

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**На тему «вдосконалення електроприводу вакуумного насоса в
системах охолодження»**

Здобувач Кравченко Д. В.

4 курсу АЕМ-40 групи

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. завідувача кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

Одеса – 2026 рік

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 Е та М
д.т.н, проф. Петро Осадчук.

« __ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Кравченка Дениса Вадимовича

1. Тема роботи: «Вдосконалення електроприводу вакуумного насоса в системах охолодження».

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

2. Затверджено наказом ОНТУ № 641 від 21.11.2025 р.

Строк подання студентом роботи 15.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи: Модернізація електроприводу штовхача прокатного стану.

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. Вибір вакуумного насоса. Вибір електроприводу. Розрахункова частина. Вибір і аналіз системи керування. Математичне моделювання. Економічна частина. Вимоги безпеки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації: 1. Актуальність теми. 2. Конструктивна схема роторно-лопатевого вакуумного насоса. 3. Різновиди вакуумних насосів. 4. Вакуумний насоса типу 2НВР-250Д. 5. Технічні характеристики пластинчасто-роторного вакуумного насоса 2НВР-250Д. 6. Кінематична схема. Конструкція розробленої системи. 7. Силкові та кінематичні розрахунки електроприводу. 8 Технічні характеристики електродвигуна АІР132М4. 9. Технічні характеристики ПЧ АВВ АСS-580. 10. Принципова схема перетворювача частоти. 11 Схема моделі електропривода вакуумного насосу без використання частотного перетворювача у програмі MATLAB Simulink. 12. Графік електромагнітного моменту електропривода вакуумного насоса та графік природної механічної характеристики електродвигуна привода насосу. 13-15. Графічні результати моделювання. 16. Економічне обґрунтування.

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 керування	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 _____ Кравченко Д.В.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Строк виконання етапів	Примітка
	Вступ. Огляд літератури. Вибір об'єкта модернізації.	10.02.2026	
	Попередній розрахунок потужності електричного двигуна і вибір електроприводу Розрахунок механічних характеристик. Кінематична схема приводу. Розрахунок динамічного режиму електроприводу.	25.02.2026	
	Дослідження процесів при частотному регулюванні в самому електродвигуні. Прямий пуск електродвигуна. Моделювання динамічних режимів електроприводу у середовищі MATLAB/ Simulink. Використання методів імітаційного моделювання.	18.05.2026	
	Розрахунок економічної доцільності	30.05.2026	
	Охорона праці та безпека життєдіяльності	05.06.2026	
	Перевірка роботи на добротність	12.06.2026	
	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи бакалавра	16.06.2026	
	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	23.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Кравченко Д.В.

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 доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Кравченко Д.В.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена вдосконаленню електроприводу вакуумного насоса в системах охолодження. У роботі розглянуто особливості функціонування систем охолодження. Проведено аналіз існуючих електроприводів вакуумних насосів та виявлено їх основні недоліки, зокрема відсутність ефективного регулювання режимів роботи та підвищене енергоспоживання. Виконано розрахунок потужності електроприводу вакуумного насоса, обґрунтовано вибір електродвигуна та системи керування. Запропоновано застосування частотно-регульованого електроприводу. Проведено математичне та імітаційне моделювання в середовищах MATLAB/Simulink, за результатами якого досліджено динамічні режими роботи електроприводу, перехідні процеси та вплив регулювання швидкості на енергетичні показники системи. У результаті виконання роботи встановлено, що використання частотно-регульованого електроприводу дозволяє підвищити енергоефективність системи охолодження, зменшити механічні навантаження, рівень вібрацій і забезпечити стабільність технологічних параметрів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система охолодження, вакуумний насос, електропривід, частотне регулювання, енергоефективність, моделювання.

ABSTRACT

The diploma thesis is devoted to the improvement of the electric drive of a vacuum pump in cooling systems. The paper considers the features of the operation of cooling systems. An analysis of existing electric drives of vacuum pumps is carried out, and their main drawbacks are identified, in particular the lack of effective control of operating modes and increased energy consumption. The power of the electric drive of the vacuum pump is calculated, and the selection of the electric motor and control system is substantiated. The application of a variable frequency drive is proposed. Mathematical and simulation modeling is performed using MATLAB / Simulink, based on which the dynamic operating modes of the electric drive, transient processes, and the influence of speed control on the energy performance of the system are studied. As a result of the work, it is established that the use of a variable frequency drive makes it possible to increase the energy efficiency of the cooling system, reduce mechanical loads and vibration levels, and ensure the stability of technological parameters.

KEYWORDS: cooling system, vacuum pump, electric drive, variable frequency control, energy efficiency, modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	9
1.1 Аналіз сучасних систем охолодження та їх технічних особливостей.....	9
1.2 Роль і принцип роботи вакуумних насосів у системах охолодження	16
1.3 Системи охолодження у промислових овочесховищах	24
1.4 Роторно-пластинчастий вакуумний насос типу 2НВР-250Д у системі охолодження промислового овочесховища.....	27
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	34
2.1 Розрахунок потужності електроприводу вакуумного насоса 2НВР-250Д	34
2.2 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода.....	37
2.3 Розрахунок механічної характеристики двигуна.....	38
Синхронна кутова частота обертання двигуна	38
2.4 Параметри схеми заміщення:.....	40
2.4.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна	43
2.4.2 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна .	45
2.5 Вибір апаратури керування	48
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	52

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Вдосконалення електроприводу вакуумного насоса в системах охолодження	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Кравченко Д.В.				у	5	77
Керівник		Шейда Голбад К.А.				ОНТУ Гр, АЕМ-40		
Реценз.								
Зав. кафедр		Жигайло О.М.						

3.1 Аналіз динамічних режимів роботи електроприводу вакуумного компресора на основі математичної моделі	52
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	58
4.1 Капітальні (інвестиційні) витрати.....	58
4.2 Експлуатаційні витрати	59
4.3 Амортизаційні витрати	61
4.4 Розрахунок річного споживання електроенергії приводом.....	61
4.5 Визначення терміну окупності	63
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	64
5.1 Загальні вимоги	64
5.2 Вимоги перед початком роботи (зміни).....	65
5.3 Вимоги безпеки під час роботи	65
5.4 Вимоги після завершення роботи.....	66
5.5 Негативний вплив шуму на організм людини.....	66
5.6 Вібрація та її негативний вплив на людину	68
5.7 Освітлення виробничих приміщень	69
5.8 Електробезпека	70
5.9 Пожежна безпека.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	76

ВСТУП

Системи охолодження є невід’ємною складовою сучасних промислових і енергетичних установок, забезпечуючи підтримання необхідних температурних режимів технологічних процесів. Вони широко застосовуються в харчовій, хімічній, енергетичній галузях, а також у холодильній техніці. Ефективність роботи таких систем безпосередньо залежить від інтенсивності теплообміну та стабільності термодинамічних параметрів робочого середовища. Одним із способів підвищення продуктивності систем охолодження є використання вакууму. Застосування розрідження базується на залежності температури кипіння від тиску, відповідно до якої зі зниженням тиску температура кипіння рідини зменшується. Це дозволяє організувати процеси випаровування при нижчих температурах, що суттєво підвищує інтенсивність відведення тепла та знижує енергетичні витрати системи. Крім того, вакуум сприяє видаленню неконденсованих газів, які негативно впливають на теплообмінні процеси.

Ключову роль у створенні та підтриманні необхідного рівня розрідження відіграють вакуумні насоси. Вони забезпечують безперервне відкачування газів і пари з системи, стабілізують робочий тиск та підтримують задані технологічні параметри. Від ефективності роботи вакуумного насоса залежить надійність функціонування всієї системи охолодження, її продуктивність і економічність.

Разом з тим, значний вплив на роботу вакуумного насоса має його електропривід. Традиційні електроприводи, що працюють на основі асинхронних двигунів із фіксованою частотою обертання, не забезпечують достатньої гнучкості керування режимами роботи. Це призводить до надлишкового енергоспоживання, підвищених механічних навантажень, а також виникнення вібрацій і нестабільності параметрів системи.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Актуальність теми. Модернізація електроприводу вакуумного насоса в системах охолодження є важливим інженерним завданням, спрямованим на підвищення ефективності, стабільності та економічності роботи технологічних установок. Актуальним напрямом є вдосконалення електроприводу вакуумних насосів шляхом впровадження частотно-регульованих систем керування. Це дозволяє забезпечити плавне регулювання швидкості обертання, адаптацію до змінних режимів роботи, зниження енергоспоживання та підвищення надійності обладнання.

Об'єктом дослідження є система охолодження з вакуумним насосом як складова технологічного процесу.

Предметом дослідження є електропривод вакуумного насоса системи охолодження.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс теоретичних і практичних методів дослідження. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях електромеханіки, теорії електроприводу, гідродинаміки та термодинаміки. З метою дослідження динамічних режимів роботи електроприводу використано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB із застосуванням пакету Simulink.

Практична новизна отриманих результатів полягає у розробці та обґрунтуванні технічних рішень щодо вдосконалення електроприводу вакуумного насоса в системах охолодження, що забезпечують підвищення енергоефективності та надійності роботи установки. запропоновано застосування частотно-регульованого електроприводу для керування вакуумним насосом, що дозволяє адаптувати режим роботи до змінних технологічних умов. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при модернізації існуючих систем охолодження, що дозволяє знизити експлуатаційні витрати, підвищити стабільність роботи обладнання та продовжити строк його служби.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз сучасних систем охолодження та їх технічних особливостей

Система охолодження — це сукупність технічних пристроїв і процесів та способів, призначених для відведення зайвого тепла від працюючого обладнання призначених для відведення надлишкового тепла від обладнання, технологічних процесів або середовища з метою підтримання заданого температурного режиму. Основний принцип роботи будь-якої системи охолодження полягає у перенесенні теплової енергії від об'єкта з вищою температурою до середовища з нижчою температурою за допомогою робочого тіла (холодоагенту, повітря або рідини).

Класифікація систем охолодження за способом відведення теплової енергії базується на типі середовища, яке використовується як кінцевий теплопоглинач. У процесі роботи будь-якої термодинамічної системи надлишкове тепло має бути передане зовнішньому середовищу, що визначає конструкцію, ефективність та експлуатаційні характеристики установки.

Повітряні системи охолодження працюють за принципом прямої або примусової конвекції, коли надлишкове тепло від нагрітого об'єкта передається навколишньому повітрю. Теплопередача відбувається через контакт поверхні теплообмінника з потоком повітря, який створюється вентиляторами. Інтенсивність охолодження залежить від швидкості повітряного потоку та різниці температур між поверхнею і навколишнім середовищем. З точки зору теплопередачі, процес базується на рівнянні конвективного теплообміну:

$$Q = hA\Delta T \quad (1.1)$$

де Q — тепловий потік;

h - коефіцієнт тепловіддачі,

A — площа теплообміну,

ΔT — різниця температур між поверхнею та повітрям.

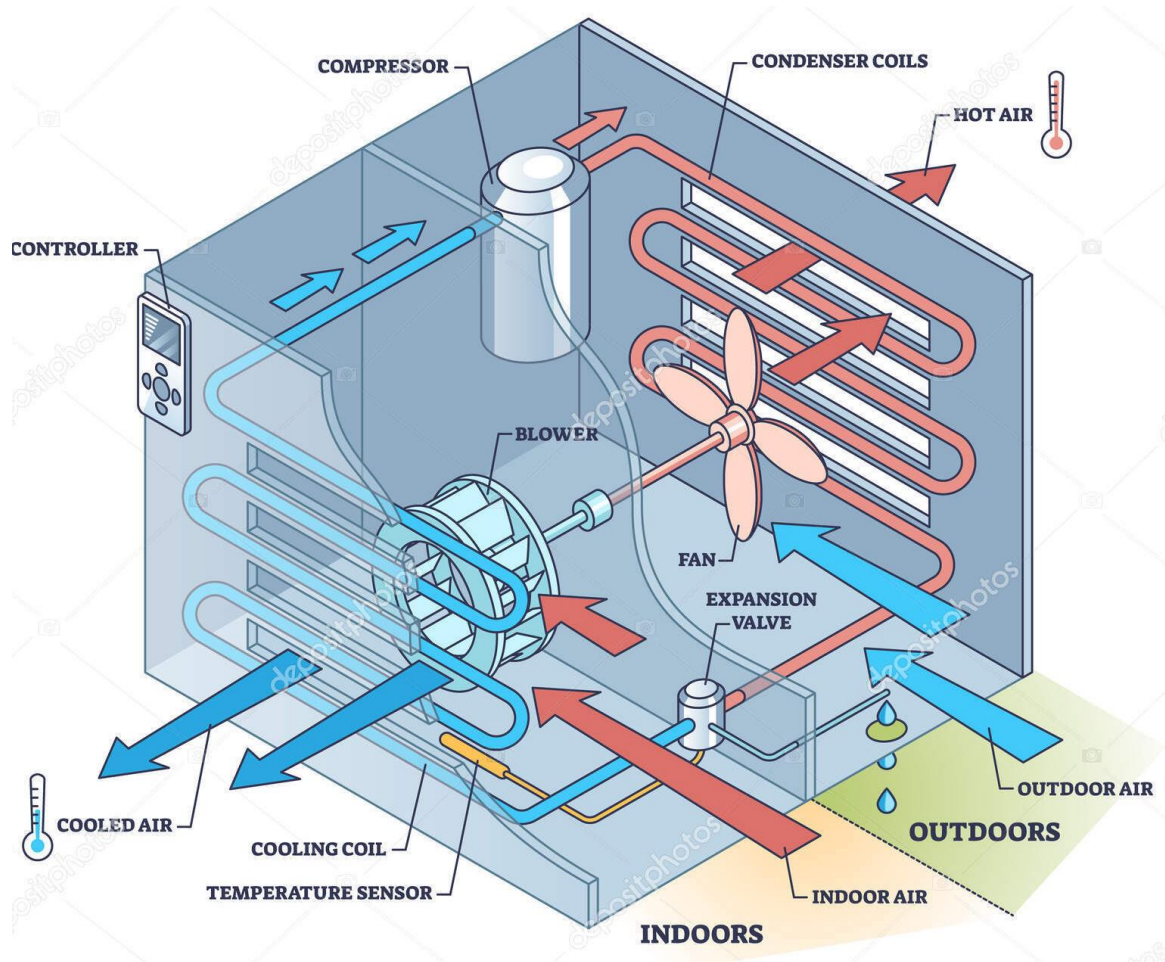


Рис. 1.1 Повітряна система охолодження

Сфера застосування - комп'ютери, радіатори, панелі. Переваги: простота конструкції, низька вартість, мінімальні вимоги до обслуговування. Недоліки: залежність ефективності від температури навколишнього середовища; значне падіння продуктивності при високих зовнішніх температурах.

У рідинних (водяних) системах тепло відводиться за допомогою проміжного теплоносія — води або водно-гліколевих розчинів. Передача тепла здійснюється через теплообмінники та насосні системи, які

забезпечують циркуляцію рідини. Процес базується на конвективному теплообміні в рідині та подальшій теплопередачі через теплообмінник.

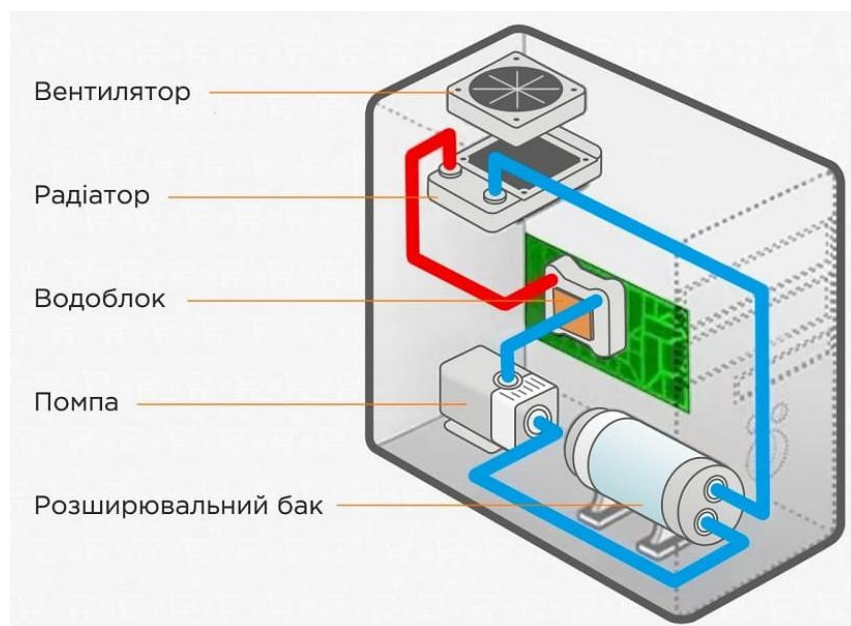


Рис. 1.2 Система рідинного охолодження

Сфера застосування - верстати, чилери, теплообмінники. Такі системи характеризуються значно вищою теплоємністю робочого середовища:

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1.2)$$

де $\dot{m}$ - масова витрата теплоносія,

c_p - питома теплоємність,

ΔT - зміна температури теплоносія.

