затребуваних типів конвеєрів безперервної дії завдяки своїй компактності, герметичності корпусу та простоті інтеграції у складні технологічні лінії.

Сучасний технологічний процес розвантаження сипучих матеріалів (зерна, комбікормів) із силосу є завершальним етапом циклу зберігання та початковим етапом транспортування продукції на подальшу переробку або відвантаження. Процес ґрунтується на гравітаційній подачі матеріалу з об'єму силосу до розвантажувального отвору, де безпосередньо встановлено шнековий конвеєр.

Основним завданням технологічного процесу є забезпечення рівномірної та строго регульованої подачі зерна. Електромеханічна система працює наступним чином: шнек, обертаючись від електропривода, захоплює сипучий матеріал своєю гвинтовою поверхнею та переміщує його вздовж нерухомого металевого жолоба. Важливою технологічною умовою стабільної роботи є недопущення утворення так званих «зводів» (арок) матеріалу всередині ємності та заторів у випускному патрубку.

Крім того, швидкість розвантаження (продуктивність шнека) повинна бути чітко узгоджена з пропускнуою здатністю наступних транспортних механізмів у лінії (наприклад, норій або стрічкових конвеєрів) для запобігання їх перевантаженню, засипанню обладнання та втратам продукту.

Для кращого розуміння взаємодії обладнання та послідовності руху зернового матеріалу необхідно розглянути загальне компонування розвантажувального вузла. На рисунку 1.2 представлена принципова схема силосу в розрізі, де наочно показано розташування випускної воронки та інтегрованого під нею шнекового живильника, що забезпечує безперервний забір продукту з робочого об'єму ємності.

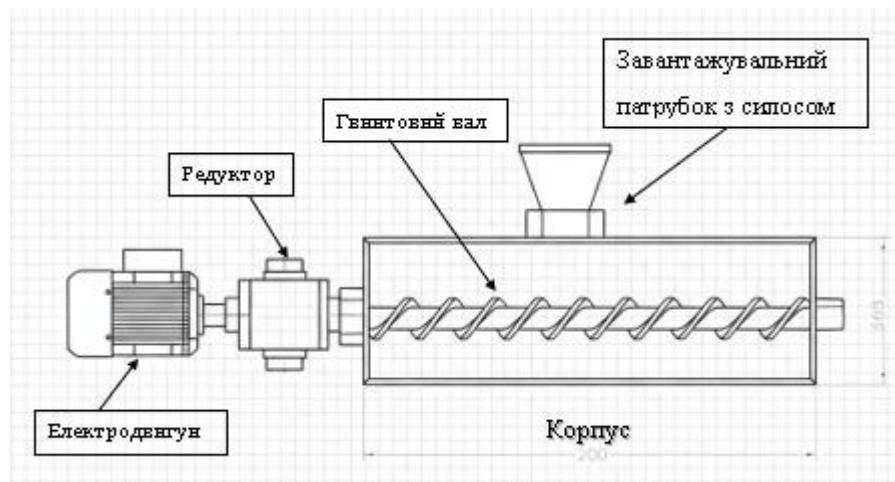


Рисунок 1.2 Схема силосу в розрізі з нижнім розташуванням шнека.

1.2 Конструкція і технічні характеристики розвантажувального шнека

Об'єктом нашого дослідження є розвантажувальний гвинтовий конвеєр (шнек), що забезпечує дозоване виведення зернових культур із нижньої конусної частини силосу. Механізм складається з несучого металевого корпусу, всередині якого на підшипникових опорах розташований робочий вал із суцільною гвинтовою навивкою. Конструктивно шнек виконаний за закритою схемою у вигляді жолоба з герметичною кришкою, що запобігає запиленню виробничого приміщення та забезпечує дотримання жорстких санітарно-екологічних норм на підприємстві [5]. Корпус конвеєра виготовлений із конструкційної вуглецевої сталі марки Ст3 товщиною 3 мм, що гарантує необхідну механічну міцність конструкції при повному завантаженні матеріалом.

Привод шнека розміщений на окремій жорсткій станині та складається з асинхронного електродвигуна і механічного понижувального редуктора. Передача крутного моменту від редуктора до робочого вала здійснюється за допомогою пружної муфти, яка частково компенсує неспіввісність валів та пом'якшує динамічні удари під час пуску [4].

Згідно з технічною документацією та паспортом об'єкта, існуючий розвантажувальний шнек має наступні основні технічні характеристики:

- ✓ Тип конвеєра: стаціонарний, горизонтальний;
- ✓ Номінальна продуктивність: 40 т/год (по пшениці);
- ✓ Діаметр гвинта (шнека): 250 мм;

- ✓ Крок гвинтової лінії: 200 мм;
- ✓ Загальна довжина корпусу (траси транспортування): 6 м;
- ✓ Встановлений електродвигун: АІР112М4;
- ✓ Номінальна частота обертання вала шнека: 65 об/хв.

Центральним і найбільш навантаженим вузлом механізму, що безпосередньо взаємодіє з насипним вантажем, є робочий вал шнека. Його конструкція повинна забезпечувати високу жорсткість на кручення та згинання, оскільки під час розвантаження повністю заповненого силосу на гвинтову поверхню діють значні сили опору матеріалу [5]. Для детального ознайомлення з будовою основних елементів вала, місцями розташування підшипникових опор та параметрами навивки спіралі, нижче наведено його конструктивну схему на рисунку

1.3

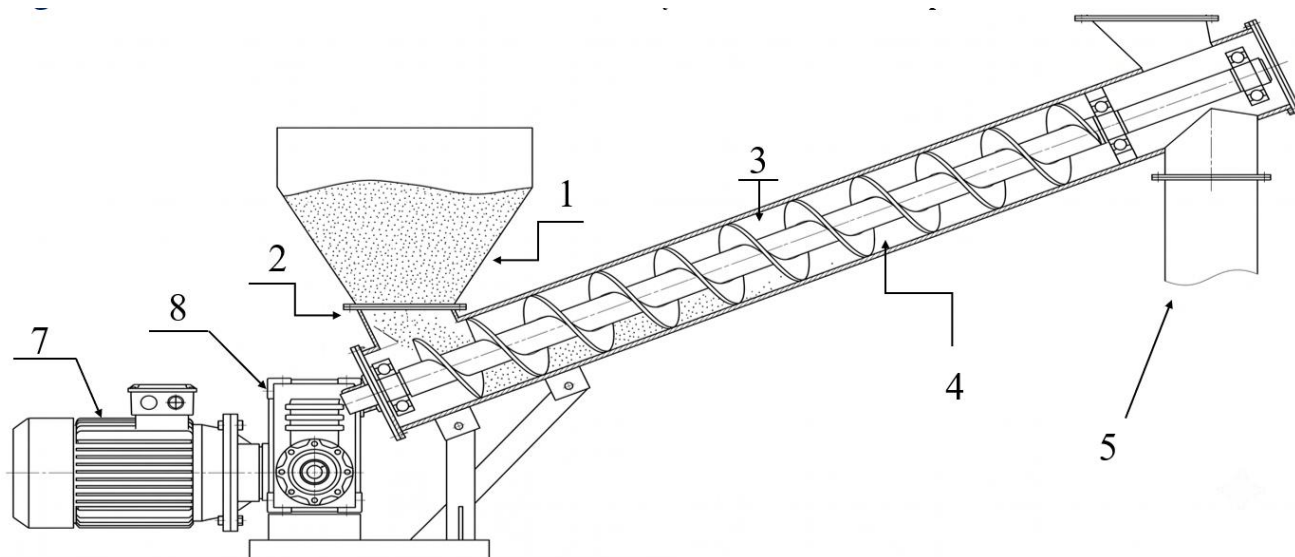


Рисунок 1.3 - Загальний вигляд вузла гвинтового конвеєра

1. Бункер; 2. Завантажувальний патрубок із засувкою; 3. Корпус (жолоб) конвеєра; 4 Гвинтовий вал (шнек); 5. Розвантажувальний патрубок; 6. Асинхронний електродвигун; 7. Черв'ячний редуктор.

1.3 Загальна характеристика існуючого електропривода шнека на базі двигуна АІР112М4

На поточному етапі експлуатації розвантажувальний шнек силосу оснащений нерегульованим електроприводом змінного струму. Силовим

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		13

агрегатом виступає трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР112М4 потужністю 5,5 кВт та синхронною частотою обертання 1500 об/хв (номінальна частота обертання ротора становить 1445 об/хв) [6].

Керування приводним двигуном реалізовано за допомогою найбільш поширеної, але технічно застарілої схеми прямого пуску (Direct-On-Line). Комутація силових ланцюгів статора здійснюється за допомогою електромагнітного пускача серії ПМЛ, а функцію захисту від тривалих струмових перевантажень покладено на теплове реле. Дана конфігурація апаратури забезпечує лише базове дискретне керування (старт/стоп) без жодної можливості технологічного впливу на швидкість обертання вала. Принципова електрична схема існуючого вузла наведена на рисунку 1.4.

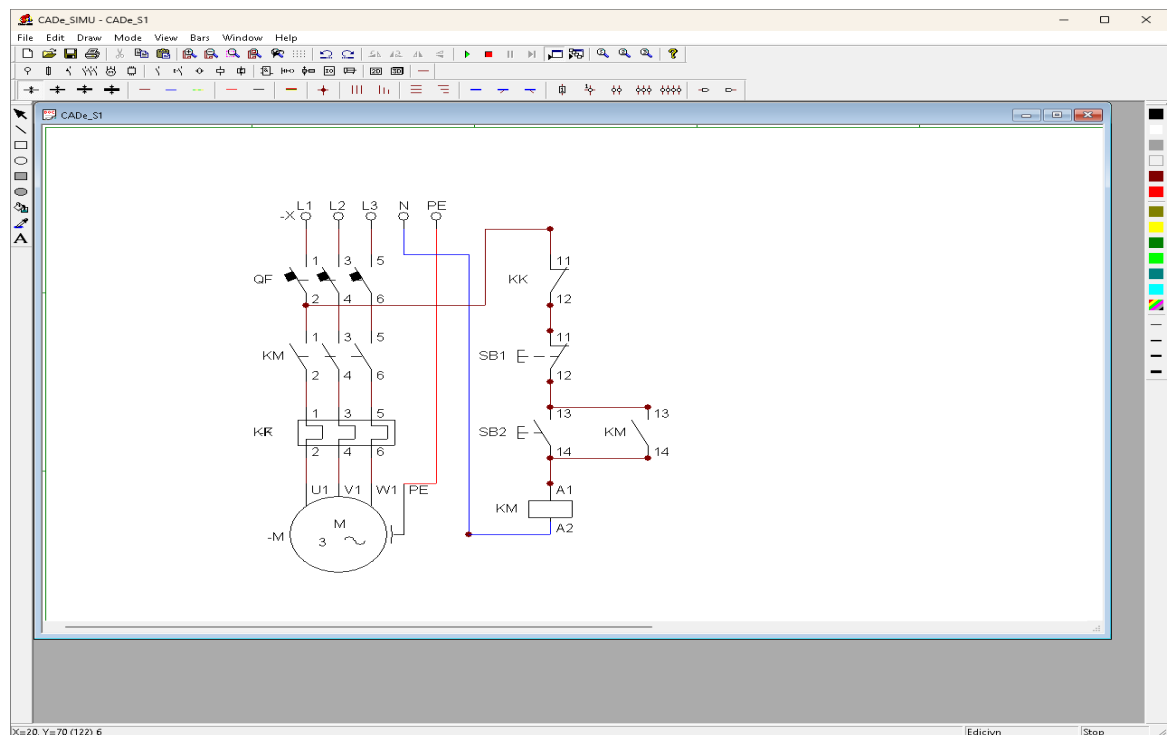


Рисунок 1.4 - Принципова електрична схема існуючого електропривода шнека

Детальний аналіз існуючого стану об'єкта та наведеної схеми виявив ряд критичних експлуатаційних та технологічних проблем, які роблять подальше використання цього привода нераціональним:

1. Встановлена потужність базового електродвигуна (5,5 кВт) була закладена на етапі проєктування силосу з величезним запасом для гарантованого

подолання пускових опорів при повному завантаженні конвеєра. Проте в номінальному робочому режимі двигун виявляється суттєво недовантаженим. Робота асинхронної машини з низьким коефіцієнтом завантаження призводить до різкого зниження її коефіцієнта корисної дії (ККД) та падіння коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$), що спричиняє підвищені втрати електроенергії на підприємстві.

2. Пряме ввімкнення потужного асинхронного двигуна в мережу супроводжується значними пусковими струмами, що досягають 7-кратного перевищення номінального значення (в абсолютному вираженні це понад 80 А). Такі струмові кидки створюють відчутні просадки напруги в локальній мережі, що негативно впливає на роботу чутливої мікропроцесорної автоматики інших вузлів елеватора.

3. Відсутність плавного наростання електромагнітного моменту при пуску призводить до жорстких динамічних ударів у трансмісії. Це викликає передчасний знос шпонкових з'єднань, підшипників та зубчастих коліс існуючого двоступінчастого циліндричного редуктора.

4. Поточний технологічний процес вимагає точного дозування зерна під час вивантаження для синхронізації з норіями. При використанні нерегульованого привода це завдання вирішується шляхом механічного перекриття засувки силосу. Такий метод призводить до непродуктивних витрат електроенергії (двигун долає штучний опір) та підвищеного травмування зерна об напівзакриту засувку.

Виходячи з наведеного, існуючий стан електропривода оцінюється як такий, що не відповідає сучасним вимогам енергоефективності, надійності та рівня автоматизації технологічних процесів. Це повністю обґрунтовує технічну необхідність його комплексної модернізації. Для вирішення виявлених експлуатаційних проблем необхідно виконати перевірочний розрахунок кінематики та навантажень, визначити дійсно необхідну потужність приводного двигуна, обрати раціональну схему механічної передачі та впровадити сучасну систему керування з плавним регулюванням швидкості. Відповідні розрахунки та

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						15
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

обґрунтування вибору нового комплексу обладнання наведено у наступному розділі роботи.

1.4 Види та застосування транспортних машин для переміщення сипучих матеріалів.

У сучасному агропромисловому комплексі та на підприємствах переробної промисловості ефективне переміщення сипучих матеріалів є одним із ключових етапів, який безпосередньо впливає на загальну продуктивність і рентабельність

підприємства. Транспортне обладнання забезпечує безперервність технологічних процесів, своєчасне завантаження та вивантаження місткостей зберігання, таких як металеві силоси чи склади підлогового типу, а також переміщення сировини між різними виробничими ділянками. Процес вибору конкретного типу механізму є досить складним інженерним завданням, оскільки він залежить від безлічі різноманітних факторів: фізико-механічних властивостей вантажу, необхідної продуктивності, геометричних параметрів траєкторії переміщення, відстані транспортування, а також жорстких вимог щодо збереження цілісності продукту під час його руху. Важливо розуміти, що на практиці не існує абсолютно універсального рішення, і для кожного конкретного технологічного завдання чи виду сировини підбирається свій найбільш оптимальний варіант конвеєра.

