

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Модернізація електроприводу насосу водопостачання»

Здобувач: Патерко О. С.

IV курсу, групи АЕМ-40

Керівник: доцент Ревенюк Т. А.

Кваліфікаційна робота бакалавра допускається до захисту.

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

Завідувач кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

здобувачу вищої освіти

Патерко Олексію Сергійовичу

Тема роботи: «Модернізація електроприводу насосу водопостачання».

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

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

Строк подання студентом роботи: 15.06.2026 р.

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

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

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

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

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

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

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електро-приводу.

6. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел. Додатки.

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

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7 Дата видачі завдання: 05.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми насосу. Загальна характеристика насосу, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода насосу. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу насосу. Формулювання вимог до електроприводу насосу, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.	30.04.2026	
3	Дослідження роботи електроприводу на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу насосу. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу до і після модернізації.	25.05.2026	
4	Організація та технологія монтажу, ремонту і обслуговування та техніка безпеки праці при обслуговуванні електроприводу вантажного підйомнику.	03.06.2026	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2026	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.2026	
8	Перевірка роботи на доброчесність. Рецензування роботи	18.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	23.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Патерко О. С.

Керівник _____ Ревенюк Т. А.

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

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Патерко О. С.

РЕФЕРАТ

Патерко Олексій Сергійович. «Модернізація електроприводу насосу водопостачання». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2026. – 80 с. Іл.: 6. Табл.: 20.

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

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

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

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

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

ABSTRACT

Paterko Oleksiy Serhiyovych. "Modernization of the Electric Drive of a Water Supply Pump". Bachelor's qualification work. Odesa: ONTU, 2026. – 80 p. Ills.: 6. Tables: 20.

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

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

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

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

Keywords: water supply pump, automated electric drive, frequency inverter, mathematical model, variable frequency speed control, mechanical characteristic.

ЗМІСТ

1.1	Загальна характеристика насосного обладнання в промисловому водопостачанні.	8
1.2	Класифікація насосів за принципом дії та галузями застосування.	9
1.3	Відцентрові насоси: будова, принцип дії та класифікація.	12
1.4	Відцентрові насоси великої продуктивності: конструктивні різновиди. ...	15
1.5	Кавітація у відцентрових насосах та методи її попередження.	17
1.6	Порівняльний аналіз конструктивних різновидів відцентрових насосів для промислового водопостачання.	18
1.7	Регулювання режимів роботи відцентрових насосів великої продуктивності.	20
1.8	Тенденції розвитку насосного обладнання для промислового водопостачання.....	22
2	РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ НАСОСА, ВИБІР АСИНХРОННОГО ДВИГУНА АІР315М4 ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ.....	24
2.1	Вихідні дані та постановка задачі.	24
2.2	Розрахунок гідравлічної та валової потужності насоса.....	26
2.3	Вибір та перевірка двигуна АІР.	27
2.4	Принципи роботи перетворювачів частоти.	30
2.5	Розрахунок параметрів і вибір перетворювача частоти.	31
2.6	Розрахунок параметрів системи керування.	33
2.7	Розрахунок річної економії електроенергії від застосування ПЧ.	34
3	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	36
3.1	Актуальність математичного моделювання електроприводу насоса.	36
3.2	Рівняння асинхронного двигуна у природній системі координат.....	36
3.3	Перетворення Парка–Горєва.	38
3.4	Математична модель у формі рівнянь стану.	41
3.5	Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна.....	43

					<i>КРБ.ЕтаМ.141.641-03.9</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Патерко О. С.				Модернізація електроприводу насосу водопостачання	Літ.	Аркуш
Керівник	Ревенюк Т. А.						
						ОНТУ, АЕМ-40а	
Зав.кафедри	Жигайло О. М.						