Переваги: висока ефективність тепловідведення, стабільність роботи, незалежність від температури повітря. Недоліки: складніша конструкція, потреба в насосах, ризик витоків, вищі капітальні витрати.

Градірні та випарні системи використовуються для відведення тепла через випарне охолодження води. Частина води випаровується, забираючи приховану теплоту пароутворення, що значно підвищує ефективність тепловідведення. Ці системи особливо ефективні у великих промислових установках, де необхідно відводити значні теплові навантаження. Охолодження здійснюється за рахунок часткового випаровування води, під

час якого відбирається значна кількість теплової енергії (прихована теплота пароутворення). Тепло передається від гарячої води до повітря через контактну взаємодію та випаровування частини рідини. Викривуються для охолодження конденсаторів парових турбін на теплових (ТЕС) та атомних електростанціях (АЕС). реакторів, абсорберів доменних печей, прокатних станів та машин безперервного лиття тощо.

Компресорна система охолодження працює на основі парокомпресійного холодильного циклу, в якому тепло переноситься за рахунок фазових переходів холодильного агента (випаровування та конденсації) і підвищення його тиску за допомогою компресора. Основна ідея полягає в тому, що холодильний агент циркулює по замкненому контуру, змінюючи свій агрегатний стан і тим самим забезпечуючи відведення тепла від охолоджуваного середовища.

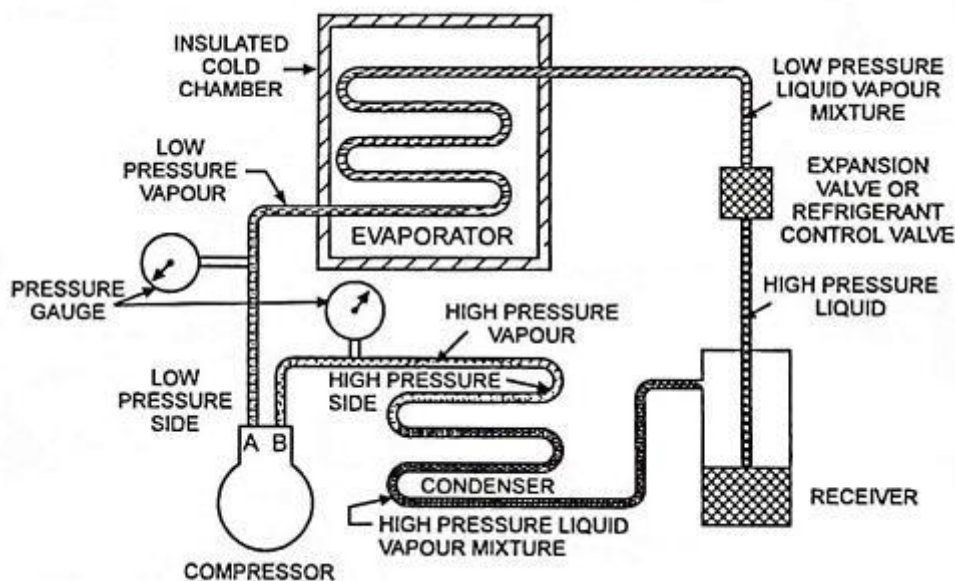


Рис. 1.3 Принципова схема парокомпресійної холодильної установки

У випарнику холодильний агент при низькому тиску кипить і випаровується, поглинаючи тепло від охолоджуваного середовища.

$$Q_0 = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1.3)$$

Пари холодильного агента стискаються, у результаті чого підвищуються тиск і температура.

$$W_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1.4)$$

У конденсаторі відбувається відведення тепла в навколишнє середовище, і холодильний агент переходить у рідкий стан.

$$Q_{cond} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (1.5)$$

де Q_0 - холодопродуктивність (тепло, яке відбирається у випарнику);

Q_{cond} - тепло, яке віддається в конденсаторі;

W_{comp} - робота компресора;

h_1, h_2, h_3, h_4 - ентальпії в різних точках циклу (випарник, компресор, конденсатор, дросель).

Рідина знижує тиск без виконання корисної роботи, після чого надходить у випарник. Компресорна система характеризується тим, що:

- основне енергоспоживання припадає на привід компресора;
- процес є циклічним і термодинамічно керованим;
- ефективність визначається коефіцієнтом холодильного циклу (COP):

$$COP = \frac{Q_0}{W_{comp}} \quad (1.6)$$

Переваги: висока енергоефективність; широкий діапазон потужностей; точне регулювання температури; універсальність застосування (побут, промисловість, транспорт). Недоліки: наявність рухомих частин (знос, вібрації); підвищене енергоспоживання компресора; шум і механічні навантаження; потреба в регулярному обслуговуванні.

Абсорбційна система охолодження працює на основі термохімічного процесу поглинання (абсорбції) холодильного агента абсорбентом із подальшим його відновленням за рахунок підведення теплової енергії. На відміну від компресійних систем, де використовується механічний компресор, в абсорбційній системі підвищення тиску холодильного агента здійснюється за рахунок розчинення та нагрівання робочої суміші.

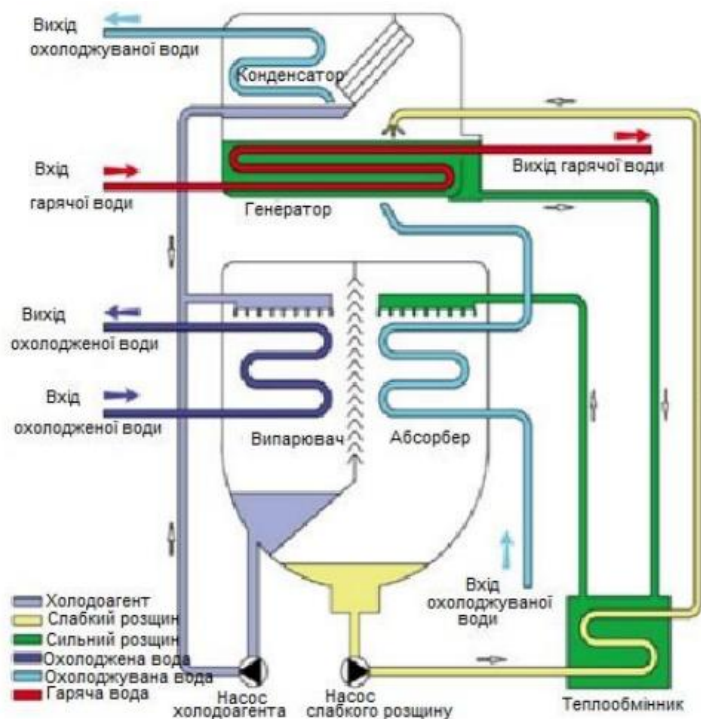


Рис. 1.4 Структурна схема одноступеневої абсорційної холодильної машини

Найпоширеніші робочі пари:

- аміак – вода ($\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$);
- бромід літію – вода ($\text{LiBr--H}_2\text{O}$).

Холодильний агент випаровується при низькому тиску, поглинаючи тепло від охолоджуваного середовища. Пари холодильного агента поглинаються абсорбентом (наприклад, водою або розчином LiBr), утворюючи розчин. Збагачений розчин перекачується у генератор під підвищеним тиском (витрати енергії значно менші, ніж у компресорі). Під дією теплоти (пара, гаряча вода, газ або відпрацьоване тепло) холодильний агент відділяється від розчину. Пари холодильного агента конденсуються з виділенням тепла. Рідина знижується за тиском і знову надходить у випарник, завершуючи цикл.

Переваги: використання відпрацьованого або низькопотенційного тепла; екологічна безпечність (в деяких конфігураціях); низьке електроспоживання; висока надійність через відсутність компресора.

Недоліки: велика металоємність; складність регулювання режимів; нижча ефективність порівняно з компресійними системами.

Гібридні системи охолодження є перспективним напрямом розвитку холодильних і кліматичних установок, що базується на поєднанні декількох принципів відведення теплоти в межах єдиного технологічного комплексу. Такий підхід дозволяє ефективно адаптувати роботу системи до змінних експлуатаційних умов, підвищуючи її енергоефективність та надійність.

Під гібридною системою охолодження розуміють інтегровану систему, в якій одночасно або по чергово використовуються два чи більше способів охолодження. Найбільш поширеними комбінаціями є:

- компресорне та випарне охолодження;
- компресорне та абсорбційне;
- повітряне та водяне охолодження;
- використання природного охолодження (free-cooling) разом із традиційними холодильними машинами.

Основною ідеєю є раціональний розподіл теплового навантаження між різними підсистемами залежно від зовнішніх умов (температури навколишнього середовища, вологості, режиму роботи об'єкта). В залежності від умов навколишнього середовища система автоматично змінює режим роботи для досягнення максимальної енергоефективності.

Гібридні системи можуть працювати у кількох режимах:

- основний режим: використовується один домінуючий тип охолодження (наприклад, компресорний), який забезпечує необхідний температурний рівень;
- комбінований режим: декілька підсистем працюють одночасно, розподіляючи навантаження. Наприклад, частина тепла відводиться через водяне охолодження, а частина — через повітряне.
- альтернативний режим (перемикання): система автоматично обирає найбільш енергоефективний спосіб охолодження. Наприклад, при низькій

температурі зовнішнього повітря активується режим природного охолодження без використання компресора.

1.2 Роль і принцип роботи вакуумних насосів у системах охолодження

Вакуумні насоси є важливим елементом у сучасних системах охолодження, особливо в холодильній техніці, кондиціонуванні повітря та промислових технологічних процесах. Їх основна функція полягає у створенні та підтриманні необхідного рівня розрідження (вакууму) в замкнених об'ємах, що забезпечує ефективний перебіг тепломасообмінних процесів.

У системах охолодження вакуумні насоси застосовуються насамперед для видалення повітря, вологи та неконденсованих газів із холодильного контуру. Наявність таких домішок у системі негативно впливає на її роботу: знижується ефективність теплообміну, зростає навантаження на компресор, підвищується енергоспоживання та зменшується загальний ресурс обладнання. Таким чином, вакуумування є необхідною умовою для стабільної та економічної роботи охолоджувальних установок.

Принцип роботи вакуумних насосів базується на видаленні газів із замкнутого об'єму шляхом створення різниці тисків між робочою камерою насоса та середовищем, що відкачується, тобто шляхом зниження тиску в герметичному об'ємі через видалення газових молекул. Ступінь розрідження оцінюється в таких одиницях, як мбар (мілібар) та торр (мм рт. ст.), і умовно поділяється на кілька рівнів: грубий вакуум (від атмосферного тиску до приблизно 1 мбар), середній (у межах від 1 до 10^{-3} мбар) та високий (менше 10^{-3} мбар).

Ключові механізми відкачування газів:

- механічне витіснення: газ захоплюється та переміщується за допомогою рухомих елементів, як це реалізовано у роторно-лопатевих або мембранних насосах;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						16
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- імпульсна передача: молекули газу отримують прискорення і спрямовано переміщуються, що характерно для турбомолекулярних насосів.

- поглинання: газ зв'язується фізичними або хімічними методами, наприклад у криогенних установках.

Застосування того чи іншого принципу визначає ефективність роботи насоса і залежить від умов експлуатації, зокрема температурного режиму, наявності парів та рівня забруднення середовища.

Існує декілька базових різновидів вакуумних насосів, кожен із яких призначений для вирішення конкретних виробничих задач. Вибір відповідного типу визначається потрібним рівнем розрідження, продуктивністю (швидкістю відкачування, що вимірюється в м³/год), а також його сумісністю з робочим середовищем.

Основні різновиди вакуумних насосів та їх характеристики:

1. Роторно-лопатеві (ротаційні). Ексцентрично розташований ротор з лопатками обертається всередині циліндричного корпусу, розділяючи камеру на частини, що змінюють об'єм. Газ захоплюється між лопатками ротора та статором, стискається та викидається. Пластини, що рухаються в пазах ротора, створюють змінні за об'ємом камери. Під час обертання відбувається всмоктування газу, його стиснення та подальше викидання в атмосферу або в систему відведення.

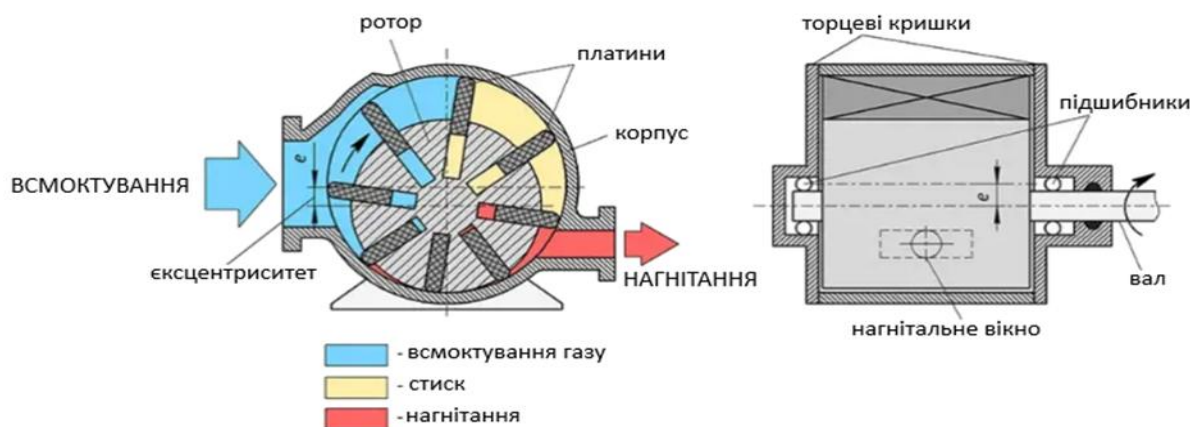


Рис. 1.5 Конструктивна схема роторно-лопатевого вакуумного насоса

Для забезпечення герметичності та зменшення зносу часто використовується мастило, яке одночасно виконує функцію ущільнення та охолодження.

Роторно-лопатеві насоси в промисловості застосовуються для упаковки харчових продуктів, у фармацевтичному виробництві, дегазації матеріалів. Переваги: висока продуктивність на грубому вакуумі, надійність, низька вартість обслуговування. Недоліки: чутливість до забруднень, потреба в мастилі може забруднювати газ.

2. Рідинно-кільцеві вакуумні насоси є різновидом механічних насосів об'ємної дії, які широко застосовуються у промислових системах охолодження, хімічній та енергетичній галузях. Їх основною перевагою є здатність ефективно працювати з вологими, забрудненими або агресивними газовими середовищами. Принцип роботи водокільцевого насоса базується на використанні рідини (найчастіше води) як робочого елемента для створення вакууму. У середині корпусу розміщений ротор, встановлений ексцентрично відносно осі циліндра.

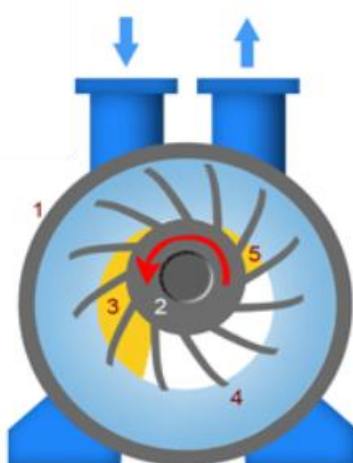


Рис. 1.6 Схема рідинно-кільцевого вакуумного насоса

1 - корпус; 2 - робоче колесо; 3 - вікно, що всмоктує; 4 - робоча рідина; 5 - нагнітальне вікно

Під час обертання ротора рідина під дією відцентрових сил утворює кільце вздовж внутрішньої поверхні корпусу. Між лопатями ротора та

рідинним кільцем формуються замкнені камери змінного об'єму. Під час збільшення об'єму камери газ засмоктується через вхідний патрубок. При подальшому обертанні об'єм камери зменшується, що призводить до стискування газу. Стиснений газ виштовхується через випускний отвір.

Рідина виконує одночасно кілька функцій: ущільнення робочих зазорів, відведення тепла та часткове поглинання домішок. Завдяки цьому рідинно-кільцеві насоси мають високу надійність і довговічність, а також можуть працювати без складних систем очищення газу.

У системах охолодження рідинно-кільцеві насоси часто застосовуються для видалення неконденсованих газів із конденсаторів, підтримання стабільного вакууму в технологічних процесах, а також у системах випарного охолодження. Їх використання сприяє підвищенню ефективності теплообміну та загальної надійності роботи обладнання. Переваги: стійкість до парів та рідин, низький рівень шуму, екологічність. Недоліки: обмежена глибина вакууму (до 30 мбар), витрата води.