Зазвичай вибір типу транспортної машини дуже тісно пов'язаний із характеристиками самого транспортованого матеріалу. Наприклад, для переміщення насіннєвого матеріалу, бобових культур або продовольчого зерна на великі відстані традиційно обирають стрічкові конвеєри. Вони забезпечують найбільш дбайливе ставлення до продукту, оскільки зерно не треться об металеві стінки, що зводить до мінімуму відсоток його травмування і збереження товарної якості. Якщо ж підприємство працює з борошном, комбікормами, шротом або іншими пилоподібними та дрібнодисперсними матеріалами, перевагу віддають повністю закритим герметичним системам. До таких належать гвинтові конвеєри (шнеки) або закриті скребкові конвеєри. Це дозволяє уникнути значних втрат продукту через розпилення, запобігає забрудненню навколишнього середовища та

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		16

мінімізує ризик утворення вибухонебезпечного пилового середовища у приміщеннях. Гвинтові конвеєри також часто стають безальтернативним вибором, коли необхідно організувати точне об'ємне дозування матеріалу, вивантаження вологого зерна з бункерів або переміщення відходів очищення на відносно невеликій відстані. У випадках, коли технологічний процес вимагає підняти сипучий матеріал на значну висоту, наприклад, для верхнього завантаження у високі металеві силоси елеватора, основним і найбільш раціональним варіантом залишаються норії, тобто ковшові елеватори вертикального типу.

Розглядаючи більш детально конструктивні особливості основних типів транспортних механізмів, варто почати з гвинтових конвеєрів, які в промисловості найчастіше називають шнеками. Цей пристрій використовує для переміщення вантажу обертовий гвинт, який розміщений всередині наглухо закритого металевого жолоба або труби. Сипучий матеріал просувається вздовж осі завдяки гвинтовій конструкції робочого органу. Такі машини є надзвичайно компактними, вони забезпечують повну герметичність траси та є відносно простими у технічному обслуговуванні. Проте сфера їх застосування дещо обмежується високою енергоємністю процесу транспортування та високим ризиком пошкодження гранул чи зернівок через постійне тертя об витки металевих гвинта. Саме через здатність подрібнювати продукт, шнеки намагаються не використовувати на довгих трасах для транспортування крихких матеріалів чи елітного насіння.

Норія, або ковшовий елеватор, є класичним індустріальним рішенням для безперервного вертикального транспортування сипучих вантажів. Вона працює за принципом нескінченної гнучкої тягової стрічки або ланцюга із закріпленими на ній металевими чи полімерними ковшами, яка швидко переміщується всередині вертикальних норійних труб. Норії здатні забезпечити дуже високу продуктивність при підйомі зерна на висоту понад півсотні метрів, займаючи при цьому абсолютно мінімальну площу на території підприємства. Разом з тим, експлуатація таких вертикальних систем вимагає ретельного контролю за вибухобезпекою через ризик утворення статичної електрики та іскор у сильно

запиленому середовищі. Крім того, конструкція норії створює певні складнощі при її повному очищенні під час технологічного переходу з одного виду культури на інший.

Стрічкові конвеєри суттєво виділяються серед інших машин тим, що вантаж у них безперервно переміщується на гнучкій прогумованій стрічці, яка спирається на розгалужену систему роликів опор. Завдяки такій конструкції стає можливим транспортувати продукт на дуже великі відстані, іноді на сотні метрів, з мінімальними питомими витратами електроенергії та практично нульовим рівнем пошкодження вантажу. Оскільки матеріал просто нерухомо лежить на рухомій стрічці і не треться об нерухомі частини напрямних конструкцій, стрічкові машини ідеально підходять для магістрального транспортування. Головним їхнім недоліком є значні габарити, які потребують просторих галерей для встановлення, а також суворі обмеження щодо кута нахилу траси, який зазвичай не перевищує двадцяти градусів.

Скребковий, або як його ще називають ланцюговий конвеєр, конструктивно являє собою закритий прямокутний металевий короб, всередині якого безперервно рухається тяговий ланцюг із закріпленими на ньому спеціальними поперечними скребками. Під час роботи машини ці скребки захоплюють сипучий матеріал і тягнуть його по плоскому дну короба суцільною масою. Це обладнання є одним із найкращих рішень для горизонтального або полого-похилого транспортування зерна в умовах елеваторів. Головною особливістю скребкових конвеєрів є легкість організації проміжного розвантаження: завдяки встановленню засувки у днищі короба, матеріал можна висипати у будь-якій точці маршруту, що робить їх абсолютно незамінними для обслуговування цілого ряду розташованих поруч силосів. Їхня повністю герметична конструкція надійно захищає продукт від атмосферних опадів, хоча варто враховувати, що постійне волочіння маси зерна та тертя ланцюга об металеве днище з часом призводить до зношування самої конструкції та часткового мікроподрібнення транспортованого продукту.

1.5 Обґрунтування вибору шнекового транспортера та необхідність модернізації його електроприводу

Зважаючи на проведений аналіз існуючих транспортних систем, для виконання завдань, пов'язаних із локальним переміщенням сипучих матеріалів, дозуванням та забезпеченням повної герметичності процесу, найбільш доцільним є використання саме гвинтового конвеєра. Незважаючи на дещо вищу енергоємність процесу транспортування порівняно зі стрічковими аналогами, шнековий механізм беззаперечно виграє завдяки своїй винятковій компактності, відносній простоті інтеграції в уже існуючі технологічні лінії та здатності стабільно працювати в умовах суттєво обмеженого простору. Закрита конструкція металевого жолоба або труби повністю гарантує відсутність втрат продукту та мінімізує пилоутворення, що є абсолютно критичним фактором при роботі з дрібнодисперсними матеріалами.

Проте загальна ефективність роботи гвинтового конвеєра, його довговічність та надійність практично повністю залежать від технічних характеристик встановленого електромеханічного приводу. Традиційні та застарілі рішення досить часто базуються на прямому підключенні асинхронних електродвигунів до мережі, що неминуче призводить до виникнення значних пускових струмів та жорстких механічних ударів у всій системі передачі крутного моменту. Ці негативні фактори особливо сильно впливають на зношуваність фланцевих з'єднань та шестерень редукторів, а також призводять до вкрай нераціонального використання електроенергії при змінних навантаженнях на валу шнека.

Сучасні тенденції розвитку промислового машинобудування вимагають обов'язкового переходу до більш досконалих та надійних систем. Модернізація електроприводу шнекового транспортера шляхом оптимізації його кінематичної схеми, використання сучасних компактних рішень, наприклад, надійних одноступінчатих черв'ячних редукторів, та впровадження енергоефективних методів керування дозволяє кардинально змінити ситуацію. Такий підхід дає можливість значно подовжити експлуатаційний ресурс механічної частини

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		19

конвеєра, суттєво зменшити витрати на регулярне технічне обслуговування та підвищити загальну безвідмовність роботи транспортного вузла. Саме тому детальне дослідження режимів роботи електроприводу гвинтового конвеєра та розробка конкретних технічних рішень щодо його модернізації є вельми актуальним завданням, яке потребує глибокого інженерного аналізу.

1.4 Види та застосування транспортних машин для переміщення сипучих матеріалів

У сучасному агропромисловому комплексі та на підприємствах переробної промисловості ефективне переміщення сипучих матеріалів є одним із ключових етапів, який безпосередньо впливає на загальну продуктивність і рентабельність підприємства. Транспортне обладнання забезпечує безперервність технологічних процесів, своєчасне завантаження та вивантаження місткостей зберігання, таких як металеві силоси чи склади підлогового типу, а також переміщення сировини між різними виробничими ділянками. Процес вибору конкретного типу механізму є досить складним інженерним завданням, оскільки він залежить від безлічі різноманітних факторів: фізико-механічних властивостей вантажу, необхідної продуктивності, геометричних параметрів траєкторії переміщення, відстані транспортування, а також жорстких вимог щодо збереження цілісності продукту під час його руху. Важливо розуміти, що на практиці не існує абсолютно універсального рішення, і для кожного конкретного технологічного завдання чи виду сировини підбирається свій найбільш оптимальний варіант конвеєра.

Зазвичай вибір типу транспортної машини дуже тісно пов'язаний із характеристиками самого транспортованого матеріалу. Наприклад, для переміщення насіннєвого матеріалу, бобових культур або продовольчого зерна на великі відстані традиційно обирають стрічкові конвеєри. Вони забезпечують найбільш дбайливе ставлення до продукту, оскільки зерно не треться об металеві стінки, що зводить до мінімуму відсоток його травмування і збереження товарної якості. Якщо ж підприємство працює з борошном, комбікормами, шротом або іншими пилоподібними та дрібнодисперсними матеріалами, перевагу віддають повністю закритим герметичним системам. До таких належать гвинтові конвеєри

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						20
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

(шнеки) або закриті скребкові конвеєри. Це дозволяє уникнути значних втрат продукту через розпилення, запобігає забрудненню навколишнього середовища та мінімізує ризик утворення вибухонебезпечного пилового середовища у приміщеннях. Гвинтові конвеєри також часто стають безальтернативним вибором, коли необхідно організувати точне об'ємне дозування матеріалу, вивантаження вологого зерна з бункерів або переміщення відходів очищення на відносно невеликій відстані. У випадках, коли технологічний процес вимагає підняти сипучий матеріал на значну висоту, наприклад, для верхнього завантаження у високі металеві силоси елеватора, основним і найбільш раціональним варіантом залишаються норії, тобто ковшові елеватори вертикального типу.

Розглядаючи більш детально конструктивні особливості основних типів транспортних механізмів, варто почати з гвинтових конвеєрів, які в промисловості найчастіше називають шнеками. Цей пристрій використовує для переміщення вантажу обертовий гвинт, який розміщений всередині наглухо закритого металевого жолоба або труби. Сипучий матеріал просувається вздовж осі завдяки гвинтовій конструкції робочого органу. Такі машини є надзвичайно компактними, вони забезпечують повну герметичність траси та є відносно простими у технічному обслуговуванні. Проте сфера їх застосування дещо обмежується високою енергоємністю процесу транспортування та високим ризиком пошкодження гранул чи зернівок через постійне тертя об витки металевих гвинта. Саме через здатність подрібнювати продукт, шнеки намагаються не використовувати на довгих трасах для транспортування крихких матеріалів чи елітного насіння.

Норія, або ковшовий елеватор, є класичним індустріальним рішенням для безперервного вертикального транспортування сипучих вантажів. Вона працює за принципом нескінченної гнучкої тягової стрічки або ланцюга із закріпленими на ній металевими чи полімерними ковшами, яка швидко переміщується всередині вертикальних норійних труб. Норії здатні забезпечити дуже високу продуктивність при підйомі зерна на висоту понад півсотні метрів, займаючи при цьому абсолютно мінімальну площу на території підприємства. Разом з тим,

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						21
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

експлуатація таких вертикальних систем вимагає ретельного контролю за вибухобезпекою через ризик утворення статичної електрики та іскор у сильно запиленому середовищі. Крім того, конструкція норії створює певні складнощі при її повному очищенні під час технологічного переходу з одного виду культури на інший.

Стрічкові конвеєри суттєво виділяються серед інших машин тим, що вантаж у них безперервно переміщується на гнучкій прогумованій стрічці, яка спирається на розгалужену систему роликів опор. Завдяки такій конструкції стає можливим транспортувати продукт на дуже великі відстані, іноді на сотні метрів, з мінімальними питомими витратами електроенергії та практично нульовим рівнем пошкодження вантажу. Оскільки матеріал просто нерухомо лежить на рухомій стрічці і не трется об нерухомі частини напрямних конструкцій, стрічкові машини ідеально підходять для магістрального транспортування. Головним їхнім недоліком є значні габарити, які потребують просторих галерей для встановлення, а також суворі обмеження щодо кута нахилу траси, який зазвичай не перевищує двадцяти градусів.

Скребковий, або як його ще називають ланцюговий конвеєр, конструктивно являє собою закритий прямокутний металевий короб, всередині якого безперервно рухається тяговий ланцюг із закріпленими на ньому спеціальними поперечними скребками. Під час роботи машини ці скребки захоплюють сипучий матеріал і тягнуть його по плоскому дну короба суцільною масою. Це обладнання є одним із найкращих рішень для горизонтального або полого-похилого транспортування зерна в умовах елеваторів. Головною особливістю скребкових конвеєрів є легкість організації проміжного розвантаження: завдяки встановленню засувки у днищі короба, матеріал можна висипати у будь-якій точці маршруту, що робить їх абсолютно незамінними для обслуговування цілого ряду розташованих поруч силосів. Їхня повністю герметична конструкція надійно захищає продукт від атмосферних опадів, хоча варто враховувати, що постійне волочіння маси зерна та тертя ланцюга об металеве днище з часом призводить до зношування самої конструкції та часткового мікроподрібнення транспортованого продукту.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						22
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.5 Обґрунтування вибору шнекового транспортера та необхідність модернізації його електроприводу

Зважаючи на проведений аналіз існуючих транспортних систем, для виконання завдань, пов'язаних із локальним переміщенням сипучих матеріалів, дозуванням та

забезпеченням повної герметичності процесу, найбільш доцільним є використання саме гвинтового конвеєра. Незважаючи на дещо вищу енергоємність процесу транспортування порівняно зі стрічковими аналогами, шнековий механізм беззаперечно виграє завдяки своїй винятковій компактності, відносній простоті інтеграції в уже існуючі технологічні лінії та здатності стабільно працювати в умовах суттєво обмеженого простору. Закрита конструкція металевого жолоба або труби повністю гарантує відсутність втрат продукту та мінімізує пилоутворення, що є абсолютно критичним фактором при роботі з дрібнодисперсними матеріалами.

Проте загальна ефективність роботи гвинтового конвеєра, його довговічність та надійність практично повністю залежать від технічних характеристик встановленого електромеханічного приводу. Традиційні та застарілі рішення досить часто базуються на прямому підключенні асинхронних електродвигунів до мережі, що неминуче призводить до виникнення значних пускових струмів та жорстких механічних ударів у всій системі передачі крутного моменту. Ці негативні фактори особливо сильно впливають на зношуваність фланцевих з'єднань та шестерень редукторів, а також призводять до вкрай нераціонального використання електроенергії при змінних навантаженнях на валу шнека.

Сучасні тенденції розвитку промислового машинобудування вимагають обов'язкового переходу до більш досконалих та надійних систем. Модернізація електроприводу шнекового транспортера шляхом оптимізації його кінематичної схеми, використання сучасних компактних рішень, наприклад, надійних одноступінчатих черв'ячних редукторів, та впровадження енергоефективних методів керування дозволяє кардинально змінити ситуацію. Такий підхід дає

можливість значно подовжити експлуатаційний ресурс механічної частини конвеєра, суттєво зменшити витрати на регулярне технічне обслуговування та підвищити загальну безвідмовність роботи транспортного вузла. Саме тому детальне дослідження режимів роботи електроприводу гвинтового конвеєра та розробка конкретних технічних рішень щодо його модернізації є вельми актуальним завданням, яке потребує глибокого інженерного аналізу.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						24
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина.

2.1 Вимоги до автоматизованого електропривода розвантажувального шнека

Формулювання вимог до автоматизованого електропривода розвантажувального шнека базується на необхідності комплексної оптимізації його технологічних, динамічних та енергетичних показників. Першочерговою умовою стабільного функціонування всієї транспортної лінії є точне підтримання заданої кутової швидкості виконавчого органу на рівні номінальних 65 об/хв. Оскільки продуктивність конвеєра безпосередньо залежить від частоти обертання гвинта, будь-які неконтрольовані відхилення швидкості призводять до порушення ритмічності вивантаження сипучого матеріалу. Стабілізація цього параметра в межах проектних 40 т/год дозволяє повністю виключити ризики утворення заторів у випускному патрубку та забезпечує оптимальний графік спорожнення силосу.

