

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії,
автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра автоматизація технологічних електромеханічних і
робототехнічних систем
Спеціальність: 141 Електрична інженерія



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на тему «Модернізація електроприводу зерноочисної машини»

Здобувача Коваленко Максим Олегович.

4 курсу групи: АЕМ-40

Керівник: Шейда Голбад К.А. д.ф.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026р., протокол № 8.

В.о. завідувач кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра: автоматизація технологічних електромеханічних і
робототехнічних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 141 – Електрична інженерія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
завідувач кафедри АТЕіРС
д.т.н, проф. Петро Осадчук

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувача Коваленка Максима Олеговича.

1. Тема роботи: «Модернізація електроприводу зерноочисної машини»

Керівник роботи: Голбад Камбіз Ахмадович, д.ф.т.н., доцент.

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

Строк подання студентом роботи 12.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи: зерноочисна машина Р1-БЗО-М.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Актуальність теми. Мета і завдання роботи. Об'єкт і предмет дослідження. Огляд літератури і аналіз існуючих систем. Огляд існуючої конструкції. Розрахункова частина. Вибір електроприводу, підбір мотор-редуктора. Вибір і аналіз системи керування. Економічна частина. Вимоги безпеки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації: 1. Актуальність теми. 2. Прилад та етапи зерноочисного комплексу. 3-4. Схема технологічного процесу барабанного, повітроочисного, повітряно-решітного, аспіраційного сепаратора. 5. Технологічна схема циліндричного та дискового трієра. 6. Загальний вигляд і конструкція зерноочисної машини Р1-БЗО-М. 7. Технічні характеристики зерноочисної машини. 8. Силкові розрахунки електроприводу зерноочисної машини. 9. Характеристики електродвигуна АІР132S4. 10. Технічні дані редуктора NMRV 150. 11. Паспортні дані частотного перетворювача SINAMICS G120C. 12. Блок-схема перетворювача частоти. 13. Електрична схема перетворювача SIMATIC G120C. 14. Графік природної механічної характеристики двигуна. 15. Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. 16. Схема прямого пуску. 17. Графіки зміни

швидкості та електромагнітного моменту при різних навантаженнях. 18.
Техніко-економічний розрахунок.

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Аналіз літературних джерел	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.	
2	Вибір електроприводу	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.	
3	Визначення параметрів апаратури управління	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.	
4	Економічна обґрунтованість		
5	Охорона праці		

7.Дата видачі завдання: «01» грудня 2025 р.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Завдання прийняв до виконання _____ Коваленко М. О.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ. Огляд літератури і аналіз існуючих систем.	10.02.2026	
2	Попередній розрахунок потужності електричного двигуна і вибір електроприводу та редуктора. Розрахунок механічних характеристик. Кінематична схема приводу. Розрахунок динамічного режиму електроприводу.	25.02.2026	
4	Дослідження процесів при частотному регулюванні в самому електродвигуні. Прямий пуск електродвигуна. Моделювання динамічних режимів електроприводу у середовищі MATLAB/ Simulink. Використання методів імітаційного моделювання.	18.03.2026	
5	Розрахунок економічної доцільності	30.04.2026	
6	Охорона праці та безпека життєдіяльності	25.05.2026	
7	Перевірка роботи на добротність	16.06.2026	
8	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи бакалавра	17.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	24.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Коваленк М. О.

Керівник роботи _____ Шейда Голбад К.А.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних веб-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної

Здобувач-дипломник _____ Коваленк М. О.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації електропривода зерноочисної машини з метою підвищення її енергоефективності, надійності та продуктивності в умовах сучасного зернопереробного виробництва. У роботі проведено аналіз ролі зерноочисних машин у структурі зернопереробного комплексу. Досліджено конструкцію та принцип дії зерноочисної машини, проаналізовано існуючий електропривод, виявлено його основні недоліки. Запропоновано модернізацію електропривода шляхом впровадження частотно-регульованого привода на базі асинхронного електродвигуна та перетворювача частоти. Обґрунтовано вибір основних параметрів електропривода, виконано розрахунок потужності, механічних характеристик та енергоспоживання системи. Отримано залежності, що описують вплив швидкості обертання робочих органів на ефективність процесу очищення зерна.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: зерноочисна машина, електропривод, модернізація, асинхронний двигун, частотний перетворювач, енергоефективність, зернопереробний комплекс, регулювання швидкості, автоматизація.

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the modernization of the electric drive of a grain cleaning machine in order to improve its energy efficiency, reliability, and productivity under the conditions of modern grain processing production. The work includes an analysis of the role of grain cleaning machines within the structure of the grain processing complex. The design and operating principle of the grain cleaning machine are examined, and the existing electric drive is analyzed to identify its main shortcomings. A modernization of the electric drive is proposed through the implementation of a variable-frequency drive based on an asynchronous electric motor and a frequency converter. The selection of the main parameters of the electric drive is justified, and calculations of power, mechanical characteristics, and system energy consumption are performed. Relationships have been obtained that describe the influence of the rotational speed of the working parts on the efficiency of the grain cleaning process.

KEYWORDS: grain cleaning machine, electric drive, modernization, asynchronous motor, frequency converter, energy efficiency, grain processing complex, speed control, automation.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	9
1.1 Технологічні особливості зернової маси	9
1.2 Конструктивні особливості зерноочисного обладнання.....	11
1.3 Основні типи зерноочисних машин	13
1.4. Зерноочисна машина Р1-БЗО-М.....	21
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	26
2.1. Вимоги до електроприводу зерноочисної машини Р1-БЗО-М.....	26
2.2 Вибір редуктора.....	31
2.2 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода	33
2.3 Розрахунок механічної характеристики двигуна.....	35
2.4 Параметри схеми заміщення:	36
2.4.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна	39
2.4.2 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна.....	41
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУРИ КЕРУВАННЯ	45
3.1 Вибір перетворювача частоти.....	45
3.2 Вибір апаратури керування	46
3.3 Моделювання електроприводу зерноочисної машини в середовищі MATLAB Simulink без частотного регулювання.....	50

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація електроприводу зерноочисної машини	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Коваленко Д.О.				у	5	68
Керівник		Шейда Голбад К.А.						
Реценз.								
Зав. кафедр		Жигайло О.М.				ОНТУ Гр, АЕМ-40		

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ	53
4.1 Капітальні (інвестиційні) витрати.....	53
4.2 Експлуатаційні витрати	54
4.3 Розрахунок річного споживання електроенергії приводом.....	55
4.4 Визначення терміну окупності	57
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	58
5.1 Загальні вимоги охорони праці.....	58
5.2 Вимоги перед початком роботи	58
5.3 Вимоги під час роботи	59
5.4 Вимоги після закінчення роботи	59
5.5 Освітлення.....	59
5.6 Вентиляція та аспірація	60
5.7 Шум і вібрація	61
5.8 Електробезпека	61
5.9 Пожежна безпека.....	62
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65

ВСТУП

Агропромисловий комплекс України є однією з ключових галузей національної економіки, що забезпечує продовольчу безпеку держави, формує значну частку експорту та впливає на розвиток суміжних галузей. Особливе місце в його структурі займає зернопереробний комплекс, який охоплює процеси вирощування, транспортування, зберігання, очищення та переробки зернових культур. За останні роки Україна стабільно входить до числа провідних світових експортерів зерна, зокрема пшениці, кукурудзи та ячменю, а валовий збір зернових культур у сприятливі роки перевищує 60–80 млн. тонн. Ефективність функціонування зернопереробного комплексу значною мірою залежить від якості первинної обробки зерна, одним із ключових етапів якої є очищення. Зерноочисні машини відіграють вирішальну роль у забезпеченні необхідних показників якості зерна. Вони здійснюють сепарацію матеріалу за розмірами, аеродинамічними властивостями та масою, забезпечуючи зниження вмісту домішок до нормативних значень (як правило, не більше 1–2% для продовольчого зерна). Від ефективності роботи цих машин залежить не лише якість кінцевої продукції, а й енергоефективність усього технологічного процесу, зменшення втрат зерна та підвищення економічної рентабельності підприємства.

Сучасні зерноочисні машини є складними електромеханічними системами, в яких електропривод виконує одну з ключових функцій — забезпечує рух робочих органів (сит, вентиляторів, транспортерів тощо) та визначає продуктивність і стабільність роботи обладнання.

У сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів та необхідності підвищення конкурентоспроможності аграрного виробництва особливої актуальності набуває питання модернізації електроприводів зерноочисних

машин. Одним із перспективних напрямків є впровадження регульованого електропривода на базі частотних перетворювачів, що дозволяє оптимізувати режими роботи обладнання, зменшити споживання електроенергії на 20–40%,

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

підвищити надійність і довговічність машин, а також забезпечити більш точне керування технологічним процесом очищення зерна.

Модернізація електропривода дозволяє реалізувати плавний пуск і зупинку механізмів, знизити пускові струми, мінімізувати динамічні навантаження на вузли машини та покращити умови експлуатації

Актуальність теми. Сучасний розвиток агропромислового комплексу України характеризується зростанням обсягів виробництва зернових культур, підвищенням вимог до якості продукції та необхідністю забезпечення її конкурентоспроможності на світовому ринку. У цих умовах особливого значення набуває ефективне функціонування зернопереробного комплексу, де одним із ключових етапів є очищення зерна перед зберіганням і подальшою переробкою.

Об'єктом дослідження є електропривод зерноочисної машини.

Предметом дослідження є режими роботи та способи підвищення ефективності електропривода шляхом його модернізації.

Методи дослідження. Теоретичною основою дослідження є положення теорії електропривода, електромеханіки, автоматичного керування та технологічних процесів. У роботі застосовано методи математичного моделювання для опису динамічних і статичних режимів роботи електропривода.

Наукова та практична новизна отриманих результатів. Удосконалено математичну модель електропривода зерноочисної машини, яка, підхід до вибору параметрів частотно-регульованого електропривода, розроблено технічне рішення модернізації електропривода зерноочисної машини на основі застосування частотного перетворювача, забезпечено зменшення пускових струмів і динамічних навантажень. Розроблені рекомендації можуть бути використані при модернізації існуючих зерноочисних машин на підприємствах агропромислового комплексу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Технологічні особливості зернової маси

Україна традиційно є однією з провідних аграрних країн світу. Зерно для це не просто сільськогосподарська продукція, а стратегічний ресурс, який впливає на економіку, продовольчу безпеку та експортний потенціал держави. Завдяки сприятливим ґрунтово-кліматичним умовам значна частина території України використовується для вирощування зернових культур, таких як пшениця, кукурудза, ячмінь та жито.

Зерно є основою харчового ланцюга. З нього виробляють:

- борошно і хлібобулочні вироби;
- крупи;
- макаронні вироби;
- комбікорми для тваринництва.

У середньому, одна людина споживає близько 100–130 кг хліба і хлібних виробів на рік, що робить зерно базовим продуктом харчування населення.

Аграрний сектор є одним із ключових джерел валютних надходжень України. Частка агропродукції в експорті становить близько 40–50 %. Зернові культури займають понад 50 % у структурі аграрного експорту. Україна входить до ТОП-5 світових експортерів кукурудзи, пшениці, ячменя. Експорт зерна забезпечує надходження валюти, що підтримує економічну стабільність країни. У роки високих врожаїв Україна експортує понад 40–50 млн тонн зерна на рік. Це дозволяє країні впливати на світові ціни на зернові культури.

Аграрний сектор забезпечує робочі місця для мільйонів людей, розвиток сільських територій, стабільність продовольчих ринків.

Зерно є основною сировиною для виробництва продуктів харчування, комбікормів і сировини для переробної промисловості. Якість зерна безпосередньо впливає на ефективність його подальшої переробки, зберігання та кінцеві властивості продукції. Її склад залежить від культури, умов збирання,

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						9
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вологості, стану техніки та агротехніки вирощування. У середньому, після комбайнового збирання зернова маса містить значну кількість домішок. До них відносяться:

- основне зерно до 85–95 %
- органічні домішки (солома, полова, насіння бур'янів) до 3–8 %
- мінеральні домішки (пісок, земля, каміння) до 1–3 %
- пошкоджене шкідниками, недозріле або заражене зерно до 2–6 %

Наприклад, для пшениці після збирання типова засміченість може становити до 10–15 %, що є критичним для зберігання без попереднього очищення. Наявність домішок негативно впливає на технологічні процеси, зокрема призводить до:

- зниження масової частки товарного зерна;
- зниження якості борошна або комбікорму.
- знижується якість кінцевої продукції;
- підвищення вологості та ризику самозігрівання;
- збільшення зносу робочих органів машин;
- ускладнюються транспортування та зберігання;
- підвищується ризик самозігрівання та псування зерна.

Очищення зерна є обов'язковим технологічним етапом післязбиральної обробки. Його основна мета — підвищення якості зернової маси шляхом видалення сторонніх домішок та некондиційного зерна.

Процес очищення базується на відмінностях фізико-механічних властивостей зерна та домішок, таких як розміри, маса, аеродинамічні характеристики та форма. Для цього застосовуються різні типи зерноочисних машин: ситові, повітряні, комбіновані та інші.

Таким чином, ефективне очищення зерна є важливим технологічним етапом, що безпосередньо впливає на якість продукції та економічну ефективність виробництва, а також визначає вимоги до роботи та модернізації електроприводів зерноочисного обладнання.

1.2 Конструктивні особливості зерноочисного обладнання

Зерноочисне обладнання відноситься до спеціалізованих технічних засобів, що широко застосовуються у сільському господарстві та на підприємствах агропромислового комплексу. Основним його призначенням є забезпечення якісної підготовки зернової маси після збирання для подальшої переробки, реалізації або тривалого зберігання, зокрема як посівного матеріалу. Це досягається шляхом видалення сторонніх домішок.

До складу домішок можуть входити мінеральні частинки (пісок, ґрунт), насіння бур'янів, металеві включення, комахи, а також пошкоджене або уражене мікроорганізмами зерно. Наявність таких компонентів негативно впливає на якість продукції та ускладнює подальші технологічні процеси. Крім основної функції очищення, сучасні зерноочисні машини, залежно від конструктивного виконання, можуть виконувати додаткові операції, зокрема сортування зерна за розмірами, формою, масою та іншими фізичними характеристиками. У комплексі це дозволяє суттєво підвищити якість зернової продукції, покращити її технологічні властивості та забезпечити відповідність встановленим стандартам.



Рис. 1.1 Прилад зерноочисного комплексу

Залежно від принципу дії зерноочисне обладнання поділяють на три основні групи. До першої групи належать машини для первинного очищення зернової маси. До них відносяться повітряні, механічні, а також повітряно-решітні установки. Таке обладнання використовується для обробки зерна безпосередньо після збирання врожаю. Воно забезпечує видалення основної частини домішок різного розміру — як великих, так і дрібних, що дозволяє підготувати зерно до подальших технологічних операцій.

Друга група включає обладнання для сортування зерна. Його застосовують для розділення зернової маси залежно від подальшого використання: на посівний матеріал або для переробки в харчовій промисловості (зокрема для виробництва борошна, круп та інших продуктів). У процесі сортування зерно розподіляється за розмірами, масою та іншими фізичними характеристиками.

До третьої групи відносяться машини спеціального призначення. Сюди входять магнітні сепаратори, пневматичні столи, а також різні типи сортувальних установок. Таке обладнання використовується для більш глибокого очищення та доведення зерна до високих кондицій. Воно може бути виконане як у стаціонарному, так і в пересувному варіанті.

Застосування різних типів зерноочисного обладнання дозволяє забезпечити поетапну та ефективну обробку зернової маси відповідно до вимог технологічного процесу.