3. Мембранні (діафрагмові) вакуумні насоси — це об'ємні вакуумні машини, у яких переміщення та стискування газу здійснюється за рахунок періодичної деформації пружної мембрани (діафрагми), що відокремлює робочу камеру від привідного механізму. Така конструкція забезпечує герметичність процесу та виключає контакт перекачуваного середовища з мастильними матеріалами. Робота мембранного вакуумного насоса базується на зміні об'єму робочої камери відповідно до закону об'ємного стискування газу (аналогічно до поршневих машин), але замість поршня використовується гнучка діафрагма. Один робочий цикл включає два основні такти:

- такт всмоктування. При переміщенні мембрани у бік привідного механізму (вниз або назад) об'єм робочої камери збільшується. Внаслідок цього, згідно із законом Бойля–Маріотта (при приблизно ізотермічному процесі), тиск у камері знижується. Коли тиск у камері стає нижчим за тиск

у всмоктувальній лінії, відкривається впускний клапан, і газ надходить у камеру;

- такт нагнітання. При зворотному русі мембрани (вгору або вперед) об'єм камери зменшується, що призводить до підвищення тиску газу. Коли тиск у камері перевищує тиск у нагнітальній лінії, впускний клапан закривається, відкривається випускний клапан, і стиснений газ виштовхується назовні.

Процес у мембранному насосі зазвичай близький до ізотермічного стискання, оскільки маса газу невелика; теплообмін із корпусом достатньо інтенсивний. Однак на практиці процес є політропним, що враховується при точних розрахунках.

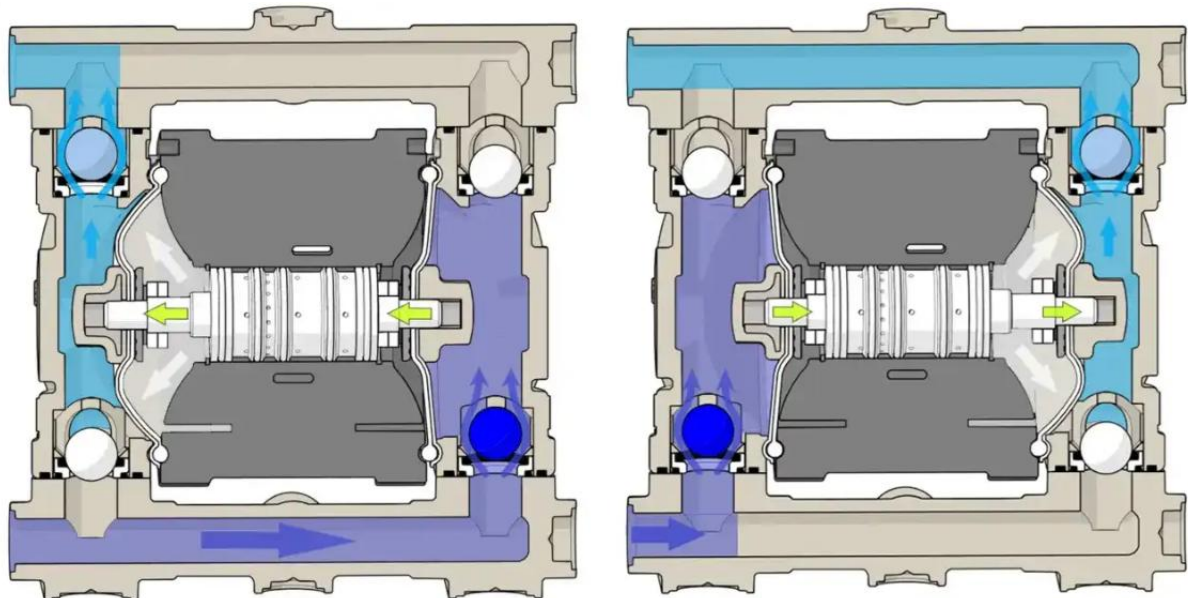


Рис. 1.7 Робочий цикл Мембранного (діафрагмового) вакуумного насоса.

Повітря (рис.1.7) через отвір розподільних каналів потрапляє в ліву мембрану, яка надувається. Вал тягне за собою праву мембрану, яка здувається, транспортуючи надлишок повітря до випускного отвору. У лівій камері рідина виходить з нагнітального колектора під тиском, створеним мембраною. Всмоктувальна куля закрита, а нагнітальна куля відкрита. У правій камері створюється вакуум (завдяки здуванню повітря з мембрани),

що дозволяє відкрити всмоктувальну кулю та пропустити рідину через всмоктувальний колектор. Нагнітальна куля закрита.

Переваги: Безмасляна робота, стійкість до корозії, низьке забруднення. Недоліки: Нижча продуктивність порівняно з роторними, вища вартість.

4. Турбомолекулярні вакуумні насоси — це високовакуумні динамічні насоси, принцип дії яких базується на передачі імпульсу молекулам газу від швидко обертових лопаток ротора. Вони застосовуються для отримання глибокого вакууму (до $10^{-7} - 10^{-10}$ мбар) у наукових та високотехнологічних установках. Робота турбомолекулярного насоса базується на взаємодії окремих молекул газу з поверхнями, що рухаються з великою швидкістю. Це можливо за умов молекулярного режиму течії, коли довжина вільного пробігу молекул більша за розміри каналу. Швидко обертові лопатки ротора (з кутом нахилу) направлено передають імпульс молекулам газу, змушуючи їх рухатися від входу насоса до виходу.

Конструкція насоса включає чергування:

- обертових дисків (ротор);
- нерухомих дисків (статор).

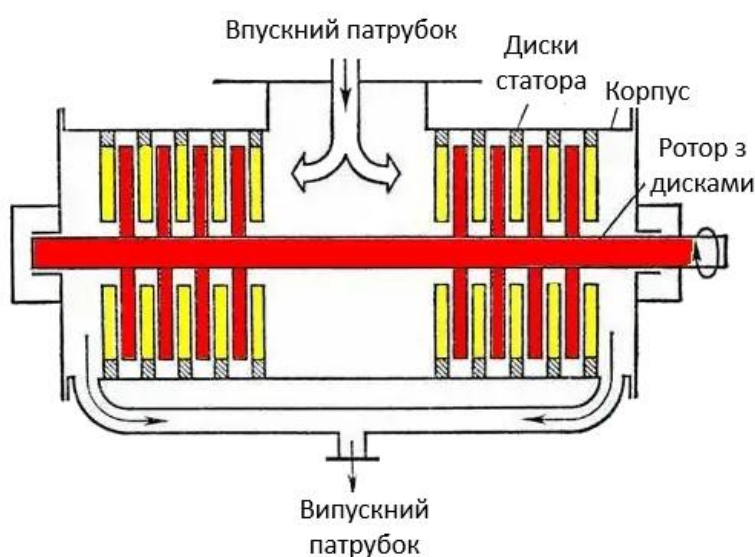


Рис. 1.8 Принцип роботи турбомолекулярного вакуумного насоса

Газ із вакуумної камери надходить у вхідний отвір насоса. Молекули хаотично рухаються та потрапляють у зону обертання ротора. Лопатки ротора, що обертаються з дуже великою швидкістю (20 000–90 000 об/хв), при зіткненні з молекулами передають їм додаткову швидкість у напрямку до виходу. Після взаємодії з ротором молекули потрапляють на статор, який спрямовує їх до наступного ступеня. Така система з багатьох ступенів забезпечує поступове переміщення газу та підвищення тиску.

На виході насоса газ передається до попереднього (форвакуумного) насоса, який відкачує його в атмосферу.

Ефективність турбомолекулярного насоса визначається співвідношенням швидкості лопаток і теплової швидкості молекул газу:

$$u \sim v_{th}$$

де u — лінійна швидкість краю лопатки,

v_{th} — середня теплова швидкість молекул.

Чим ближче ці величини, тим ефективніше передається імпульс.

Сфера застосування: виробництво напівпровідників, вакуумне покриття. Перваги: глибокий вакуум (до 10^{-7} мбар), висока швидкість відкачування. Недоліки: потреба в попередньому грубому вакуумі, чутливість до вібрацій.

5. Сухі гвинтові вакуумні насоси — це об'ємні ротаційні машини, в яких відкачування газу здійснюється за допомогою двох синхронно обертових гвинтових роторів без використання мастила в робочій камері («сухе» стискання). Робота насоса базується на зміні об'єму замкнених порожнин, що утворюються між гвинтами та корпусом, із подальшим переміщенням газу вздовж осі ротора. Основні етапи процесу:

- всмоктування: газ із вакуумної системи надходить у вхідний патрубок. При обертанні гвинтів між їх витками та корпусом утворюються замкнені об'єми, які захоплюють порцію газу;

- транспортування: захоплений газ переміщується вздовж осі гвинтів від зони всмоктування до зони нагнітання. При цьому гвинти не

контактують між собою (зазор забезпечується точною синхронізацією через шестерні);

- стискання: у міру руху до виходу об'єм між витками зменшується, що призводить до підвищення тиску газу (політропний процес стискання);

- викид: стиснений газ виштовхується через випускний патрубок у атмосферу або в наступний ступінь системи.

Процес стискання можна описати політропним законом:

$$pV^n = \text{const}$$

де n — показник політропи (зазвичай 1–1,4 для таких насосів).

На відміну від маслозаповнених насосів, ущільнення досягається не рідиною, а:

- мінімальними зазорами;
- точною геометрією гвинтів;
- високою частотою обертання.

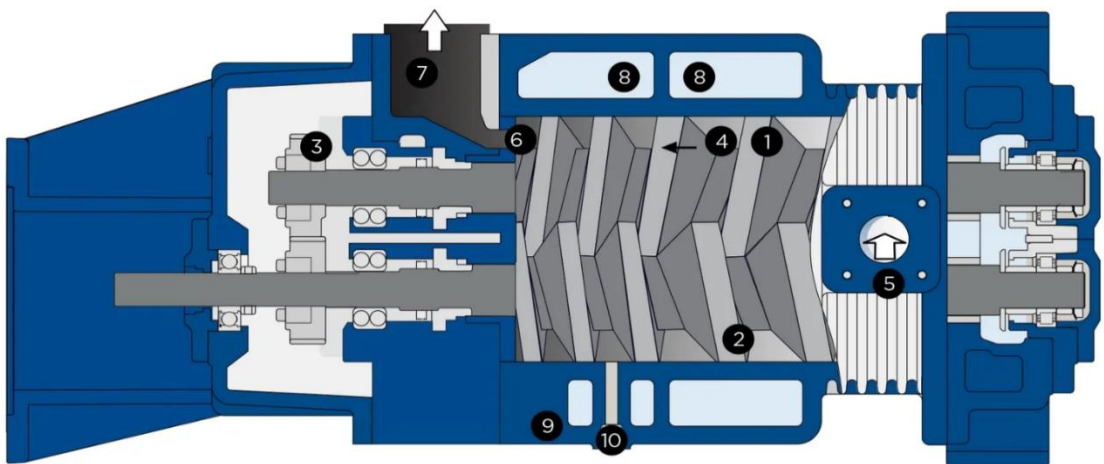


Рис. 1.9 Схема роботи сухого гвинтового вакуумного насоса

Сухий гвинтовий вакуумний насос (рис. 1.6) складається з двох паралельних, не контактуючих гвинтоподібних роторів (1) та (2), що обертаються синхронно з високими швидкостями за допомогою точних шестерень (3). Вони обертаються в протилежних напрямках, і таким чином захоплюють певну кількість газу на вході (5) та транспортують його до

випускного отвору (6) та у випускний канал (7). Стінки статора (9) та спеціальна форма переплетених гвинтів утворюють компресійні камери або кишені (4), які транспортують газ. Охолодження здійснюється через кожух, що оточує насос (8). Доступний газовий баластний отвір (10). За потреби газовий баласт може допомогти прогріти холодний насос або швидше висушити вологий насос, вивести легкозаймисту пару з діапазону її займання та допомогти очистити насос від твердих речовин, особливо під час промивання розчинником.

Сфера застосування: хімічне виробництво, фармацевтика, де потрібна чистота, електронна та напівпровідникова промисловість. Переваги: безмасляна операція, стійкість до агресивних середовищ, низьке обслуговування, широкий діапазон тисків (від атмосферного до $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ мбар). Недоліки: висока вартість, вимоги до точності виготовлення, чутливість до теплових деформацій, необхідність ефективного охолодження, складність ремонту.

1.3 Системи охолодження у промислових овочесховищах

Сучасні овочесховища є важливим елементом агропромислового комплексу, оскільки забезпечують тривале зберігання сільськогосподарської продукції зі збереженням її товарних, харчових та технологічних властивостей. Після збору овочева продукція продовжує здійснювати біологічне дихання, у результаті чого відбуваються процеси тепловиділення, випаровування вологи та поступового старіння продукції. Підвищення температури навколишнього середовища прискорює розвиток мікроорганізмів, активізує ферментативні процеси та призводить до втрати маси і погіршення якості продукції.

Для забезпечення довготривалого зберігання овочів у промислових умовах застосовуються системи штучного охолодження, які підтримують необхідні параметри мікроклімату:

- температуру;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						24
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- відносну вологість;
- циркуляцію повітря;
- концентрацію газів.

Для більшості овочевих культур оптимальна температура зберігання становить від 0 до + 5 °С, а відносна вологість — 85–95%. Підтримання таких параметрів дозволяє значно зменшити втрати продукції та збільшити термін її зберігання.



Рис. 1.10 Кліматичне обладнання для овочесховищ

Промислові овочесховища оснащуються холодильними установками великої продуктивності, які забезпечують відведення теплоти від камер зберігання та підтримання стабільного температурного режиму протягом усього періоду експлуатації.

Система охолодження промислового овочесховища являє собою комплекс взаємопов'язаного обладнання, призначеного для відведення теплоти від продукту та підтримання заданих параметрів мікроклімату. До складу системи входять:

- холодильний компресор;
- конденсатор;
- випарник;
- дроселюючий пристрій;
- трубопроводи;

- циркуляційні насоси;
- вентилятори;
- система автоматизації;
- вакуумне обладнання.



Рис. 1.11 Холодильна установка промислового овочесховища

У більшості сучасних систем охолодження застосовується парокомпресійний холодильний цикл. Принцип дії системи полягає у циркуляції холодоагенту, який послідовно проходить через компресор, конденсатор, дросельний елемент та випарник.

У випарнику холодоагент кипить при низькому тиску, поглинаючи теплоту з повітря холодильних камер. Після цього газоподібний холодоагент надходить до компресора, де стискається до високого тиску і температури. У конденсаторі теплота відводиться до навколишнього середовища, а холодоагент переходить у рідкий стан. Далі через дроселюючий елемент тиск знижується, і цикл повторюється.

Для стабільної та ефективної роботи системи необхідною умовою є відсутність у холодильному контурі:

- повітря;

- водяної пари;
- неконденсованих газів;
- забруднень.

Саме для цього у системі застосовується вакуумне обладнання.

Вакуумний насос у холодильній установці виконує важливу технологічну функцію — створення та підтримання розрідження у холодильному контурі під час монтажу, технічного обслуговування та ремонту системи.

Перед заправленням холодильного контуру холодоагентом необхідно виконати вакуумування системи з метою:

- видалення атмосферного повітря;
- видалення водяної пари;
- усунення неконденсованих газів;
- зниження ймовірності утворення льоду;
- підвищення ефективності теплообміну.

Наявність повітря або вологи у холодильному контурі призводить до:

- підвищення тиску конденсації;
- зростання енергоспоживання;
- погіршення теплопередачі;
- корозії елементів системи;
- зниження ресурсу компресора та арматури.

Вакуумний насос забезпечує відкачування газів із системи до необхідного рівня залишкового тиску, після чого холодильний контур може бути заповнений холодоагентом та введений в експлуатацію.

1.4 Роторно-пластинчастий вакуумний насос типу 2НВР-250Д у системі охолодження промислового овочесховища

Насос типу 2НВР-250Д є промисловим двоступеневим роторно-пластинчастим вакуумним насосом, призначеним для створення високого

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						27
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ступеня вакууму у промислових технологічних системах. Принцип дії насоса базується на зміні об'єму робочих камер під час обертання ротора з пластинами. При обертанні ротора пластини під дією відцентрових сил притискаються до внутрішньої поверхні корпусу, утворюючи герметичні камери змінного об'єму. У процесі обертання відбувається всмоктування, стискання та видалення газу.

Конструкція насоса включає:

- корпус;
- ротор;
- пластини;
- вакуумні камери;
- систему мастила;
- електродвигун;
- систему охолодження.