Не менш важливим інженерним завданням є забезпечення повної керованості електромеханічною системою під час динамічних перехідних процесів, зокрема при пуску та зупинці привода. Традиційне нерегульоване ввімкнення супроводжується значними механічними ударами, які є вкрай небезпечними у випадках, коли шнек запускається «під завалом», тобто будучи повністю заповненим щільним або злежаним зерном. Нова система керування повинна забезпечувати плавне, контрольовано розтягнуте у часі наростання електромагнітного моменту. Це дозволить усунути руйнівні ударні навантаження на елементи черв'ячного зачеплення редуктора та робочий вал конвеєра, суттєво зменшуючи знос бронзового вінця черв'ячного колеса та подовжуючи міжремонтний інтервал експлуатації всього вузла.

Технологічна гнучкість об'єкта досягається за рахунок впровадження функції безступінчастого регулювання кутової швидкості приводного асинхронного двигуна. Можливість оперативного та точного налаштування темпу обертання шнека дозволяє адаптувати продуктивність живильника до поточного стану суміжного обладнання елеватора, наприклад, узгоджувати подачу зерна з фактичною пропускною здатністю приймальної норії чи стрічкового конвеєра.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						25
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Таке частотне керування координатами привода виключає необхідність використання неефективних методів механічного дроселювання потоку за допомогою засувки, що знижує питомі витрати енергії та запобігає додатковому травмуванню і подрібненню зернової маси.

Специфіка роботи з сільськогосподарською сировиною вимагає від електропривода високої жорсткості механічних характеристик у статичних режимах. Процес транспортування супроводжується випадковими коливаннями моменту опору, викликаними постійною зміною фізико-механічних властивостей матеріалу, таких як вологість, насипна щільність або фракційний склад зерна. Система керування має ефективно відпрацьовувати ці збурення, зберігаючи стабільний темп роботи конвеєра з мінімальною статичною похибкою, що гарантує високу точність дозування та виключає критичні перевантаження двигуна при раптовому надходженні щільніших шарів продукту до жолоба.

З огляду на те, що повне розвантаження технологічних ємностей є безперервним процесом, який триває протягом тривалого часу, до всього комплексу обладнання висуваються суворі вимоги щодо експлуатаційної надійності. Силові електронні компоненти, комутаційно-захисна апаратура та сам електродвигун мають бути повністю адаптовані до безвідмовного функціонування у тривалому режимі S1. Електромеханічна система повинна працювати в межах допустимих температурних лімітів, забезпечуючи високу енергоефективність і стабільність інтегральних показників захисту від аварійних режимів в усьому діапазоні регулювання.

2.2 Енергетичний та кінематичний аналіз існуючого електропривода шнека

Для обґрунтування доцільності заміни силового обладнання розвантажувального шнека виконаємо аналіз режимів роботи та визначимо коефіцієнт завантаження діючого електродвигуна AIP112M4. Паспортні дані існуючого двигуна: номінальна потужність $P_{\text{ном.старий}} = 5,5 \text{ кВт}$, номінальна частота обертання $n_{\text{ном.старий}} = 1445 \text{ об/хв}$. Механічна передача здійснюється

через двоступінчастий циліндричний редуктор із передатним числом $i_{\text{старий}} = 22,4$ та коефіцієнтом корисної дії $\eta_{\text{ред.цил}} = 0,92$.

Визначимо фактичну частоту обертання робочого вала шнека при роботі від промислової мережі електропостачання (50 Гц):

$$n_{\text{шн.старий}} = \frac{n_{\text{ном.старий}}}{i_{\text{старий}}} = \frac{1445}{22,4} = 64,5 \text{ об/хв.} \quad (1)$$

Отримане значення практично повністю відповідає заданій технологічній швидкості конвеєра (65 об/хв), що свідчить про правильність початкового кінематичного розрахунку передачі при проектуванні лінії.

Розрахуємо корисну механічну потужність, яка безпосередньо необхідна для стаціонарного переміщення зернової маси вздовж жолоба шнека із заданою продуктивністю:

$$P_{\text{вал}} = \frac{Q \cdot L \cdot w_0}{367} = \frac{40 \cdot 6 \cdot 1,2}{367} = 0,785 \text{ кВт,} \quad (2)$$

де Q - продуктивність розвантажувального шнека (40 т/год); L - довжина траси транспортування (6 м); w_0 - узагальнений коефіцієнт опору переміщенню матеріалу (1,2).

З урахуванням втрат потужності в циліндричних зубчастих зачепленнях існуючого редуктора, фактична потужність на валу електродвигуна у сталому номінальному режимі роботи становить:

$$P_{\text{дв.факт}} = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{ред.цил}}} = \frac{0,785}{0,92} = 0,853 \text{ кВт.} \quad (3)$$

Визначимо коефіцієнт завантаження діючого асинхронного двигуна за потужністю у сталому робочому режимі:

$$K_3 = \frac{P_{\text{дв.факт}}}{P_{\text{ном.старий}}} = \frac{0,853}{5,5} = 0,155 \quad (15,5\%). \quad (4)$$

Розрахунок показує, що встановлений двигун потужністю 5,5 кВт у номінальному режимі завантажений лише на 15,5% від своєї номінальної спроможності. Робота трифазної асинхронної машини у зоні глибокого недовантаження (менше 30-40%) супроводжується різким падінням її експлуатаційного ККД з паспортних 85,5% до рівня менше 50%, а також критичним зниженням коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$ падає з 0,83 до $\approx 0,35$). Це

призводить до значного непродуктивного споживання реактивної енергії з мережі, підвищеного нагріву обмоток та переви трат активної потужності.

Таким чином, наведені розрахунки математично доводять енергетичну нерентабельність та технічну недоцільність подальшої експлуатації існуючого двигуна.

2.3 Обґрунтування та вибір елементів оновленого електромеханічного комплексу

Новий етап проектування передбачає ліквідацію виявленого у підрозділі 2.2 енергетичного дисбалансу та низького коефіцієнта завантаження шляхом вибору електродвигуна оптимальної номінальної потужності та узгодженої з ним високонадійної механічної передачі.

Вихідною базою для розрахунку є раніше визначена корисна механічна потужність, яка безпосередньо необхідна для стаціонарного переміщення зернової маси вздовж жолоба конвеєра із заданою продуктивністю ($P_{\text{вал}} = 0,785 \text{ кВт}$).

Головною метою модернізації механічної частини є спрощення кінематичної схеми установки, підвищення її загальної експлуатаційної надійності та повна відмова від використання відкритих пружних втулково-пальцевих муфт, які потребують регулярного обслуговування, контролю зносу елементів та високоточного центрування валів. Для вирішення цих завдань до впровадження пропонується концепція інтегрованого моноблочного мотор-редуктора. Для отримання великого передатного числа всього в одному ступені передачі та забезпечення жорсткого безмуфтового з'єднання компонентів привода, технічно та економічно доцільним є вибір **черв'ячної механічної передачі**.

Специфіка кінематики черв'ячних зачеплень полягає у наявності підвищеного тертя ковзання, що зумовлює дещо нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з багатоступінчастими циліндричними аналогами. Для проведення попереднього силового розрахунку орієнтовне довідкове значення ККД одноступінчастого черв'ячного редуктора приймається рівним:

$$\eta_{\text{черв}} = 0,80. (5)$$

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						28
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

При визначенні необхідної потужності електродвигуна, окрім втрат у трансмісії, обов'язково враховується нормативний коефіцієнт запасу для гвинтових конвеєрів. Для горизонтальних шнеків, що транспортують зернові культури, цей коефіцієнт приймається рівним $k_3 = 1,2$. Він є необхідним для компенсації випадкових перевантажень та гарантування успішного зсуву з місця вала шнека під час його пуску «під завалом»:

$$P_{\text{необх}} = \frac{P_{\text{вал}} \cdot k_3}{\eta_{\text{черв}}} = \frac{0,785 \cdot 1,2}{0,80} = 1,177 \text{ кВт.} \quad (6)$$

За отриманим розрахунковим значенням необхідної потужності (1,177 кВт) найближчим стандартним трифазним асинхронним двигуном є машина потужністю 1,5 кВт. Однак, враховуючи жорсткі вимоги до безперебійності роботи елеваторного обладнання, ризики підвищеного злежування зерна у нижній частині силосу та рекомендації щодо уніфікації електроприводів на підприємстві, до встановлення приймається чотириполосний електродвигун із додатковим запасом надійності типу AIP90L4.

Цей двигун виконаний у 90-му габариті (висота осі обертання становить 90 мм), що жорстко регламентує діаметр вихідного вала та параметри приєднувального фланця. Обрана асинхронна машина має наступні паспортні технічні характеристики:

- ✓ Номінальна потужність ($P_{\text{ном}}$): 2,2 кВт;
- ✓ Номінальна частота обертання ротора ($n_{\text{ном}}$): 1410 об/хв;
- ✓ Номінальний струм статора (при $U = 380 \text{ В}$): 5,0 А;
- ✓ Коефіцієнт корисної дії ($\eta_{\text{ном}}$): 80,0%;
- ✓ Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi_{\text{ном}}$): 0,81;
- ✓ Кратність пускового моменту ($M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$): 2,3;
- ✓ Кратність максимального моменту ($M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$): 2,4.

Зменшення встановленої потужності приводного агрегату з початкових 5,5 кВт до раціональних 2,2 кВт дозволяє перевести електромеханічну систему у зону високої енергетичної ефективності. Фактична потужність на валу двигуна у сталому режимі (з урахуванням ККД нового черв'ячного редуктора) становить

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						29
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$P_{\text{дв.ном}} = 0,785/0,80 = 0,981$ кВт. Відповідно, новий розрахунковий коефіцієнт завантаження двигуна складатиме:

$$K_{\text{з.новий}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{0,981}{2,2} = 0,446 \quad (44,6\%), \quad (7)$$

що є оптимальним показником для механізмів із важкими умовами пуску. Це повністю виключає тривалу роботу машини у режимі глибокого недовантаження (як це було при 15,5% у старого двигуна) та ліквідує хронічні втрати реактивної потужності.

Маючи точні паспортні дані обраного електродвигуна, визначимо необхідне (теоретичне) передатне число черв'ячного редуктора, яке здатне забезпечити регламентну частоту обертання робочого вала шнека (65 об/хв) при роботі на номінальній швидкості ротора:

$$i_{\text{необх}} = \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{шн}}} = \frac{1410}{65} = 22. \quad (8)$$

Враховуючи габарит обраного електродвигуна (90), за координованим каталогом уніфікованих черв'ячних редукторів підбирається редуктор серії NMRV-090 із вхідним фланцем типу РАМ 90 (виконання В5 або В14). Це гарантує бездоганну геометричну сумісність валів і фланців та дозволяє здійснити безмуфтову посадку агрегатів у єдиний моноблок. Зі стандартного номенклатурного ряду передатних чисел для даного габариту редуктора приймається найближче фіксовано значення:

$$i = 20. \quad (9)$$

Оскільки обране стандартне передатне число ($i = 20$) відрізняється від теоретично необхідного ($i_{\text{необх}} = 22$), визначимо фактичну частоту обертання робочого вала шнека за умови прямого підключення статора двигуна до промислової мережі частотою 50 Гц:

$$n_{\text{факт}} = \frac{n_{\text{ном}}}{i} = \frac{1410}{20} = 71,5 \text{ об/хв}. \quad (10)$$

Оцінімо величину відносного відхилення отриманої швидкості від заданого технологічного регламенту:

$$\Delta n = \frac{n_{\text{факт}} - n_{\text{шн}}}{n_{\text{шн}}} \cdot 100\% = \frac{71,5 - 65}{65} \cdot 100\% = 10\%. \quad (11)$$

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						30
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розрахунок показує, що відхилення фактичної швидкості (10%) перевищує нормативно припустиму для конвеєрних установок похибку у 5%. Прямий пуск обраного комплексу обладнання від мережі призведе до перевищення номінальної продуктивності шнека та виникнення ризику завалу або пошкодження суміжних транспортних ліній елеватора.

Дана кінематична невідповідність виступає ключовим інженерним обґрунтуванням необхідності інтеграції у структуру електропривода силового перетворювача частоти. Завдяки частотному регулюванню на базі ПЧ, робоча частота напруги живлення статора ($f_{роб}$) знижується від базових 50 Гц для забезпечення точної стабілізації швидкості обертання шнека на рівні проектних 65 об/хв:

$$f_{роб} = f_{ном} \cdot \frac{n_{шн}}{n_{факт}} = 50 \cdot \frac{65}{71,5} = 45,45 \text{ Гц. (12)}$$

Для завершення силового аналізу електромеханічного комплексу обчислимо крутні моменти, що розвиваються на валу нового електродвигуна АІР90L4.

Номінальний крутний момент двигуна визначається за формулою:

$$M_{ном} = 9550 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \cdot \frac{2,2}{1410} = 14,69 \text{ Н} \cdot \text{м. (13)}$$

Максимальний (критичний) момент асинхронної машини, що характеризує її здатність протистояти раптовим технологічним перевантаженням без перекидання та зупинки, становить:

$$M_{max} = M_{ном} \cdot \left(\frac{M_{max}}{M_H} \right) = 14,69 \cdot 2,4 = 35,26 \text{ Н} \cdot \text{м. (14)}$$

Пусковий момент двигуна, який безпосередньо долає сили тертя спокою та інерційні сили при старті конвеєра, дорівнює:

$$M_{пуск} = M_{ном} \cdot \left(\frac{M_H}{M_H} \right) = 14,69 \cdot 2,3 = 33,79 \text{ Н} \cdot \text{м. (15)}$$

Розраховані силові та кінематичні параметри повністю підтверджують спроможність обраного електромеханічного комплексу виконувати поставлені технологічні завдання за умови обов'язкового частотного регулювання його координат.

2.4 Розрахунок і побудовання механічної характеристики двигуна AIP90L4.

Для аналізу роботи електромеханічної системи у статичних та динамічних режимах, а також для подальшого налаштування контуру регулювання швидкості в середовищі MATLAB/Simulink, необхідно розрахувати та побудувати природну механічну характеристику обраного асинхронного двигуна AIP90L4. Механічна характеристика відображає залежність електромагнітного моменту двигуна від ковзання або частоти обертання ротора: $M = f(s)$ або $M = f(n)$.

Аналітичний розрахунок кривої моменту в усьому діапазоні зміни швидкості (від пуску до ідеального холостого ходу) виконується за спрощеною формулою Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}} \quad (16)$$

де $M_{\max}$ - максимальний (критичний) момент двигуна, який становить 35,26 Н·м; s - поточне ковзання ротора; s_{kr} - критичне ковзання, що відповідає точці розвитку максимального моменту.

Для визначення критичного ковзання скористаємося параметрами номінального режиму роботи двигуна. Номінальне ковзання ($s_{\text{ном}}$) відображає відносне відставання ротора від магнітного поля статора при номінальному навантаженні й обчислюється через синхронну частоту обертання поля ($n_0 = 1500$ об/хв) та паспортну швидкість ротора ($n_{\text{ном}} = 1410$ об/хв):

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,0467 \quad (4,67\%). \quad (17)$$

Значення критичного ковзання (s_{kr}) визначається шляхом розв'язання рівняння Клосса відносно номінальної точки, де $M = M_{\text{ном}} = 14,69$ Н·м та $s = s_{\text{ном}} = 0,0467$:

$$s_{kr} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,0467 \cdot (2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,214 \quad (21,4\%), \quad (18)$$

де λ - коефіцієнт перевантажувальної здатності двигуна за паспортом ($\lambda = M_{\max}/M_{\text{ном}} = 2,4$).