Основні способи очищення зернової маси поділяються на механічні та пневматичні, кожен з яких має свої особливості та сферу застосування.

Механічні методи базуються на використанні сит, решіт та барабанів, що забезпечують відокремлення домішок за геометричними параметрами — розміром і формою частинок. У процесі очищення зерно проходить через систему сит з отворами різного діаметра, що дозволяє ефективно видаляти як дрібні домішки (пісок, пил), так і більш крупні включення (каміння, рослинні рештки). Барабанні очищувачі, у свою чергу, використовують обертальний рух, завдяки якому відбувається додаткове відокремлення домішок від поверхні зерна.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Пневматичні методи очищення ґрунтуються на дії повітряного потоку, який проходить крізь зернову масу. За рахунок різниці аеродинамічних характеристик частинок легкі домішки, такі як пил, полова та лушпиння, відокремлюються від основного зерна. Такий спосіб є ефективним і водночас щадним, оскільки практично не пошкоджує зерно. Пневматичні сепаратори можуть мати різні конструктивні виконання — із вертикальним або горизонтальним напрямком повітряного потоку, що дозволяє адаптувати їх до різних культур.

Для підвищення ефективності очищення на практиці широко застосовуються комбіновані методи, які поєднують механічне та пневматичне розділення. У цьому випадку зернова маса спочатку проходить через ситові системи для видалення великих і дрібних домішок, після чого піддається обробці повітряним потоком для усунення легких частинок. Такий комплексний підхід забезпечує високий ступінь очищення та дозволяє отримати зерно, придатне для зберігання або подальшої переробки.

1.3 Основні типи зерноочисних машин

Зерноочисні машини (сепаратори) класифікують за принципом дії та способом розділення зернової маси. За принципом роботи розрізняють барабанні, повітроочисні, повітрянорешітні, аспираційні та трієрні машини.

Барабанний сепаратор - один із різновидів зерноочисних машин, у якому процес розділення зернової маси здійснюється за допомогою обертового циліндричного барабана. Вони широко застосовуються для попереднього та вторинного очищення зерна від домішок, що відрізняються за розмірами, формою або довжиною. Основним робочим органом є перфорований або комірчастий барабан, який обертається навколо своєї осі. Зернова суміш подається всередину барабана, де під дією обертання, сили тяжіння та тертя відбувається її переміщення і розділення на фракції. Принцип роботи барабанного сепаратора полягає в тому, що частинки різного розміру або форми по-різному взаємодіють із поверхнею барабана:

дрібні домішки проходять через отвори перфорованого барабана; великі домішки залишаються всередині та виводяться окремо. Швидкість обертання барабана і кут нахилу плавно змінюються. Решета швидкоз'ємні. Конструктивно барабанний сепаратор складається з:

- завантажувального пристрою;
- обертового барабана (перфорованого або комірчастого);
- приводу (електродвигун, передача);
- рами та опор;
- системи відведення очищеного зерна та відходів;
- іноді — аспіраційної системи для видалення легких домішок.

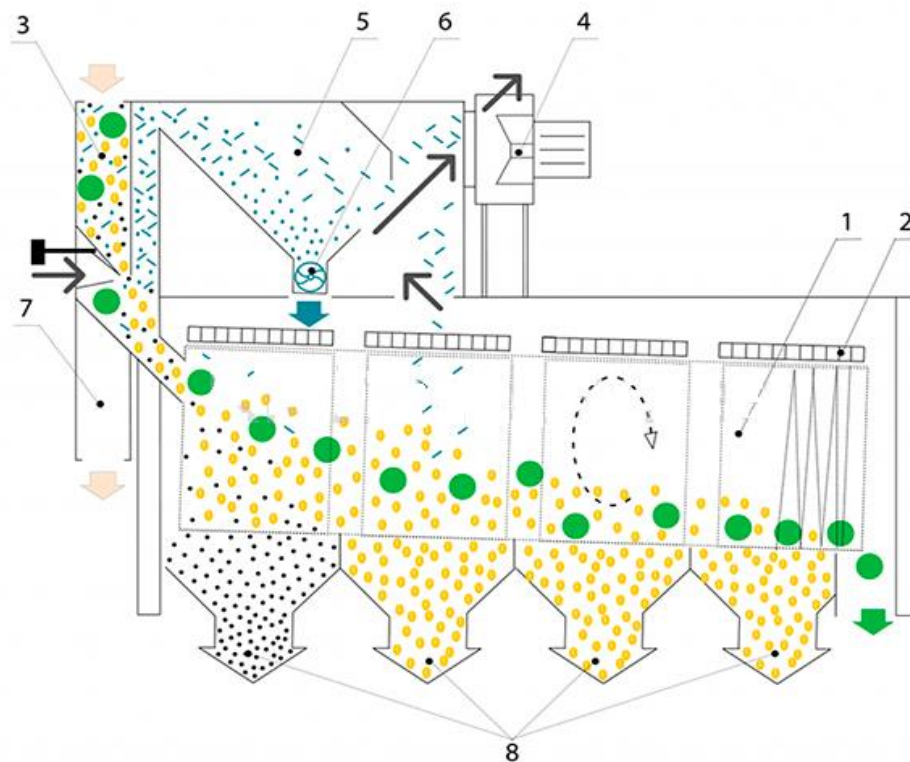


Рис. 1.2 Схема технологічного процесу барабанного сепаратора:

1-барабан; 2 -очищувач решіт; 3-пневмосепаруючий канал; 4-вентилятор; 5 -пилоосадова камера; 6-розвантажувальний пристрій легких домішок; 7-відвідний патрубок; 8- приймач продуктового розподілу.

Повітроочисні сепаратори належать до простих зерноочисних машин, які здійснюють очищення зернового вороху виключно за рахунок дії повітряного потоку, без використання сит або інших механічних робочих органів. Основне їх призначення полягає у видаленні легких домішок, таких як пил, солома,

лушпиння та інші органічні частинки. До цієї групи обладнання відносяться пневмоколонки, які широко застосовуються для первинного очищення зерна безпосередньо після його збирання. Принцип їх роботи базується на пропусканні зернової суміші через вертикальний або похилий повітряний канал, у якому створюється спрямований повітряний потік. Незважаючи на простоту конструкції та експлуатації, повітроочисні машини не забезпечують повного очищення зерна, оскільки не здатні видаляти важкі або близькі за фізичними властивостями домішки. У зв'язку з цим вони, як правило, використовуються у складі комплексних зерноочисних ліній у поєднанні з ситовими та іншими сепараторами.

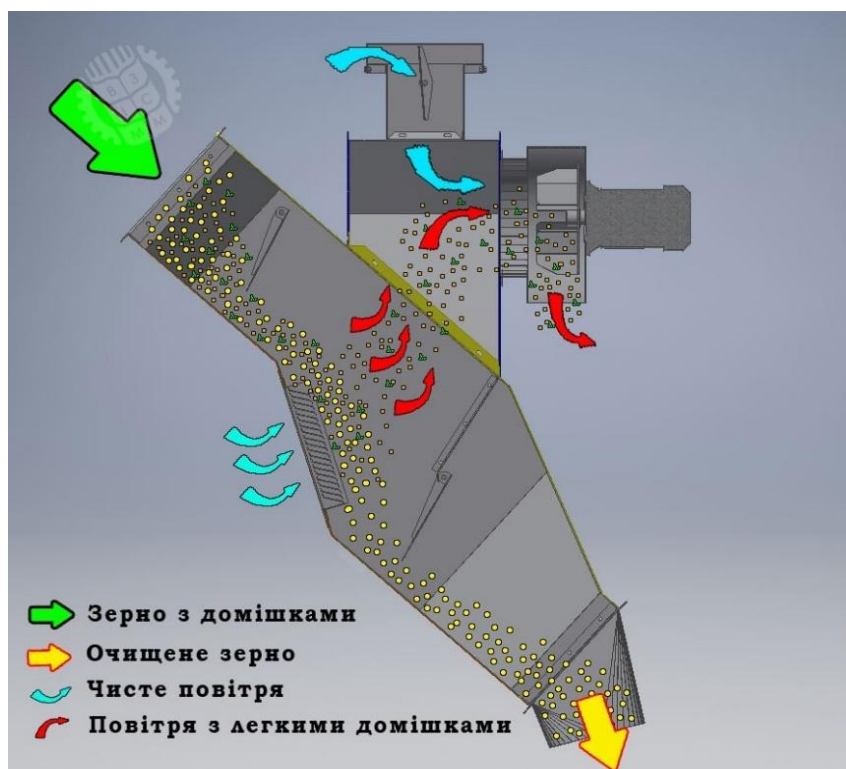


Рис. 1.2 Принцип роботи повітроочисного сепаратора

2. Повітряно-решітні машини призначені для попереднього очищення та часткового сортування зернового вороху після обмолоту комбайнами і молотарками. Їх застосування дозволяє ефективно видаляти як легкі, так і великі та дрібні домішки, що значно підвищує якість зерна та полегшує подальші технологічні операції. Вони розділяють зерна за розмірами за допомогою сит з

отворами різного діаметра. Видаляють великі домішки (солома, каміння) та дрібні домішки (пісок, пил). Часто працюють у вібраційному режимі. Основними робочими елементами таких машин є ситові поверхні та відцентрові вентилятори. За допомогою сит здійснюється відокремлення від зернової маси домішок різного розміру, зокрема великих (каміння, грудки ґрунту, солома) і дрібних (пісок, пил).

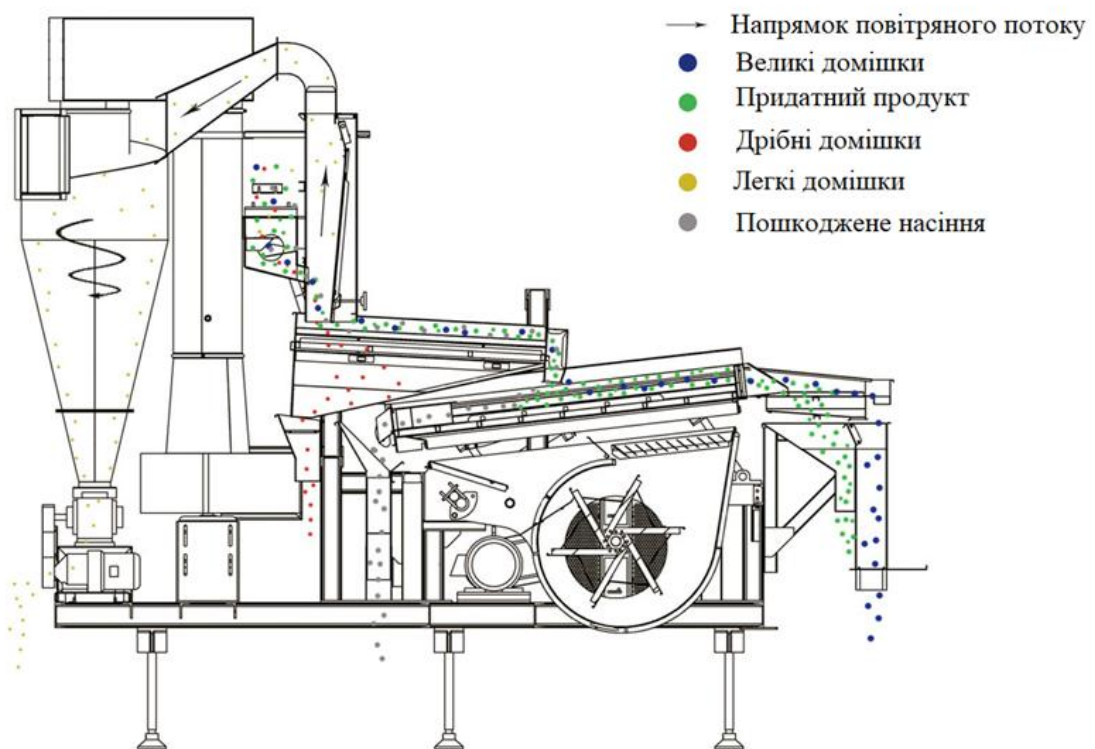


Рис. 1.3 Схема роботи повітряно-решітного сепаратора

Додатково, в процесі обробки повітряним потоком, що створюється вентиляторами, видаляються легкі домішки, такі як солома, пил та інші дрібнодисперсні частинки. Принцип роботи в поєднанні механічного (сита) та пневматичного (повітря) очищення. Основні складові частини повітряно-ситового сепаратора:

- завантажувальний пристрій (бункер);
- живильний пристрій;
- ситовий блок;
- аспіраційна система (вентилятор та повітряні канали);

- привод;

-вивантажувальні патрубки.

Аспіраційний сепаратор — це обладнання для очищення зерна та інших сипучих матеріалів від легких домішок (пил, лушпиння, солома) шляхом створення регульованого повітряного потоку. Він використовує принцип аеродинамічного поділу, ефективно розділяючи продукти за питомою вагою та швидкістю витання.

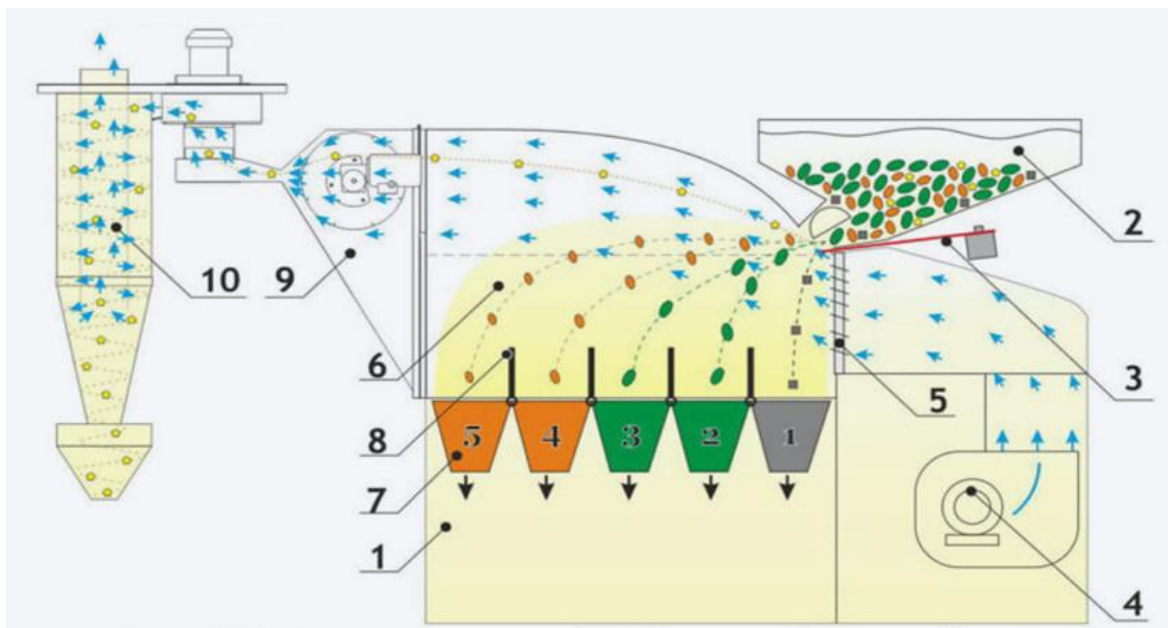


Рис. 1.4 Схема роботи аспіраційного сепаратора:

1-модуль базовий; 2-бункер-живильник; 3-вібралоток; 4-головний вентилятор; 5-струменевий генератор; 6-камера сепарації; 7-збірники фракцій; поворотні шторки; 9-блок аспірації; 10-циклон.