Рис. 1.12 Загальний вигляд роторно-пластинчастого вакуумного насоса типу 2HBP-250Д

Насоси 2HBP-250Д мають блокове компонування. На стійці встановлений електродвигун, з іншого боку, робочий блок насоса, поміщений в корпус. Вхід та вихід насоса виконані у стійці. Вхідний патрубок розташований на верхній стінці стійки, вихлопний патрубок – на бічній стінці стійки. Елементи технічного обслуговування насоса

розташовані з боку торцевої та верхньої стін корпусу. До них відносяться:

- отвори для затоки та зливу олії;
- оглядове скло для контролю рівня олії;
- ручка керування газобаластовим пристроєм.

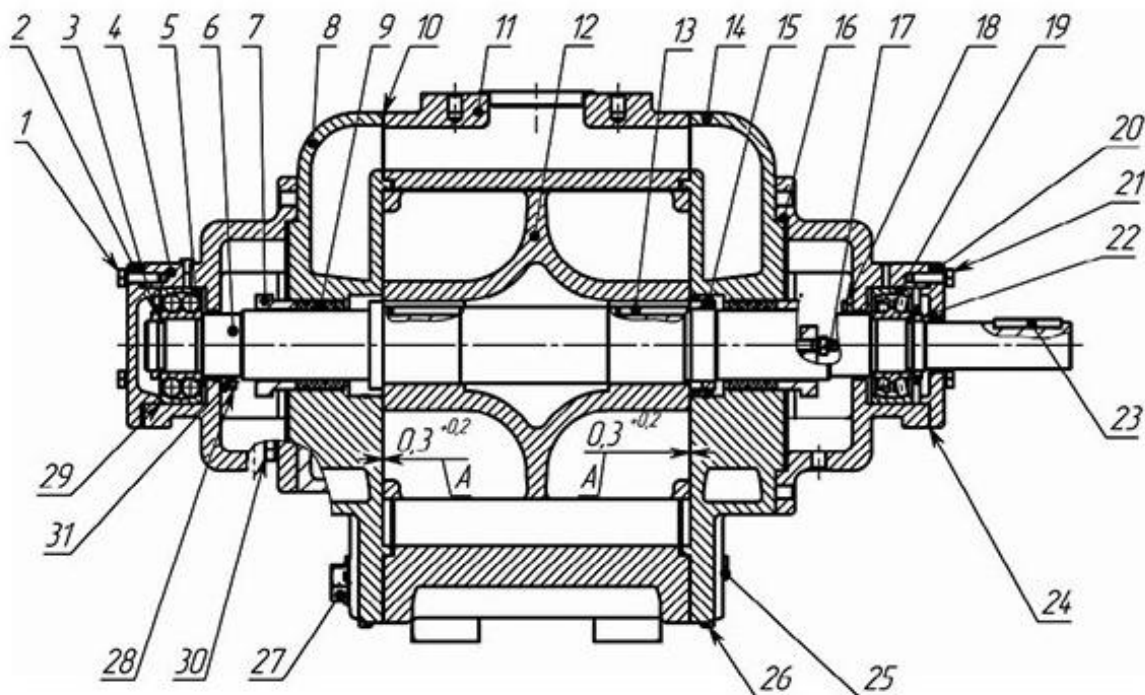


Рис. 1.13 Влаштування вакуумного насоса 2HBP-250Д

1, 17, 25, 30 – кріплення; 2, 20 - кришка підшипника; 3, 22, 31 - гайка; 4, 16 - корпус підшипника; 5, 19 – підшипник; 6 – вал; 7 - кришка сальника; 8 - лобовина права; 9 - сальникове набивання; 10 – прокладка; 11 - чавунний корпус; 12 - лопаткове робоче колесо; 13, 23 – шпонка; 14 - лобовина ліва; 18, 28, 29 - болт регулювальний

Вакуумний насос 2HBP-250Д забезпечений газобаластовим пристроєм, призначеним для запобігання конденсації пари при відкачуванні парогазових сумішей. Витрата повітря через газобаластовий пристрій встановлюється за рахунок отвору, що калібрується. Система вихлопу насоса складається з гумових клапанів, пружин, кришок, що служать одночасно обмежувачами ходу клапанів, масловідбиваючих екранів. Для запобігання попаданню в насос твердих частинок у вхідному патрубку

встановлено фільтр. Охолодження повітряного насоса. Забір повітря крильчаткою здійснюється через щілини в кришці.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики роторно-пластинчастого вакуумного насоса типу 2НВР-250Д

Таблиця 1.1

Параметр	Значення
Діаметр умовного проходу вхідного/вихідного патрубків, мм	63/63
Швидкість дії в діапазоні тиску на вході від атмосферного до 0,26 кПа(2 мм рт.ст.), м ³ /год (л/с)	230 (63)
Граничний залишковий тиск, кПа (мм рт.ст.), не більше, при застосуванні робочої рідини VACMA OIL 100 - парціальне без газобаласту - повне без газобаласту - повне з газобаластом	1,0x10 ⁻⁵ (7,5x10 ⁻⁵) 6,7 x10 ⁻⁴ (5x10 ⁻³) 6,7 x10 ⁻³ (5x10 ⁻²)
Кількість робочої рідини, що заливається в насос, дм ³	14
Найбільше робочого тиску, кПа (мм рт.ст.)	1,33(10)
Об'єм судини, що відкачується, м ³ , не більше	25
Марка робочої рідини (вакуумна мінеральна олія)	VACMA OIL100
Охолодження насоса	Повітряне
Найбільший тиск пари води на вході насоса кПа (мм рт.ст.)	2,66 (20)
Живлення електродвигуна від мережі трифазного змінного струму з частотою 50 Гц напругою,	380
Потужність електродвигуна, кВт	5,5

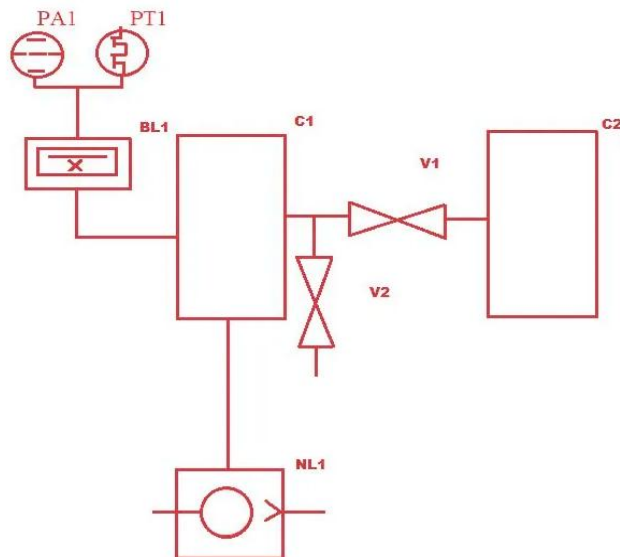


Рис. 1.16 Схема підключення роторно-пластинчастого вакуумного насоса типу 2HBP-250Д

Насос працює у тривалому режимі експлуатації та характеризується значними механічними і динамічними навантаженнями під час:

- запуску;
- виходу на номінальний режим;
- зміни навантаження;
- тривалої безперервної роботи.

При прямому пуску електродвигуна виникають значні пускові струми та ударні механічні навантаження, які негативно впливають на:

- муфти;
- підшипники;
- пластини;
- вал електродвигуна.

Крім того, постійна робота насоса на номінальній швидкості призводить до надлишкового енергоспоживання при неповному навантаженні системи.

Модернізація електропривода вакуумного насоса є актуальною задачею підвищення енергоефективності та надійності роботи холодильних

систем. Основним напрямком модернізації є впровадження частотного регулювання електропривода шляхом встановлення перетворювача частоти. Застосування перетворювача частоти дозволяє:

- забезпечити плавний пуск електродвигуна;
- зменшити пускові струми;
- знизити механічні навантаження;
- регулювати продуктивність насоса;
- зменшити енергоспоживання;
- знизити рівень вібрацій;
- підвищити ресурс обладнання.

Залежність продуктивності насоса від частоти обертання можна описати співвідношенням:

$$Q \sim n$$

а споживаної потужності:

$$P \sim n^3$$

Таким чином, навіть незначне зниження частоти обертання електродвигуна дозволяє суттєво зменшити споживання електричної енергії.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Розрахунок потужності електроприводу вакуумного насоса 2НВР-250Д

Потужність електроприводу визначається на основі механічної потужності, необхідної для забезпечення роботи вакуумного насоса у заданому режимі відкачування. Продуктивність насоса переводиться у систему SI:

$$Q = \frac{230}{3600} 0,0639 \text{ м}^3/\text{с}$$

де Q — подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

$230 \text{ м}^3/\text{год}$ — паспортна продуктивність насоса.

Потужність, необхідна для переміщення газового середовища:

$$P_T = \Delta p \cdot Q \quad (2.1)$$

де P_T — теоретична потужність, Вт;

Δp — перепад тиску, Па;

Q — продуктивність насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для вакуумних насосів перепад тиску визначається як:

$$\Delta p = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} \quad (2.2)$$

де $p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$;

$p_{\text{вак}}$ — залишковий тиск у системі.

Оскільки насос працює у форвакуумному режимі, залишковий тиск значно менший за атмосферний, тому:

$$\Delta p = 101325 \text{ Па} \quad (2.3)$$

Тоді теоретична потужність:

$$P_T = 101325 \cdot 0,0639 = 6474,67 \text{ Вт}$$

Реальна потужність на валу насоса:

$$P_{\text{вал}} = \frac{P_T}{\eta_n} \quad (2.4)$$

де η_n — ККД вакуумного насоса, для пластинчасто-роторних насосів $0,80 - 0,85$ (приймаємо $0,83$).

Тоді:

$$P_{\text{вал}} = \frac{6474,67}{0,83} 7800,81 \text{ Вт}$$

Врахування втрат у механічній передачі. Необхідна потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{пр}}} \quad (2.5)$$

де $\eta_{\text{пр}}$ — ККД передачі, для муфтового з'єднання дорівнює 0,95.

Тоді:

$$P_{\text{дв}} = \frac{7800,81}{0,95} = 8211,38 \text{ Вт}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{дв}} \cdot k_z = 8211,38 \cdot 1,2 = 9853,66 \text{ Вт}$$

Отримане розрахункове значення потужності перевищує паспортну потужність штатного двигуна 9,8 кВт. Це пояснюється тим, що заводський двигун працює:

- у номінальному режимі без перевантажень;
- при оптимальних температурних умовах;
- із врахуванням реального ККД насоса;
- у вузькому робочому діапазоні;
- без значних пускових перевантажень.

Крім того, у промислових умовах вакуумні насоси часто працюють із неповним навантаженням, а паспортна потужність визначається експериментально для конкретного режиму роботи. Теоретичний розрахунок дає більш робоче значення та враховує запас потужності, необхідний для стабільної роботи електроприводу після модернізації.

З довідника електродвигунів вибираємо найближчий максимум тобто. АІР 132 М4 асинхронний двигун із короткозамкненим ротором на 11 кВт.

Таблиця 2.1 - Характеристика електродвигуна АІР132М4

Таблиця 2.1

Параметр	Значення
Потужність	11 кВт
Частота обертання поля статора	1500 об/хв
Швидкість обертання валу	1460 об/хв
Напруга живлення Трифазна,	220/380, 380/660 вольт
Номінальний струм	22,5 А
ККД	88,4%
Номінальний момент, що крутить	72,448 Нм
Співвідношення моментів, що крутять Мп/Мн	2,3
Співвідношення моменту крутного Мmax/Мн	2,3
Відношення струму Іп/Ін	7,0
Момент інерції	0,0349 кг·м ²
Діаметр валу	38 мм
Вага	86 кг
Передній/задній підшипник	6308 ZZ-С3
Рівень шуму до	75 дБ
Монтажне виконання	Лапи/фланець/ комбіноване



AIP 132 M4 U2 IM 1081

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

AIP132M4 U2 IM 1081:

AIP – тип електродвигуна

132 – умовний габарит

M – позначення довжини
сердечника

4 – число полюсів

U2 – категорія розміщення

Рис. 2.1 Загальний вигляд та умовні позначення двигуна AIP132M4 1081

2.2 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода

Вихідні каталожні дані асинхронного двигуна AIP 132 S4

Потужність:

$$P_{\text{дв}} = 11 \text{ кВт}$$

Номінальна напруга:

$$U_{1\text{лн}} = 380 \text{ В}$$

Динамічний момент інерції двигуна

$$J_{\text{дв}} = 0.0349 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Частота напруги живлення

$$f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$$

Синхронна частота обертання

$$n_0 = 1500 \text{ об/хв}$$

Номінальні оберти двигуна

$$n_1 = 1460 \text{ об/хв}$$

Відносний пусковий момент

$$M_{\text{п}} = 2,3$$

Відносний критичний момент

$$M_{\text{к}} = 2,3$$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3

Арк

37

Відносний пусковий струм

$$k_i = 7$$

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

$$\sin \varphi = \sin(a \cos(\cos \varphi)) = 0,54259 \quad (2.6)$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = 0,884$$

Номинальний струм двигуна

$$I_{\text{ном}} = 22,5 \text{ A}$$

Часткове навантаження

$$p' = 0,70$$

$$\beta = 1,5$$

$$\cos \varphi_{p'} = 0,99 \cdot \cos \varphi = 0,8316 \quad (2.7)$$

$$\eta_{p'} = 0,86$$

2.3 Розрахунок механічної характеристики двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.8)$$

Номинальна кутова частота обертання

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1460}{30} = 152,89 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9)$$

Номинальне ковзання

$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0} = \frac{1500 - 1460}{1500} \cdot 100\% = 0,02667 \quad (2.10)$$

Номинальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{11000}{152,89} = 71,947 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.11)$$

Номінальні фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\phi H} = \frac{U_{1ЛH}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В} \quad (2.12)$$

$$I_{1\phi H} = \frac{P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,84 \cdot 0,884} = 22,507 \text{ А} \quad (2.13)$$

$$I_{1ЛH} = I_{1\phi H} = 22.507 \text{ А}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \cos \varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,7 \cdot 11000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,8316 \cdot 0,86} = 16,358 \text{ А} \quad (2.14)$$

Критичне ковзання

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

$$0,02667 \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,02667 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,02667 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)} = 0,1309 \quad (2.15)$$

$$S_K = 0.1309$$

Струм холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_1 p'^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} I_{1\phi H} \right]^2}{1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{12,747^2 - \left[\frac{0,70 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,80 \cdot 0,0333} \cdot 22,507 \right]^2}{1 - \left[\frac{0,70 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,70 \cdot 0,06667} \right]^2}} = 6,7212 \text{ А} \quad (2.16)$$

де чисельник

$$I_1 p'^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\Phi H} \right]^2 \rightarrow 12.747^2 - \left[\frac{0.70 \cdot (1 - 0.02667)}{1 - 0.70 \cdot 0.02667} \cdot 22.507 \right]^2 = 23,398 \text{ A} \quad (2.17)$$

знаменник

$$1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2 = 1 - \left[\frac{0.70 \cdot (1 - 0.02667)}{1 - 0.70 \cdot 0.02667} \right]^2 = 0.51796 \quad (2.18)$$

2.4 Параметри схеми заміщення:

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\Phi H}} \right) = 1 + \frac{6.7212}{2 \cdot 7.0 \cdot 22.507} = 1.0213 \quad (2.19)$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot M_K \cdot P_{дв.н} \cdot C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_K} \right)} = \frac{3 \cdot 219.393^2 \cdot (1 - 0.02667)}{2 \cdot 2.3 \cdot 11000 \cdot 1.0213 \cdot \left(1.5 + \frac{1}{0.1309} \right)} = 0.29137 \text{ Ом} \quad (2.20)$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0.29137 \cdot 1.5 \cdot 1.0213 = 0.44636 \text{ Ом} \quad (2.21)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_K} \right)^2 - \beta^2} = \left(\frac{1}{0.1309} \right)^2 - 1.5^2 = 7.4907 \quad (2.22)$$

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0.29137 \cdot 7.4907 \cdot 1.0213 = 2.2291 \text{ Ом} \quad (2.23)$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі

$$X_{1\sigma} = 0.42 \cdot X_{KH} = 0.42 \cdot 2.2291 = 0.93622 \text{ Ом} \quad (2.24)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0.93622}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0029801 \text{ Гн} \quad (2.25)$$

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

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{2.2291}{1.0213} = 1,2659 \text{ Ом} \quad (2.26)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1.2659}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0040295 \text{ Гн} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\Phi H} \cdot \cos \varphi - I_{1\Phi H} \cdot R_1)^2 + (U_{1\Phi H} \cdot \sin \varphi - I_{1\Phi H} \cdot X_{1\sigma})^2} \rightarrow \\ &= \sqrt{(219,393 \cdot 0,84 - 22,507 \cdot 0,44636)^2 + (219,393 \cdot 0,54259 - 22,507 \cdot 0,93622)^2} = \\ &= 199,9 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Індуктивний опір контура намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{199,9}{6,7212} = 29,742 \text{ Ом} \quad (2.29)$$