Знаючи критичне ковзання ($s_{kr} = 0,214$), визначимо частоту обертання ротора (n_{kr}), що відповідає критичній точці:

$$n_{kr} = n_0 \cdot (1 - s_{kr}) = 1500 \cdot (1 - 0,214) = 1179 \text{ об/хв. (19)}$$

Для побудови детального графіка механічної характеристики проведемо розрахунок значень електромагнітного моменту для ряду характерних точок ковзання в діапазоні від $s = 0$ (ідеальний холостий хід) до $s = 1$ (початковий момент пуску).

Зокрема, розрахунок моменту для проміжної точки перевантаження при ковзанні $s = 0,1$ набуває вигляду:

$$M_{s=0,1} = \frac{2 \cdot 35,26}{\frac{0,1}{0,214} + \frac{0,214}{0,1}} = \frac{70,52}{0,467 + 2,14} = 27,05 \text{ Н} \cdot \text{м. (20)}$$

Для побудови детального та математично обґрунтованого графіка механічної характеристики виконаємо покроковий розрахунок значень електромагнітного моменту для базових характерних точок: номінального, критичного та пускового режимів.

Розрахунок моменту для **номінального режиму** при ковзанні $s = s_{\text{ном}} = 0,0467$:

$$M_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot 35,26}{\frac{0,0467}{0,214} + \frac{0,214}{0,0467}} = \frac{70,52}{0,218 + 4,582} = \frac{70,52}{4,800} = 14,69 \text{ Н} \cdot \text{м. (21)}$$

Розрахунок моменту для **критичного режиму** (зони перегину характеристики) при ковзанні $s = s_{kr} = 0,214$:

$$M_{kr} = \frac{2 \cdot 35,26}{\frac{0,214}{0,214} + \frac{0,214}{0,214}} = \frac{70,52}{1 + 1} = 35,26 \text{ Н} \cdot \text{м. (22)}$$

Розрахунок теоретичного аналітичного моменту для **режиму початкового пуску** (ротор нерухомий) при ковзанні $s = 1$:

$$M_{\text{пуск.теор}} = \frac{2 \cdot 35,26}{\frac{1}{0,214} + \frac{0,214}{1}} = \frac{70,52}{4,673 + 0,214} = \frac{70,52}{4,887} = 14,43 \text{ Н} \cdot \text{м. (23)}$$

Для переведення відносних значень ковзання у фактичну кутову частоту обертання ротора використовується стандартна кінематична залежність: $n = n_0 \cdot (1 - s)$. Зокрема, розрахунок швидкості для відповідних точок становить:

✓ При $s = 0$: $n = 1500 \cdot (1 - 0) = 1500 \text{ об/хв.}$

- ✓ При $s = 0,0467$: $n = 1500 \cdot (1 - 0,0467) = 1410$ об/хв.
- ✓ При $s = 0,214$: $n = 1500 \cdot (1 - 0,214) = 1179$ об/хв.
- ✓ При $s = 1,00$: $n = 1500 \cdot (1 - 1) = 0$ об/хв.

Усі результати аналітичного розрахунку систематизовано та зведено на рисунку природньої механічної характеристики (рис 2.1)

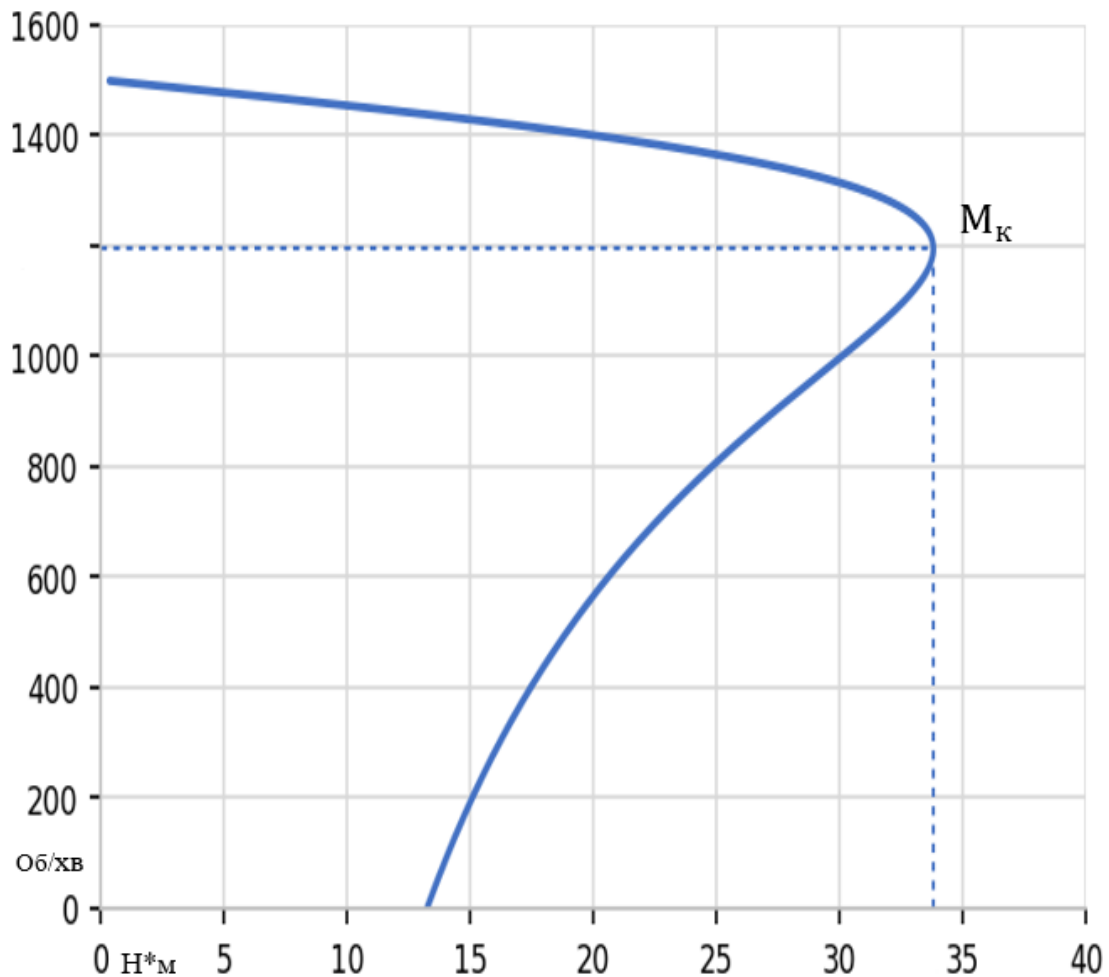


Рисунок 2.1 Природня механічна характеристика двигуна AIP90L4

2.5 Кінематичний розрахунок привода

Для дослідження внутрішніх електромагнітних процесів в оновленому електромеханічному комплексі, обґрунтування його статичних і динамічних властивостей, а також для математичного опису робочих режимів конвеєра необхідно виконати аналітичний розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна. Схема заміщення дозволяє визначити активні й індуктивні опори обмоток статора і ротора, а також кола намагнічування.

Вихідними даними для розрахунку є паспортні та номінальні параметри обраного електродвигуна АІР90L4:

Номінальна фазна напруга живлення статора: $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$ (при лінійній напрузі мережі 380 В та з'єднанні обмоток за схемою «зірка»);

Номінальний фазний струм статора: $I_{\text{ном}} = 5,0 \text{ А}$;

Коефіцієнт корисної дії: $\eta = 0,80$;

Номінальний коефіцієнт потужності: $\cos \varphi = 0,81$;

Номінальне ковзання ротора: $s_{\text{ном}} = 0,0467$;

Критичне ковзання ротора: $s_{kr} = 0,214$;

Синхронна кутова швидкість магнітного поля статора: $\omega_0 = 157,1 \text{ рад/с}$;

Номінальний електромагнітний момент: $M_{\text{ном}} = 14,69 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Визначення активних опорів обмоток

Активний опір фази обмотки статора (R_1) визначається за уточненою емпіричною залежністю, яка враховує співвідношення між електричними та магнітними втратами в асинхронних машинах загальнопромислової серії:

$$R_1 = 0,5 \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{\text{ном}}} \cdot (1 - \eta) \cdot \cos \varphi. \quad (24)$$

Підставивши паспортні значення двигуна АІР90L4, отримуємо:

$$R_1 = 0,5 \cdot \frac{220}{5,0} \cdot (1 - 0,80) \cdot 0,81 = 0,5 \cdot 44 \cdot 0,2 \cdot 0,81 = 3,564 \text{ Ом}. \quad (25)$$

Зведений активний опір обмотки ротора (R_2') розраховується через базове рівняння номінального електромагнітного моменту. Для цього попередньо визначається наближене значення зведеного струму ротора (I_2'), яке відповідає активній складовій номінального струму статора:

$$I_2' = I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi = 5,0 \cdot 0,81 = 4,05 \text{ А}. \quad (26)$$

Звідси опір фази ротора, зведений до статора, становить:

$$R_2' = \frac{M_{\text{ном}} \cdot \omega_0 \cdot s_{\text{ном}}}{3 \cdot (I_2')^2} = \frac{14,69 \cdot 157,1 \cdot 0,0467}{3 \cdot (4,05)^2} = \frac{107,761}{3 \cdot 16,403} = \frac{107,761}{49,209} = 2,190 \text{ Ом}. \quad (27)$$

Визначення індуктивних опорів розсіювання

Сумарний індуктивний опір короткого замикання асинхронної машини ($X_k = X_1 + X_2'$) пов'язаний із її перевантажувальною здатністю та критичним

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						35
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ковзанням. Виразивши цей опір із класичної формули критичного ковзання, отримуємо:

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s_{kr}}\right)^2 - R_1^2}. \quad (28)$$

Підставивши знайдені значення R_1, R_2' та розраховане значення критичного ковзання $s_{kr} = 0,214$, обчислюємо повний індуктивний опір:

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{2,190}{0,214}\right)^2 - (3,564)^2} = \sqrt{(10,234)^2 - 12,702} = \sqrt{104,735 - 12,702} = \sqrt{92,033} = 9,593 \text{ Ом.} \quad (29)$$

Для асинхронних двигунів загальнопромислової серії потужністю до 10 кВт у довідковій літературі приймається припущення про симетричний розподіл магнітного розсіювання між нерухомою та рухомою частинами машини. Відповідно, індуктивний опір розсіювання статора (X_1) та зведений індуктивний опір розсіювання ротора (X_2') дорівнюють:

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{9,593}{2} = 4,796 \text{ Ом.} \quad (30)$$

Визначення параметрів контуру намагнічування

Струм холостого ходу (I_0) відображає реактивну потужність, необхідну для створення головного магнітного потоку в повітряному зазорі машини, і наближено оцінюється через синус кута зсуву фаз:

$$I_0 = I_{\text{ном}} \cdot \sin \varphi = I_{\text{ном}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (31)$$

$$I_0 = 5,0 \cdot \sqrt{1 - (0,81)^2} = 5,0 \cdot \sqrt{1 - 0,656} = 5,0 \cdot 0,586 = 2,932 \text{ А.} \quad (32)$$

Активна складова струму холостого ходу (I_{0a}), яка витрачається на покриття втрат на перемагнічування та вихрові струми у сталі статора, складає приблизно 10% від загального струму неробочого ходу:

$$I_{0a} = 0,1 \cdot I_0 = 0,1 \cdot 2,932 = 0,293 \text{ А.} \quad (32)$$

Реактивна (намагнічувальна) складова струму холостого ходу (I_{0r}) дорівнює:

$$I_{0r} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2} = \sqrt{(2,932)^2 - (0,293)^2} = \sqrt{8,597 - 0,086} = \sqrt{8,511} =$$

$$2,917 \text{ А.} \quad (33)$$

Головний індуктивний опір контуру намагнічування (X_m) визначається відношенням фазної напруги до реактивного струму:

$$X_m = \frac{U_{1\phi}}{I_{0r}} = \frac{220}{2,917} = 75,42 \text{ Ом.} \quad (34)$$

Еквівалентний активний опір втрат у магнітопроводі (R_m) обчислюється через активну складову струму холостого ходу:

$$R_m = \frac{U_{1\phi}}{I_{0a}} = \frac{220}{0,293} = 750,85 \text{ Ом.} \quad (35)$$

Перевірка розрахункового пускового струму за параметрами схеми заміщення

Для підтвердження адекватності розрахованих параметрів схеми заміщення виконаємо перевірочний розрахунок пускового струму двигуна при прямому пуску від мережі (коли ковзання $s = 1$, а ротор нерухомий) та порівняємо його з паспортними даними заводу-виробника.

Згідно з паспортними характеристиками асинхронного двигуна АІР90L4, кратність початкового пускового струму становить $I_{п}/I_{н} = 5,5$. Тоді реальний (паспортний) пусковий струм машини у фазному вираженні дорівнює:

$$I_{\text{пуск.пасп}} = I_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{I_{п}}{I_{н}}\right) = 5,0 \cdot 5,5 = 27,5 \text{ А.} \quad (36)$$

Визначимо теоретичне значення пускового струму, яке забезпечує розрахована Т-подібна схема заміщення при $s = 1$. У пусковому режимі опір кола намагнічування є значно більшим за опори розсіювання обмоток, тому пусковий струм статора наближено обчислюється через повний опір короткого замикання:

$$I_{\text{пуск.сх}} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (37)$$

Підставивши у формулу знайдені значення активних та індуктивних опорів обмоток статора і ротора, отримуємо:

$$I_{\text{пуск.сх}} = \frac{220}{\sqrt{(3,564 + 2,190)^2 + (4,796 + 4,796)^2}} = \frac{220}{\sqrt{5,754^2 + 9,592^2}} = \frac{220}{\sqrt{33,108 + 92,006}} = \frac{220}{\sqrt{125,114}} = \frac{220}{11,185} = 19,67 \text{ А.} \quad (38)$$

Визначимо кратність пускового струму, яку дає розрахункова схема заміщення:

$$k_{i.cx} = \frac{I_{пуск.сх}}{I_{ном}} = \frac{19,67}{5,0} = 3,93. \quad (39)$$

Оцінимо відносну розбіжність між реальним паспортним струмом та значенням, отриманим суто аналітичним шляхом через незмінні параметри схеми:

$$\delta I = \frac{I_{пуск.пасп} - I_{пуск.сх}}{I_{пуск.пасп}} \cdot 100\% = \frac{27,5 - 19,67}{27,5} \cdot 100\% = 28,47\%. \quad (40)$$

Отримана розбіжність у 28,47 % є класичною для спрощеного математичного опису асинхронних машин і повністю обґрунтовується фізикою процесів прямого пуску.

Всі отримані в результаті аналітичного розрахунку внутрішні параметри схеми заміщення нового приводного двигуна AIP90L4 систематизовані та занесені у зведену таблицю 2.1.