Зернова суміш падає через повітряний канал, де легкі частки підхоплюються вентилятором і виносяться, а важке очищене зерно виходить знизу. Основні конструктивні елементи аспіраційного сепаратора:

- приймальний пристрій;
- повітряний канал;
- відцентрований вентилятор;
- осаджувальна камера;

- системи регулювання повітряного потоку;
- привод;
- вивантажувальні патрубки.

Трієрні машини призначені для очищення та сортування насіння після вторинної обробки. Вони застосовуються для більш точного розділення зернової маси за довжиною частинок, що дозволяє видаляти домішки, які не були відокремлені на попередніх етапах очищення. Трієри, які видаляють із зернової суміші короткі домішки (кукіль, гречишка, бите зерно), називають куколевідбірниками, а ті що видаляють довгі домішки (вівсюг, овес) - вівсюговідбірниками. За конструкцією трієри поділяю на циліндричні і дискові.

Робочим органом циліндричного трієра є обертовий від приводу циліндр, на внутрішній стороні якого є осередки. Завантажене всередину циліндра зерно заповнює осередки. При невеликому куті повороту циліндра довгі зерна випадають з осередків і повертаються в загальну масу, а короткі при повороті циліндра на великий кут випадають з осередків в лоток і вивантажуються шнеком. До основних конструктивних елементів трієрної машини належать:

- завантажувальний пристрій;
- трієрний барабан (циліндр);
- привід;
- лотки або жолоби для відбору;
- корпус і рама;
- регулювальні пристрої.

Принцип роботи трієрної машини базується на різниці довжини зерен і домішок та їх взаємодії з комірчастою поверхнею обертового барабана.

Зернова суміш подається всередину обертового циліндра, внутрішня поверхня якого має спеціальні комірки (лунки). Під час короткі частинки (біті зерна, дрібні домішки) потрапляють у комірки, піднімаються вгору та випадають у спеціальний лоток; довгі зерна не затримуються в комірках і переміщуються вздовж барабана до вихідного отвору. У випадку використання спеціальних

режимів можуть також відокремлюватися довгі домішки (наприклад, у довгих трієрах).

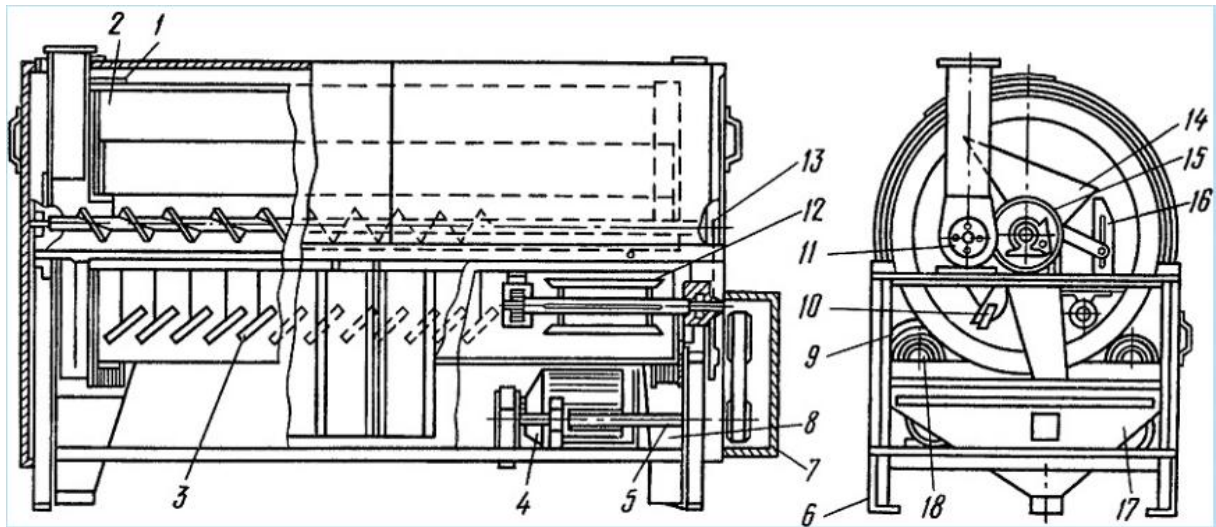


Рис. – 1.5 Циліндричний трієр:

1-бандаж; 2-обичайка; 3-плуг; 4-електродвигун; 5-вал; 6-станина; 7-огорожа; 8-збірник вівсюга; 9 – ролик; 10 – клапан; 11 – перегрібач; 12 – живильний шнек; 13 – ланцюгова передача; 14 – лоток; 15 – шнек для очищеного зерна; 16 – напрямна; 17 – збірник зерна; 18 – приводний вал.

До складу дискового трієра входять вал із закріпленим набором литих чавунних дисків, на поверхні яких розміщені осередки, рама, шнековий механізм, електропривод та металевий захисний кожух.

У процесі роботи дискового трієра зернова маса безперервним потоком надходить у приймальний пристрій із регульовальною заслінкою та заповнює простір між дисками. Під час обертання дисків зерно захоплюється їхньою поверхнею. Довгі частинки не утримуються в осередках і повертаються до основного потоку, тоді як короткі домішки затримуються в комірках, підіймаються і під дією сили тяжіння випадають у відповідний лоток та видаляються з машини. Спеціальні напрямні елементи (вигнуті спиці) забезпечують переміщення зерна від одного диска до іншого вздовж корпусу до вихідного каналу.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

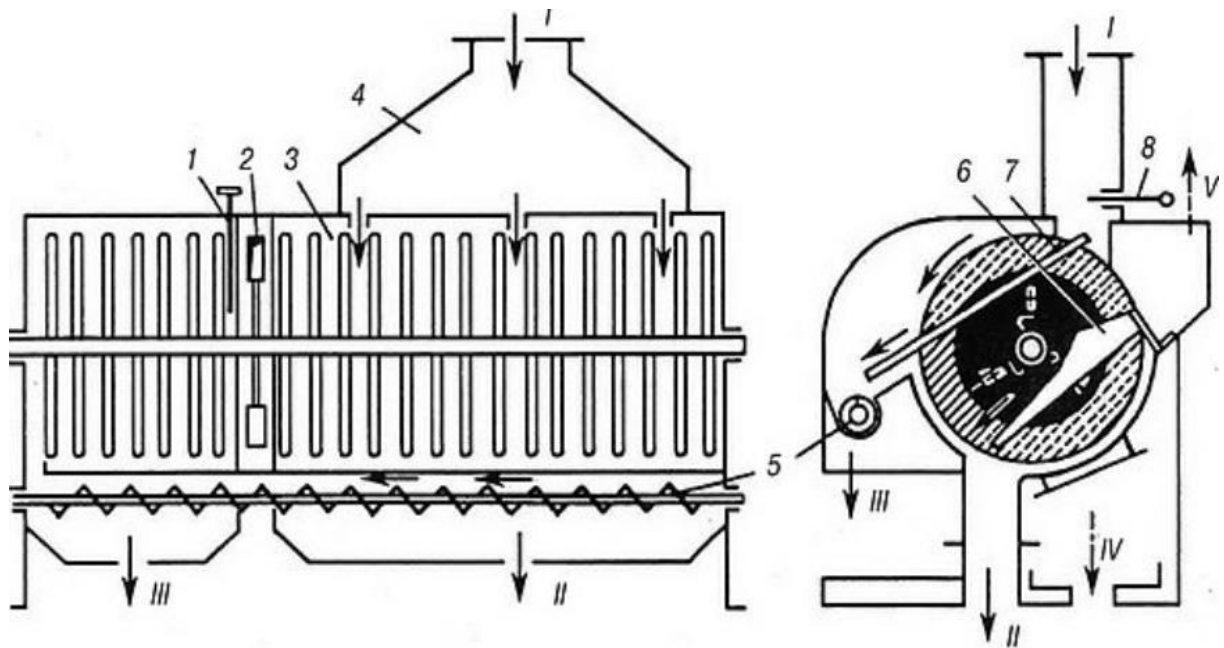


Рис. 1.6 – Дісковий трієр ЗТО-5М:

1-станина; 2-кронштейн; 3-вал; 4-електропривод; 5-диск, 6-накопичувальне відділення; 7-ковшове колесо; 8-лоток; 9, 10, 11 -патрубки; 12-кожух; 13- патрубок для аспіраційного повітроводу; 14-приймальний патрубок.

Магнітні сепаратори призначені для видалення металевих домішок із зернової маси, які не можуть бути видалені за допомогою ситових, повітряних або трієрних машин та можуть потрапляти в продукт під час збирання, транспортування або переробки. Такі домішки є особливо небезпечними, оскільки можуть пошкоджувати робочі органи машин і створювати аварійні ситуації в технологічних лініях. Для їх вилучення у передбачають встановлення магнітного захисту після бункерів із неочищеним зерном, а також перед сепараторами, трієрами, дробарками і на етапі контролю готової продукції. Електромагнітний сепаратор складається з живильного бункера, циліндричного барабана з немагнітного матеріалу (наприклад, алюмінію або латуні), нерухомого електромагніту, розташованого всередині барабана та створюючого магнітне поле, приводного механізму і корпусу. Під час роботи зерно з живильного бункера надходить на обертовий барабан. Металеві домішки під дією магнітного поля притягуються до його поверхні в зоні полюса магніту. При подальшому обертанні барабана, у зоні ослаблення магнітного поля, ці частинки

відокремлюються і потрапляють у приймальний відсік. Очищене зерно при цьому вільно сходить у відповідний бункер.

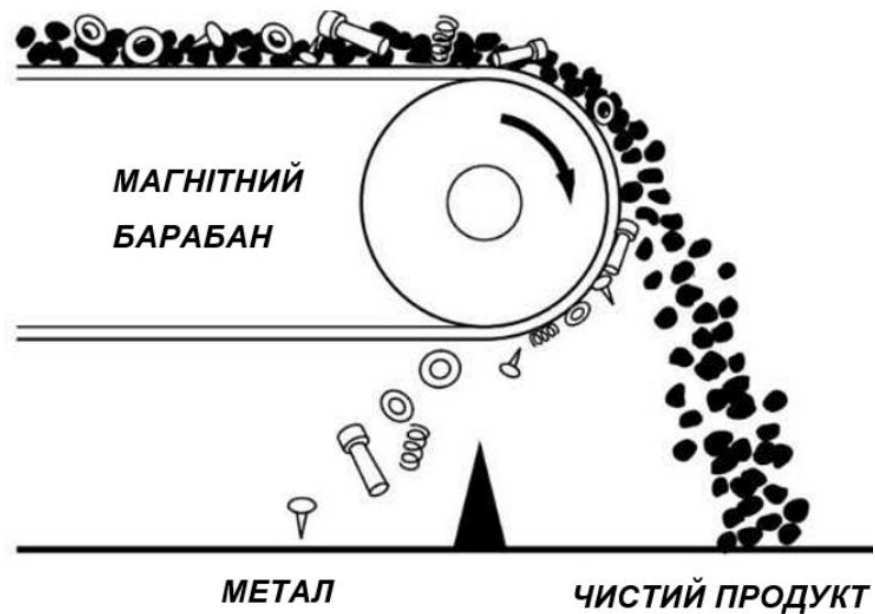


Рис. 1.6 Принцип роботи магнітного сепаратора

Сепаратори поділяють за різними ознаками. За виконанням вони бувають стаціонарні та мобільні, а також одинарні або комбіновані. За типом приводу розрізняють машини з інерційним, ексцентриковим, віброприводом чи кривошипно-шарнірним механізмом. За способом очищення сит застосовують приводні, інерційні або ударні пристрої. Вибір доцільного сепаратора також визначається його основними параметрами: розмірами підсівних сит (довжиною та шириною), кутом їх нахилу до горизонту, кутом коливань, кінематичними характеристиками та рівнем ефективності очищення.

1.4. Зерноочисна машина Р1-БЗО-М

Барабанні сепаратори типу БЗО призначені для видалення із зернової маси великих, грубих і соломистих домішок, що запобігає засміченню приймально-розподільчих вузлів наступного зерноочисного обладнання.

Крім того, модель Р1-БЗО-М може використовуватися як машина первинного очищення та калібрування зерна, забезпечуючи відокремлення домішок, що відрізняються від зерна за шириною та товщиною.



Рис. 1.7 Загальний вигляд зерноочисної машини Р1-БЗО-М

Сепаратори БЗО встановлюються у зерноочисних відділеннях елеваторів, на хлібоприймальних підприємствах, а також застосовуються в лініях післязбиральної обробки зерна.

Принцип роботи в режимі «первинне очищення» полягає у послідовному очищенні зерна від:

- легких домішок (полова, органічний і неорганічний пил);
- дрібних домішок (насіння бур'янів тощо);
- великих і соломистих домішок.

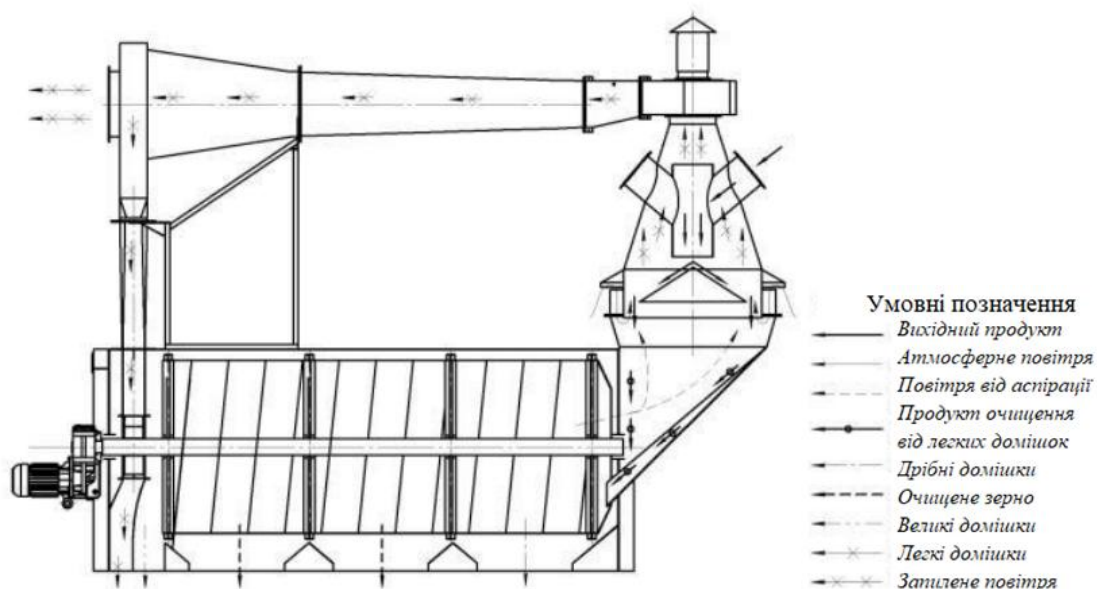


Рис. 1.8 Функціональна схема роботи зерноочисної машини Р1-БЗО-М

Конструкція сепаратора складається з таких основних вузлів: корпусу 1, барабана 2 зі змінними решетами 3, приймального пристрою 4, перехідника 5, циклона-осаджувача 6, щіток-очисників 7, мотор-редуктора 8. Корпус 1 розбірної конструкції виготовлений із листової сталі та являє собою закриту з усіх боків робочу камеру для розміщення барабана. Для кріплення машини до перекриття на стійках корпусу передбачені отвори.

Для заміни сит на барабані та візуального огляду під час технічного обслуговування в корпусі передбачені дверцята. Приймальний пристрій 4 є пневмосепаратором, що складається з корпусу 10 та вбудованого радіального вентилятора 11. Барабан 2 з горизонтальною віссю обертання закріплений у двох підшипникових опорах і є основним робочим органом машини. Він складається з трьох секцій зі змінними решетами.