Результуюча індуктивність

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{29,742}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,094672 \text{ Гн} \quad (2.30)$$

Результуюче потокозчеплення

$$\psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 6,7212 \cdot 0,094672 = 0,89988 \quad (2.31)$$

Результуюча індуктивність обмотки статора

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		41

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.0029801 + 0.094672 = 0,097652 \text{ Гн}$$

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0.0040295 + 0.094672 = 0,098702 \text{ Гн}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0.094672^2}{0.097652 + 0.098702} = 0,954354$$

$$X_{1\sigma} = 0,93622$$

$$L_m = 0,094672$$

$$L_{1\sigma} = 0,00298$$

$$R_1 = 0,44636$$

$$L'_{2\sigma} = 0,004029$$

$$X_{\text{кн}} = 2,2291$$

$$X_\mu = 29,742$$

$$R'_2 = 0,291370$$

$$\eta = \frac{221}{250} = 0,884$$

$$n_{\text{ном}} = 1460 \text{ об/хв}$$

Параметри Т-подібної схеми замищення

Таблица 2.2

R_1	R'_2	$x_{1\sigma}$	$L_{1\sigma}$	$L'_{2\sigma}$	L_m	x_μ	$x_{\text{кн}}$
0,44636	0,291370	0,93622	0,00298	0,004029	0,094672	29,742	2,2291

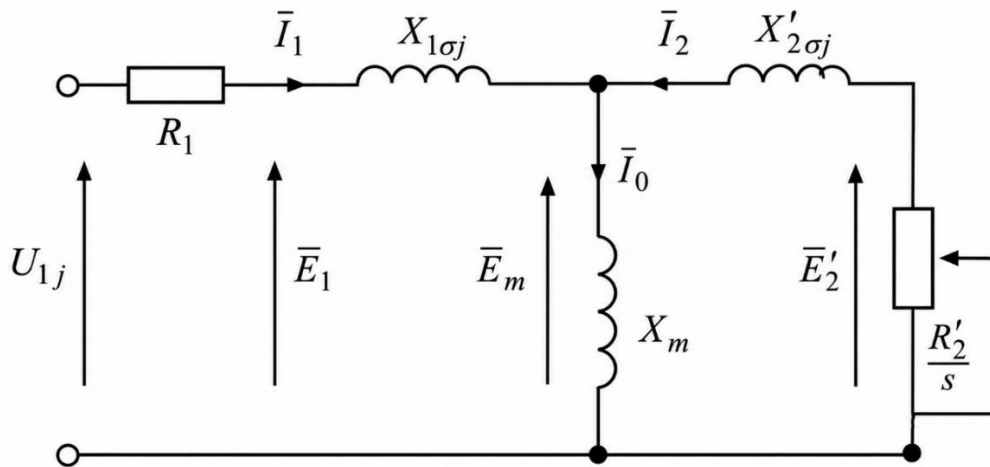


Рис. 2.2 Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Номінальний електромагнітний момент на валу двигуна

$$M' = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_{2}}{\omega_0 \cdot S_H \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{2}}{S_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot 0,29137}{157,08 \cdot 0,02667 \left[3,0548^2 + \left(0,44636 + \frac{0,29137}{0,02667} \right)^2 + \left(\frac{0,44636 \cdot 0,29137}{0,02667 \cdot 29,742} \right)^2 \right]} = 74,779 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(2.32)

$$M'' = \left(\frac{3}{2} \right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}} \right) \cdot \psi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\Phi H}^2 - I_0^2} \rightarrow M'' = 157,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(2.33)

2.4.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаємо діапазон та крок зміни ковзання

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

$$M_{em}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_{2}}{\omega_0 \cdot S_H \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{2}}{S_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \quad (2.34)$$

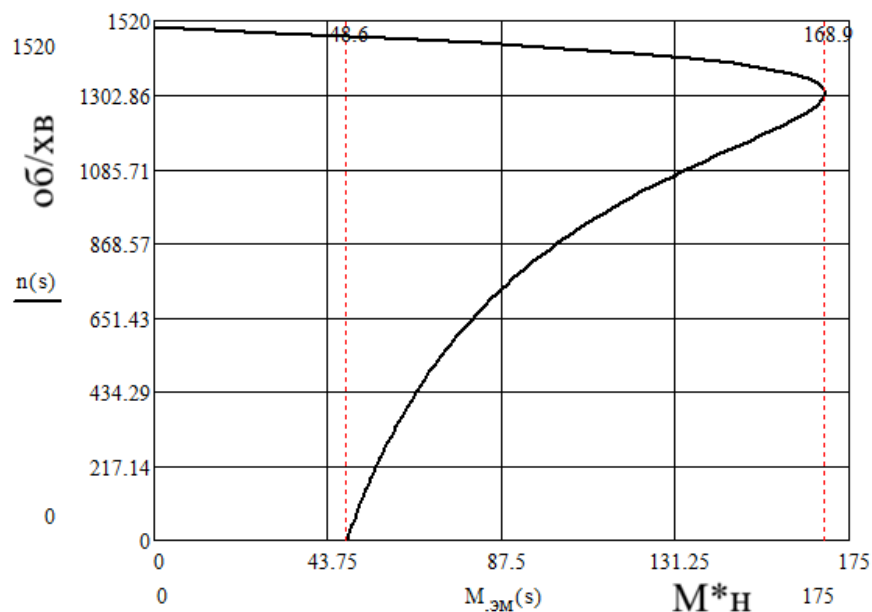


Рис. 2.3 Природна механічна характеристика двигуна

Порівняння розрахункових і паспортних даних двигуна

$$\omega_H = 152,89 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$M_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{11000}{152,89} = 71,947 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$(2.35)$$

$$M_{\text{к.пас}} = m_k \cdot M_{\text{нп}} = 2.3 \cdot 71.947 = 165,478 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$(2.36)$$

$$M_{\text{п.пас}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{нп}} = 2.3 \cdot 71.947 \text{ Н} \cdot \text{м} = 165,478 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$(2.37)$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R_1'^2 + X_{\text{кн}}'^2)}} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot 157.08 \cdot 1.0213 \cdot (0.44636 + \sqrt{(0.44636^2 + 2.2291^2)})} = 165,48 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$(2.38)$$

$$A = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0.44636}{0.29137} = 1,5319 \quad (2.39)$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K + S_H}{S_H + S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 165.48 \cdot (1 + 1.5319 \cdot 0.1309)}{\frac{0.1309}{0.02667} + \frac{0.0333}{0.1309} + 2 \cdot 1.5319 \cdot 0.1309} = 72,072 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.40)$$

$$S_{\Pi} = 1$$

$$M_{\text{пуск}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K + S_{\Pi}}{S_{\Pi} + S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 165.48 \cdot (1 + 1.5313 \cdot 0.1309)}{\frac{0.1309}{1} + \frac{1}{0.1309} + 2 \cdot 1.5319 \cdot 0.1309} = 48,624 \quad (2.41)$$

Розрахунок коефіцієнтів для рівняння навантажувальної компресорної характеристики

$$a = \frac{0.8 M_{\text{НП}}}{n_{\text{НОМ}}^2} \rightarrow \frac{0.8 \cdot 71.947}{1460^2} = 0,000027 \quad (2.42)$$

$$c = 0,2 \cdot M_{\text{НП}} \rightarrow 0.2 \cdot 71.947 = 14,3894$$

Залежність моменту від швидкості для компресорного типу навантаження

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

$$\rightarrow 0.000027002064177143932 \cdot n^2 + 14.389400000000002$$

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

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} \right) \cdot (1 - s) \quad (2.43)$$

Механічний електромагнітний момент двигуна

$$M_{em}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1\phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \cdot R'_{2}}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) \cdot S \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{2}}{S_H \cdot X_{\mu}} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1} \right)^2 \right]} \quad (2.44)$$

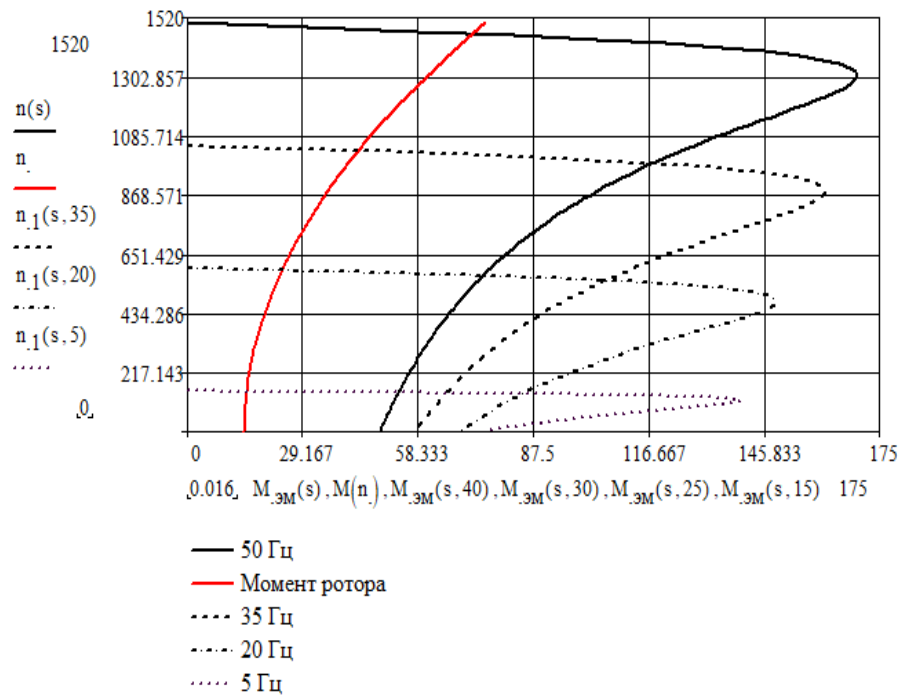


Рис. 2.4 Графіки механічних характеристик двигуна і компресора при регулюванні за скалярним законом

Побудова електромеханічної характеристики двигуна

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

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

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2}} \quad (2.45)$$

$$\sin \varphi(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2}} \quad (2.46)$$

$$I_0 = \frac{16803}{2500} = 6,7212 \text{ A}$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi(s)} \quad (2.47)$$

$$I_{\text{НОМ}} = 22,5 \text{ A}$$

$$I_{\text{H1}}(s) = I_{\text{НОМ}}$$

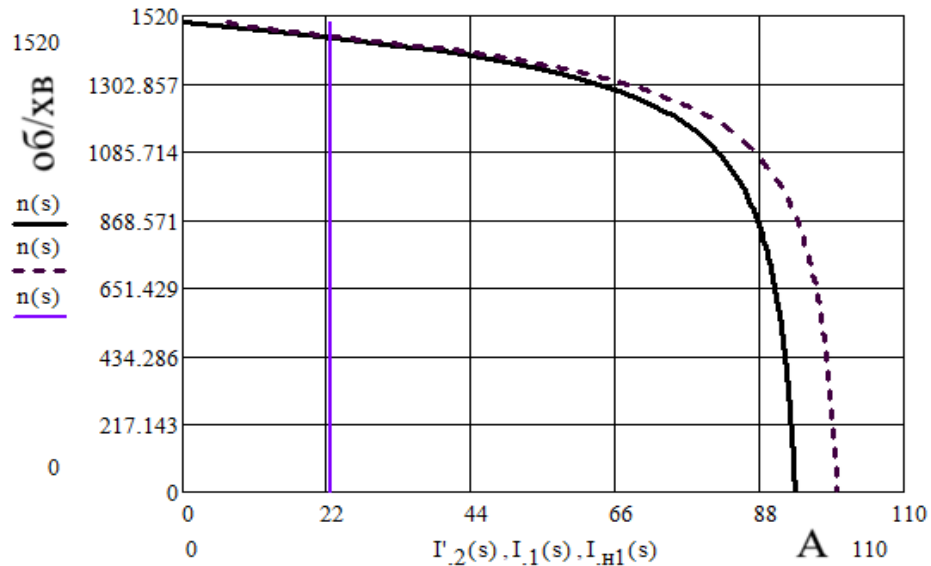


Рис. 2.5 Залежність струмів статора та частот обертання двигуна та механізму штовхача прокатного стану.

Розрахунок номінального струму статора

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2}} = \frac{219,393}{\sqrt{2,2291^2 + \left(0,44636 + \frac{0,29137}{0,02666}\right)^2}} = 18,933 \text{ A} \rightarrow \quad (2.48)$$

$$\sin \varphi(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{н}}}\right)^2}} = \frac{2,2291}{\sqrt{2,2291^2 + \left(0,44636 + \frac{0,29137}{0,02666}\right)^2}} = 0,19237 \quad (2.49)$$

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

$$\sqrt{6,7212^2 + 18,933^2 + 2 \cdot 6,7212 \cdot 18,933 \cdot 0,19237}$$

$$I_1(s) = 21,274 \text{ A} \quad (2.50)$$

2.5 Вибір апаратури керування

Оскільки вакуумна система охолодження працює в умовах змінного навантаження, для керування електроприводом системи було обрано частотний перетворювач. Використання частотного регулювання дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи приводу компресора, забезпечуючи стабільність технологічного процесу, зменшення енергоспоживання та зниження механічних навантажень на обладнання при пусках і зупинках. В системі охолодження з вакуумним компресором застосування ПЧ є особливо доцільним, оскільки процес вакуумування та підтримання заданого розрідження характеризується змінним навантаженням. У різні етапи роботи системи потрібна різна продуктивність компресора: від інтенсивного відкачування повітря на початкових стадіях до стабілізації вакууму в усталеному режимі. Використання частотного регулювання дозволяє автоматично адаптувати швидкість обертання двигуна до поточних вимог процесу.

Використання саме частотного перетворювача дає ряд переваг:

- плавний пуск електродвигуна без ударних струмів;
- регулювання продуктивності системи відповідно до потреб процесу;
- зниження енергоспоживання за рахунок роботи на часткових навантаженнях;
- зменшення вібрацій, шуму та гідравлічних (або пневматичних) ударів;
- підвищення ресурсу двигуна та механічної частини приводу.

В якості засобу керування електроприводом обрано перетворювач частоти від компанії ABB серії ACS580. Це універсальний промисловий привод, призначений для керування асинхронними двигунами, синхронними двигунами з постійними магнітами та двигунами з реактивним ротором (SynRM). Він забезпечує плавний пуск, точний контроль швидкості й крутного моменту, а також значну економію електроенергії. ACS580 має вбудовані функції оптимізації

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						48
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

енергоспоживання, підтримує векторне та скалярне керування двигуном, а також забезпечує високу надійність у промислових умовах.

Вибір саме моделі ACS580 обґрунтовано її відповідністю вимогам системи: наявність необхідного діапазону потужності, висока перевантажувальна здатність, вбудовані захисти двигуна, простота налаштування та сумісність із сучасними системами автоматизації. Це робить її доцільним рішенням для модернізації електроприводу вакуумної системи охолодження.



Рис. 2.6 Зовнішній вигляд ПЧ ACS580

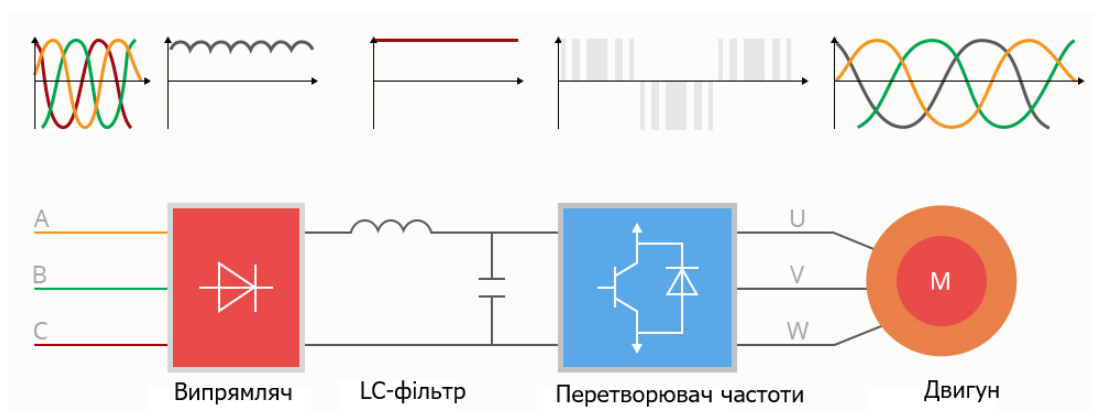


Рис.2.7 Принципова схема перетворювача частоти

Технічні характеристики частотного перетворювача ACS580

Таблиця 2.3

Параметр	Значення
Потужність	15 кВт
Живлення на вході	3х380 В
Кількість фаз/напруга на виході	3х380 В
Mmax (1 min)	150%
Номінальний Струм	32 А
Вхідна частота	50-60+-6%
Максимальна вихідна частота	500 Гц
Вбудований ПІД	Є
Режими керування	Скалярний/Векторний
Векторний режим керування з енкодером	Опція
Лінійний закон управління U/f	Є
Квадратичний закон управління U/f ²	Є
Віддалене керування	Немає

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Аналіз динамічних режимів роботи електроприводу вакуумного компресора на основі математичної моделі

Математичне моделювання в технічних системах використовується для опису реальних фізичних процесів за допомогою математичних рівнянь і залежностей. У випадку електроприводів та систем охолодження воно дозволяє формалізувати роботу об'єкта, врахувати вплив електричних, механічних процесів та отримати кількісну оцінку його поведінки без проведення великої кількості натурних експериментів.