3.7	Зведена таблиця параметрів моделі для Simulink.	49
3.8	Налаштування Simulink-моделі.....	50
3.9	Результати моделювання.	51
4	ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ	55
4.1	Постановка задачі.....	55
4.2	Аналіз графіка навантаження насоса.....	55
4.3	Розрахунок річного споживання і вартості електроенергії.....	56
4.5	Загальна річна економія.....	59
4.6	Розрахунок терміну окупності.	60
4.7	Прогноз економічного ефекту з урахуванням зростання тарифів.....	62
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСОСІВ ПРОМИСЛОВОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ	63
5.1	Нормативно-правова база охорони праці на насосних станціях.	63
5.2	Вимоги безпеки при монтажі насосного обладнання.	65
5.3	Електробезпека при монтажі і підключенні електрообладнання.	68
5.4	Техніка безпеки при пусконаладжувальних роботах.....	70
5.5	Охорона праці при технічному обслуговуванні.	71
5.6	Протипожежна безпека.	72
5.7	Захист від шуму і вібрації. Мікроклімат та вентиляція.....	73
5.8	Надання першої допомоги при виробничих травмах.	74
5.9	Організаційні заходи охорони праці.....	75
	ВИСНОВКИ.....	78
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

					<i>КРБ.ЕтаМ.141.641-03.9</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив</i>		<i>Патерко О. С.</i>			<i>Модернізація електроприводу насосу водопостачання</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>
<i>Керівник</i>		<i>Ревенюк Т. А.</i>					
						<i>ОНТУ, АЕМ-40а</i>	
<i>Зав.кафедри</i>		<i>Жигайло О. М.</i>					

1 РІЗНОВИДИ ПРОМИСЛОВИХ НАСОСІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ ВЕЛИКОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

1.1 Загальна характеристика насосного обладнання в промисловому водопостачанні.

Промислове водопостачання є однією з ключових галузей інженерної інфраструктури, що забезпечує безперебійну роботу підприємств різних секторів економіки. Насосне обладнання у цій системі виконує функцію серця: воно підтримує необхідний тиск та витрату рідини на всіх ділянках технологічного ланцюжка. Від правильного вибору і технічного стану насосів безпосередньо залежить надійність водопостачання, енергоефективність та безпека виробничих процесів.

Широкий діапазон умов експлуатації - від мілководних водозаборів з малим статичним напором до глибоких артезіанських свердловин з тиском, що перевищує 60 атм, - зумовив появу значної кількості конструктивних рішень насосного обладнання. Кожний тип насоса має свою нішу застосування, визначену фізичними принципами роботи, конструктивними особливостями та техніко-економічними характеристиками.

Сучасна промислова насосна техніка є результатом тривалої еволюції, яка охоплює понад двісті років інженерного пошуку. Від простих поршневих машин парової доби промисловість перейшла до складних багатоступінчастих відцентрових агрегатів з комп'ютерним керуванням, що здатні перекачувати десятки тисяч кубічних метрів води на годину. Ця еволюція не лише підвищила продуктивність і надійність обладнання, а й принципово змінила підходи до проектування насосних станцій і систем водопостачання загалом.

З погляду термодинаміки насос є пристроєм, що перетворює механічну енергію привода (як правило, електричного двигуна) на гідравлічну енергію рідини. Ця гідравлічна енергія витрачається на підйом рідини на певну висоту (статичний напір), подолання гідравлічного опору трубопровідної мережі (динамічний напір) та надання рідині кінетичної енергії. Відношення корисно

витраченої потужності до загальної споживаної є коефіцієнтом корисної дії (ККД) насоса - одним з ключових показників його якості.

Промислові насоси класифікують за численними ознаками: принципом дії, конструктивними особливостями, орієнтацією вала, числом ступенів, типом рідини, що перекачується, умовами встановлення тощо. Найбільш фундаментальним є розподіл за принципом дії на динамічні та об'ємні насоси. Саме ця класифікація визначає базові гідродинамічні характеристики машини та її придатність до тих чи інших умов застосування.

1.2 Класифікація насосів за принципом дії та галузями застосування.