Переміщення зерна і великих домішок уздовж барабана здійснюється шнеком 12. Привід здійснюється мотор-редуктором, закріпленим безпосередньо на робочому валу. Щітка-очисник 7 з еластичними прутками розташована зверху вздовж змінних решіт і закріплена в тримачі.

Вихідна зернова суміш через патрубок надходить у приймальний пристрій 4, де відбувається процес пневмосепарації, тобто відокремлення легких домішок

від основної зернової маси. Суміш повітря з легкими домішками надходить у циклон-осаджувач 6.

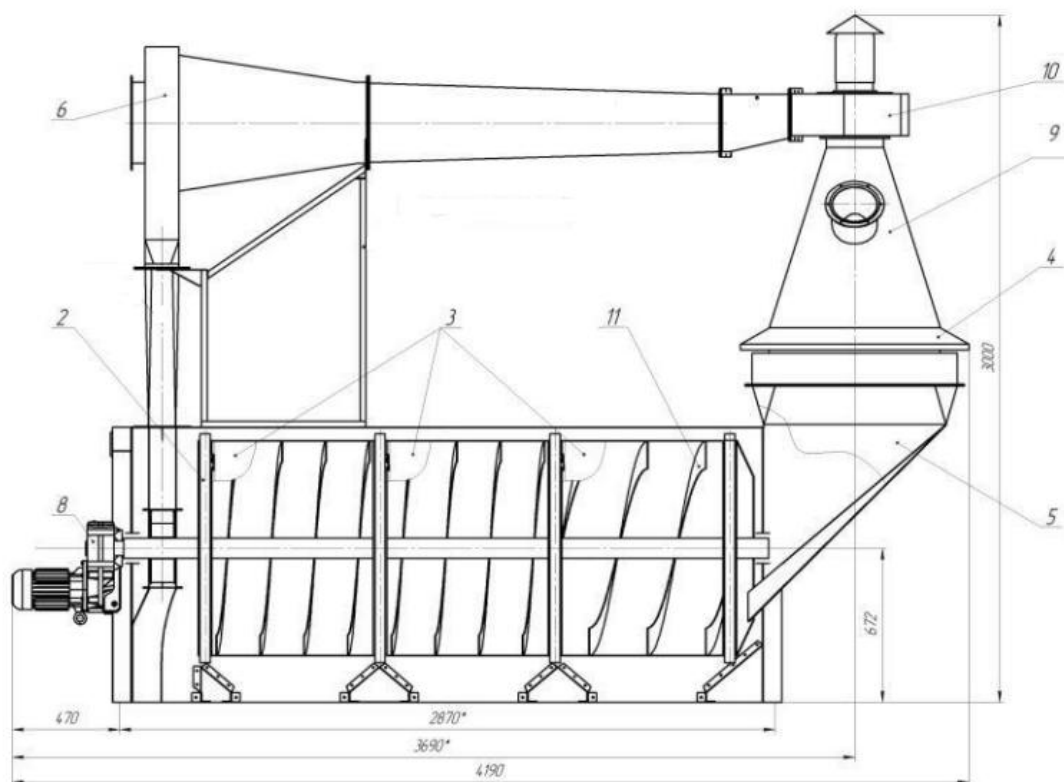


Рис. 1.9 Конструкція зерноочисної машини Р1-БЗО-М

1-корпус; 2-барабан; 3-змінні решета; 4-приймальний пристрій; 5-перехідник; 6-циклон; 7-щітки очисника; 8-мотор-редуктор; 9-корпус приймального пристрою; 10 — вентилятор радіальний; 11 — шнек барабана

Технічні характеристики зерноочисної машини Р1-БЗО-М

Аспірація здійснюється вентилятором приймального пристрою 4. Далі зернова маса по лотку перехідника 5 через отвір у торцевій стінці корпусу 1 потрапляє до барабана. У першій секції барабана (решета першої секції до комплекту поставки не входять, постачаються за окремим замовленням) відбувається відокремлення дрібних домішок, які виводяться через патрубок 13.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9

Арк

24

Таблиця 1.1 – технічні характеристики зерноочисної машини Р1-БЗО-М

Параметр	Значення
Продуктивність при попередньому очищенні	до 80 т/год
Продуктивність при первинному очищенні	до 20 т/год
Ефективність видалення крупних домішок	до 100 %
Діаметр решітного барабана	940 мм
Довжина решітного циліндра	2100 мм
Частота обертання решітного циліндра, діапазон	0–30,5 об/хв
Встановлена потужність електродвигунів	2,2+1,5 кВт
Витрата повітря аспіраційної системи	3000 м³/год
Тип приводу	мотор-редуктор
Кількість обслуговуючого персоналу	1 особа
Габаритні розміри без урахування циклону аспірації: довжина ширина висота	4200мм 1130мм 30мм
Маса машини	2000–2500 кг

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1. Вимоги до електроприводу зерноочисної машини Р1-БЗО-М

Електропривід зерноочисної машини повинен забезпечувати надійну, ефективну та безпечну роботу обладнання в умовах змінного навантаження та запиленого середовища, забезпечувати необхідну потужність для приводу барабана з урахуванням пускових моментів і можливих перевантажень. Повинен гарантувати стабільну роботу при змінній продуктивності та нерівномірній подачі зернової маси.

Для оптимізації процесу очищення залежно від типу зерна і рівня забрудненості повинна бути передбачена можливість плавного регулювання частоти обертання барабана. Електропривід має забезпечувати плавний розгін і гальмування, що зменшує динамічні навантаження на механічні вузли, знижує знос обладнання та запобігає аварійним режимам.

Під час обертання, за умови правильно зібраного та відрегульованого сепаратора, потужність електродвигуна переважно витрачається на виконання корисної роботи: піднімання матеріалу на певну висоту, після чого, сповзаючи, він переміщується до розвантажувального пристрою.

До втрат належать сили опору, зокрема тертя ковзання між поверхнями цапф і підшипниками опорних роликів, тертя кочення бандажів по опорних роликах, втрати в головному механізмі, а також тертя інших рухомих елементів корпусу барабана об поверхні деталей, що працюють із щільним приляганням. Визначаємо необхідну потужність приводу для обертання барабана за виразом:

$$P_{\text{пот}} = \frac{P_{\text{п}} + P_{\text{т}}}{\eta} \quad (2.1)$$

де $P_{\text{пот}}$ - необхідна потужність електродвигуна, Вт;

$P_{\text{п}}$ - потужність, що витрачається на переміщення та підйом матеріалу, Вт;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

P_T - потужність втрат на тертя в опорах і механізмах, Вт;

η - загальний коефіцієнт корисної дії приводу.

Потужність, що потрібна для переміщення сировини, визначаємо за формулою:

$$P_{\Pi} = \frac{1000 \cdot S_c \cdot L \cdot \gamma_m v_0}{102} \quad (2.2)$$

де S_c - площа кругового сегмента, м²;

L — довжина корпусу, м;

γ_m - об'ємна маса (насипна щільність) матеріалу, т/м³, виходячи з практичних даних $\gamma_m = 0,47$ т/м³;

v_0 — колова швидкість центра мас перерізу матеріалу, м/с.

Колова швидкість центра мас перерізу матеріалу дорівнює:

$$v_0 = \frac{\pi n}{30} \cdot R_{\text{св}} = \frac{3,14 \cdot 30,5}{30} 0,47 \cdot 0,8 = 1,2 \quad (2.3)$$

де n — частота обертання барабана, об/хв;

$R_{\text{св}}$ - радіус центра ваги матеріалу (тобто середня відстань від осі обертання до маси зерна в барабані). Зазвичай $R_{\text{св}} = 0,8 \cdot R_6$

Загальна формула площі кругового сегмента:

$$S_c = k_3 \cdot \pi R^2 = 0,3 \cdot 3,14 \cdot 0,22 = 0,208 \quad (2.4)$$

де k_3 — коефіцієнт заповнення барабана ($\approx 0,1-0,3$);

R^2 - радіус барабана, м.

$$P_{\Pi} = \frac{1000 \cdot F_m \cdot L \cdot \gamma_m \cdot v_0}{102} = \frac{1000 \cdot 0,208 \cdot 4,2 \cdot 0,47 \cdot 1,2}{102} = 4,83 \text{ кВт}$$

Потужність на подолання тертя в опорних роликах і підшипниках визначають через сумарний момент тертя:

$$P_T = M_{тр} \cdot \omega \quad (2.5)$$

де P_T - потужність втрат на тертя, Вт;

$M_{тр}$ - сумарний момент тертя, Н·м;

ω - кутова швидкість, рад/с.

Сумарний момент:

$$M_{тр} = M_{п} + M_p \quad (2.6)$$

де $M_{п}$ - момент тертя в підшипниках опорних роликів;

M_p - момент тертя кочення бандажа по роликах.

$$M_{п} = f_{п} \cdot N_{п} \cdot r_{п} \quad (2.7)$$

де $f_{п}$ - коефіцієнт тертя в підшипниках ($\approx 0,01-0,03$)

$N_{п}$ - навантаження на підшипники, Н;

$r_{п}$ - приведений радіус тертя в підшипниках, приймається за довідковими даними (для підшипників кочення подібних машин його значення знаходиться в межах 0,02–0,05 м.

$$N_{п} = \frac{(m_6 + \rho \cdot S_c \cdot L) \cdot g}{Z_{опор}} \quad (2.8)$$

де m_6 - маса барабана, кг;

ρ - насипна щільність ($\approx 700-800$ кг/м³);

S_c - площа сегмента, м²;

L - довжина барабана, м;

g – прискорення вільного падіння, 9,81м/с²;

$Z_{опор}$ - кількість підшипникових опор (зазвичай 2).

$$M_{п} = 0,03 \cdot \frac{(2500+800 \cdot 0,208 \cdot 4,2) \cdot 9,81}{2} \cdot 0,05 = 23,54$$

$$M_p = f_p \cdot N_p \cdot R \quad (2.9)$$

де f_p - коефіцієнт кочення ($\approx 0,002-0,005$);

N_p - навантаження на ролики, Н;

R - радіус барабана, м.

$$N_p = \frac{(m_6 + \rho \cdot S_c \cdot L) \cdot g}{z_p} \quad (2.10)$$

де $z_{\text{опор}}$ - кількість опорних роликів (зазвичай 4)

$$M_p = 0,005 \cdot \frac{(2500 + 800 \cdot 0,208 \cdot 4,2) \cdot 9,81}{4} \cdot 0,47 = 18,43$$

$$M_{\text{тр}} = 23,54 + 18,43 = 41,98$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

де ω — кутова швидкість барабана, рад/с;

n — частота обертання барабана, об/хв;

2π — один повний оберт у радіанах;

60 — перехід від хвилин до секунд.

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30,5}{60} = 3,19$$

$$P_{\text{т}} = 41,98 \cdot 3,19 = 133,9 \text{ Вт} = 0,13 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{дв}} = \frac{4,83 + 0,13}{0,8} = 4,96 \text{ кВт}$$

З урахуванням коефіцієнту запасу $k_{\text{зап}} = 1.1 - 1.3$ знаходимо

$$P_{\text{раз}} = P_{\text{дв}} \cdot k_3 \approx 6 \text{ кВт}$$

З довідника по електродвигунах вибираємо найближчий максимум. з АІР 132 S4 - загальнопромисловий асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором потужністю 7,5 кВт.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики електродвигуна AIP132S4

Параметр	Значення
Потужність $P_{\text{ном}}$	7,5 кВт
Частота обертання поля статора n_c	1500 об/хв
Швидкість обертання валу 1450 оборотів $n_{\text{ном}}$	1450 об/хв
Тип	Асинхронний
Ковзання $S_{\text{ном}}$	0,33 чи 3,3%
Напруга живлення Трифазна	220/380, 380/660 вольт
Номінальний струм $I_{\text{ном}}$	15,6 А
ККД	87,0 %
Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$)	0,84
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$	49,74 Нм
Співвідношення моментів $M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$	2,3
Співвідношення моментів, $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,3
Відношення струмів $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	7,0
Момент інерції ротору	0,0227 кг·м ²
Кріплення, фланець	IM1081
Діаметр валу	38 мм
Вага	67 кг
Передній/задній підшипник	6308 ZZ-C3
Рівень шуму	до 71 дБ



AIP	132	S4	У2	IM	3081
①	②	③	④	⑤	⑥

Розшифровка маркування
 AIP – тип електродвигуна
 132 – умовний габарит
 S – позначення довжини сердечника
 4 – число полюсів
 У2 – категорія розміщення
 IM 3081 – монтажне виконання
 фланець

Рис. 2.1 Зовнішній вигляд та умовні позначення двигуна AIP132S4

2.2 Вибір редуктора

Для приводу механізму обрано трифазний асинхронний електродвигун AIP132S4 потужністю 7,5 кВт з номінальною частотою обертання 1440–1500 об/хв.

Номінальний момент двигуна визначається за формулою:

$$M = \frac{9550P}{n} \quad (2.11)$$

де P – потужність двигуна, кВт;

n – частота обертання, об/хв.

Підставляємо параметри двигуна:

$$M = \frac{9550 \cdot 7.5}{1440} = 49,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отримане значення відповідає паспортним характеристикам двигуна.

Визначення необхідного передаточного числа. Для більшості зерноочисних механізмів потрібна невелика швидкість вихідного вала та підвищений крутний момент. Приймаємо передаточне число редуктора:

$$i = 30$$

Тоді частота обертання вихідного вала становитиме:

$$n_2 = \frac{n_1}{i} \quad (2.12)$$

$$n_2 = \frac{1440}{30} = 48 \text{ об/хв}$$

Що відповідає вимогам до роботи механізму.

Розрахунок вихідного крутного моменту. Враховуючи ККД черв'ячного редуктора

$$\eta = 0.85$$

Вихідний момент визначається:

$$M_2 = M_1 \cdot i \cdot \eta \quad (2.12)$$

$$M_2 = 49.7 \cdot 30 \cdot 0.85$$

$$M_2 = 1267 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірка вибору редуктора. Для редуктора NMRV-150 при передаточному числі $i = 30$ допустимий крутний момент становить близько 1274 Н·м, а допустима потужність електродвигуна — 7,5 кВт.

Умова працездатності виконується:

$$M_2 \leq M_{\text{доп}}$$

$$1267 \leq 1274 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для приводу з електродвигуном AIP132S4 потужністю 7,5 кВт та частотою обертання 1500 об/хв обрано черв'ячний одноступінчастий редуктор виробництва Італійської компанії Motovario серії NMRV-150 з передаточним числом $i = 30$. Вибір редуктора обумовлений такими факторами:

- забезпечення необхідного зниження швидкості з 1440 до 48 об/хв;
- збільшення крутного моменту до 1267 Н·м;
- відповідність допустимого моменту редуктора розрахунковому навантаженню;
- компактність конструкції та простота монтажу;

- плавність роботи та низький рівень шуму;
- можливість безпосереднього агрегування з двигуном AIP132S4.