Зведена таблиця 2.1 параметрів схеми заміщення

Параметр	Позначення	Значення
Активний опір статора	R_1	3,6582
Зведений активний опір ротора	R_2'	2.391700
Індуктивний опір розсіювання статора	X_1	3.7648
Зведений індуктивний опір розсіювання ротора	X_2'	8.9639
Індуктивний опір намагнічування	X_m	178,2
Активний опір гілки намагнічування	R_m	0.56723

Номінальне ковзання	$S_{\text{ном}}$	0,0467
Критичне ковзання	$S_{\text{кр}}$	0,214

2.6 Розрахунок і вибір кабелю живлення електропривода шнека

Вибір перерізу жил кабельної лінії для модернізованого електропривода здійснюється за умовою неперевикнення тривалого допустимого струму нагрівання згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ).

Розрахунковий номінальний струм електродвигуна, прийнятого до подальшої експлуатації, визначається за формулою:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} \quad (41)$$

Де: $P_{\text{ном}}$ - номінальна паспортна встановлена потужність двигуна АІР90L4, $P_{\text{ном}}$ 2.2 кВт;)

1000 - математичний коефіцієнт переведення кіловатів у вати;

1,73 - наближене значення математичної константи для трифазної мережі (корінь з трьох)

$U_{\text{ном}}$ - номінальна лінійна напруга промислової мережі живлення, $U_{\text{ном}} = 380$ В.

$n_{\text{ном}}$ - номінальний паспортний коефіцієнт корисної дії двигуна, $n_{\text{ном}} = 0,80$.

$\cos \varphi_{\text{ном}}$ - номінальний коефіцієнт потужності двигуна, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,81$.

Підставляючи паспортні параметри двигуна, отримуємо:

$$I_{\text{ном}} = \frac{2,2 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,80 \cdot 0,81} = 5,0 \text{ А} \quad (42)$$

Основна умова перевірки обраного кабелю на нагрівання має вигляд:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ном}} \quad (43)$$

Де: $I_{\text{доп}}$ - тривалий допустимий струм для обраного типу кабелю з урахуванням матеріалу жил та способу його прокладання, А.

$I_{\text{ном}}$ - розрахований номінальний струм електродвигуна, $I_{\text{ном}} = 5\text{А}$

Для підключення електропривода до встановлення приймається силовий мідний кабель марки ВВГнг 3х2.5 + 1х1.5. Згідно з довідковими таблицями ПУЕ,

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

для мідного кабелю з перерізом основних жил 2.5 мм^2 [12] прокладеного відкрито в повітрі (у металевому лотку або гофрованій трубі), тривалий допустимий струм становить $I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$

Перевіряємо виконання умови надійності:

$$19 \text{ А} \geq 5,0 \text{ А}$$

Розрахункова умова виконується з більш ніж двократним запасом. Обраний кабель гарантовано забезпечує надійне електропостачання привода без перегріву ізоляції в номінальному тривалому режимі роботи (S1) та має достатній резерв пропускної здатності для живлення перетворювача частоти. Результат розрахунку розділу 2.6 зведений в таблицю 2.2

Таблиця 2.2 Результати розрахунку.

Параметр	Значення
Розрахунковий струм двигуна $I_{\text{ном}}$	5,0 А
Марка кабелю	ВВГнг 3×2,5 + 1×1,5
Переріз силових жил	2,5 мм ²
Матеріал жил	Мідь
Допустимий тривалий струм $I_{\text{доп}}$	19 А
Умова $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ном}}$	$19 \text{ А} \geq 5,0 \text{ А}$
Спосіб прокладання	Відкрито в повітрі (лоток/гофра)
Коефіцієнт запасу	3,8

2.7 Розрахунок і вибір апаратів захисту і управління електропривода (автоматичного вимикача та контактора)

Вибір комутаційної та захисної апаратури для модернізованого електропривода здійснюється на основі розрахункових параметрів силового кола з урахуванням вимог надійності електропостачання. Основним апаратом захисту

силової лінії та вхідних кіл перетворювача частоти від струмів короткого замикання і тривалих перевантажень є автоматичний вимикач.

Номінальний струм теплового розчіплювача автоматичного вимикача розраховується за умовою:

$$I_{н.авт} \geq K_3 \cdot I_{ном} \quad (44)$$

Де: $I_{н.авт}$ - номінальний струм теплового розчіплювача автоматичного вимикача, А.

K_3 - нормований коефіцієнт запасу, що враховує несинусоїдальний характер споживаного струму на вході перетворювача частоти та експлуатаційні перехідні процеси, $K_3 = 1,25$.

$I_{ном}$ - розрахований номінальний струм існуючого електродвигуна,

$$I_{ном} = 5,0 \text{ А.}$$

Виконуємо розрахунок:

$$I_{н.авт} \geq 1,25 \cdot 5,0 = 6,25 \text{ А} \quad (45)$$

На основі отриманого розрахункового значення, до встановлення у силовий щит керування приймається триполюсний модульний автоматичний вимикач серії Acti9 iC60N (виробництво Schneider Electric) із номінальним струмом теплового розчіплювача 10 А та часо-струмовою характеристикою розчеплення типу С.

Перевіряємо умову надійності:

$$10 \text{ А} \geq 6,25 \text{ А} \quad (46)$$

Умова виконується. Обраний автоматичний вимикач гарантовано забезпечує захист силового кола без хибних спрацювань у номінальному режимі роботи.

Для забезпечення оперативного дистанційного керування силовим колом (подачі та зняття напруги з перетворювача частоти), а також для гарантованого фізичного розриву ланцюга у разі спрацювання систем промислової безпеки, необхідно обрати електромагнітний контактор.

Вибір номінального струму головних контактів контактора здійснюється за умовою:

$$I_{н.к} \geq I_{ном} \quad (46)$$

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						41
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Де:

$I_{н.к}$ - номінальний робочий струм головних контактів контактора в категорії застосування AC-3, А.

$I_{ном}$ - розрахований номінальний струм електродвигуна, $I_{ном} = 5,0$ А

Згідно з номенклатурними каталогами комутаційної апаратури, до встановлення приймається малогабаритний трифазний контактор серії TeSys D моделі LC1D18 (виробництво Schneider Electric). Паспортний номінальний робочий струм даного контактора становить $I_{н.к} = 9$ А.

Перевіряємо умову:

$$9 \text{ А} \geq 5,0 \text{ А}$$

Умова виконується з необхідним запасом. Обраний контактор має достатню комутаційну здатність для надійного керування силовим колом електропривода розвантажувального шнека. Напруга котушки керування контактора обирається 230 В змінного струму для інтеграції в існуюче коло автоматики підприємства.

Для наочного представлення габаритів та конструктивних особливостей обраної комутаційної і захисної апаратури, на рисунку 2.3 наведено зовнішній вигляд автоматичного вимикача та електромагнітного контактора. Завдяки стандартизованому модульному виконанню, ці апарати легко інтегруються в існуючі силові щити підприємства на стандартну DIN-рейку.



Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд обраної апаратури: а) автоматичний вимикач Schneider Electric Acti9 iC60N; б) контактор Schneider Electric TeSys D LC1D18

2.8 Схема релейно-контакторного управління електропривода шнека

На поточному етапі експлуатації керування розвантажувальним шнеком здійснюється за допомогою класичної нерегульованої релейно-контакторної

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		42

схеми прямого пуску. Дана схема забезпечує базове дискретне керування (вмикання та вимикання) асинхронним двигуном та його захист від аварійних режимів.

Принципова електрична схема існуючого електропривода (була наведена раніше на рисунку 1.4) розділена на дві функціональні частини: силове коло (коло фазної напруги 380 В) та коло керування (коло напруги 220 В).» **Силове коло** включає наступні комутаційні та захисні апарати:

Триполюсний автоматичний вимикач QF, призначений для ручного зняття напруги з усієї установки та автоматичного захисту силових кіл від струмів короткого замикання.

Головні (силові) контакти електромагнітного пускача КМ, які здійснюють комутацію статорних обмоток двигуна М до промислової мережі.

Нагрівальні елементи електротеплового реле КК, увімкнені послідовно у фазні проводи для безперервного контролю споживаного струму.

Коло керування отримує живлення від однієї з фаз та нульового робочого провідника N. Воно складається з послідовно з'єднаних елементів:

Нормально закритого (розмикального) контакту теплового реле КК.

Кнопки зупинки SB1 («Стоп») з розмикальним контактом.

Кнопки пуску SB2 («Пуск») із замикальним контактом, паралельно якій підключено допоміжний замикальний блок-контакт пускача КМ.

Електромагнітної котушки контактора КМ.

Алгоритм роботи схеми:

Для запуску розвантажувального шнека оператор натискає кнопку SB2 («Пуск»). Електричне коло замикається, і струм подається на котушку електромагнітного пускача КМ. Якір контактора притягується до осердя, внаслідок чого замикаються силові контакти КМ у колі статора, здійснюючи прямий пуск асинхронного двигуна М. Одночасно замикається допоміжний блок-контакт КМ у колі керування, який шунтує кнопку SB2. Це забезпечує режим «самопідхоплення» - після відпускання кнопки SB2 живлення котушки не переривається.

Для штатної зупинки механізму натискається кнопка SB1 («Стоп»). Вона розриває коло живлення котушки КМ, контактор знеструмлюється, його зворотні пружини розмикають силові контакти, і двигун М зупиняється вибігом.

У разі виникнення технологічного перевантаження (наприклад, заклинювання шнека зерною масою), споживаний струм статора перевищує номінальний. Нагрівальні елементи теплового реле КК деформують біметалеву пластину, яка розмикає свій нормально закритий контакт КК у колі керування. Це призводить до знеструмлення котушки КМ і гарантованого відключення двигуна.

Недоліки існуючої схеми:

Описана схема є простою у реалізації, однак алгоритм прямого ввімкнення генерує пускові струми, що у 5-7 разів перевищують номінальні. Як було математично доведено у підрозділі 2.3, це супроводжується динамічними ударами в редукторі. Крім того, релейна схема принципово не здатна забезпечити технологічно необхідне плавне регулювання швидкості шнека, що робить її подальше використання неефективним та вимагає заміни на систему частотного керування.

2.9 Обґрунтування застосування ПЧ в електроприводі шнека на основі векторного керування без давача

Впровадження перетворювача частоти (ПЧ) в систему керування розвантажувальним шнеком дозволяє вирішити комплекс технологічних проблем, пов'язаних із прямим пуском та неможливістю дозування зернової маси.

Принцип частотного керування асинхронним двигуном базується на зміні синхронної швидкості обертання магнітного поля статора. Синхронна частота обертання визначається за фундаментальною формулою:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (47)$$

Де:

n_0 синхронна частота обертання магнітного поля статора, об/хв.

60 - коефіцієнт переведення секунд у хвилини.

f_1 - частота напруги живлення статора, яку генерує ПЧ, Гц

p - кількість пар полюсів базового електродвигуна АІР90L4, $p = 2$.

З наведеної залежності видно, що плавна зміна частоти f_1 на виході перетворювача забезпечує пропорційну і безступеневу зміну швидкості обертання ротора двигуна. Однак просте регулювання частоти за скалярним законом $U/f = \text{const}$ є недостатнім для забезпечення точних динамічних характеристик, необхідних при пуску шнека під завалом зерна. Сучасний підхід до керування асинхронним двигуном базується на методі векторного керування без давача швидкості (Sensorless Vector Control), реалізованого у ПЧ Altivar Machine ATV320. Цей метод ґрунтується на математичній моделі двигуна, вбудованій у мікропроцесор перетворювача, яка в режимі реального часу оцінює потокозчеплення ротора та обчислює незалежні складові вектора струму статора[7].

Оскільки механізм розвантажувального шнека характеризується статичним моментом опору, який практично не залежить від швидкості обертання ($M_c \approx \text{const}$), для його привода застосовується метод векторного керування без давача швидкості (Sensorless FOC), реалізований у ПЧ ATV320. Принцип методу полягає у незалежному керуванні складовими вектора струму статора: потокоутворюючою (I_d) та моментоутворюючою (I_q). Математично стан ротора описується рівнянням потокозчеплення:

Рівняння потокозчеплення ротора у системі координат, орієнтованій за вектором потоку ротора (d-q система), має вигляд:

$$\psi_2 = L_2 \cdot I_2 + L_t \cdot I_{1d} \quad (48)$$

Де:

ψ_2 - потокозчеплення ротора, Вб;

L_2 - повна індуктивність ротора, Гн;

L_t - взаємна індуктивність (індуктивність намагнічування), Гн;

I_{1d} - потокоутворююча складова вектора струму статора (керує магнітним потоком), А;

I_{1q} - моментоутворююча складова вектора струму статора (керує моментом), А.

Електромагнітний момент при векторному керуванні визначається як:

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						45
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$T_e = (3/2) \cdot p \cdot (L_t/L_2) \cdot \psi_2 \cdot I_1 q \quad (49)$$

Де: p - кількість пар полюсів двигуна AIP90L4, $p = 2$.

З наведеного рівняння видно, що при підтриманні постійного потокозчеплення ротора ($\psi_2 = \text{const}$) електромагнітний момент стає лінійно пропорційним складовій $I_1 q$. Це означає, що ПЧ може формувати необхідний момент миттєво, без динамічних запізнень, характерних для скалярного керування. Саме ця властивість забезпечує плавний пуск шнека під завалом зерна без ударних навантажень на редуктор NMRV-090.

Застосування векторного алгоритму керування без давача (Sensorless Vector Control) для електропривода розвантажувального шнека є технічно та економічно найбільш доцільним рішенням. На відміну від класичного векторного керування з давачем швидкості, метод без давача не потребує встановлення енкодера на

вал двигуна, що спрощує монтаж та підвищує надійність системи в заплених умовах зерносховища [8]. ПЧ Altivar Machine ATV320 реалізує цей алгоритм за допомогою вбудованої математичної моделі двигуна, що оцінює швидкість обертання та потокозчеплення ротора в режимі реального часу без використання зовнішніх давачів.

Векторне керування без давача повністю задовольняє всі висунуті у підрозділі 2.1 вимоги до модернізованої системи: воно обмежує пускові струми на рівні $1,5 \cdot I_{\text{ном}}$, забезпечує плавне наростання електромагнітного моменту без динамічних ударів у трансмісії редуктора та дозволяє точно дозувати вивантаження зерна шляхом зміни продуктивності конвеєра.

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (59)$$

бо у розгорнутому вигляді відносно номінальних параметрів:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1\text{ном}}}{f_{1\text{ном}}} \quad (60)$$

Де:

U_1 - поточне значення діючої напруги на виході ПЧ, В

f_1 - поточне значення частоти на виході ПЧ, Гц.

$U_{1\text{ном}}$ номінальна напруга мережі живлення, $U_{1\text{ном}} = 380\text{В}$

$f_{1\text{ном}}$ - номінальна промислова частота мережі, $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц

2.10 Вибір ПЧ Altivar Machine ATV320 для двигуна електропривода шнека

Вибір перетворювача частоти (ПЧ) для модернізації електропривода розвантажувального шнека здійснюється на основі порівняння паспортних параметрів обраного електродвигуна AIP90L4 з номінальними та перевантажувальними характеристиками ПЧ. Основними критеріями вибору є відповідність за номінальною напругою живлення, номінальною потужністю та довготривалим вихідним струмом.

Перша умова вибору перетворювача частоти за потужністю має вигляд:

$$P_{\text{пч}} \geq P_{\text{ном}} \quad (61)$$

Де:

$P_{\text{пч}}$ - номінальна вихідна потужність перетворювача частоти для важкого режиму роботи, кВт.