Динамічні насоси здійснюють передачу енергії рідині шляхом безперервної взаємодії між рухомим робочим органом і потоком рідини. Характерною рисою таких машин є відсутність замкнених камер, що циклічно змінюють свій об'єм: рідина рухається через насос у відносно безперервному потоці. До динамічних відносять лопатеві та спеціальні насоси.

Лопатеві насоси передають енергію рідині через обертове лопатеве колесо. Залежно від напрямку руху рідини відносно осі обертання вони поділяються на відцентрові, осьові та діагональні.

Відцентрові насоси - найпоширеніший тип у системах промислового водопостачання. У відцентровому насосі рідина надходить до центру обертового робочого колеса та під дією відцентрових сил відкидається до периферії, набуваючи кінетичної та потенційної енергії. Тиск у насосі зростає як у самому колесі, так і у спіральному відводі або направляючому апараті. Відцентрові насоси відрізняються плавністю роботи, відносно рівномірною подачею та широким діапазоном регулювання. Їхні ключові переваги перед іншими типами насосів - простота конструкції, компактність, можливість прямого з'єднання з електродвигуном і висока надійність при тривалій роботі.

Осьові (пропелерні) насоси застосовуються там, де потрібно переміщати дуже великі об'єми рідини при малому напорі. Рідина у таких насосах рухається паралельно осі робочого колеса, як у звичайному гребному гвинті. Завдяки великим прохідним перерізам осьові насоси здатні перекачувати воду з включеннями та

суспензіями. Вони широко застосовуються у зрошувальних системах, шлюзах, великих насосних станціях перекачування річкової води.

Діагональні (змішаного типу) насоси займають проміжне місце між відцентровими і осьовими. Вектор абсолютної швидкості виходу рідини з робочого колеса спрямований під кутом до осі обертання. Такі насоси забезпечують вищий напір, ніж осьові, при більшій продуктивності, ніж одноступінчасті відцентрові. Вони оптимальні для великих насосних станцій з подачею від 500 до 50 000 м³/год при напорі 8–60 м.

Об'ємні насоси переміщують рідину шляхом примусового витіснення із замкнених камер, що циклічно змінюють свій об'єм. Їхня принципова відмінність від динамічних насосів полягає у здатності розвивати дуже високий тиск при відносно малих витратах. Характеристика Q-H об'ємного насоса є круто спадаючою: при збільшенні опору мережі подача змінюється незначно.

У промисловому водопостачанні об'ємні насоси застосовуються переважно для точного дозування реагентів на станціях водопідготовки, перекачування в'язких середовищ, забезпечення надвисокого тиску у промислових установках зворотного осмосу, а також у малих автономних системах з великим статичним напором.

Поршневі і плунжерні насоси характеризуються найвищим ступенем нерівномірності подачі: вона пульсує з частотою, що відповідає ходам поршня. Для пом'якшення пульсацій застосовують пневматичні акумулятори та багатоциліндрові конструкції. Гвинтові насоси забезпечують більш рівномірну подачу і здатні перекачувати рідини з абразивними включеннями, що робить їх цінними в технологічних системах водопідготовки.

Серед спеціальних типів насосів найбільший інтерес для водопостачальних систем представляють вихрові та струминні насоси. Вихрові насоси здатні самовсмоктуватися, тобто підкачувати рідину без попереднього заповнення всмоктувальної лінії, що надзвичайно зручно в умовах нестационарної роботи насосних агрегатів. Струминні (ежекторні) насоси позбавлені рухомих частин і тому виключно надійні, однак мають низький ККД - зазвичай не вище 25–35%.

Вони застосовуються як допоміжне обладнання: для відкачування дренажних вод, видалення повітря з трубопроводів, підкачки рідини до основного насоса.