Таким чином, редуктор NMRV-150 повністю забезпечує необхідні кінематичні та силові параметри привода і має достатній запас міцності для надійної тривалої експлуатації.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики мотор-редуктора NMRV-150

$n_{\text{ном}}$ двигуна, об/хв	Передатне число	$n_{\text{вих}}$, об/хв	$P_{\text{ном}}$, кВт	$M_{\text{ном}}$, Нм	η	Сервіс- фактор
1500	Від 7.5 до 100	Від 9 до 373	Від 1.5 до 11	Від 253 до 951	0.6-0.9	Від .089 до 3.4



Рис. 2.2 Зовняшний вигляд редуктора NMRV 150

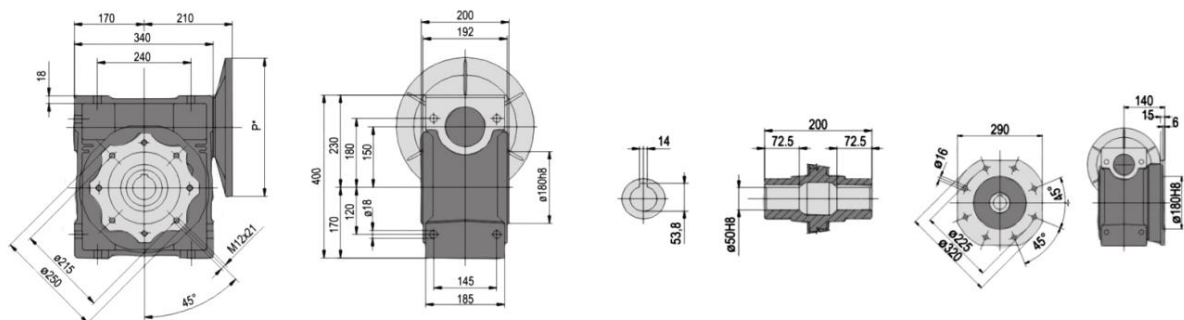


Рис. 2.3 Габаритні розміри редуктора NMRV 150

2.2 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода

Вихідні каталожні дані асинхронного двигуна АИР 132 S4

Потужність:

$$P_{\text{дв}} = 7,5 \text{ кВт}$$

Номинальна напруга:

$$U_{1\text{лн}} = 380 \text{ В}$$

Динамічний момент інерції двигуна

$$J_{\text{дв}} = 0.0227 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Частота напруги живлення

$$f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$$

Синхронна частота обертання

$$n_0 = 1500 \text{ об/хв}$$

Номинальні оберти двигуна

$$n_1 = 1450 \text{ об/хв}$$

Відносний пусковий момент

$$M_{\text{п}} = 2,3$$

Відносний критичний момент

$$M_{\text{к}} = 2,3$$

Відносний пусковий струм

$$k_i = 7$$

$$\cos \varphi = 0,84$$

$$\sin \varphi = \sin(a \cos(\cos \varphi)) = 0,54259 \quad (2.13)$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = 0,87$$

Номинальний струм двигуна

$$I_{\text{ном}} = 15.6 \text{ А}$$

Часткове навантаження

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		34

$$\begin{aligned}
 p' &= 0,80 \\
 \beta &= 1,5 \\
 \cos \varphi_{p'} &= 0,99 \cdot \cos \varphi = 0,8316 \\
 \eta_{p'} &= 0,86
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

2.3 Розрахунок механічної характеристики двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 750}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \tag{2.15}$$

Номінальна кутова частота обертання

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 730}{30} = 151,84 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \tag{2.16}$$

Номінальне ковзання

$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0} = \frac{1500 - 1450}{3000} \cdot 100\% = 0,0333 \tag{2.17}$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{7500}{151,84} = 49.394 \text{ Н} \cdot \text{м} \tag{2.18}$$

Номінальні фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В} \tag{2.19}$$

$$I_{1\text{фн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{7500}{3 \cdot 219,393 \cdot 0.87 \cdot 0.88} = 15,593 \text{ А} \tag{2.20}$$

$$I_{1\text{лн}} = I_{1\text{фн}} = 15.593 \text{ А}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,8 \cdot 7500}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,8316 \cdot 0,86} = 12,747 \text{ A} \quad (2.21)$$

Критичне ковзання

$$S_K = S_H \frac{[m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)]}]}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)} =$$

$$0,02667 \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,0333 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,0333 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)} = 0,1687 \quad (2.22)$$

$$S_K = 0,1687$$

Струм холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\text{фн}} \right]^2}{1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{12,747^2 - \left[\frac{0,80 \cdot (1 - 0,0333)}{1 - 0,80 \cdot 0,0333} \cdot 15,593 \right]^2}{1 - \left[\frac{0,80 \cdot (1 - 0,0333)}{1 - 0,80 \cdot 0,0333} \right]^2}} = 4,9403 \text{ A} \quad (2.23)$$

де чисельник

$$I_{1p'}^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\text{фн}} \right]^2 \rightarrow 12,747^2 - \left[\frac{0,80 \cdot (1 - 0,0333)}{1 - 0,80 \cdot 0,0333} \cdot 15,593 \right]^2 =$$

$$8,999 \text{ A} \quad (2.24)$$

знаменник

$$1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2 = 1 - \left[\frac{0,80 \cdot (1 - 0,0333)}{1 - 0,80 \cdot 0,0333} \right]^2 = 0,36874 \quad (2.25)$$

2.4 Параметри схеми заміщення:

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{фн}}} \right) = 1 + \frac{4,9403}{2 \cdot 7,0 \cdot 15,593} = 1,0226 \quad (2.26)$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot M_K \cdot P_{\text{дв.н}} \cdot C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_K} \right)} = \frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot (1 - 0,0333)}{2 \cdot 2,3 \cdot 7500 \cdot 1,0226 \cdot \left(1,5 + \frac{1}{0,1687} \right)} = 0,52091 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		36

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0.52091 \cdot 1.5 \cdot 1.0226 = 0.79902 \text{ Ом} \quad (2.28)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_K}\right)^2 - \beta^2} = \left(\frac{1}{0.1687}\right)^2 - 1.5^2 = 5.7348 \quad (2.29)$$

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0.52091 \cdot 5.7348 \cdot 1.0226 = 3.0548 \text{ Ом} \quad (2.30)$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі

$$X_{1\sigma} = 0.42 \cdot X_{KH} = 0.42 \cdot 3.0548 = 1.283 \text{ Ом} \quad (2.31)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1.283}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.0040839 \text{ Гн} \quad (2.32)$$

Приведений до обмотки статора індуктивний опір розсіяння обмотки ротора в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} = 0.58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{3.0548}{1.0226} = 1.7326 \text{ Ом} \quad (2.33)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1.7326}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.005515 \text{ Гн} \quad (2.34)$$

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

$$= \sqrt{(219,393 \cdot 0,84 - 15.593 \cdot 0.79902)^2 + (219,393 \cdot 0.54259 - 15.593 \cdot 1.283)^2} = 198,33 \quad (2.35)$$

Індуктивний опір контура намагнічування

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{198.33}{4.9403} = 40,145 \text{ Ом} \quad (2.36)$$

Результуюча індуктивність

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{40.145}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,12779 \text{ Гн} \quad (2.37)$$

Результуюче потокозчеплення

$$\psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 4.9403 \cdot 0.12779 = 0.89282 \quad (2.38)$$

Результуюча індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.0040839 + 0.12779 = 0,131874 \text{ Гн}$$

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0.005515 + 0.12779 = 0,133305 \text{ Гн}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0.12779^2}{0.1318739 + 0.13330499999999998} = 0,938418$$

$$X_{1\sigma} = 1,283$$

$$L_m = 0,12779$$

$$L_{1\sigma} = 0,004084$$

$$R_1 = 0,79902$$

$$L'_{2\sigma} = 0,005515$$

$$X_{KH} = 3,0548$$

$$X_{\mu} = 40,145$$

$$R'_2 = 0,520910$$

$$\eta = \frac{87}{100} = 0,87$$

$$n_{\text{ном}} = 1450 \text{ об/хв}$$

Таблиця 2.3 - Параметри для моделювання

R_1	R'_2	$x_{1\sigma}$	$L_{1\sigma}$	$L'_{2\sigma}$	L_m	x_μ	$x_{\text{кн}}$
0.79902	0.520910	1.283	0.004084	0.005515	0.12779	40.145	3.0548

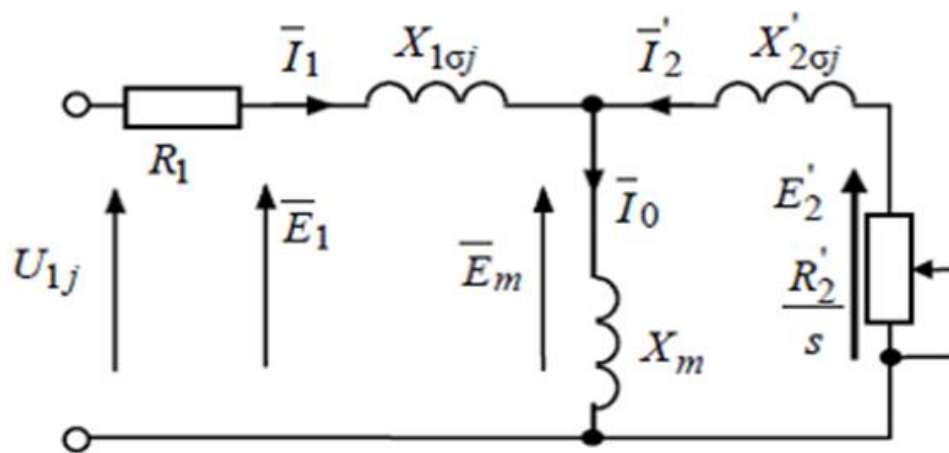


Рис. 2.4 Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Номінальний електромагнітний момент на валу двигуна

$$M' = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{н}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_{\text{н}} \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_{\text{н}} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot 0.520910}{157.08 \cdot 0.03333 \left[3.0548^2 + \left(0.79902 + \frac{0.52091}{0.0333} \right)^2 + \left(\frac{0.79902 \cdot 0.520910}{0.0333 \cdot 40.145} \right)^2 \right]} = 51,439 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.39)$$

$$M'' = \left(\frac{3}{2} \right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}} \right) \cdot \psi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\phi\text{н}}^2 - I_0^2} \rightarrow M'' = 107,409 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.40)$$

2.4.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаємо діапазон та крок зміни ковзання

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

$$S = 0.00001, 0.01..1$$

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{H}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_{\text{H}} \left[X_{\text{KH}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{H}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_{\text{H}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \quad (2.41)$$

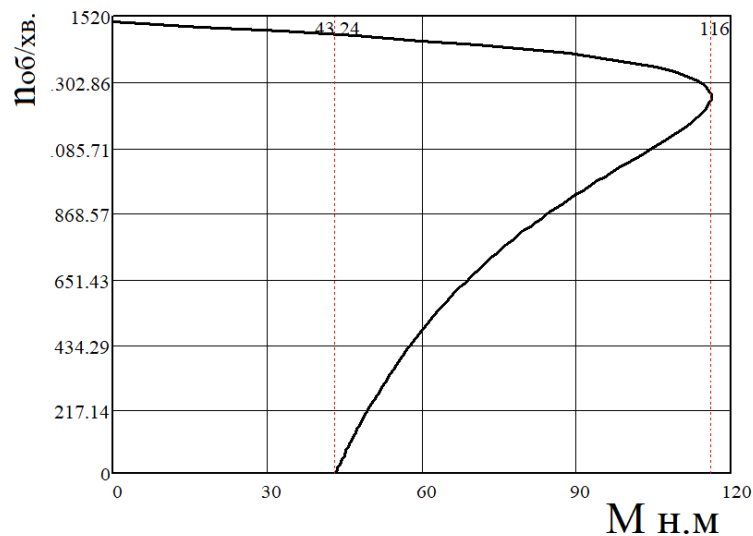


Рис. 2.3 Природна механічна характеристика двигуна

Порівняння розрахункових і паспортних даних двигуна

$$\omega_{\text{H}} = 151,84 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$M_{\text{HП}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{H}}} = \frac{7500}{151,84} = 49,394 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.42)$$

$$M_{\text{к.пас}} = m_k \cdot M_{\text{HП}} = 2.3 \cdot 49.394 = 113,606 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.43)$$

$$M_{\text{п.пас}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{HП}} = 2.3 \cdot 49.394 \text{ Н} \cdot \text{м} = 113,606 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.44)$$

$$M_{\text{K}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{H}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R_1'^2 + X_{\text{KH}}^2)}} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot 157.08 \cdot 1.0226 \cdot (0.79902 + \sqrt{(0.79902^2 + 3.0548^2)})} = 113,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.45)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$A = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0.79902}{0.79902} = 1,5339 \quad (2.46)$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K}{S_H} + \frac{S_H}{S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 113.6 \cdot (1 + 1.5339 \cdot 0.1687)}{\frac{0.1687}{0.0333} + \frac{0.0333}{0.1687} + 2 \cdot 1.5339 \cdot 0.1687} = 49,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.47)$$

$$S_{\Pi} = 1$$

$$M_{\text{ПУСК}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K}{S_{\Pi}} + \frac{S_{\Pi}}{S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 113.6 \cdot (1 + 1.5339 \cdot 0.1687)}{\frac{0.1687}{1} + \frac{1}{0.1687} + 2 \cdot 1.5339 \cdot 0.1687} = 43,241 \quad (2.48)$$

Розрахунок коефіцієнтів для рівняння навантажувальної компресорної характеристики

$$a = \frac{0.8 M_{\text{НП}}}{n_{\text{НОМ}}^2} \rightarrow \frac{0.8 \cdot 49.509}{1450^2} = 0,00001879 \quad (2.49)$$

$$c = 0,2 \cdot M_{\text{НП}} \rightarrow 0.2 \cdot 49.509 = 9,8788$$

Залежність моменту від швидкості для компресорного типу навантаження

$$M(n) = a \cdot n^2 + c \rightarrow 0.000018794387633769321 \cdot n^2 + 9.8788$$

Задаємо діапазон та крок зміни швидкості $n = 0,100 \dots 1520$

2.4.2 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна

Залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) \cdot (1 - s) \quad (2.50)$$

Механічний електромагнітний момент двигуна

$$M_{\text{ЕМ}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1\Phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \cdot R'_{2}}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) \cdot S \left[\left(X_{\text{KH}} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{2} \cdot f_{1H}}{S_H \cdot X_{\mu} \cdot f_1} \right)^2 \right]} \quad (2.51)$$

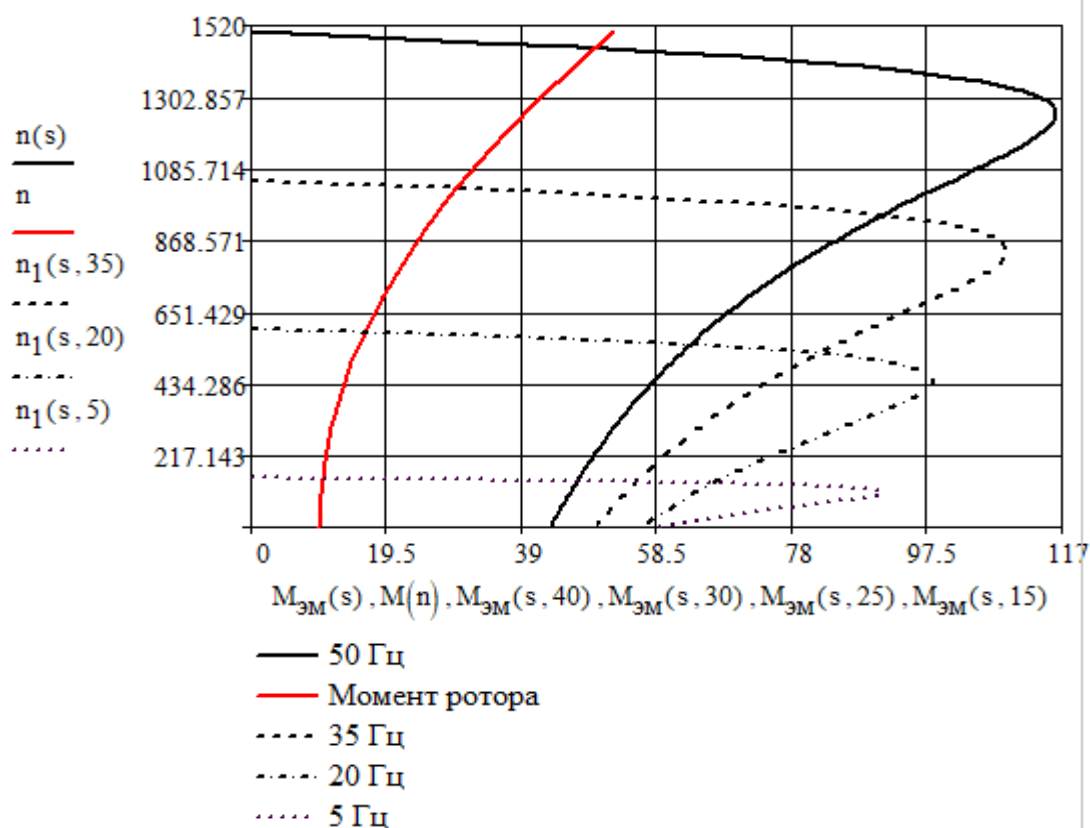


Рис. 2.4 Графіки механічних характеристик двигуна і компресора при регулюванні за скалярним законом