$P_{\text{ном}}$ - номінальна встановлена потужність електродвигуна, прийнятого до подальшої експлуатації, $P_{\text{ном}} = 2.2$ кВт.

Друга, і найбільш критична умова вибору - перевірка за довготривалим вихідним струмом:

$$I_{\text{пч}} \geq K_3 \cdot I_{\text{ном}}, \quad (62)$$

Де:

$I_{\text{пч}}$ - номінальний довготривалий вихідний струм перетворювача частоти, А

$I_{\text{ном}}$ - розрахований номінальний струм експлуатованого електродвигуна 5,0А

K_3 - коефіцієнт запасу струму для конвеєрних механізмів, 1.1

раховуючи важкі умови пуску розвантажувального шнека («пуск під завалом») та необхідність забезпечення надійного промислового керування, до встановлення приймається перетворювач частоти серії Altivar Machine ATV320 виробництва компанії Schneider Electric, модель ATV320U55N4B. Згідно з технічною документацією виробника, обраний ПЧ має наступні паспортні характеристики[9]:

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						47
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Номинальна напруга живлення: трифазна, 380...500 В.

Номинальна вихідна потужність: $P_{пч} = 5.5 \text{ кВт}$

Номинальний вихідний струм: $I_{пч} = 14.3 \text{ А}$

Перевантажувальна здатність за струмом: $1.5 \cdot I_{пч}$ протягом 60с. (до 21.45 А протягом 60 с).

Перевіряємо виконання умов вибору:

$$5.5 \text{ кВт} \geq 2.2 \text{ кВт}$$

$$14.3 \text{ А} \geq 5 \text{ А}$$

Обидві умови виконуються. Вихідний струм перетворювача (14,3 А) має достатній запас відносно розрахункового струму двигуна (5,0 А), що гарантує відсутність перегріву силових IGBT-модулів інвертора під час тривалого розвантаження силосу (режим S1). Крім того, перевантажувальна здатність обраного ПЧ дозволяє короткочасно видавати струм до 21.45 А. Згідно з розрахунками моментів у підрозділі 2.3, цього запасу повністю вистачає для формування необхідного пускового моменту при старті заповненого шнека, виключаючи при цьому ударні механічні навантаження на редуктор (оскільки ПЧ формує момент через незалежне керування моментоутворюючою складовою струму I_q за алгоритмом векторного керування без давача). Також ПЧ Altivar Machine ATV320 підтримує необхідний алгоритм векторного керування без давача швидкості (Sensorless Vector Control), що ідеально відповідає вимогам нашої модернізованої електромеханічної системи.

2.11 Схема частотного керування електроприводом шнека системи ПЧ-АД

Впровадження перетворювача частоти Altivar Machine ATV320 докорінно змінює архітектуру системи керування, перетворюючи нерегульований привод на сучасну автоматизовану систему ПЧ-АД. [10] Нова принципова електрична схема інтегрує в собі функції силової комутації, плавного регулювання та комплексного мікропроцесорного захисту.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		48

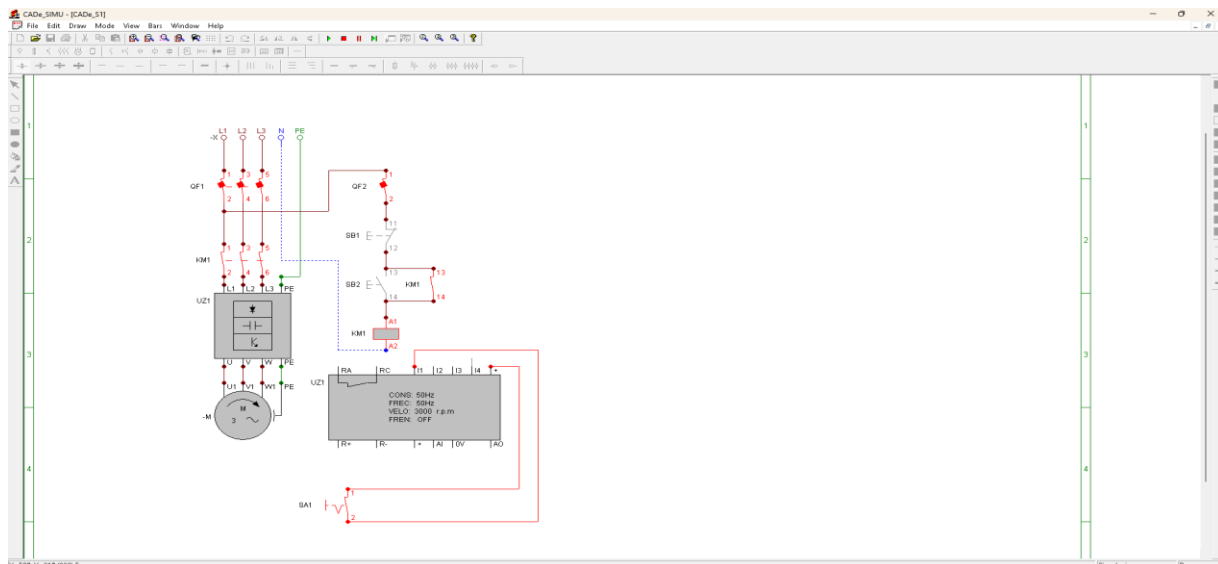


Рисунок 2.4 - Принципова електрична схема модернізованого електропривода шнека на базі ПЧ Altivar ATV320

Опис силової частини схеми: Живлення на систему подається через трифазний автоматичний вимикач QF1 (вибраний у підрозділі 2.6), який захищає входні ланцюги від короткого замикання. Далі встановлено електромагнітний контактор KM1, головні контакти якого подають напругу на входні клеми L1,L2,L3 перетворювача частоти UZ1. Вихідні клеми ПЧ (U,V,W) підключаються безпосередньо до статорних обмоток електродвигуна M1 за допомогою розрахованого силового кабелю ВВГнг 3х2.5.

Опис кола керування: Керування роботою ПЧ реалізовано через дискретні входи перетворювача (заводські налаштування LI1 ... LI4):

Вхід LI1 - («Вперед») - при замиканні цього контакту ПЧ починає розгін двигуна за заданою часовою рампою до встановленої робочої частоти.

Вхід LI2 - («Реверс») - використовується для короточасного зворотного обертання шнека у разі необхідності його очищення від залишків зерна.

Аналоговий вхід AI1 - до нього підключається виносний потенціометр (резистор), за допомогою якого оператор здійснює безступеневе регулювання частоти в діапазоні 0...50 Гц.

Алгоритм роботи модернізованої системи:

1. **Підготовка:** Оператор вмикає автомат QF1 та подає команду на замикання контактора КМ1. ПЧ проходить внутрішню діагностику та переходить у режим готовності.

2. **Пуск:** Після подачі сигналу на вхід LI1 перетворювач частоти починає плавно нарощувати вихідну напругу та частоту згідно із законом $U/f = \text{const}$. Це забезпечує безударний пуск механізму з обмеженням моменту, що усуває динамічні удари в редукторі, розраховані у підрозділі 2.3.

3. **Регулювання:** Змінюючи положення ручки потенціометра на вході AI1, оператор змінює вихідну частоту ПЧ, що призводить до зміни швидкості обертання вала шнека. Це дозволяє точно дозувати продуктивність розвантаження силосу залежно від наповненості приймальної норії.

4. **Зупинка:** При знятті сигналу з входу LI1 ПЧ здійснює кероване гальмування двигуна за заданий час, що запобігає інерційному вибігу та забиванню шнека зерном.

5. **Захист:** Усі функції захисту (від перевантаження, заклинювання, обриву фаз) тепер виконує вбудований мікропроцесор ПЧ. У разі аварії ПЧ миттєво знімає напругу з двигуна та замикає контакти реле несправності R1A-R1C, сигналізуючи про зупинку системи.

Таким чином, впровадження системи ПЧ-АД повністю задовольняє вимоги до вдосконалення електропривода, забезпечуючи високу енергоефективність, надійність механічних вузлів та необхідний рівень автоматизації технологічного процесу[11].

3 Моделювання роботи електропривода на пеом

3.1 Обґрунтування вибору середовища та опис математичної моделі

Для дослідження динамічних режимів роботи модернізованого електропривода розвантажувального шнека застосовано пакет прикладних програм MATLAB із розширенням Simulink та бібліотекою спеціалізованих енергетичних компонентів Simscape Electrical. Вибір даного програмного комплексу зумовлений його високою точністю при моделюванні електромеханічних перехідних процесів та можливістю гнучкого налаштування параметрів асинхронного двигуна і перетворювача частоти.

Основою імітаційної моделі є математичний опис трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який реалізовано у вигляді системи диференціальних рівнянь Парка-Горєва, перетворених до нерухомої системи координат. Модель враховує активні та індуктивні опори обмоток статора і ротора, а також зведений момент інерції електромеханічної системи.

Для імітації роботи системи керування розроблено структурну схему, яка включає блок векторного регулятора з оцінювачем стану (спостерігачем потоку ротора), силовий перетворювач, асинхронний двигун та блок механічного навантаження.

Модель асинхронного двигуна AIP90L4 налаштовується відповідно до паспортних даних та розрахованих параметрів. Імітація технологічного навантаження реалізується шляхом подачі на вал двигуна статичного моменту опору $M_{\text{мех}} = 6.1 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Імітація технологічного навантаження реалізується шляхом подачі на вал двигуна статичного моменту опору, зведеного до вала двигуна $M_{\text{оп.зв}} = 6.10 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

3.2 Розробка імітаційної моделі прямого пуску електропривода

Для дослідження базового режиму роботи розвантажувального шнека було розроблено імітаційну модель прямого пуску асинхронного двигуна в середовищі Simulink. Силу частину моделі побудовано з використанням блоків спеціалізованої бібліотеки Specialized Power Systems. Джерелом живлення

виступає трифазне програмоване джерело напруги Three-Phase Programmable Voltage Source, яке імітує мережу підприємства з параметрами 380 В та 50 Гц.

Схема моделі наведена на рис. 3.1.

Сам електродвигун представлений базовим блоком Asynchronous Machine у міжнародній системі одиниць SI, в параметри якого внесено розраховані раніше характеристики двигуна AIP90L4 потужністю 2.2 кВт. Для імітації завантаження шнека зерном застосовано блок генерації східчастого сигналу Step, який через 0.5 секунди після запуску подає на вал двигуна розраховане статичне навантаження величиною 6.1 Н·м.

Вимірювання та виведення перехідних процесів на екран осцилографа Scope реалізовано за допомогою системної шини та блоку Bus Selector, що дозволяє одночасно фіксувати зміни швидкості ротора, електромагнітного моменту та струму статора. Розрахунок електричних кіл забезпечує системний блок powergui, налаштований на дискретний режим роботи з кроком інтегрування 50 мікросекунд для забезпечення максимальної точності та стабільності обчислень.

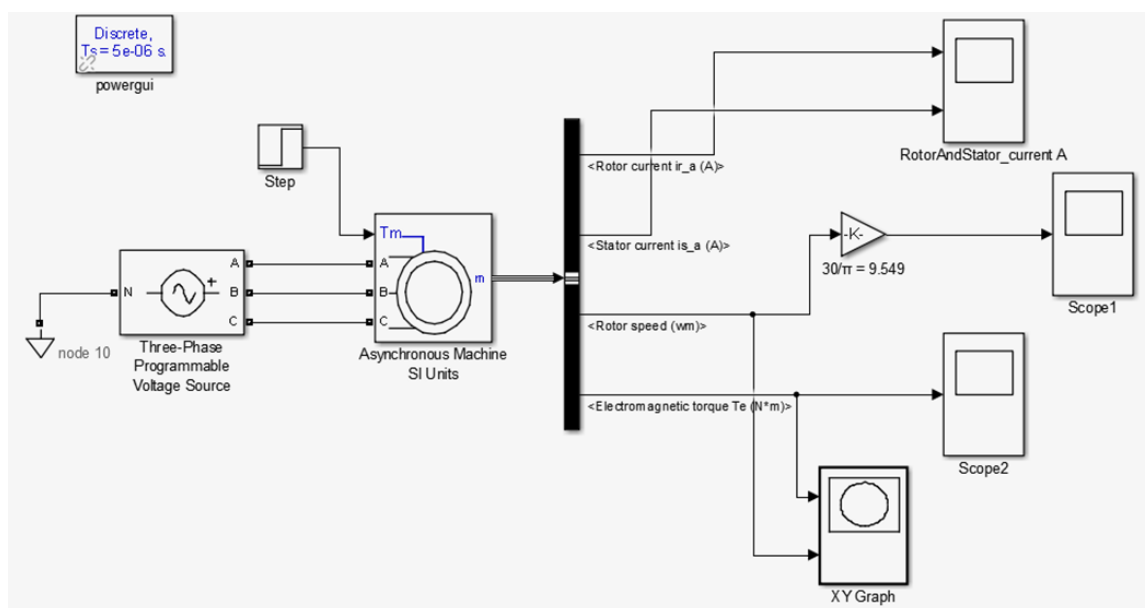


Рисунок 3.1 Імітаційна модель прямого пуску шнека в середовищі Simulink.

3.3 Моделювання перехідних процесів при прямому пуску шнека

Для проведення порівняльного аналізу ефективності модернізації, на першому етапі було змодельовано базовий режим роботи електропривода - прямий пуск асин

хронного двигуна AIP90L від мережі В, 50 Гц без використання перетворювача частоти. Це дозволило оцінити реальні динамічні навантаження, які виникають у механічній частині шнека при традиційній схемі керування. Результати моделювання наведено на рис. 3.2.

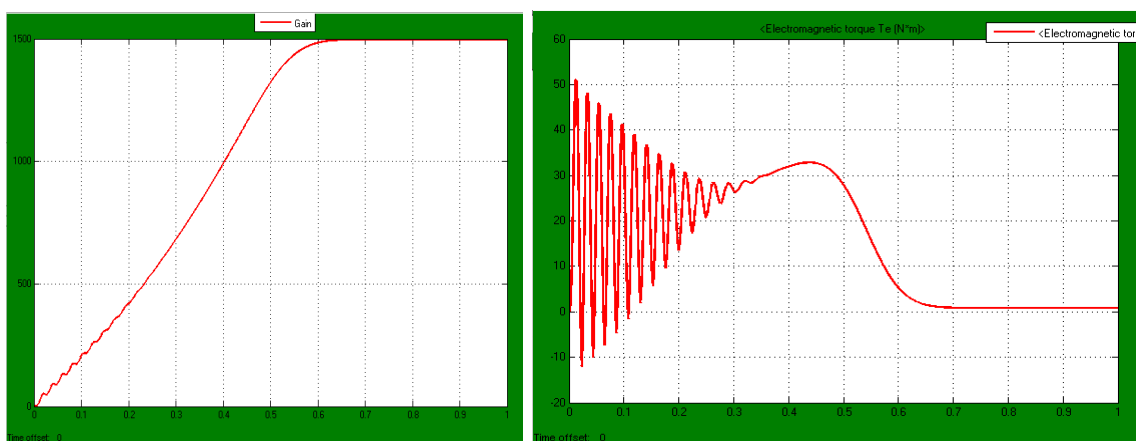


Рисунок 3.2 - (А) Графік залежності швидкості електроприводу при відсутності механічного навантаження, (Б) Характеристика зміни електромагнітного моменту електроприводу в режимі холостого ходу

3.4 Моделювання пуску та регулювання швидкості двигуна електропривода шнека з ПЧ

Після аналізу прямого пуску було проведено дослідження роботи системи «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ-АД). Моделювання виконувалося в MATLAB/Simulink із застосуванням алгоритму векторного керування без давача швидкості (Sensorless Vector Control), реалізованого у ПЧ Altivar Machine ATV320.