Застосування математичного моделювання є необхідним, оскільки реальна система охолодження з вакуумним компресором є складною багатопараметричною системою зі змінним навантаженням. Проведення експериментів у реальних умовах часто є дорогим, тривалим і технологічно обмеженим. Натомість модель дозволяє досліджувати різні режими роботи системи, змінювати параметри та прогнозувати її поведінку ще на етапі проєктування або модернізації.

Результати математичного моделювання дають змогу:

- оцінити динамічні характеристики системи (перехідні процеси, час встановлення режиму);
- проаналізувати стійкість роботи електроприводу та системи в цілому;
- визначити вплив зміни навантаження на швидкість, момент та продуктивність компресора;
- дослідити рівень коливань (вібрацій) та пульсацій тиску у системі;
- підібрати оптимальні параметри регулювання частотного перетворювача;
- підвищити енергоефективність та зменшити втрати енергії;
- зменшити ризики помилок при впровадженні реальної системи.

Далі наведено структурні схеми моделі електропривода вакуумного

насоса у двох варіантах — без частотного перетворювача та з його застосуванням, а також графіки електромагнітного моменту електропривода, швидкості обертання ротора, струмів статора та ротора, а також графік зміни електромагнітного моменту приводу вакуумного насоса.

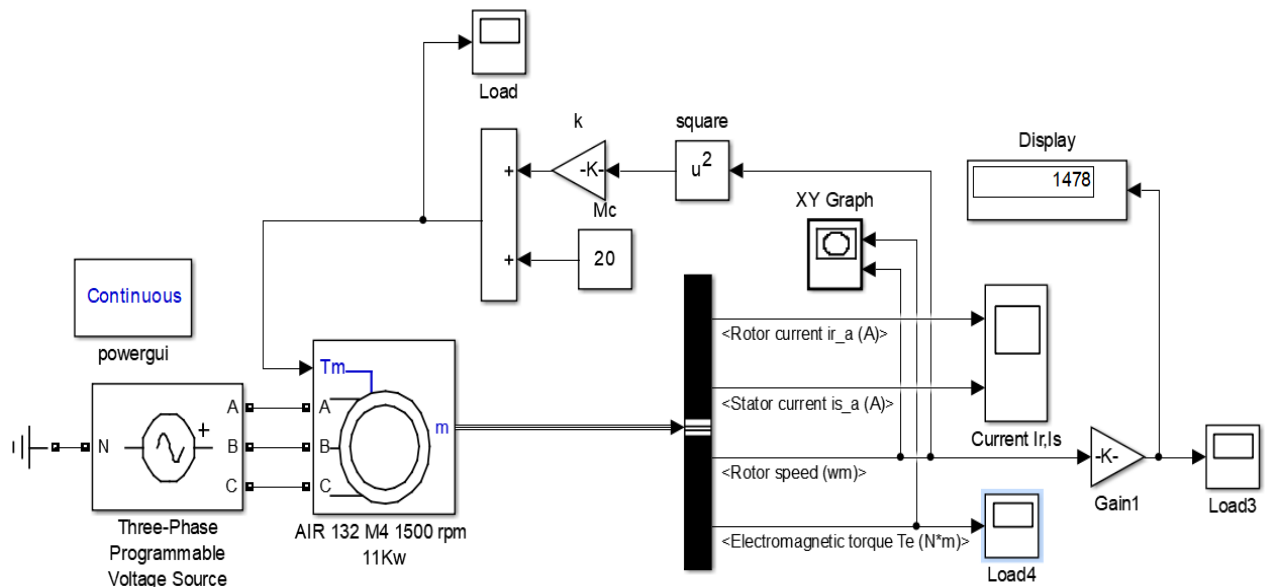


Рис. 3.1- Схема моделі електропривода вакуумного насоса без використання частотного перетворювача

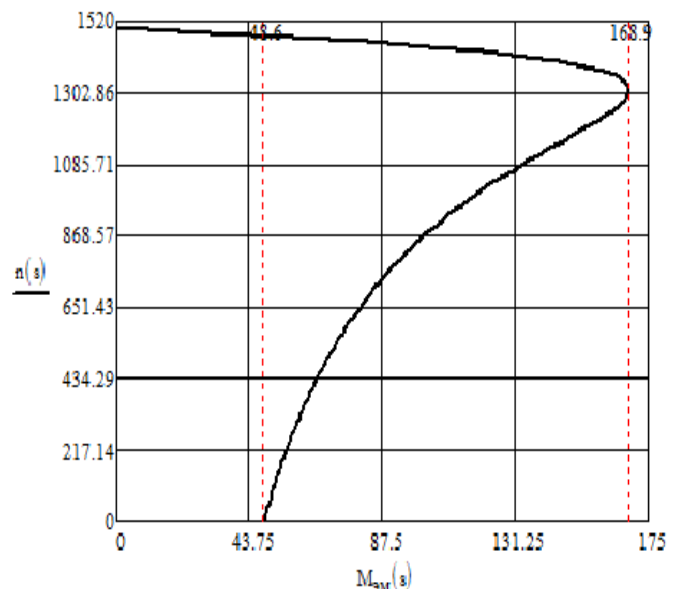
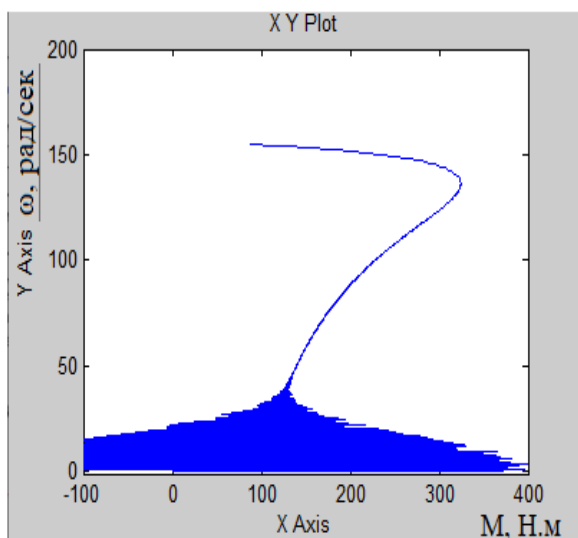


Рис. 3.2-Графік електромагнітного моменту електропривода вакуумного насоса та графік природної механічної характеристики електродвигуна приводу насосу

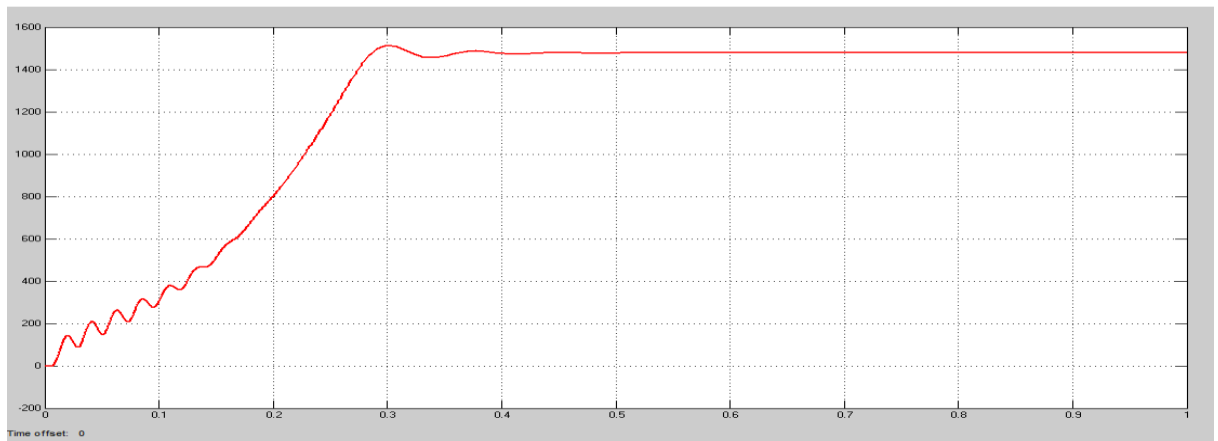


Рис. 3.3- графік зміни швидкості ротору вакуумного насосу у режимі прямого пуску без використання частотного перетворювача

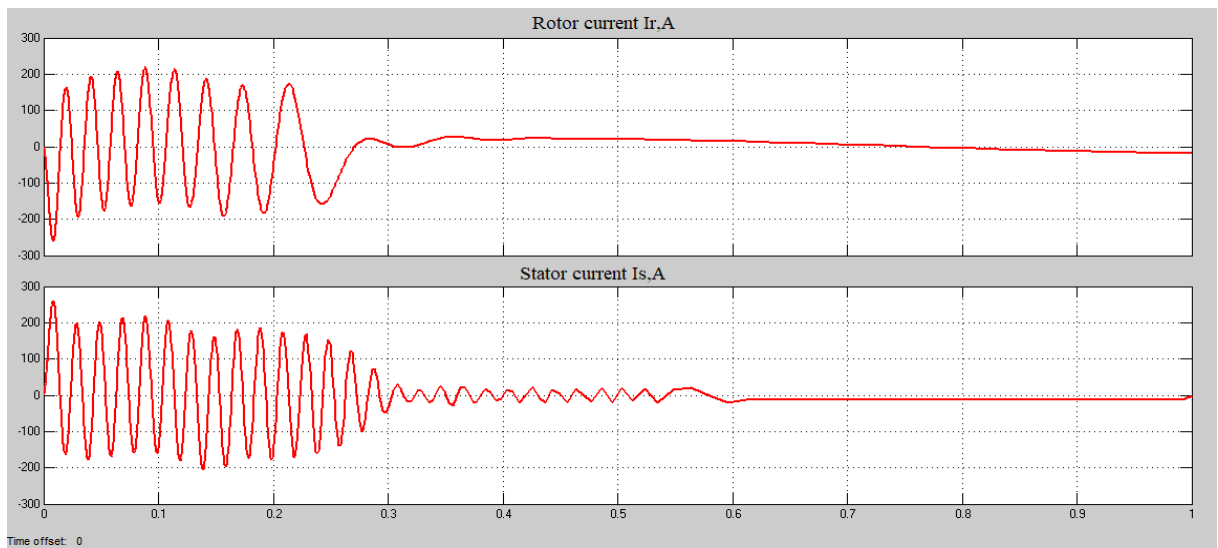


Рис. 3.4 зміни струмів ротору і статора електроприводу вакуумного насоса

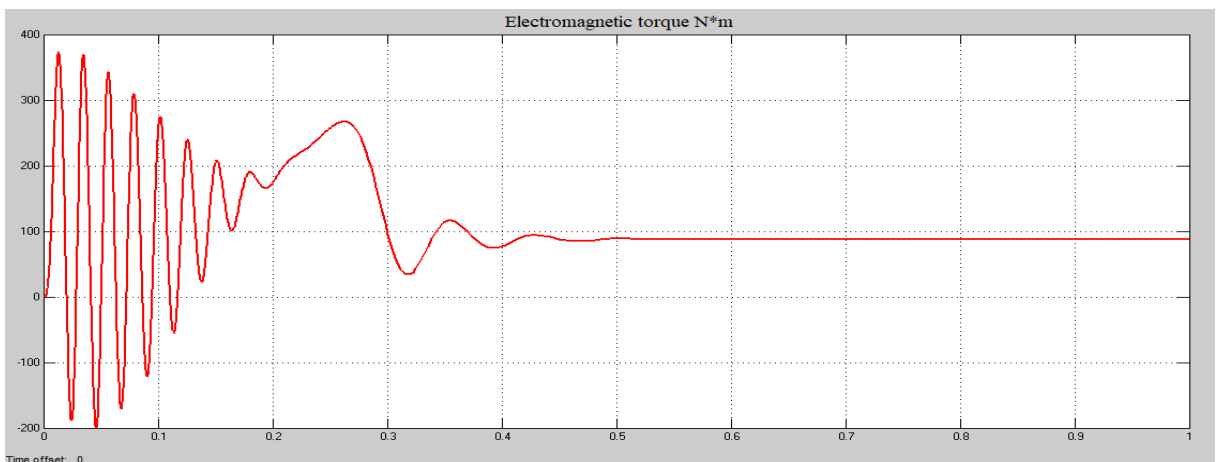


Рис. 3.4 графік зміни електромагнітного моменту приводу вакуумного насоса

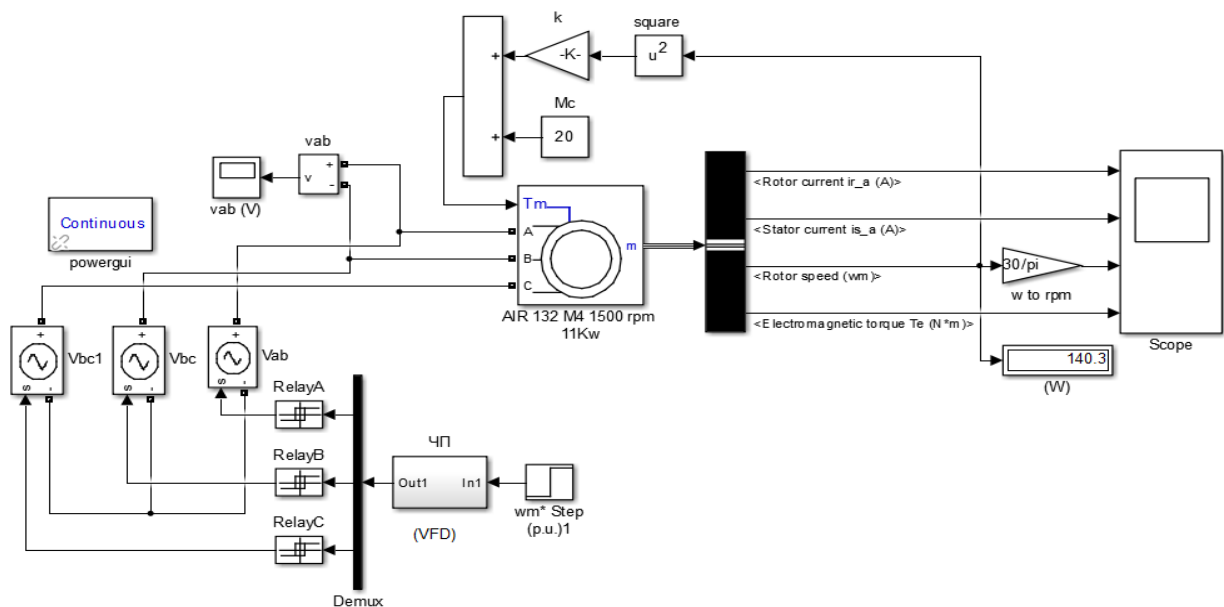


Рис. 3.5- Схема моделювання електроприводу вакуумного насосу зі використанням частотного перетворювача за скалярним законом $U/f = \text{constant}$