Таблиця 1.1 – Класифікація насосів за принципом дії та основні характеристики

Клас насосів	Тип насоса	Принцип дії	Діапазон подачі, м³/год	Напір, м вод. ст.
Динамічні (лопатеві)	Відцентрові одноступінчасті	Передача енергії рідині через обертовий робочий орган (лопаті)	20 – 20 000	10 – 150
	Відцентрові багатоступінчасті	Послідовне нарощування тиску у кількох ступенях	10 – 2 000	60 – 900
	Осьові (пропелерні)	Переміщення рідини вздовж осі ротора за рахунок підйомної сили лопатей	1 000 – 300 000	3 – 20
	Діагональні (змішані)	Комбінований відцентрово-осьовий принцип	500 – 50 000	8 – 60
Об'ємні	Поршневі (плунжерні)	Витіснення рідини поршнем у закритому циліндрі	0,5 – 500	50 – 5 000
	Гвинтові (гелікоїдальні)	Нагнітання рідини обертовим гвинтовим ротором	1 – 1 000	20 – 800
	Шестерінчасті	Перенесення рідини між зубами шестерень	0,1 – 200	10 – 350
Спеціальні	Вихрові	Передача енергії при багаторазовому русі	1 – 120	20 – 250

Клас насосів	Тип насоса	Принцип дії	Діапазон подачі, м³/год	Напір, м вод. ст.
		рідини через лопатеве колесо		
	Струминні (ежекторні)	Підйом рідини струменем робочого тіла	0,5 – 50	5 – 100

Як видно з таблиці 1.1, найширший діапазон подачі мають відцентрові насоси двостороннього всмоктування та спіральні насоси великого діаметру. Ці типи є основою великих насосних станцій систем промислового водопостачання і заслуговують детального розгляду у наступних підрозділах.

1.3 Відцентрові насоси: будова, принцип дії та класифікація.

Відцентровий насос є однією з найдосконаліших гідравлічних машин, що коли-небудь створювала людська інженерна думка. Його концепція вперше була сформульована Блезом Паскалем у XVII столітті, проте практичне промислове застосування відцентрові насоси отримали лише у XIX столітті після вирішення задачі збільшення частоти обертання робочого колеса та розробки ефективних конструкцій спірального відводу.

Принцип дії відцентрового насоса ґрунтується на перетворенні механічної енергії обертання у кінетичну та потенційну енергію рідини за допомогою відцентрових сил, що виникають при обертанні робочого колеса. Рідина надходить до насоса крізь всмоктувальний патрубок і направляється у центр робочого колеса - так зване «вічко» («eye»). Обертаючись разом з колесом між лопатями, вона отримує кутовий момент і під дією відцентрового прискорення переміщується від центру до периферії.

На виході з робочого колеса рідина має значну кінетичну енергію (велику швидкість). Завдання відвідного пристрою - спірального корпусу або кільцевого направляючого апарата - перетворити цю кінетичну енергію у потенційну (тиск).

Цей процес відбувається відповідно до рівняння Бернуллі: при збільшенні поперечного перерізу каналу швидкість потоку зменшується, а тиск зростає.

Теоретичний напір, що розвивається відцентровим насосом, визначається рівнянням Ейлера:

$$H_t = (u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}) / g \quad (1.1)$$

де u_2 та u_1 - окружні швидкості на виході і вході з робочого колеса відповідно, м/с; c_{2u} та c_{1u} - проекції абсолютних швидкостей на окружний напрямок на виході і вході, м/с; g - прискорення вільного падіння, м/с². З цього рівняння випливає, що для збільшення напору необхідно або збільшити діаметр (і, отже, окружну швидкість) робочого колеса, або збільшити частоту обертання. Обидва ці шляхи широко використовуються у конструкціях потужних насосів.

Реальний напір насоса менший за теоретичний через наявність гідравлічних втрат у проточній частині: тертя об стінки каналів, вихроутворення, відрив потоку від лопатей та витоки через зазори. Гідравлічний ККД сучасних відцентрових насосів великої продуктивності сягає 0,92–0,95, що свідчить про досконалість їхньої проточної частини.

Основним робочим елементом відцентрового насоса є робоче колесо. Воно складається з переднього і заднього дисків, між якими розташовані лопаті. Форма і кількість лопатей суттєво впливають на характеристики насоса. Для водопостачальних насосів зазвичай застосовують колеса з 5–9 лопатями зворотного вигину, тобто загнутими у бік, протилежний напрямку обертання. Такі колеса забезпечують стійку характеристику і менше схильні до кавітації.