Побудова електромеханічної характеристики двигуна

$$S = 0.00001, 0.01..1$$

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$$

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} \quad (2.52)$$

$$\sin \varphi(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} \quad (2.53)$$

$$I_0 = \frac{49403}{10000} = 4,9403 \text{ A}$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi(s)} \quad (2.54)$$

$$I_{\text{НОМ}} = 15,6 \text{ A}$$

$$I_{\text{Н1}}(s) = I_{\text{НОМ}}$$

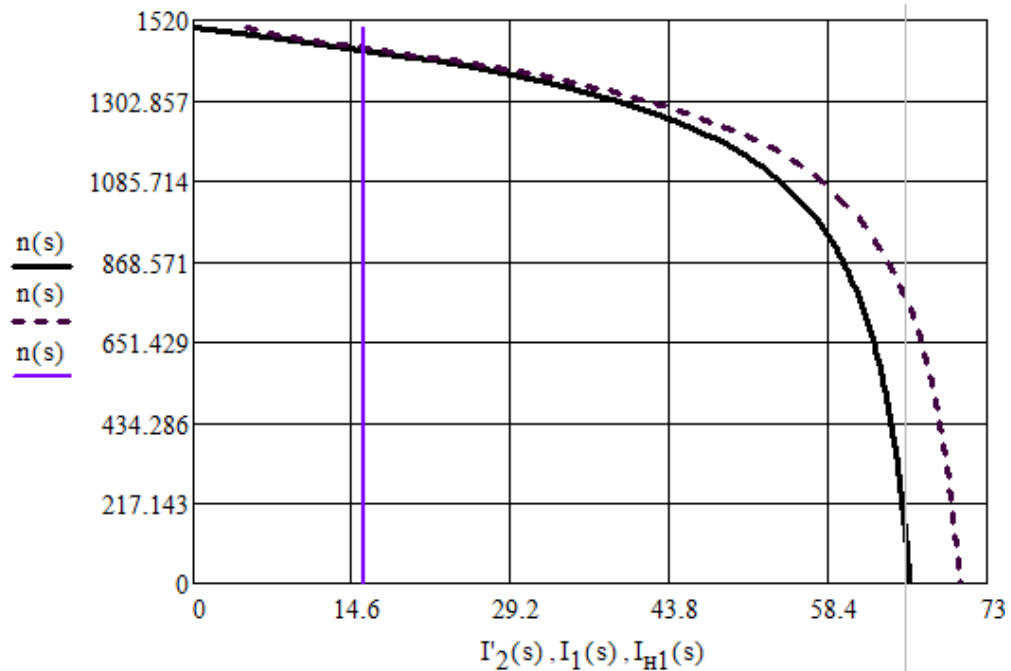


Рис. 2.5 Залежність струмів статора та частот обертання двигуна та механізму штовхача прокатного стану.

Розрахунок номінального струму статора

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2}} = \frac{219,393}{\sqrt{3.0548^2 + \left(0.79902 + \frac{0.52091}{0.0333}\right)^2}} = 13.13 \text{ A} \rightarrow \quad (2.55)$$

$$\sin \varphi(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2}} = \frac{3.0548}{\sqrt{1.9543^2 + \left(0.79902 + \frac{0.52091}{0.0333}\right)^2}} = 0,18282 \quad (2.56)$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi} \rightarrow$$

$$\sqrt{4.9403^2 + 13.13^2 + 2 \cdot 4.9403 \cdot 13.13 \cdot 0,18652}$$

$$I_1(s) = 14,85 \text{ A} \quad (2.47)$$

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АПАРАТУРИ КЕРУВАННЯ

3.1 Вибір перетворювача частоти

Традиційний спосіб керування асинхронним двигуном шляхом прямого пуску від мережі не забезпечує необхідної гнучкості роботи привода. Під час прямого пуску виникають значні пускові струми, які можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів, що призводить до підвищеного навантаження на електричну мережу, двигун, редуктор та елементи механічної передачі. Крім того, різкий розгін механізму супроводжується ударними навантаженнями, що негативно впливає на довговічність обладнання.

Для усунення зазначених недоліків до складу системи електропривода було вирішено включити перетворювач частоти. Використання частотного регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна шляхом зміни частоти живильної напруги, забезпечуючи плавний пуск, зупинку та регулювання швидкості у широкому діапазоні.

Відповідно до закону частотного керування:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (3.1)$$

де n — частота обертання ротора, об/хв;

f — частота живильної напруги, Гц;

p — кількість пар полюсів;

s — ковзання.

З формули видно, що зміна частоти живлення двигуна за допомогою перетворювача частоти безпосередньо змінює швидкість обертання електродвигуна, а отже і швидкість переміщення штовхача. Це і є основною причиною вибору системи частотного регулювання.

Таким чином, застосування перетворювача частоти дозволяє підвищити енергоефективність електропривода, покращити динамічні характеристики системи, знизити механічний знос обладнання та забезпечити більш надійну і

безпечну експлуатацію технологічного комплексу.

3.2 Вибір апаратури керування

Для реалізації поставлених вимог було обрано перетворювач частоти від компанії SIEMENS серії SINAMICS G120C. Даний пристрій призначений для керування асинхронними двигунами малої та середньої потужності та має вбудовані функції захисту двигуна, контролю навантаження, плавного пуску і гальмування.

Вибір SINAMICS G120C обумовлений наступними перевагами:

- відповідність номінальній потужності двигуна 7,5 кВт;
- можливість плавного регулювання швидкості привода в широкому діапазоні;
- зниження пускових струмів до рівня, близького до номінального;
- зменшення динамічних навантажень на редуктор та механічні вузли системи;
- підвищення точності позиціонування та керування механізмом;
- зменшення споживання електричної енергії при роботі на знижених швидкостях;
- наявність вбудованих функцій захисту від перевантаження, перегріву та аварійних режимів;
- компактність конструкції та простота інтеграції в систему автоматизації.

Модульна приводна система SIEMENS SINAMICS G120 складається з трьох функціональних блоків: модуля керування (CU), силового (PM) модуля і панелі оператора.

Керуючий модуль призначений для контролю та керівництва силовим модулем та підключеним двигуном. Спосіб регулювання – на вибір. Між CU та локальною та центральною системами керування, а також контролюючими пристроями підтримується зв'язок. Оптимальний тип модуля, що управляє, вибирається в залежності від кількості входів/виходів і необхідного набору додаткових функцій типу Safety Integrated і HVAC. Комунікаційні опції інтегровані, додаткове замовлення не потрібне.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						46
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Силовий модуль призначені для живлення електродвигунів. Надійне та гнучке функціонування електродвигуна забезпечує технологія IGBT, що має широтно-імпульсну модуляцію. Завдяки широкому переліку функцій протекції, силовий модуль та електродвигун надійно захищені.

Силові модулі вибирають, залежно від потужності двигуна, напруги мережі живлення, планованих циклів гальмування. СМ, що монтуються в електрошафу, мають рівень протекції IP20.



Рис. 3.1 Частотний перетворювач SIMATICS-G120 C

Частотний перетворювач SIMATICS-G120 C якій ми обрали, може бути як місцевим так і дистанційним пультом керування. Пульт місцевого управління, що розміщений на лицьовій панелі блоку, містить кнопки управління і настройки параметрів роботи, світлодіоди для відображення режимів роботи і багаторозрядний цифровий індикатор. Натискання будь-якої кнопки на пульті, якщо команда прийнята, буде відображатися зміною стану відповідних індикаторів.

Технічно передові можливості перетворювача частоти SINAMICS G120C:
- високі показники енергозбереження

- вектор керування бездатчиків
- зниження потоку з ECO U/f
- наявність у базовому виконанні інтегрованої опції безпечного вимкнення
- інтерфейси Profinet, Profibus, CAN, RTU Modbus, USS

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики SINAMICS G120C

Параметр	Значення
Напруга вхідна	3 AC 380 ... 480 V -20%+10 %
Напруга вхідна	3 AC 380 ... 480 V -20%+10 %
ext	24 V DC (18...30V DC)
Частота вхідна	47...63 Hz
Частота вихідна (Вектор)	0...550 Hz (U/f); 0...200 Hz
Потужність	3AC 380V 11kW
Номінальний струм (нормальний режим роботи)	26 A
Режим керування	U/f, FCC, Vector (encoder less)
Аналоговий вхід	1 AI :-10...+10 V, 0/4...20 mA, 10-bit дискретність. Може використовуватись як цифровий вхід
Аналоговий вихід	1 AO: 0...10 V; 0/4 ... 20 mA Дискретні входу 6 оптично розв'язаних DI
Дискретні виходу	1 релейний DC 30 V, 5 A 1 транзисторний DC 30 V, 0.5 A
РТС/КТУ датчик температури	1 датчик температури, РТС, КТУ

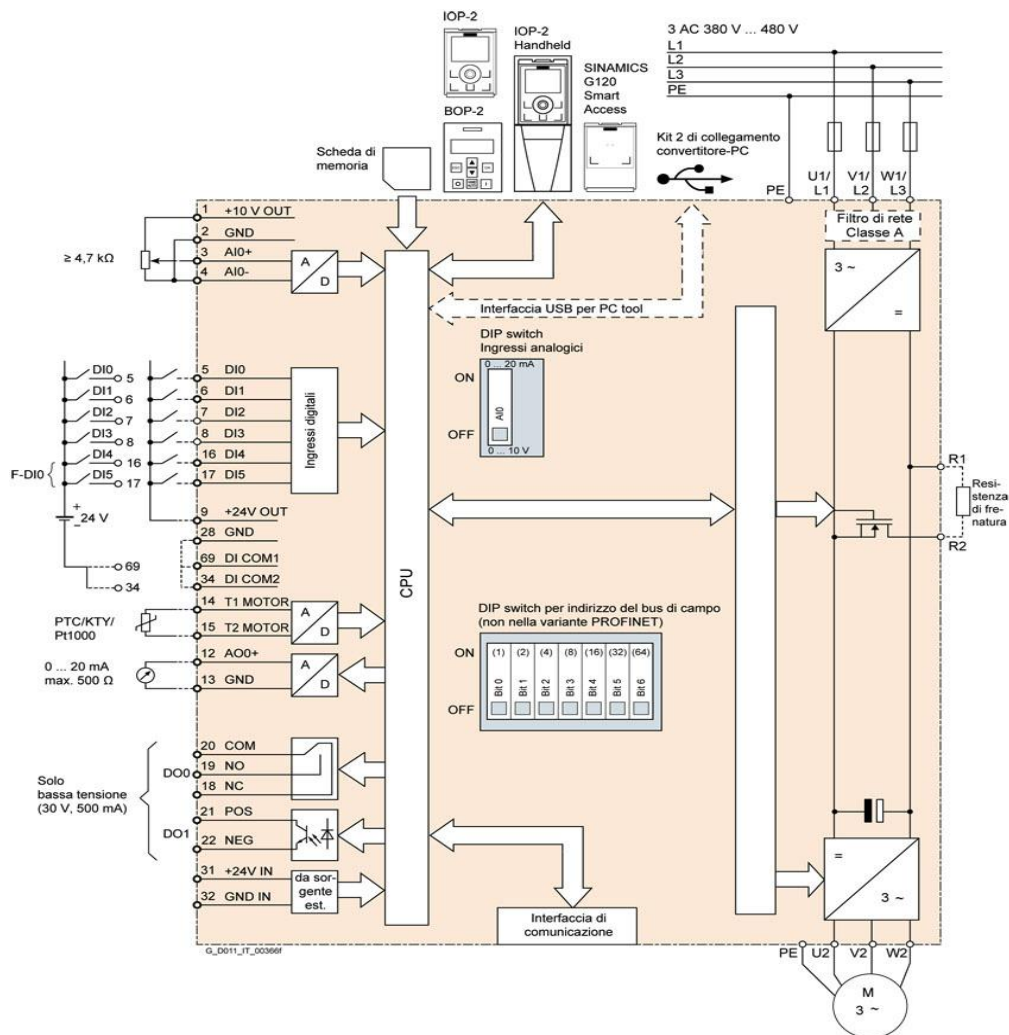


Рис. 3.2 Електрична схема підключення перетворювача частоти SINAMICS G120C

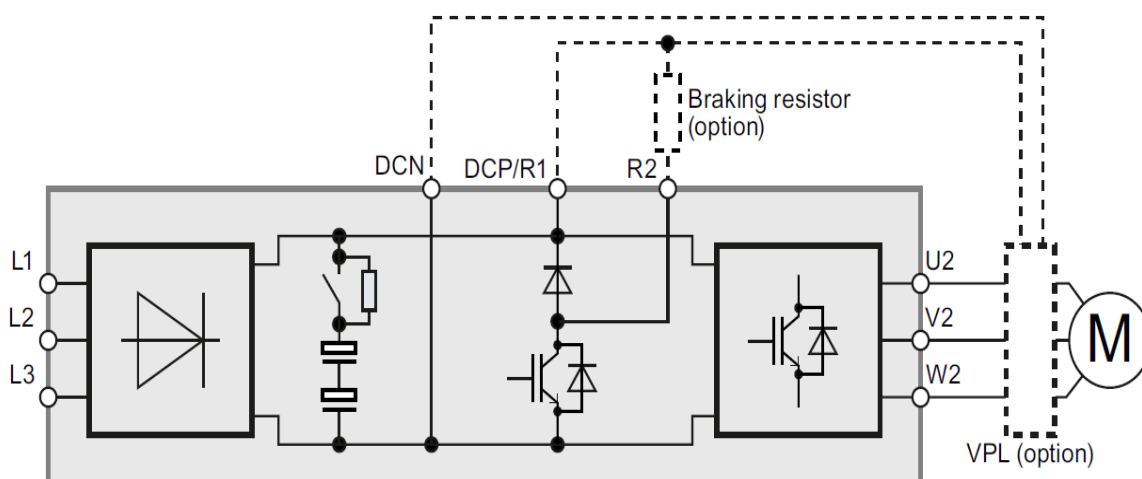


Рис. 3.3 Функціональна блок-схема частотно-регульованого електроприводу

3.3 Моделювання електроприводу зерноочисної машини в середовищі MATLAB Simulink без частотного регулювання