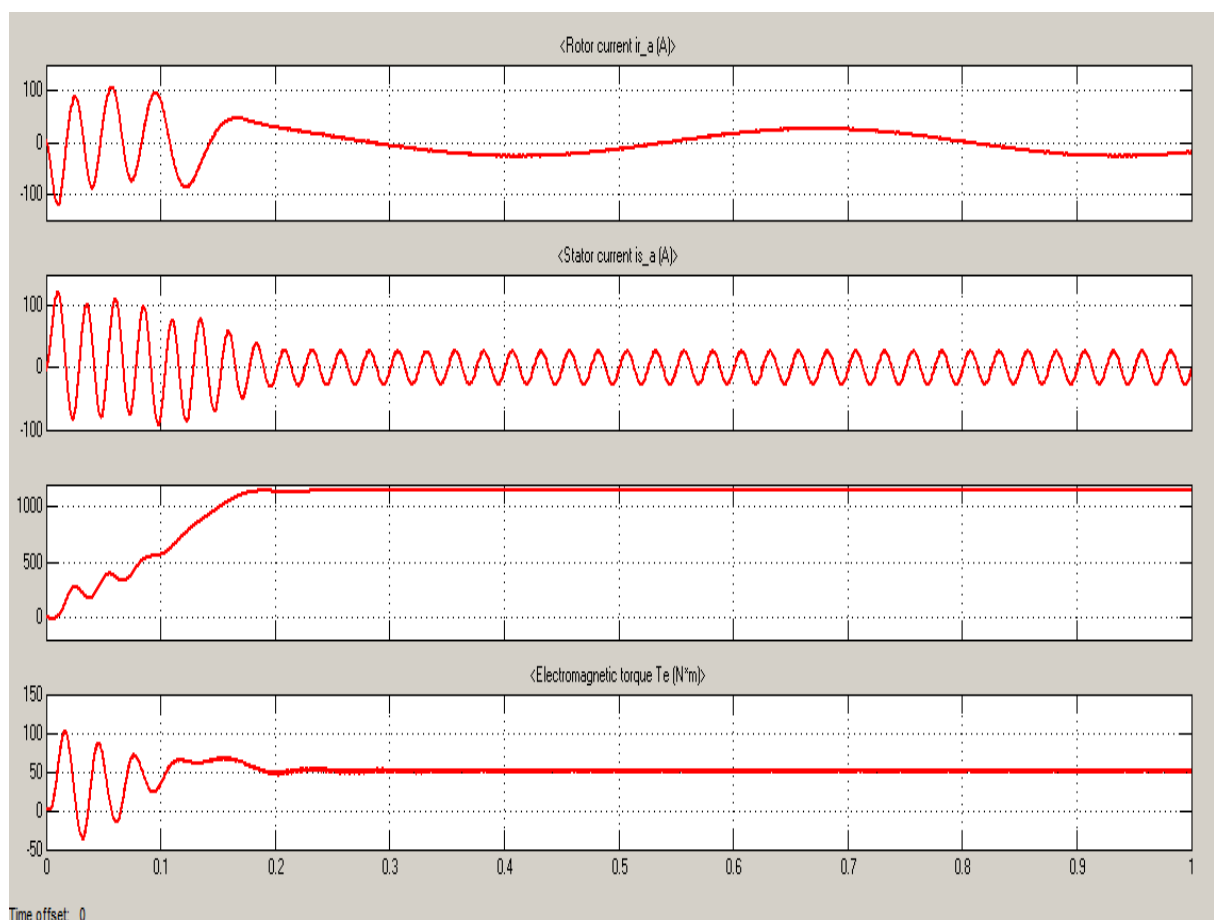


Рис. 3.6 Графічні результати частотного регулювання вакуумного насосу при $f=40 \text{ Hz}$

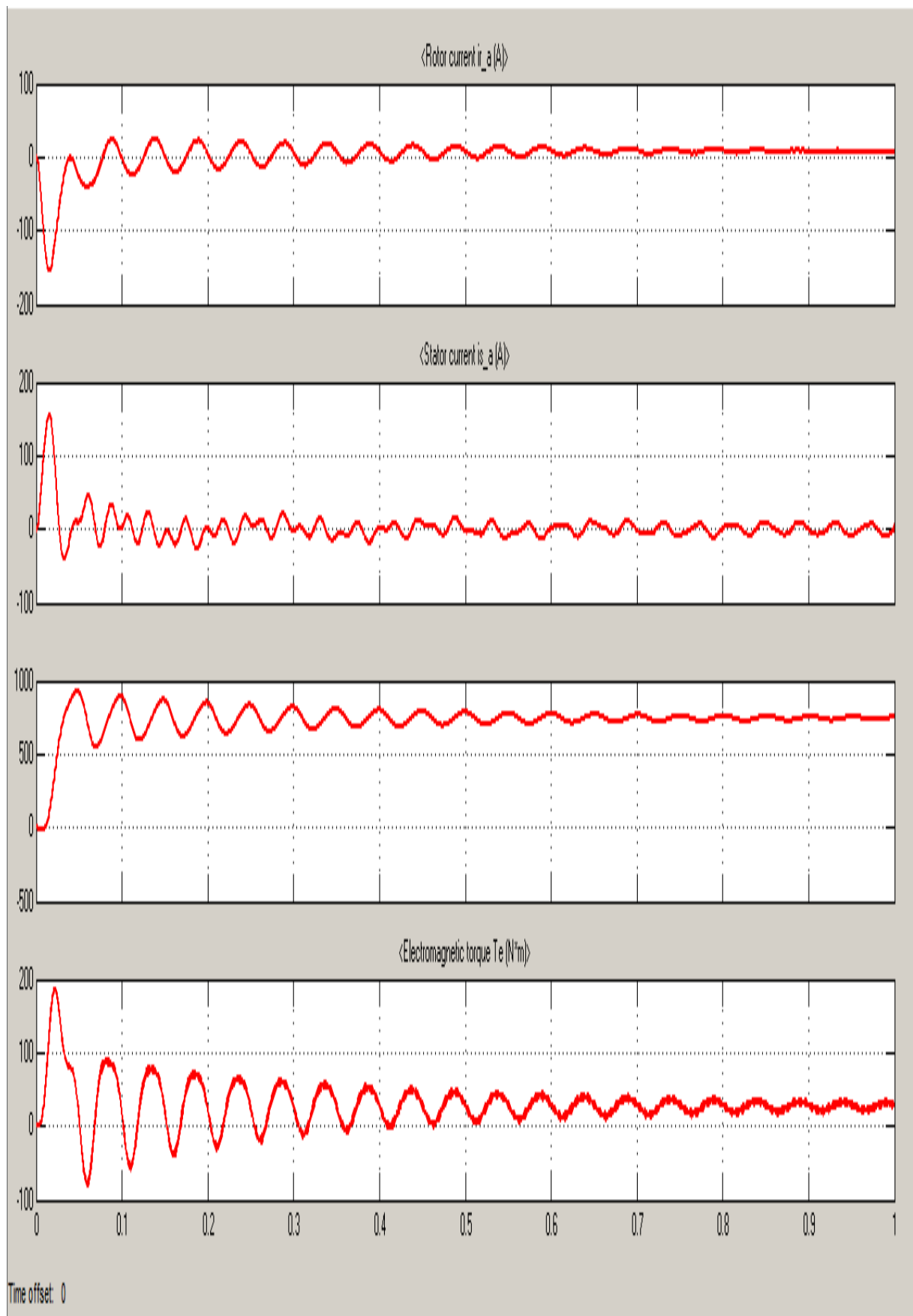


Рис. 3.7 Графічні результати частотного регулювання вакуумного насосу при $f=25$ Hz

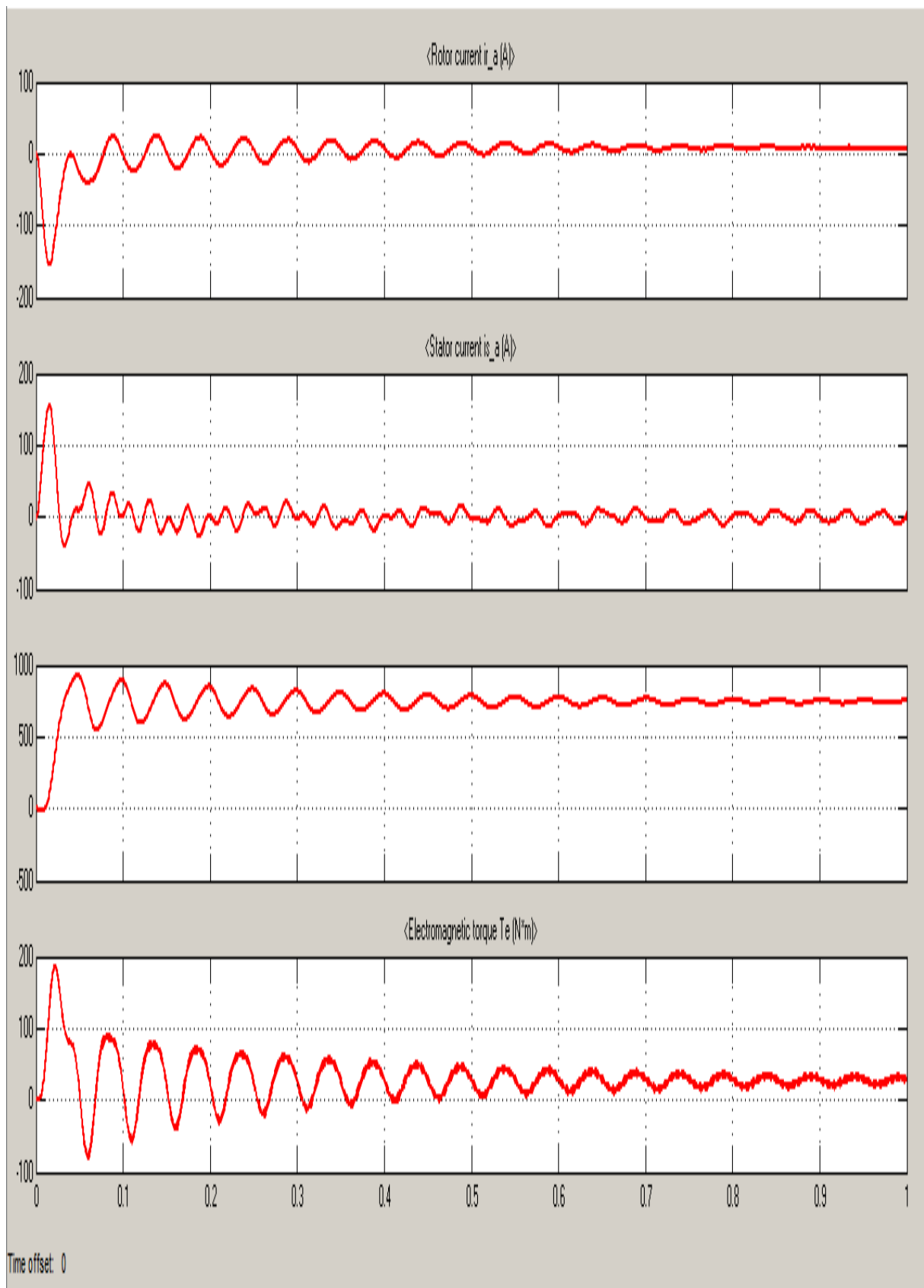


Рис. 3.8 Графічні результати частотного регулювання вакуумного насосу при $f=5 \text{ Hz}$

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

4.1 Капітальні (інвестиційні) витрати

Оцінка економічної доцільності запропонованої в дипломному проекті модернізації виражається сукупними витратами, пов'язаними з її використанням та подальшою експлуатацією. Розрахунок включає такі складові:

1. Капітальні вкладення.
2. Експлуатаційні витрати.
3. Амортизаційні відрахування.
4. 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 AIP132S4– 14000 грн.

Перетворювач частоти ABB ACS-580– 70000 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 проекту;

$K_{т}$ – транспортні витрати;

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

K_n - витрати на налагоджувальні роботи;

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

$$K_{об} = 7000 + 14000 = 84000 \text{ грн}$$

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.

$$K_{пр} = 84000 + 8400 + 16800 = \mathbf{109200} \text{ грн.}$$

4.2 Експлуатаційні витрати

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

$$B_{ек} = B_p + B_{обс} \quad (4.2)$$

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

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

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

$$B_p = 2184 + 1638 + 2184 = 6006 \text{ грн.}$$

До модернізації

$$B'_p = 3276 + 2184 + 8736 = 14196 \text{ грн}$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Економія річних витрат на поточний ремонт обладнання – **8190** грн.

Річні витрати на обслуговування обладнання

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

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, 250-350 год/рік;

t_p - дійсний річний фонд часу одного працюючого, (годин).

Оскільки овочесховище працює цілодобово, а персонал працює за графіком «доба через три», то для розрахунку використовувати річний фонд часу одного працівника:

Кількість чергувань на рік:

$$N = \frac{365}{4} = 91,25$$

Тривалість одного чергування — 24 год.

Тоді річний фонд робочого часу одного працівника:

$$t_p = 91,25 \cdot 24 = 2190 \text{ год/рік}$$

За даними Держкомстату середня заробітна плата в Україні в 2026 році становила 30350 грн. на місяць, обов'язковий платіж ЕСВ 22%.

Визначаєм річні витрати на заробітну плату одного працівника

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

Витрати на обслуговування після модернізації

$$V_{\text{обс}} = 1 \cdot 444324 \cdot \frac{250}{2190} = 50721,92 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування без модернізації

$$V'_{\text{обс}} = 1 \cdot 444324 \cdot \frac{350}{2190} = 71010,69 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування зменшилися на **20288,76** грн. на рік

4.3 Амортизаційні витрати

Амортизаційні відрахування розраховують за прямолінійним методом:

$$A = \frac{K \cdot N_a}{100} \quad (4.4)$$

де A – річні амортизаційні відрахування, грн/рік;

K – балансова (первісна) вартість обладнання, грн;

N_a – річна норма амортизації, %.

$$N_a = \frac{100}{T} \quad (4.5)$$

де T – строк служби обладнання, років.

Нормативний строк служби асинхронного двигуна AIP132S4 зазвичай 15 років, а частотного перетворювача ABB ACS580 – 10 років.

$$A = \frac{14000}{15} + \frac{7000}{10} = 7933,33 \text{ грн/рік}$$

4.4 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 11 кВт.
2. Модернізований варіант – асинхронний двигун потужністю 11 кВт з частотним перетворювачем (ПЧ) потужністю 15 кВт.

Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$W = \frac{(P_{\text{ном}} \cdot k_v \cdot h)}{\eta} \quad (4.6)$$

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

$k_v = 0,7 - 0,8$ – коефіцієнт використання, оскільки компресор працює не постійно, а вмикається залежно від температури чи тиску, для економічних розрахунків приймаємо коефіцієнт використання;

h – робочого часу двигуна за рік;

$$h = 365 \cdot 24 \cdot 0,8 = 7008 \text{ год/рік}$$

$\eta = 0,87 - 0,96$ ККД двигуна.

Розрахунок для базового варіанта (без ПЧ)

Середня споживана потужність:

$$P_{\text{ср}} = \frac{11 \cdot 0,8}{0,87} = 10,12 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії:

$$W = 10,12 \cdot 7008 = 70920,96 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$C = W \cdot \Psi = 1063814,40 \text{ грн/рік}$$

де $\Psi = 15,20 \text{ грн/(кВт} \cdot \text{год)}$

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 %.

$$P'_{\text{ср}} = \frac{8,8 \cdot 0,8}{0,96} = 7,33 \text{ кВт}$$

Річне споживання електроенергії:

$$\dot{W} = 7,33 \cdot 7008 = 51392 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$\dot{C} = \dot{W} \cdot \Psi = 51392 \cdot 15,20 = 781158,4 \text{ грн/рік}$$

Зменшення річного споживання електроенергії:

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

$$\Delta W = 70920,96 - 51392 = 19528,96 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Річна економія коштів:

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

$$E = 1063814,40 - 781158,4 = 282656 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, використання частотного перетворювача дозволяє знизити річне споживання електроенергії на 19528,96 кВт·год та отримати економічний ефект у розмірі 282656 тис. грн на рік.

4.5 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 19528,96 кВт·год.
- збільшення ефективності роботи двигуна до 96%;
- збільшився термін служби механічних частин двигуна;
- суттєво знизилася витрати на капітальний ремонт.

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{ок} = \frac{K_{пр}}{E} = \frac{109200}{8190 + 20288,76 + 282656} \approx 0,4 \text{ року}$$

Отримані результати показують, що вкладені кошти в модернізацію електропривода повертаються протягом 0,4 року. Такий показник свідчить про економічну доцільність проекту та підтверджує ефективність застосування запропонованого технічного рішення.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні вимоги

В овочесховищі з системою вакуумного охолодження основними виробничими процесами є робота холодильного обладнання, вакуумного насоса (компресора), електродвигунів, систем автоматичного керування та допоміжного обладнання.

До робіт з обслуговування електрообладнання та холодильних установок овочесховища допускаються особи, які досягли 18-річного віку, пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктаж з охорони праці та перевірку знань з питань безпеки праці, а також успішно склали перевірку знань з правил безпечної експлуатації електро- та холодильного обладнання.

Умови праці відносяться до категорії підвищеної небезпеки, оскільки присутні:

- електричний струм високої та низької напруги;
- обертові механізми;
- знижений тиск у вакуумній камері;
- шум і вібрація;
- холодоагенти (при витокі можливий ризик для здоров'я);
- підвищена вологість у холодильних зонах.

Охорона праці на об'єкті регламентується документами:

- Закон України «Про охорону праці»;
- НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок;
- ДСТУ ISO 45001:2019 – Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці;
- ДСанПіН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму;
- ДБН В.1.2-7:2008 – Загальні вимоги пожежної безпеки;

- НПАОП 0.00-1.21-07 – Правила безпечної експлуатації холодильних установок.