Для реалізації цього режиму було розроблено імітаційну модель, наведену на рисунку 3.3. На відміну від схеми прямого пуску, тут живлення двигуна здійснюється через блок Asynchronous Machine з підключеним регулятором, який

відтворює роботу ПЧ в режимі векторного керування з плавним наростанням моменту.

Параметри моделі відповідають розрахованим даним двигуна AIP90L4 та зведеному моменту інерції $J_{зв} = 0.0036 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

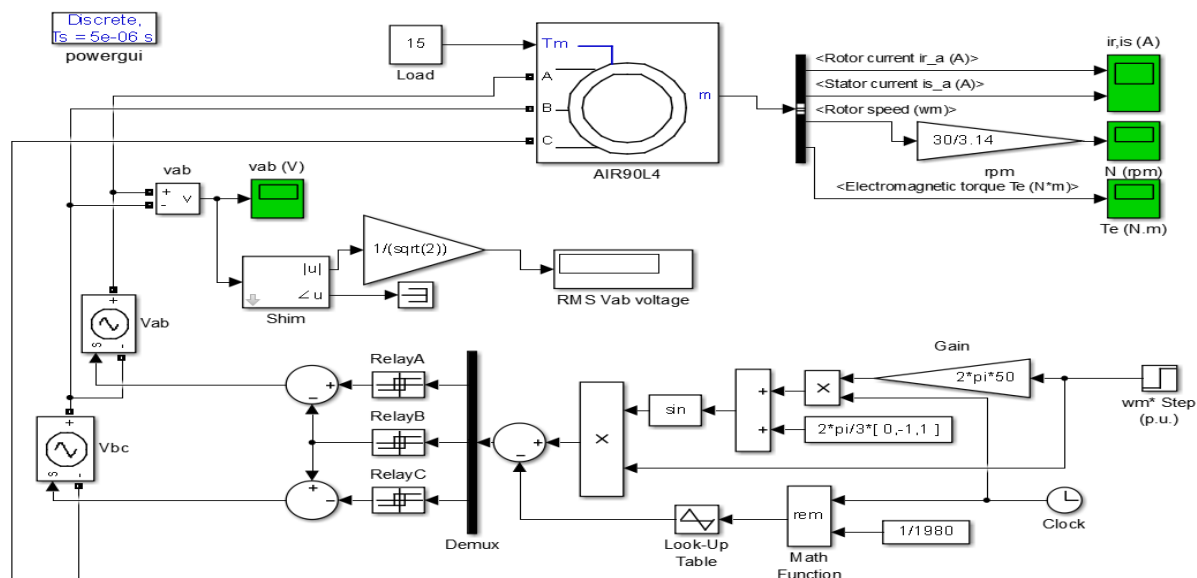


Рисунок 3.3 - Імітаційна модель електропривода шнека з ПЧ у середовищі Simulink

Модель асинхронного двигуна AIP90L4 налаштовується відповідно до паспортних даних та розрахованих у підрозділі 2.5 параметрів. Зведений момент інерції привода задається рівним розрахунковому значенню $J_{зв} = 0.0036 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (на основі паспортного моменту інерції ротора AIP90L4, який становить $0.003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, з урахуванням мас редуктора та муфти). Імітація технологічного

навантаження реалізується шляхом подачі на вал двигуна

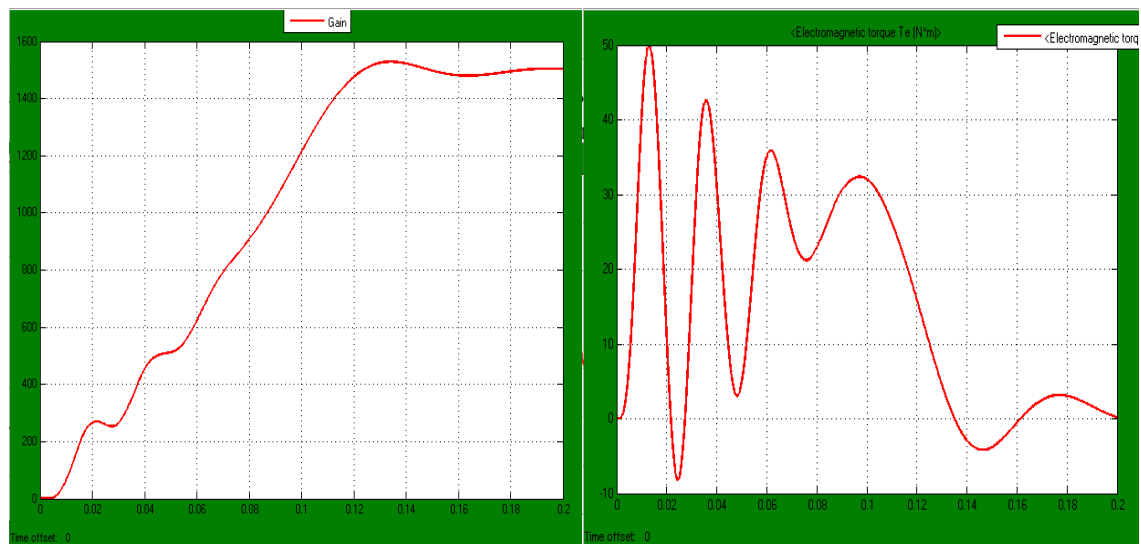


Рисунок 3.4 - (А)Графік залежності швидкості електроприводу при відсутності механічного навантаження, (Б) Характеристика зміни електромагнітного моменту електроприводу в режимі холостого ходу.

4. Економічне обґрунтування та розрахунок ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ

4.1 Розрахунок капітальних інвестицій у модернізацію привода

Перехід від застарілої релейно-контакторної схеми з прямим пуском до сучасного частотно-регульованого електропривода потребує одноразових капітальних вкладень. Зважаючи на результати кінематичного та енергетичного розрахунків, проведених у розділі 2, модернізація передбачає не лише встановлення системи керування, а й повну заміну силового агрегату: встановлення нового енергоефективного двигуна AIP90L4 (2,2 кВт) та черв'ячного редуктора NMRV-090.

Загальні капітальні витрати на реалізацію проєкту ($K_{\text{проєкт}}$) визначаються як сума вартості основного обладнання та витрат на його монтаж:

Загальні капітальні витрати $K_{\text{проєкт}}$ визначаються за формулою:

$$K_{\text{проєкт}} = C_{\text{ЧП}} + C_{\text{Дв}} + C_{\text{Ред}} + C_{\text{Монт}} + C_{\text{трансп}} + C_{\text{ФЗП}} \quad (63)$$

Де:

$K_{\text{проєкт}}$ - загальні капітальні вкладення у проєкт модернізації;

$C_{\text{ЧП}}$ - Частотний перетворювач Schneider Electric ALTIVAR MACHINE ATV320U55N4B, 18500 грн. ;

$C_{\text{Дв}}$ - Двигун AIP90L4 IM3081, 8200 грн. ;

$C_{\text{ред}}$ - Редуктор NMRV-090, 13500 грн.;

$C_{\text{монт}}$ - Монтажні та пусконаладжувальні роботи (кабелі, кріплення, матеріали), 2612 грн. ;

$C_{\text{трансп}}$ - Транспортно-заготівельні витрати (доставка обладнання, виїзди бригади), 1761 грн.;

$C_{\text{ФЗП}}$ - Фонд заробітної плати з ЄСВ (слюсарі, електромонтажники, інженер-налагоджувальник), 13169 грн.

$$K_{\text{пр}} = 18500 + 8200 + 13500 + 2612 = 42812 \text{ грн}$$

$$K_{\text{проєкт}} = 18500 + 8200 + 13500 + 2612 + 1761 + 13169 = 57\,742 \text{ грн}$$

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						56
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4.2 Розрахунок економічного ефекту:

$$E = B_e + B_p + B_{обс}$$

де: B_e - економія електроенергії; B_p - економія на ремонті механіки; $B_{обс}$ - економія на обслуговуванні.

$$B_e = (P_{до} - P_{після} \times K_{завант}) \times T \times Ц$$

$$B_e = (5,5 - 2,2 \times 0,70) \times 2000 \times 7 = 55\,440 \text{ грн/рік}$$

де: $P_{до} = 5,5$ кВт (потужність старого двигуна); $P_{після} = 2,2$ кВт (потужність нового двигуна); $K_{завант} = 0,70$ (середнє завантаження з ЧП); $T = 2\,000$ год/рік (річний фонд роботи, 1 зміна); $Ц = 7$ грн/кВт·год (промисловий тариф).

$$B_p = 2500 \times \left(1 - \frac{1}{3}\right) = 1\,667 \text{ грн/рік}$$

де: 2 500 грн - вартість одного планового ремонту; після модернізації кратність ремонтів зменшилась з 1 до 3 років.

$$B_{обс} = 370 \times (12 - 4) = 2\,960 \text{ грн/рік}$$

де: 370 грн - вартість одного обслуговування (2 год $\times$ 185 грн/год); до модернізації - 12 обслуговувань на рік, після - 4.

$$E = 55\,440 + 1\,667 + 2\,960 = 60\,067 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_{проект}}{E} = \frac{57\,742}{60\,067} = 0,96 \text{ року або } 11 \text{ місяців}$$

Розділ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз факторів виробничої небезпеки при роботі з електроприводом шнека

Модернізація електропривода гвинтового конвеєра, що передбачає впровадження частотно-регульованого комплексу на базі двигуна AIP90L4, перетворювача частоти Altivar ATV320 та редуктора NMRV-090, суттєво трансформує карту виробничих ризиків технологічної лінії. У процесі аналізу факторів небезпеки необхідно розділити їх на електричні, механічні та фізико-хімічні (зумовлені специфікою середовища), оскільки природа ризиків при використанні силової електроніки принципово відрізняється від традиційних систем з прямим пуском.

Електричні ризики в модернізованій системі зміщуються від простого ураження струмом при контакті з оголеними струмопровідними частинами до складних аспектів роботи напівпровідникового обладнання. Частотний перетворювач (ПЧ) створює високочастотні гармоніки в мережі, які при порушенні контурів заземлення можуть спричиняти появу напруги на корпусі обладнання (струми витоку через ємнісні зв'язки). У порівнянні з попередньою системою, де ризик був здебільшого пов'язаний із перегрівом ізоляції при тривалому недовантаженні, сучасна система вимагає суворого дотримання схем вирівнювання потенціалів та використання екранованих кабелів. Водночас ПЧ забезпечує якісний стрибок у безпеці через функцію миттєвого відключення (швидкий захист при короткому замиканні), що нівелює ризики загоряння ізоляції при виникненні аварійних режимів, які раніше могли тривати до моменту спрацювання теплового реле або розплавлення запобіжників.

Основною небезпекою при експлуатації шнекових конвеєрів є ризик руйнування механічних вузлів (муфт, шпонкових з'єднань, валів) під дією пускових ударних моментів. У модернізованій системі цей фактор майже повністю елімінується завдяки алгоритму «м'якого пуску» (S-подібна або лінійна

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						58
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

характеристика розгону). Аналіз показує, що при прямому пуску ударні навантаження на редуктор NMRV-090

могли перевищувати номінальні значення у 2-3 рази, створюючи ризик раптового викиду зернового продукту через порушення герметичності або вилітання кріпильних елементів під навантаженням. Частотне керування виключає ці динамічні стрибки, забезпечуючи плавне наростання моменту, що робить рух робочого органу прогнозованим і виключає ситуації «заклинювання» з подальшим вивільненням накопиченої кінетичної енергії, яка для оператора є небезпечною зоною.

Специфіка транспортування сипучих матеріалів (зерна) створює постійний фактор вибухопожежонебезпеки, зумовлений високою концентрацією зернового пилу в зоні привода. Використання обладнання із класом захисту IP54 та вище (у даному випадку мотор-редуктор NMRV-090 та корпус ПЧ) є критично важливим заходом безпеки. Герметичність модернізованого привода усуває можливість проникнення пилу всередину обмоток двигуна чи силових кіл ПЧ, де міг би виникнути локальний осередок іскріння або перегріву. Окрім того, зниження рівня акустичного шуму при роботі редуктора NMRV-090 (завдяки кращій геометрії зачеплення черв'ячної пари) сприяє поліпшенню ергономічних показників робочого місця оператора, що опосередковано зменшує втомлюваність та ймовірність виникнення помилок при обслуговуванні.

Підсумовуючи, слід зазначити, що впровадження модернізованого привода заміщує високі непередбачувані ризики (аварійні зупинки, перегрів, механічні руйнування) керованими параметрами, які постійно моніторяться. Головна небезпека для персоналу в новій системі полягає не стільки в роботі самого привода, скільки в можливості накопичення залишкового заряду у конденсаторах шини постійного струму ПЧ при обслуговуванні. Це формує нову вимогу до техніки безпеки: наявність регламентованого часу очікування (після зняття напруги) перед відкриттям шафи керування. Таким чином, безпека модернізованого привода базується на інтелектуальному обмеженні небезпечних

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

фізичних впливів (струму, моменту, тепла), що переводить систему із зони високого ризику в зону технічно контрольованих параметрів.

5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки персоналу та обладнання

Реалізація безпечної експлуатації модернізованого електропривода базується на впровадженні комплексу технічних та організаційних рішень, які нівелюють вияв

лені ризику на етапі проектування. Інженерна стратегія захисту інтегрує як апаратні засоби (захисна комутаційна апаратура), так і програмні алгоритми частотного перетворювача, що дозволяє досягти багаторівневої системи безпеки.

Для забезпечення електробезпеки при експлуатації частотного перетворювача Altivar ATV320 було впроваджено систему контуру захисного заземлення з мінімальним перехідним опором, що відповідає вимогам ДСТУ щодо силової електроніки. Зважаючи на генерацію високочастотних завад (гармонік) перетворювачем, силова лінія між інвертором та двигуном AIP90L4 виконана екранованим кабелем із заземленням екрана з обох сторін, що мінімізує рівень електромагнітного випромінювання та виключає появу наведеної напруги на металевих конструкціях конвеєра.

До складу шафи керування введено блок аварійної зупинки, який має пріоритет над будь-якими командами автоматизації. Апаратне блокування виконано за схемою «гарантованого розриву» силового ланцюга, що унеможливорює подачу живлення на двигун навіть у разі програмного збою процесора перетворювача. Додатково, для запобігання пошкодженню силових ключів інвертора, встановлено вхідні запобіжники з характеристикою gG, координація яких забезпечує селективність захисту: при виникненні внутрішнього короткого замикання в перетворювачі відключається лише аварійна ділянка, запобігаючи поширенню наслідків на загальноцехову мережу.

Конструктивне виконання привода, а саме використання герметичного мотор-редуктора NMRV-090, значно підвищує експлуатаційну безпеку. Виключення потреби в частому змащуванні та підтяжці кріплень завдяки високій

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						60
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

герметичності вузлів дозволяє вивести персонал із зони постійної присутності (небезпечної зони робочого органу).