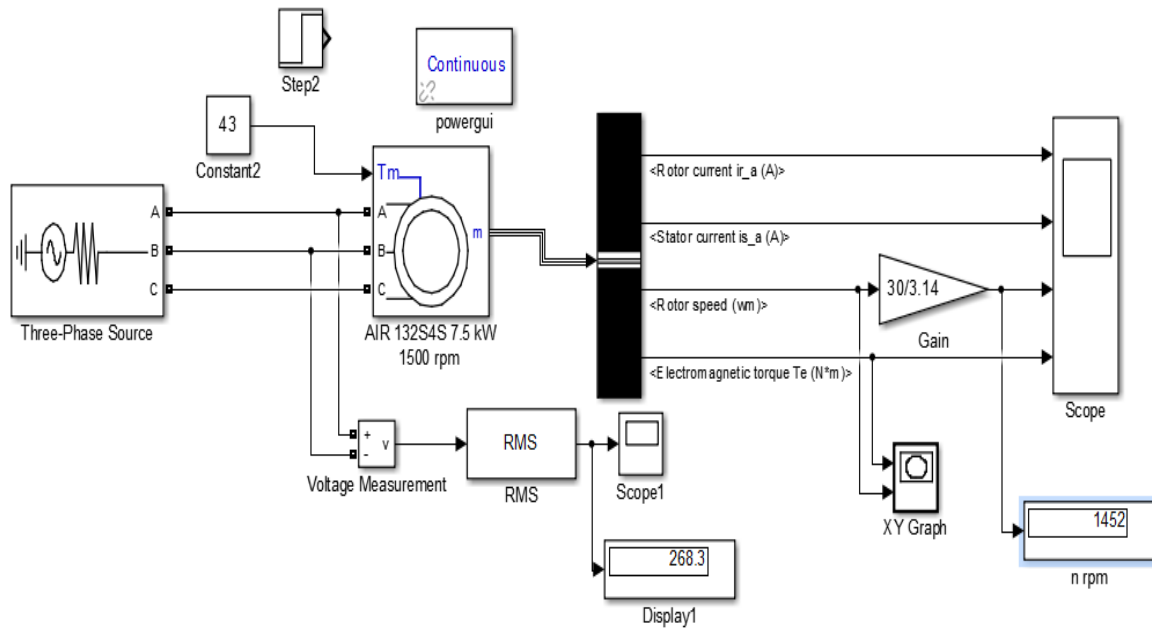


Рис. 3.4 Схема прямого пуску (без використання частотного перетворювача) електроприводу зерноочисної машини

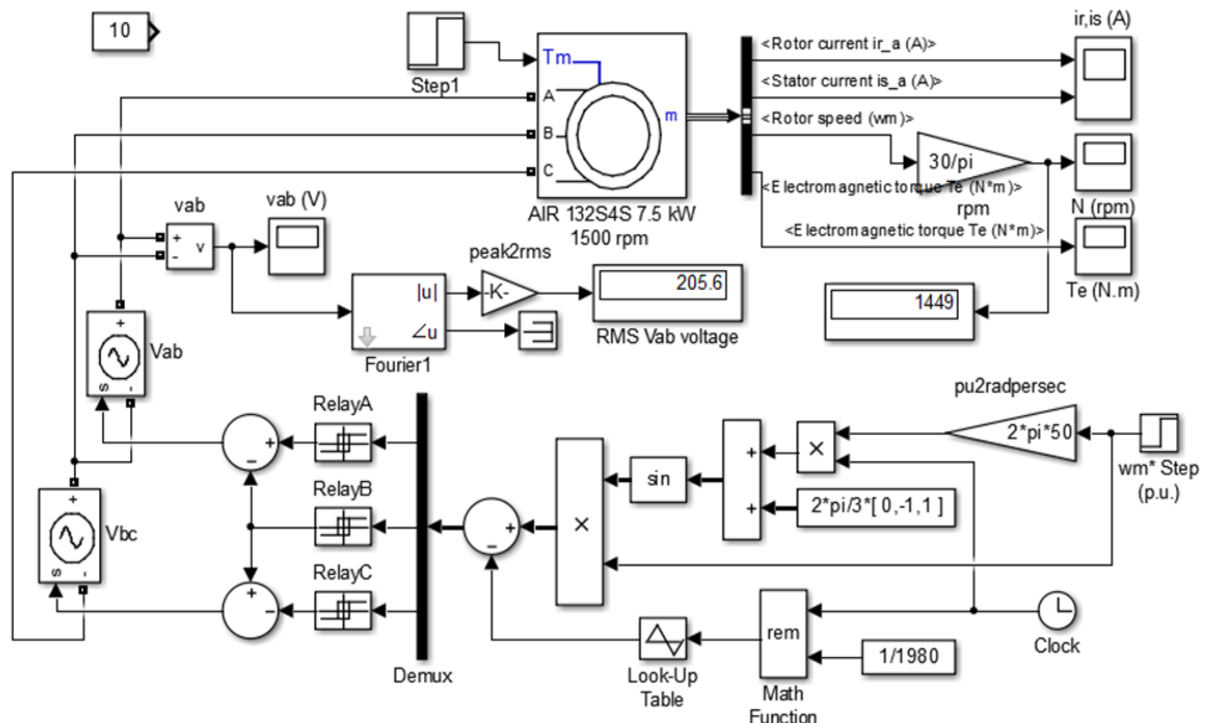


Рисунок 3.5 Схема імітаційної моделі зерноочисної машини зі використанням частотного перетворювача за векторним законом керування

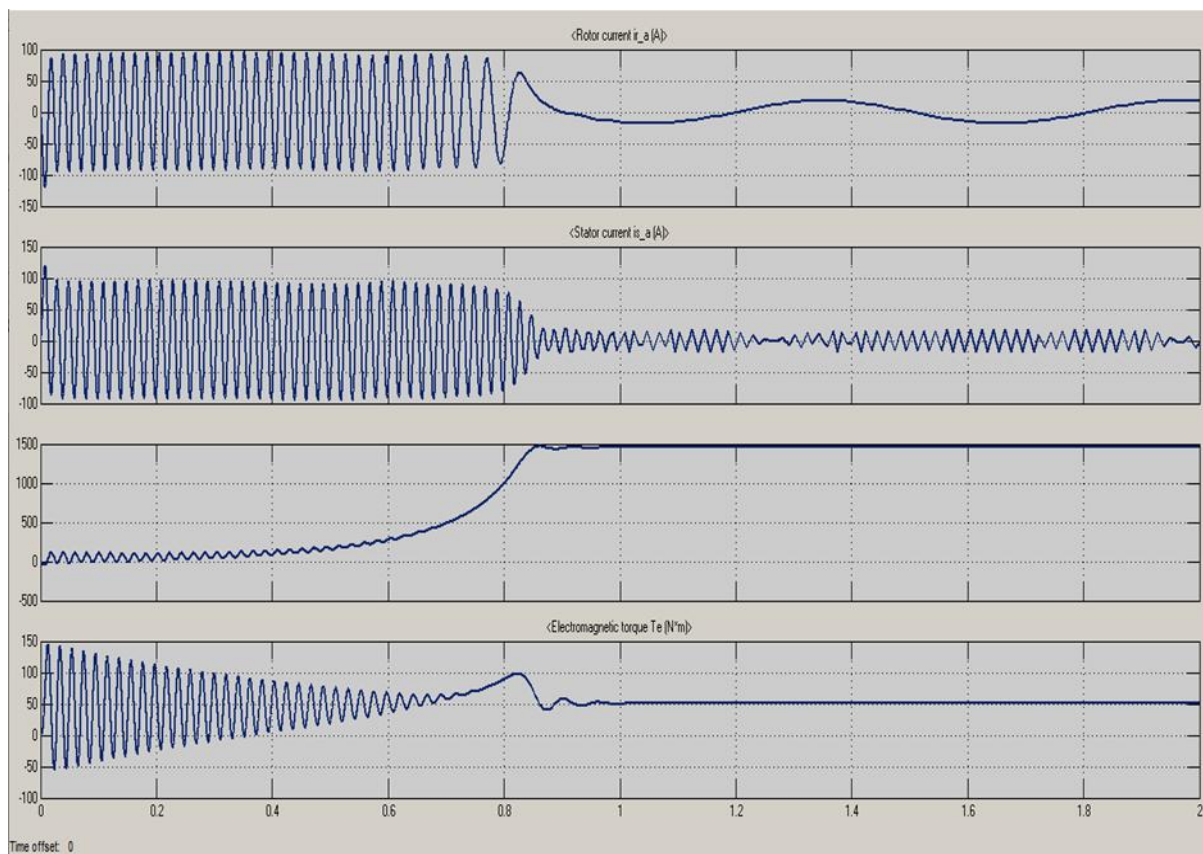


Рисунок 3.5 Графічні результати моделювання електроприводу зерноочисної машини у програмі MATLAB(Simulink), графіки зміни струмів ротора, статора, швидкості та електромагнітного моменту.

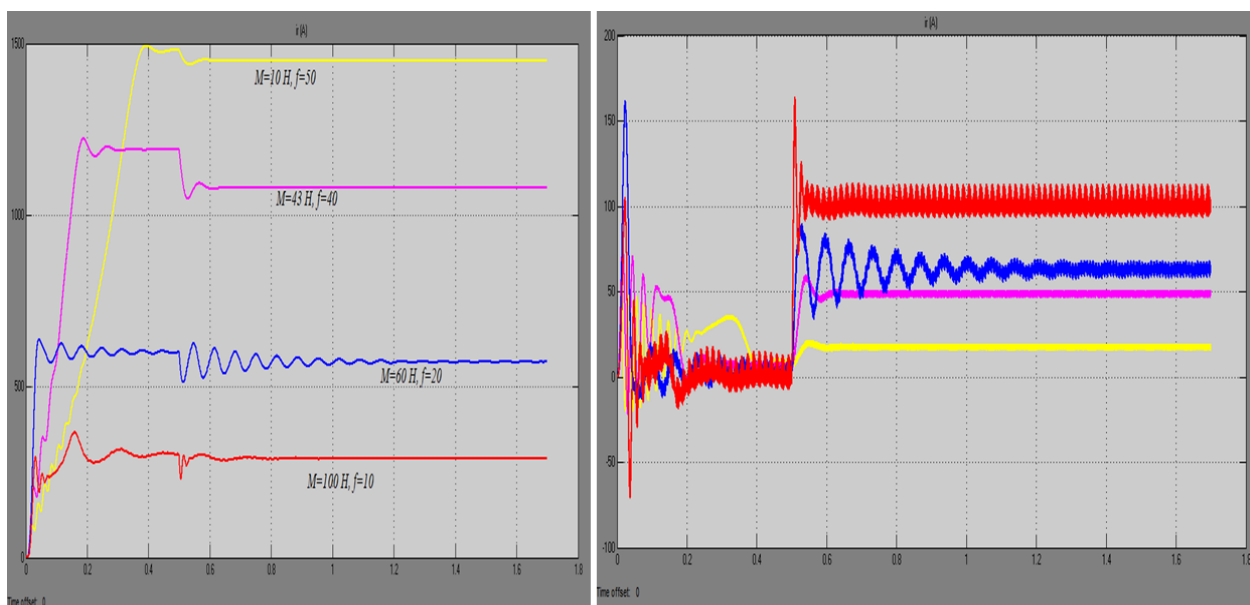


Рисунок 3.6 Графіки зміни швидкості та електромагнітного моменту при різних навантаженнях та частотах внаслідок частотного регулювання (за векторним законом)

На рисунку наведено перехідні процеси зміни швидкості обертання та струму асинхронного двигуна при різних значеннях навантажувального моменту та частоти живлення, реалізованих за допомогою частотного перетворювача з векторним законом керування.

Аналіз графіка швидкості показує, що частота обертання ротора безпосередньо залежить від заданої частоти живлення. При частоті 50 Гц двигун розвиває швидкість близько 1450 об/хв, що відповідає номінальному режиму роботи. При зниженні частоти до 40, 20 та 10 Гц швидкість обертання відповідно зменшується до приблизно 1150, 600 та 250 об/хв.

Під час пуску спостерігається плавний розгін двигуна без різких стрибків швидкості. Невеликі коливання в перехідному режимі швидко затухають, після чого система виходить на усталений режим роботи. Це свідчить про достатню стійкість системи автоматичного керування та правильне налаштування параметрів векторного регулятора.

З графіка струму видно, що в момент пуску виникає короткочасний пусковий струм, після чого його значення зменшується та стабілізується на рівні, необхідному для створення відповідного електромагнітного моменту. Зі збільшенням навантаження від 10 до 100 Н·м відбувається зростання усталеного значення струму, що відповідає збільшенню моменту опору на валу двигуна.

Отримані характеристики підтверджують ефективність використання частотного перетворювача SINAMICS G120C з векторним керуванням. Система забезпечує плавний пуск електропривода, стабільне підтримання заданої швидкості та автоматичне формування необхідного моменту залежно від навантаження.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ

4.1 Капітальні (інвестиційні) витрати

Для оцінки економічної доцільності запропонованої в дипломному проєкті модернізації необхідно визначити сукупні витрати, пов'язані з її впровадженням та подальшою експлуатацією. Розрахунок включає такі складові:

1. Капітальні вкладення.
2. Експлуатаційні витрати, зокрема витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт обладнання.

3. Витрати на електричну енергію, споживану модернізованою системою.

Капітальні вкладення являють собою інвестиції, спрямовані на придбання, встановлення та введення в експлуатацію нового обладнання, а також на оновлення основних виробничих фондів. До їх складу входять:

- витрати на придбання обладнання та комплектуючих;
- витрати на демонтаж існуючого обладнання;
- витрати на виконання монтажних робіт;
- витрати на проведення пусконаладжувальних робіт;
- транспортні та складські витрати.

На першому етапі виконується розрахунок вартості технічного обладнання, необхідного для реалізації запропонованої модернізації.

Асинхронний електродвигун АІР132S4– 11700 грн.

Редуктор NMRV-150 – 22800 грн.

Перетворювач частоти SINAMICS G120C– 25600 грн.

Величина проектних капіталовкладень ($K_{пр}$):

$$K_{пр} = K_{об} + K_{т} + K_{дм} + K_{н} + K_{пк} \quad (4.1)$$

де $K_{об}$ - сумарна вартість придбання обладнання, необхідного для реалізації проєкта;

$K_{т}$ – транспортні витрати;

$K_{дм}$ – витрати на демонтажні, монтажні роботи;

$K_{н}$ - витрати на налагоджувальні роботи;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						53
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$K_{пк}$ – інші одноразові вкладення на придбання комплектуючих елементів, становлять приблизно 10% від вартості обладнання.

$$K_{об} = 11700 + 22800 + 25600 = 60100 \text{ грн}$$

Витрати на транспортування, монтаж і наладку розраховуються за допомогою цін, прейскурантів, тарифів підприємств-перевізників та підприємств, які займаються монтажними і пусконаладжувальними роботами. Визначаємо ці витрати на рівні 20% від вартості обладнання.

$$K_{пр} = 60100 + 6010 + 12020 = \mathbf{78130} \text{ грн.}$$

4.2 Експлуатаційні витрати

Експлуатаційні витрати складаються з річних витрат на ремонт, обслуговування та витрати на електроенергію і розраховуються за формулою:

$$V_{ек} = V_p + V_{обс} + V_e \quad (4.2)$$

де V_p - витрати на поточний ремонт і обслуговування приводу штовхача, до яких входять річна вартість матеріалів, необхідних для ремонту і експлуатації;

$V_{обс}$ - заробітна плата за рік ремонтного і обслуговуючого персоналу;

V_e – вартість річних витрат на активну і реактивну електроенергію.

За відсутності конкретних даних витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування можуть визначатися методом укрупнених розрахунків у відсотках від капітальних витрат для варіантів, що порівнюються:

- для електричних машин (генераторів, двигунів, трансформаторів) – 2-3%;

- для електричних кабелів – 1,5-2%;

- для систем електропривода – 1-8%.