Основні небезпечні фактори:

- електричний струм
- механічні небезпеки (обертові частини)
- вакуумний тиск
- шум
- вібрація
- низька температура
- підвищена вологість.

5.2 Вимоги перед початком роботи (зміни)

Перед початком роботи працівник зобов'язаний:

- перевірити справність спецодягу та засобів індивідуального захисту (рукавиці, спецвзуття);
- пройти інструктаж з охорони праці (за необхідності — цільовий інструктаж);
- перевірити технічний стан вакуумного насоса, компресора та холодильного обладнання;
- переконатися у справності заземлення електрообладнання;
- перевірити відсутність пошкоджень кабелів, ізоляції та пускової апаратури;
- перевірити справність системи аварійного вимкнення;
- переконатися у відсутності сторонніх предметів у зоні обертових частин механізмів;
- перевірити герметичність вакуумної системи.

5.3 Вимоги безпеки під час роботи

Під час роботи забороняється:

- торкатися рухомих частин обладнання;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- відкривати електрощити під напругою;
- виконувати ремонтні роботи без відключення обладнання;
- перевищувати допустимі режими роботи вакуумного компресора;
- залишати працююче обладнання без нагляду;
- працювати при виявленні витоку холодоагенту або розгерметизації системи.

Під час роботи необхідно:

- контролювати параметри вакууму, тиску та температури;
- стежити за показниками струму двигуна та частотного перетворювача;
- забезпечувати нормальну вентиляцію приміщення;
- використовувати засоби індивідуального захисту;
- дотримуватись встановлених технологічних режимів роботи.

5.4 Вимоги після завершення роботи

Після закінчення роботи працівник повинен:

- вимкнути обладнання у встановленій послідовності;
- зняти напругу з електроустановок;
- очистити робоче місце від забруднень і сторонніх предметів;
- перевірити стан обладнання перед консервацією або зупинкою;
- повідомити змінника або відповідальну особу про всі виявлені несправності;
- зробити запис у змінному журналі (за наявності);
- прибрати інструменти та засоби захисту у встановлені місця.
-

5.5 Негативний вплив шуму на організм людини

У процесі роботи овочесховища з системою вакуумного охолодження основними джерелами шуму є вакуумні насоси, холодильні компресори, електродвигуни та вентиляційне обладнання. Сукупна дія цих джерел створює постійний виробничий шум, який може негативно впливати на стан здоров'я працівників.

Рівень шуму від декількох джерел визначається:

$$L = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (5.1)$$

де L — сумарний рівень шуму, дБ;

L_i — шум окремого джерела.

Рівень шуму оцінюється у децибелах (дБ) і визначається логарифмічною залежністю:

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (5.2)$$

де L — рівень шуму, дБ;

I — інтенсивність звуку;

I_0 — порогова інтенсивність слуху.

Згідно з ДСанПіН 3.3.6.037-99, допустимий рівень шуму на робочих місцях при тривалості робочої зміни 24 години допустимий рівень шуму повинен бути до 70 дБ.

Тривала дія підвищеного рівня шуму може призводити до:

- зниження слухової чутливості та розвитку професійної приглухуватості;
- підвищення втомлюваності та зниження працездатності;
- порушення роботи центральної нервової системи;
- підвищення артеріального тиску та ризику серцево-судинних захворювань;
- зниження концентрації уваги, що підвищує ризик виробничих травм.

Особливо небезпечним є шум понад 85 дБ, який при тривалому впливі викликає незворотні зміни слухового апарату.

Для зниження негативного впливу шуму в овочесховищі застосовуються:

- встановлення шумопоглинаючих кожухів на обладнання;
- розміщення шумних агрегатів в окремих приміщеннях;
- використання віброгасних опор під електродвигуни;
- застосування індивідуальних засобів захисту (наушники, беруші);
- регулярний контроль рівня шуму.

5.6 Вібрація та її негативний вплив на людину

У процесі роботи овочесховища з системою вакуумного охолодження джерелами вібрації є вакуумні насоси, холодильні компресори, електродвигуни, вентилятори та інше обертове обладнання. Вібрація передається через фундаменти, рами та трубопроводи і може впливати як на обладнання, так і на персонал, що обслуговує установку.

Рівень вібрації оцінюється прискоренням коливань:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (5.3)$$

де a_{eq} — еквівалентне вібраційне прискорення, м/с²;

$a(t)$ — миттєве значення прискорення;

T — час спостереження.

Згідно з санітарними нормами ДСН 3.3.6.039-99, допустимі значення вібрації для виробничих приміщень залежать від частоти коливань, але для загальної виробничої вібрації орієнтовно становлять:

- до 1,1 м/с² — загальна вібрація;
- до 2,0 м/с² — локальна вібрація.

Тривала дія вібрації на працівника може призводити до розвитку професійних захворювань та функціональних порушень організму, зокрема:

- порушення роботи опорно-рухового апарату;
- болі в суглобах та м'язах;
- погіршення кровообігу в кінцівках;
- розвиток вібраційної хвороби;
- порушення нервової системи (підвищена втомлюваність, дратівливість);
- зниження чутливості пальців та координації рухів.

Особливо небезпечною є локальна вібрація, яка передається через руки при контакті з інструментами або корпусами обладнання, що може викликати хронічні професійні захворювання.

Для зменшення впливу вібрації в системі вакуумного охолодження передбачаються:

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						68
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- встановлення обладнання на вібропоглинаючі опори;
- балансування обертових частин (валів, крильчаток);
- своєчасне технічне обслуговування та змащення механізмів;
- використання гнучких вставок у трубопроводах;
- обмеження часу перебування працівників біля джерел вібрації;
- застосування засобів індивідуального захисту.

5.7 Освітлення виробничих приміщень

Раціональне освітлення у виробничих приміщеннях овочесховища з системою вакуумного охолодження є важливим фактором безпечних і комфортних умов праці. Недостатній або надмірний рівень освітлення може призводити до підвищеної втомлюваності працівників, зниження продуктивності праці та зростання ризику виробничого травматизму.

У приміщеннях холодильних камер, машинних залів та зон обслуговування обладнання застосовується природне, штучне та комбіноване освітлення. Основним є штучне освітлення, яке повинно забезпечувати достатню видимість елементів обладнання, контрольно-вимірювальних приладів та робочих зон.

Нормування освітлення здійснюється відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» та санітарних норм.

Освітленість робочої поверхні визначається за формулою:

$$E = \frac{F}{S} \quad (5.4)$$

де E — освітленість, лк;

F — світловий потік, лм;

S — площа освітлюваної поверхні, м².

Для виробничих приміщень овочесховища приймаються такі значення освітленості:

- машинні та компресорні приміщення — 200–300 лк;
- зони обслуговування обладнання — 300–500 лк;

- проходи та допоміжні приміщення — 100–150 лк.

Порушення норм освітлення може призводити до:

- швидкої втоми очей;
- зниження концентрації уваги;
- підвищення ризику помилок під час обслуговування обладнання;
- збільшення виробничого травматизму;
- головного болю та загального зниження працездатності.

Для забезпечення безпечних умов праці передбачаються:

- використання енергоефективних LED-світильників;
- рівномірне розміщення світильників у приміщенні;
- регулярне очищення світильників від пилу;
- резервне аварійне освітлення;
- контроль рівня освітленості під час експлуатації.

5.8 Електробезпека

У процесі експлуатації овочесховища з системою вакуумного охолодження основну небезпеку становить ураження електричним струмом, оскільки в роботі використовується електродвигуни, вакуумні насоси, холодильне обладнання та частотні перетворювачі. Електрообладнання працює під напругою до 0,4 кВ, що відноситься до категорії підвищеної небезпеки.

Основні причини ураження електричним струмом:

- пошкодження ізоляції кабелів;
- дотик до струмоведучих частин;
- несправність заземлення;
- помилки при обслуговуванні та ремонті обладнання;
- потрапляння вологи на електроустановки.

Струм, що проходить через тіло людини, визначається за законом Ома:

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						70
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$I = \frac{U}{R} \quad (5.5)$$

де I — струм через тіло людини, А;

U — напруга дотику, В;

R — опір тіла людини (в середньому 1000–2000 Ом).

При напрузі 220 В і опорі 1000 Ом струм становить:

$$I = 0,22 \text{ А} = 220 \text{ мА}$$

що є смертельно небезпечним значенням.

Електробезпека регламентується:

- НПАОП 0.00-1.28-10 – правила охорони праці під час експлуатації електроустановок;
- ПУЕ (Правила улаштування електроустановок);
- ДСТУ EN 61140 – захист від ураження електричним струмом.

Згідно з нормативами, всі електроустановки повинні мати:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимкнення живлення при аварії;
- захисне занулення;
- ізоляцію струмоведучих частин;
- блокування доступу до електрощитів.

Ураження електричним струмом може викликати:

- опіки різного ступеня;
- порушення серцевого ритму (фібриляцію серця);
- ураження нервової системи;
- втрату свідомості;
- летальні наслідки при високих значеннях струму.

Найнебезпечнішим є змінний струм частотою 50 Гц, який використовується у промислових мережах.

Для забезпечення безпечної експлуатації передбачено:

- обов'язкове заземлення всіх металевих корпусів обладнання;
- використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ);

- регулярна перевірка ізоляції кабелів;
- застосування блокувальних пристроїв на електрощитах;
- допуск до роботи лише персоналу з групою з електробезпеки;
- використання діелектричних засобів захисту (рукавички, килимки, інструмент).

5.9 Пожежна безпека

У процесі експлуатації овочесховища з системою вакуумного охолодження існує потенційна пожежна небезпека, пов'язана з використанням електрообладнання, частотних перетворювачів електродвигунів, силових кабельних мереж та холодильного обладнання. Основними причинами виникнення пожеж можуть бути коротке замикання, перевантаження електричних мереж, перегрів обладнання, порушення ізоляції проводів або неправильна експлуатація електроустановок.

Пожежна безпека на об'єкті регламентується такими документами:

- Кодекс цивільного захисту України;
- ДБН В.1.1-7:2016 “Пожежна безпека об'єктів будівництва”;
- НАПБ А.01.001-2014 “Правила пожежної безпеки в Україні”;
- ПУЕ (Правила улаштування електроустановок).

Основні причини виникнення пожежі:

- коротке замикання в електричних мережах;
- перевантаження електродвигунів і трансформаторів;
- перегрів частотних перетворювачів;
- іскріння контактів;
- порушення правил експлуатації електрообладнання;
- відсутність або несправність заземлення.

Нагрівання провідника при протіканні струму визначається законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t \quad (5.6)$$

де Q — кількість теплоти, Дж;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						72
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

I — сила струму, А;

R — опір провідника, Ом;

t — час проходження струму, с.

Зі збільшенням струму різко зростає тепловиділення, що може призвести до перегріву ізоляції та займання.

Пожежі на виробничих об'єктах можуть призвести до:

- пошкодження або повного знищення обладнання;
- зупинки технологічного процесу;
- матеріальних збитків;
- загрози життю та здоров'ю персоналу;
- виділення токсичних продуктів горіння (особливо при горінні ізоляції кабелів і пластмас).

Для запобігання виникненню пожеж передбачаються:

- автоматичні системи пожежної сигналізації;
- порошкових вогнегасників (ОП) — універсальні для гасіння електроустановок під напругою;
- вуглекислотних вогнегасників (ОУ) — ефективні для гасіння електрообладнання без пошкодження техніки;
- автоматичну пожежну сигналізацію;
- систему оповіщення про пожежу;
- при необхідності — систему автоматичного порошкового або газового пожежогасіння в електрощитових та машинних приміщеннях;
- контроль стану електропроводки та ізоляції;
- захист електромереж автоматичними вимикачами;
- недопущення перевантаження електродвигунів і ПЧ;
- регулярні інструктажі персоналу з пожежної безпеки;
- вільні евакуаційні виходи та плани евакуації.

Розрахунок кількості вогнегасників виконується відповідно до площі приміщення та категорії пожежної небезпеки згідно з НАПБ А.01.001-2014.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						73
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуто питання модернізації електропривода вакуумного насоса системи охолодження шляхом заміни стандартного режиму живлення асинхронного двигуна на частотне регулювання з використанням перетворювача частоти. Проведено аналіз існуючої системи електропривода та виявлено її основні недоліки, зокрема значні пускові струми, підвищене енергоспоживання при роботі на змінних навантаженнях, а також недостатньо плавне регулювання продуктивності вакуумного насоса. Виконано математичне моделювання електромеханічних процесів у системі електропривода, що дозволило дослідити динаміку зміни електромагнітного моменту, швидкості обертання ротора та струмів статора і ротора при різних режимах роботи. На основі отриманих математичних залежностей проведено аналіз перехідних процесів та стійкості системи.

Для дослідження роботи електропривода також використано середовище MATLAB/Simulink, у якому побудовано модель системи без частотного перетворювача та з його застосуванням. Моделювання підтвердило ефективність використання частотного регулювання, зокрема зменшення пускових навантажень, покращення динамічних характеристик та стабілізацію роботи вакуумного насоса.

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що впровадження частотного перетворювача дозволяє: знизити енергоспоживання електропривода; забезпечити плавний пуск і зупинку двигуна; зменшити механічні навантаження на вал і муфтові з'єднання; підвищити надійність та ресурс обладнання; покращити якість регулювання вакуумного процесу.

Виконано техніко-економічне обґрунтування, яке показало доцільність модернізації за рахунок зменшення річних експлуатаційних витрат та отримання економічного ефекту, що забезпечує прийнятний термін окупності проєкту.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						74
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У розділі охорони праці проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори виробництва та запропоновано комплекс заходів щодо забезпечення безпечних умов експлуатації обладнання.

Таким чином, проведені математичні розрахунки, комп'ютерне моделювання в MATLAB та техніко-економічний аналіз підтверджують ефективність запропонованої модернізації електропривода вакуумного насоса системи охолодження.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.5.3	Арк
						75
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Навчально-методичний посібник. / В.І. Дуганець, І.М.Бендера, В.А. Дідур та ін. За ред. В.І. Дуганця, І.М.Бендери, В.А. Дідура. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В. 2013. – 566 с.
2. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод / [Дідур В.А., Савченко О.Д., Пастушенко С.І., Мовчан С.І.]. – Запоріжжя, Прем'єр, 2005. – 464 с.
3. Холодильні установки: Підручник: У двох книгах. / І.Г. Чумак, В.П.Чепурненко та ін. – К.: Либідь, 1995
4. Масліков М.М. Холодильна технологія харчових продуктів: Навч. посіб. / М.М. Масліков – К.: НУХТ, 2007. – 335 с.
5. Холодильні установки: Підручник / 6-е вид., перероблене і доповнене / І.Г. Чумак, В.П. Чепурненко, С.Ю. Лар'яновський та ін.; За ред. І.Г. Чумака. – Одеса: Рефпринтінфо, 2006. – 550 с.
6. Жихарева Н. В. Оптимізація обладнання систем кондиціонування повітря : навч. посіб. / Н. В. Жихарева; Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса : ОНАХТ, 2014. – 118 с.
7. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів : навч. посіб. / Джеджула В. В. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 71 с. ISBN 978–966–641–830–5.
8. Зінич П. В.Вентиляція громадських будівель : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / П. Л. Зінич ; Київський національний ун-т будівництва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2002. – 256 с.: іл. – Бібліогр.: с. 248–251. – ISBN 966–627–061–7.
9. Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисюк, В. А. Гаврилюк та ін.]; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 494 с.

10. Видмиш А.А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник / А. А. Видмиш, С. М. Бабій, В. В. Петрусь. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 96 с.

11. Моделювання електромеханічних систем : підручник / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й., Сисук Г.Ю., Садовой О.В]. – Кременчук, 2001. – 410 с.

12. Півняк Г.Г. Сучасні частотно – регульовані асинхронні електроприводи з широтно – імпульсною модуляцією : монографія / Г.Г. Півняк, О.В. Волков.- Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

13. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. Київ: НТУУ "КПІ", 2011. 421 с. Електронний ресурс.. Режим доступу: https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf

14. Цідило І. М, Ковальський Імітаційне моделювання засобами matlab у структурі підготовки інженера-педагога. Наукові записки. Серія Педагогіка №1, 2013. С.31-40

15. Мазнєв Г.Є., Турченко М.М., Щетіпін М.Д. Економічне обґрунтування інженерних рішень в сфері АПК: /Навч. посібник. – Харків: ХДТУСГ, 2001.- 401с.

16. Петрович Й.М., Кіт А.Ф., Кулішов В.В. та ін. Економіка підприємства: Підручник / За загальною редакцією Й.М. Петровича. – Львів: „Магнолія плюс”, видавець В.М. Піча.- 2004.-680с.

17. Зеркалов Д.В. Охорона праці. навч. посібник. К.: «Основа». 2015. 348 с.

18. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. та ін. Основи охорони праці: підручник. – К.: Основа, 2011. – 474 с.