Для забезпечення безпеки при технічному обслуговуванні розроблено протокол LOTO (Lockout/Tagout). На шафі керування передбачено механічний замок для фіксації ввідного автомата у вимкненому стані, а також встановлено індикатор наявності залишкової напруги на конденсаторах шини постійного струму перетворювача. Останній є критично важливим інженерним рішенням, оскільки вказує обслуговуючому персоналу точний час (таймінг), після якого розрядка конденсаторів досягає

безпечного рівня (нижче 50В), що усуває ризик ураження електричним струмом при розкритті шафи. Ці заходи в сукупності формують замкнену систему безпеки, де інженерні рішення (захист, блокування) та ергономіка (доступ, індикація) мінімізують вплив людського фактора на виникнення аварійних ситуацій.

5.3 Модернізація системи безпеки за рахунок функціоналу ПЧ та автоматики

Перехід від класичної релейно-контакторної схеми до систем керування на базі ПЧ Altivar ATV320 дозволив реалізувати концепцію «активної безпеки». Інженерне рішення полягає у перенесенні функцій захисту з рівня силових комутаційних апаратів на рівень логічної обробки сигналів перетворювачем частоти. Це скорочує час реакції системи на аварійну подію з мілісекунд (електромеханічна комутація) до мікросекунд (цифрова обробка), що є критичним для запобігання розвитку катастрофічних сценаріїв.

На відміну від систем, де захист спрацьовує лише після настання аварії (перегорання запобіжника, перегрів), впроваджений комплекс використовує предиктивну логіку. Частотний перетворювач постійно аналізує профіль струму, моменту та температури двигуна. Автоматизація налаштована таким чином, що ПЧ порівнює поточні дані з математичною моделлю «нормального стану». При виявленні аномалій (наприклад, нелінійне зростання струму через механічне заклинювання шнека зерном) система автоматично ініціює алгоритм безпечного

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		61

зупину до того, як параметри досягнуть критичних значень. Це виключає ризик пожежі чи руйнування механіки, які раніше були невід'ємною частиною аварійних зупинок.

Логіка керування модернізованим приводом інтегрована із загальною системою автоматизації через систему програмних блокувань (Interlocking). ПЧ Altivar ATV320 налаштований на обробку зовнішніх сигналів безпеки через програмовані входи (DI), що дозволяє створити ієрархічну структуру захисту:

- ✓ При спрацюванні датчика рівня в бункерах, система автоматично переводить ПЧ у режим плавного гальмування, запобігаючи пересипанню матеріалу, яке могло б призвести до забивання шнека та виходу двигуна з ладу.

- ✓ Завдяки використанню зворотного зв'язку (або алгоритмічного розрахунку

- ✓ швидкості), ПЧ виявляє факт проковзування пасової передачі або зупинки вала редуктора. У цьому випадку система миттєво знімає момент з двигуна, запобігаючи ситуаціям, коли «очікуваний» рух механізму не відповідає реальному (наприклад, при обриві шпонки).

Функціонал ПЧ дозволяє налаштувати поведінку системи при втраті зв'язку або збої програмного забезпечення (Fail-Safe). У модернізованому проекті реалізовано алгоритм, при якому у разі виникнення помилки зв'язку з контролером або зависання процесора, перетворювач автоматично переходить у стан безпечної зупинки (на вибір: вільний вибіг або кероване гальмування). Додатково, використання функції «Watchdog timer» всередині ПЧ гарантує, що при відсутності циклічного підтвердження справності від зовнішнього контролера, система вимикається. Це унеможливорює роботу шнека за неконтрольованою командою.

Модернізація передбачає виведення діагностичних кодів помилок на пульт оператора (НМІ-панель). Замість «сліпого» пошуку несправності, обслуговуючий персонал отримує точну інформацію про причину зупинки (наприклад, «Overcurrent», «Overtemperature», «Loss of Phase»). Це виключає спроби «запуску наосліп» або шунтування захистів, що є поширеною причиною травматизму при

ремонті застарілих систем. Інформаційна безпека в цьому контексті стає частиною техніки безпеки: оператор чітко знає, чи є помилка критичною, чи потребує лише перезавантаження через HMI-інтерфейс, що мінімізує кількість небезпечних маніпуляцій усередині шафи керування.

5.4 Пожежна безпека та дії у надзвичайних ситуаціях

Експлуатація електропривода гвинтового конвеєра в умовах зернопереробного підприємства, де середовище класифікується як вибухопожежонебезпечне через високу концентрацію пилу, вимагає переходу від класичних методів протипожежної профілактики до інтелектуальних систем захисту. Модернізація привода на базі частотного перетворювача Altivar ATV320 кардинально змінює профіль пожежних ризиків, оскільки замість реагування на наслідки займання система спрямовує зусилля на усунення самих причин виникнення теплових викидів. Інтегральна теплова модель двигуна AIP90L4, реалізована програмними засобами перетворювача, веде постійний

розрахунок термічного стану обмоток, гарантуючи, що жоден перехідний процес не призведе до критичного нагрівання ізоляції, яке раніше було найпоширенішим джерелом іскріння та подальшого займання.

Технічне забезпечення пожежної безпеки в оновленій системі ґрунтується на автоматичному контролі механічного опору на валу привода. Будь-яке зростання навантаження, викликане заклинюванням шнека або механічним тертям вузлів редуктора

NMRV-090, миттєво фіксується як аномалія, після чого система ініціює безпечне зупинення конвеєра. Це виключає нагрівання корпусу редуктора до температур, здатних ініціювати тління зернового пилу, що осідає на зовнішніх поверхнях. Виконання вузлів за стандартом захисту IP54 доповнює цей рівень безпеки, створюючи надійний бар'єр для проникнення пилоповітряної суміші в зони, де можлива поява навіть незначного теплового виділення, тим самим герметизуючи потенційні вогнища загоряння.

Дії персоналу в аварійних ситуаціях у модернізованій системі також підпорядковані логіці інтелектуального керування. При виявленні візуальних

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						63
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ознак небезпеки, як-от задимлення або відкрите полум'я, активація кнопки аварійної зупинки (E-Stop) забезпечує розмикання ланцюга безпеки STO (Safe Torque Off) у перетворювачі частоти. Це технічне рішення є пріоритетним, оскільки воно не просто зупиняє програму керування, а фізично знеструмлює силові ключі інвертора, перериваючи подачу електроенергії на двигун незалежно від стану процесора. Після активації захисту протокол безпеки передбачає вимкнення ввідного автоматичного вимикача, що гарантує повне зняття напруги після вичерпання часу розряду ємностей на шині постійного струму.

Вибір засобів гасіння в разі виникнення пожежі є критичним етапом, де персонал керується принципом неруйнівного впливу на електроніку. Застосування води або піноутворюючих складів у зоні розташування шафи керування та двигуна суворо заборонено через ризик вторинного короткого замикання та непередбачуваної хімічної реакції з пиловими відкладеннями.

Замість цього пріоритет надається вуглекислотним вогнегасникам, властивості яких дозволяють ефективно локалізувати осередок загоряння без руйнування компонентів перетворювача, що згодом дає можливість провести об'єктивну технічну експертизу причин аварії. Завдяки такому підходу, що

об'єднує превентивний автоматичний захист та регламентовані інженерні дії оператора, ризики пожежі при експлуатації модернізованого конвеєра мінімізуються до технічно допустимих меж.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						64
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

6 Результативна частина

6.1 Висновки і пропозиції за прийнятими в проєкті рішеннями

У результаті виконання цієї кваліфікаційної роботи було повністю реалізовано комплексне інженерне завдання, спрямоване на глибоку модернізацію та автоматизацію електромеханічної системи розвантажувального шнека силосу. Сучасні тенденції розвитку агропромислового сектору та елеваторної промисловості висувають дедалі жорсткіші вимоги до надійності, енергоефективності та точності керування логістичними потоками сипучих матеріалів. Проведене дослідження дозволило виявити ключові технічні недоліки традиційних підходів до проектування таких ліній і запропонувати науково обґрунтоване рішення, що відповідає сучасним індустріальним стандартам.

На початкових етапах проектування було здійснено детальний технологічний та енергетичний аудит діючого обладнання, який продемонстрував повну нерентабельність подальшої експлуатації існуючого привода на базі нерегульованого асинхронного двигуна потужністю 5,5 кВт. Головна проблема полягала в надмірному завищенні встановленої потужності, через що у сталому номінальному режимі роботи двигун виявлявся перевантаженим лише на 15,5% від своєї номінальної спроможності. Таке глибоке недовантаження спричиняло різке падіння коефіцієнта корисної дії системи та критичне зниження коефіцієнта потужності, що призводило до значних втрат електроенергії та перевитрат активної і реактивної потужності в масштабах усього підприємства. Додатковим деструктивним чинником виступала релейно-контакторна схема прямого пуску, яка генерувала величезні струмові кидки в мережі та викликала жорсткі динамічні удари у трансмісії, прискорюючи механічне зношення зубчастих коліс циліндричного редуктора.

Для ліквідації виявленого енергетичного дисбалансу та спрощення кінематичної структури установки було розроблено нове розрахунково-конструкторське рішення. Замість застарілого роздільного компонування вузлів було впроваджено концепцію інтегрованого моноблочного мотор-редуктора на базі чотириполюсного асинхронного двигуна раціональної потужності 2,2 кВт та

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

високонадёжного одноступінчастого черв'ячного редуктора з передатним числом двадцять. Це дозволило перевести електромеханічний комплекс у зону максимальної енергетичної ефективності,

піднявши коефіцієнт завантаження до оптимального рівня, що повністю усунуло хронічні втрати реактивної потужності. Повна відмова від відкритих пружних втулково-пальцевих муфт дозволила ліквідувати потребу в регулярному центруванні валів і суттєво спростила технічне обслуговування агрегату в процесі тривалої експлуатації.

Основним концептуальним ядром модернізації стало впровадження інтелектуальної системи частотного керування на базі сучасного перетворювача частоти, який реалізує алгоритм безсенсорного векторного керування. Перехід від простого скалярного регулювання до векторного дозволив забезпечити роздільне і високоточне керування потокоутворюючою та моментоутворюючою складовими струму статора в режимі реального часу. На основі вбудованої математичної моделі двигуна мікропроцесорна система перетворювача частоти отримала здатність миттєво формувати необхідний електромагнітний момент безпосередньо з нульової швидкості, без використання крихких і дорогих зовнішніх енкодерів. Ця властивість повністю вирішила критичну технологічну проблему пуску конвеєра «під завалом», коли жолоб шнека повністю заповнений щільною або злежаною зерновою масою і вимагає високого пускового зусилля для зсуву вала з місця.

Наукова спроможність та адекватність прийнятих інженерних рішень були всебічно перевірені за допомогою методів математичного й імітаційного моделювання у програмному комплексі MATLAB/Simulink із застосуванням спеціалізованих бібліотек. Порівняльний аналіз отриманих графіків перехідних процесів наочно довів перевагу модернізованого привода перед традиційним. Частотна система векторного керування дозволила повністю ліквідувати руйнівні пускові ударні навантаження амплітудою до п'ятдесяти ньютон-метрів, забезпечивши контрольований, плавний розгін виконавчого органу за заданою часовою рампою. У статичних режимах система продемонструвала виняткову

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						66
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

жорсткість механічних характеристик, миттєво відпрацьовуючи випадкові коливання моменту опору, викликані зміною вологості чи щільності сировини, що гарантує високу точність безступінчастого регулювання продуктивності лінії та виключає необхідність використання неефективних механічних засувов для дозування зерна.

Вагомим результатом роботи став комплексний аналіз і переформатування карти виробничих ризиків у межах вимог щодо охорони праці та пожежної безпеки. Впровадження перетворювача частоти дозволило реалізувати передову концепцію активного превентивного захисту, де мікропроцесорна логіка реагує на аномалії в профілі струму або температури за лічені мікросекунди, запобігаючи розвитку аварій. Інтегрований апаратний ланцюг безпечного зняття моменту у поєднанні з високим класом захисту корпусу мотор-редуктора дозволили звести до мінімуму ймовірність виникнення іскріння, перегріву поверхонь або займання зернового пилу, що є критично важливим для вибухопожежонебезпечних зон елеваторних комплексів. Виведення детальної діагностичної інформації на пульт оператора повністю виключило небезпечні маніпуляції всередині силових щитів під час пошуку несправностей.

Завершальним підтвердженням доцільності реалізації проекту став детальний техніко-економічний розрахунок, який продемонстрував високу фінансову рентабельність модернізації. Попри потребу в одноразових капітальних інвестиціях для закупівлі перетворювача частоти, нового двигуна, редуктора та проведення монтажних робіт, проект забезпечує стрімке повернення коштів. Сумарний річний економічний ефект, що формується за рахунок суттєвого зменшення споживання активної та реактивної електроенергії, зниження витрат на регулярні ремонти механічної частини та оптимізації графіків обслуговування, дозволяє повністю окупити капіталовкладення за одинадцять місяців. Таким чином, розроблена електромеханічна система є зразком високоефективного, безпечного та економічно виправданого технічного рішення, яке повністю готове до впровадження у реальне виробництво і здатне значно підвищити конкурентоспроможність сучасного зернопереробного підприємства.

					КРБ.АТЕІРС1.641-03.1.6	Арк
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Гевко Б. М., Рогатинський Р. М. Конструювання інноваційних транспортних систем: підручник. Тернопіль: ТНТУ, 2012. 340 с.
2. Економіка підприємства: підручник / за заг. ред. С. Ф. Покропивного. Вид. 2-ге, перероб. та дод. К.: КНЕУ, 2000. 528 с.
3. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. 5-те вид., доповн. К.: Знання, 2014. 373 с.
4. Загірняк М. В. та ін. Енергоефективні електромеханічні системи: монографія / за заг. ред. В. Б. Клепікова. Харків: ХПІ, 2019. 416 с.
5. Інвертори і перетворювачі частоти : навч. посіб. / В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс. Київ: Ліра-К, 2020. 300 с.
6. Каталог перетворювачів частоти Altivar Machine ATV320 [Електронний ресурс] / Schneider Electric. 2021. URL: <https://www.se.com/ua/ru/product-range/63440-altivar-machine-atv320> (дата звернення: 02.04.2026).
7. Ловейкін В. С., Рибалко В. М., Філіпова Г. А. Підйомно-транспортні машини: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2010. 295 с.
8. Маренич К. М. та ін. Автоматизований електропривод машин і установок: навчальний посібник. Покровськ: ДонНТУ, 2016. 252 с.
9. Михальський В. М. Системи керування електроприводом на основі сучасних напівпровідникових перетворювачів. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2018. 320 с.
10. Монтік П. М. Електроустаткування: теорія та практика: навч. посіб. для вузів. Ч.2. Одеса: Автограф, 2002. 248 с.
11. Островерхов М. Я., Бур'ян С. О. Моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 145 с.
12. Пересада С. М., Ковбаса С. М., Пушкар М. В. Системи керування електроприводами: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 268 с.

13. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Вид. 3-тє, перероб. і дод. К., 2017. 736 с.

14. Теорія електропривода: підручник / М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.; за ред. М. Г. Поповича. К.: Вища шк., 1993. 494 с.

15. Чорний О. П., Луговий А. В. та ін. Енергозбереження в електромеханічних системах: навчальний посібник. Кременчук: КрНУ, 2015. 240 с.