Після модернізації

$$V_p = 1562,6 + 1171,95 + 1562,6 = 4297,15 \text{ грн.}$$

До модернізації

$$B'_p = 2343,9 + 1562,6 + 625,4 = 10156,9 \text{ грн}$$

Економія річних витрат на поточний ремонт обладнання – **5860** грн.

Річні витрати на обслуговування обладнання

$$B_{\text{обс}} = P_{\text{обс}} \cdot \Phi_{\text{ср}} \cdot \frac{t_i}{t_p} \quad (4.3)$$

де $P_{\text{обс}}$ - кількість обслуговуючого персоналу, (осіб);

$\Phi_{\text{ср}}$ - середньорічний фонд заробітної плати одного працівника, (грн./рік);

t_i - середній час роботи одного працівника по обслуговуванню устаткування, 80-120 год/рік;

t_p - дійсний річний фонд часу одного працюючого, (годин); приймається в розмірі 1775 -1780 годин/рік.

За даними Держкомстату середня заробітна плата в Україні в 2026 році становила 30350 грн. на місяць, обов'язковий платіж ЕСВ 22%. Визначаємо річні витрати на заробітну плату одного працівника

$$(30350 + 6677) \cdot 12 = 444324 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на обслуговування після модернізації

$$B_{\text{обс}} = 1 \cdot 444324 \cdot \frac{80}{1780} = 19970 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування без модернізації

$$B'_{\text{обс}} = 1 \cdot 444324 \cdot \frac{120}{1780} = 29954 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування зменшилися на **9984** грн. на рік

4.3 Розрахунок річного споживання електроенергії приводом

Для оцінки економічної ефективності модернізації проведемо розрахунок річного споживання електроенергії для двох варіантів:

1. Базовий варіант – асинхронний двигун (АД) потужністю 7,5 кВт.
2. Модернізований варіант – асинхронний двигун потужністю 7,5 кВт з частотним перетворювачем (ПЧ) потужністю 11 кВт.

Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						55
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$W = \frac{(P_{\text{ном}} \cdot k_z \cdot h)}{\eta} \quad (4.4)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна;

$k_z = 0,8$ – коефіцієнт завантаження;

$h = 2496$ год/рік – річний фонд робочого часу;

$\eta = 0,89 - 0,96$ ККД двигуна.

Розрахунок для базового варіанта (без ПЧ)

Середня споживана потужність:

$$P_{\text{ср}} = \frac{7,5 \cdot 0,8}{0,85} = 7,06 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії:

$$W = 7,06 \cdot 2496 = 17618,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$C = W \cdot \Psi = 267806,12 \text{ грн/рік}$$

де $\Psi = 15,20$ грн/(кВт·год)

Розрахунок для модернізованого варіанта (АД + ПЧ). Застосування частотного перетворювача дозволяє знизити середню споживану потужність за рахунок регулювання швидкості привода. Після встановлення ПЧ приймаємо зменшення середньої потужності на 20 %.

Тоді:

$$P'_{\text{ср}} = \frac{5,39 \cdot 0,8}{0,96} = 4,49 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії:

$$\dot{W} = 4,49 \cdot 2496 = 11211,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$\dot{C} = \dot{W} \cdot \Psi = 11211,2 \cdot 15,20 = 170410,24 \text{ грн/рік}$$

Зменшення річного споживання електроенергії:

$$\Delta W = W - \dot{W}$$

$$\Delta W = 17618,82 - 11211,2 = 6407,62 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

Річна економія коштів:

$$E = C - \dot{C}$$

$$E = 267806,12 - 170410,24 = 97395,88 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, використання частотного перетворювача дозволяє знизити річне споживання електроенергії на 6407,62 кВт·год та отримати економічний ефект у розмірі 97395,88 тис. грн на рік.

4.4 Визначення терміну окупності

Проведячи порівняльний аналіз роботи штовхача метала до модернізації і після встановлення трифазного асинхронного двигуна і частотного перетворювача, економічна ефективність становить:

- споживання електроенергії зменшилося на 6407,62 кВт·год.
- збільшення ефективності роботи двигуна до 96%;
- збільшився термін служби механічних частин двигуна;
- суттєво знизилися витрати на капітальний ремонт.

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{E} = \frac{78130}{5860 + 9984 + 97395,88} \approx 0,7 \text{ року}$$

Отримані результати показують, що вкладені кошти в модернізацію електропривода повертаються протягом 0,7 року. Окрім економії коштів,

впровадження частотного перетворювача забезпечує зменшення зносу обладнання, що позитивно впливає на ресурс і стабільність роботи системи. Такий показник свідчить про економічну доцільність проєкту та підтверджує ефективність застосування запропонованого технічного рішення.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні вимоги охорони праці

Зерноочисні машини відносяться до обладнання, що працює в умовах підвищеної запиленості, що створює ризики:

- вибуху зернового пилу;
- пожежі;
- ураження електричним струмом;
- механічного травмування рухомими частинами.

Охорона праці організовується відповідно до:
НПАОП 15.0-1.01-17 (зернопереробна промисловість);
НПАОП 40.1-1.21-98 (електробезпека);
ДСТУ EN 1127-1 (вибухонебезпечні середовища);
ДСТУ 2293:2014.

До роботи допускаються особи:

- віком не молодше 18 років;
- які пройшли медичний огляд;
- пройшли навчання з охорони праці та інструктаж;
- мають посвідчення про допуск до робіт з обладнанням.

5.2 Вимоги перед початком роботи

Перед запуском зерноочисної машини необхідно:

- перевірити відсутність залишків зерна та пилу в робочих органах;
- перевірити справність огорожень;
- перевірити заземлення електродвигуна;
- перевірити роботу аспіраційної системи;
- переконатися у відсутності сторонніх предметів у машині.

Також перевіряється справність системи пиловидалення, оскільки накопичення пилу створює вибухонебезпечну концентрацію.

5.3 Вимоги під час роботи

Під час роботи забороняється:

- торкатися рухомих частин;
- виконувати ремонт при ввімкненому обладнанні;
- відкривати кришки та люки;
- торкатися рухомих частин;
- виконувати очищення при працюючій машині;
- перевищувати допустиме завантаження.

Коефіцієнт завантаження:

$$k_z = P_{\phi} / P_{\text{ном}}$$
$$0,7 \leq k_z \leq 1,0$$

де: k_z – коефіцієнт завантаження;

P_{ϕ} – фактична потужність;

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність.

5.4 Вимоги після закінчення роботи

Після завершення роботи необхідно:

- вимкнути електроживлення;
- очистити робоче місце;
- очистити робочу зону від пилу і зерна;
- перевірити відсутність тління пилу;
- провести сухе очищення (без відкритого води/вогню).
- перевірити відсутність перегріву обладнання;
- провести зовнішній огляд механізмів.

Температура поверхні обладнання не повинна перевищувати:

$$t \leq 60^{\circ}\text{C} \text{ (для доступних металевих частин)}$$

5.5 Освітлення

Освітлення робочих зон повинно відповідати ДБН В.2.5-28:2018.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Нормована освітленість для виробничих приміщень:

$E_n = 200\text{--}300$ лк (загальне освітлення)

Розрахунок освітлення:

$$E = \Phi / S$$

де E – освітленість, лк;

Φ – світловий потік, лм;

S – площа, м^2 .

Коефіцієнт природного освітлення:

$$K_p = (E_{\text{вн}} / E_{\text{зов}}) \cdot 100\%$$

де K_p - коефіцієнт природного освітлення

$E_{\text{вн}}$ – освітленість приміщення

$E_{\text{зов}}$ – зовнішня освітленість

5.6 Вентиляція та аспірація

Зерновий пил відноситься до вибухонебезпечних сумішей.

Умова вибуху:

$$C_{\text{пил}} \geq C_{\text{кр}}$$

де: $C_{\text{пил}}$ — концентрація пилу;

$C_{\text{кр}}$ — критична концентрація.

Для зернового пилу нижня межа вибуховості: 40–60 г/м³

Обов'язково повинна працювати аспірація:

$$L = G / (C_{\text{доп}} - C_{\text{вх}})$$

де L — необхідна витрата повітря, м³/год

G — кількість (масова витрата) шкідливої речовини, яка виділяється (наприклад, пил), г/год або мг/год

$C_{\text{доп}}$ — допустима концентрація шкідливої речовини в повітрі робочої зони, г/м³ або мг/м³

$C_{\text{вх}}$ — концентрація цієї речовини в припливному (вхідному) повітрі, г/м³ або мг/м³

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						60
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Рекомендована кратність повітрообміну 3-5 раз/год. Основні функції:

- видалення пилу;
- зниження вибухонебезпечної концентрації;
- покращення умов праці.

5.7 Шум і вібрація

Допустимий рівень шуму 80 дБ згідно ДСН 3.3.6.037-99.

Рівень шуму:

$$L = 10 \log (I / I_0)$$

де $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² (поріг чутності людини)

L — рівень звукового тиску (шуму), дБ

I — фактична інтенсивність звуку, Вт/м²

I_0 — опорна (порогова) інтенсивність звуку,

$I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² (поріг чутності людини)

Вібрація оцінюється за середньоквадратичним значенням:

$$a_{RMS} = \sqrt{(1/T \int a^2(t) dt)}$$

де a_{RMS} — середньоквадратичне (ефективне) значення прискорення вібрації, м/с²

T — інтервал часу виміру (період спостереження), с

$a^2(t)$ — квадрат миттєвого прискорення (використовується для обліку енергії коливань) t , м/с²

$(1/T)$ — усереднення за часом

Для виробничого обладнання допустима вібрація: 2,0 – 4,5 м/с² (залежно від частоти і типу робочого місця)

5.8 Електробезпека

Електробезпека забезпечується згідно: ПУЕ; НПАОП 40.1-1.21-98.

Основні заходи:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимкнення;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						61
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- ізоляція струмоведучих частин;
- використання ПЗВ (30 мА).

Опір ізоляції:

$$R_{iz} \geq 0,5 \text{ МОм}$$

Струм безпечний:

$$I \leq 10 \text{ мА (перемінний струм)}$$

Для забезпечення безпеки застосовуються такі заходи:

Усі металеві частини обладнання, що можуть опинитися під напругою, підлягають заземленню.

Опір заземлювального пристрою:

$$R_z \leq 4 \text{ Ом}$$

Час відключення при аварійному режимі: $t \leq 0,4 \text{ с}$

Номінальний струм спрацювання: 30 мА

Час спрацювання: до 0,03 с

Регулярно проводиться контроль мегомметром.

При використанні ПЧ необхідно враховувати:

- наявність постійної напруги в DC-шині навіть після вимкнення;
- високочастотні струми витоку;
- електромагнітні перешкоди.

У зерновому виробництві пил може накопичувати статичний заряд. Для зниження ризику застосовують:

- вирівнювання потенціалів металоконструкцій;
- заземлення повітроводів аспірації;
- антистатичні покриття.

Для ручного електроінструменту та освітлення: 12 В або 36 В (у вологих і пилових зонах)

5.9 Пожежна безпека

Пожежна безпека регламентується: ДБН В.1.1-7:2016; НАПБ А.01.001-2014. Категорія приміщення: В (горючі матеріали, обладнання).

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		62

Для запобігання та ліквідації загорянь у виробничому приміщенні застосовуються первинні засоби пожежогасіння відповідно до ДСТУ EN 3 та НАПБ.

До них належать:

1. Вогнегасники

- порошкові (ОП-5, ОП-10);
- вуглекислотні (ОУ-5).

Кількість вогнегасників:

$$N = S / 50$$

де S – площа приміщення, м².

У виробничих приміщеннях обов'язково встановлюється пожежний щит, який містить: лом; багор; сокиру; відро конусне; пожежний рукав (за необхідності).

Обов'язково встановлюється ящик з піском місткістю 0,5–1,0 м³. Пісок використовується для:

- засипання локальних загорянь;
- гасіння палаючих мастил;
- блокування поширення вогню.

Згідно з вимогами пожежної безпеки:

- засоби розміщуються у доступних місцях;
- відстань до будь-якої точки приміщення — не більше 20–25 м;
- щит встановлюється біля виходу або вздовж евакуаційного шляху.

Організаційні заходи:

- проведення інструктажів з пожежної безпеки;
- заборона відкритого вогню;
- регулярне очищення обладнання від пилу;
- контроль справності електрообладнання.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних систем електроприводу зерноочисного обладнання. Встановлено, що традиційні нерегульовані асинхронні приводи характеризуються підвищеним енергоспоживанням, значними пусковими струмами, ударними механічними навантаженнями та підвищеним зносом елементів привода.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність застосування частотного перетворювача як сучасного засобу керування асинхронним електродвигуном.

У роботі виконано математичне моделювання електромеханічних процесів електроприводу з урахуванням змінного навантаження та коефіцієнта завантаження. Розроблено розрахункові залежності енергоспоживання та втрат електроенергії.

Виконано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB (Simulink), яке дозволило дослідити перехідні процеси, оцінити динаміку системи та підтвердити стабільність роботи електроприводу при змінних навантаженнях. Встановлено, що впровадження частотного перетворювача забезпечує: зниження пускових струмів та динамічних навантажень на механічні вузли; підвищення плавності роботи технологічного обладнання; зменшення зносу редукторів, підшипників та робочих органів машини.

На основі техніко-економічного аналізу встановлено високу економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

Розглянуто питання охорони праці та довкілля, визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

У цілому виконана робота підтверджує технічну, економічну та експлуатаційну доцільність модернізації електроприводу зерноочисної машини та доцільність впровадження сучасних систем керування на базі частотного регулювання в умовах промислового виробництва.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
						64
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини: підручник / Д.Г. Войтюк, Л.В. Аніскевич, В.В. Іщенко та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка - Київ: Агроосвіта, 2015.- 679 с.
2. Бакум М.В. Теоретичні основи аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур / М.В. Бакум, М.М. Крекот. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – 198 с.
3. Бабенко А.П. Аеродинамічні основи сепарування зернових матеріалів / А.П. Бабенко, С.П. Москаленко. – Київ: Аграрна наука, 2017. – 256 с.
4. Васильковський М.І. Теоретичні основи процесів очищення зерна в пневмосепаруючих каналах / М.І. Васильковський, О.М. Васильковський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2018. – Вип. 45. – С. 14-21.
5. Зеленов А. Б. Теория электропривода. Часть I : учеб. пособие / А. Б. Зеленов. – Алчевск : ДонГТУ, 2005. – 394 с.
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б., Мацко Б. М., Пересада С. М., Теряев В. І., Бутний В. В., Місюренко В. О., Панченко Б. Я. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / За ред. Поповича М. Г., Лозинського О. Ю. – К.: Либідь, 2005. – 680с.
7. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М. В. Загірняк та ін. 2-ге вид., перероб. і доповн. Харків: Точка, 2017. 206 с.
8. Квітка С. О., Безменнікова Л. М., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2013. Вип. 3, т. 2. С. 164-171
9. Моржов В.І. Математичне моделювання систем та процесів. Лабораторний практикум К. НАУ, 2018. 46с.

10. Лебідь Р.Д. Математичні методи моделювання систем. Навчальний посібник. К. КМУЦА, 2020. 158с.

11. Гетьман О.О. Економіка підприємства: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / О.О.Гетьман, В.М. Шаповал – К.: Центр навч. літ., 2006 – 488с

12. Русаловський А. В. Правові та організаційні питання охорони праці: Навч. посіб. – 4-те вид., допов. і перероб. – К.: Університет “Україна”, 2009. – 295 с.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.9	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		66