Корпус насоса є конструктивним елементом, що сприймає тиск рідини і передає реакцію на фундамент. У більшості промислових відцентрових насосів корпус має спіральну форму («равликоподібний» відвід), що забезпечує плавне збільшення перерізу каналу від язичка до нагнітального патрубку. Для насосів великої продуктивності часто застосовують подвійний спіральний відвід, що дозволяє компенсувати радіальні сили, які діють на ротор, і підвищити термін служби підшипників та ущільнень.

Ущільнення вала є однією з найбільш відповідальних деталей насоса. Від якості ущільнення залежить не лише герметичність агрегата, а й витoki рідини, що безпосередньо впливають на об'ємний ККД. У сучасних насосах застосовують торцеві механічні ущільнення, які забезпечують значно менші витoki порівняно з традиційними м'якими сальниками і не потребують постійного обслуговування.

Підшипники насоса сприймають радіальні та осьові сили, що діють на ротор. У насосах великої продуктивності виникають значні осьові сили - результат різниці тисків на передній і задній поверхні диска робочого колеса. Для їх компенсації застосовують розвантажувальні диски, двостороннє всмоктування або спеціальні упорні підшипники.

Робоча характеристика відцентрового насоса описується трьома основними кривими, побудованими у функції від об'ємної витрати Q : крива напору $H(Q)$, крива потужності $N(Q)$ та крива ККД $\eta(Q)$. Характеристика $H(Q)$ для насосів з лопатями зворотного вигину є монотонно спадаючою: при збільшенні витрати напір зменшується. Це гарантує стійку роботу насоса в мережі та відсутність помпажу.

Крива потужності $N(Q)$ для більшості насосів є наростаючою, що означає: максимальна потужність споживається при максимальній витраті. Виняток становлять насоси з лопатями вперед, де потужність може різко зрости при великих витратах. Крива ККД $\eta(Q)$ має куполоподібну форму з чітко вираженим максимумом в оптимальній точці роботи (ОТР або ВЕР - Best Efficiency Point). Проектування насосних станцій передбачає, що насос більшу частину часу працює поблизу ВЕР, оскільки відхилення від цієї точки означає перевитрату електроенергії і прискорений знос деталей.

Робоча точка насоса визначається перетином його характеристики $H(Q)$ з характеристикою мережі. Характеристика мережі являє собою суму статичного напору (геодезичного підйому та різниці тисків у початковому та кінцевому перерізах) і динамічних втрат, які зростають пропорційно квадрату витрати. Зміна режиму роботи насоса - регулювання подачі - досягається зміщенням робочої точки вздовж характеристики насоса або зміною самої характеристики.

1.4 Відцентрові насоси великої продуктивності: конструктивні різновиди.

Потреби сучасного промислового водопостачання у перекачуванні десятків і сотень тисяч кубічних метрів води на добу зумовили появу цілої низки конструктивних варіантів відцентрових насосів, адаптованих до умов великих витрат. Відповідно до міжнародної практики, насоси з подачею понад 1 000 м³/год прийнято відносити до насосів великої продуктивності, хоча в деяких джерелах ця межа встановлюється на рівні 500 м³/год.

Насос з двостороннім всмоктуванням (double suction pump) є найпоширенішим типом відцентрового насоса великої продуктивності для горизонтального розташування. Його робоче колесо виконане таким чином, що рідина надходить до нього з обох боків одночасно - через два всмоктувальних «вічка» розташованих симетрично відносно середини колеса. Це технічне рішення дає два принципових переваги.

По-перше, при одній і тій самій загальній витраті Q через кожне «вічко» проходить лише $Q/2$, що вдвічі знижує осьову швидкість у вхідному перерізі. Відповідно до рівняння нерозривності, менша швидкість означає менше зниження тиску у вхідному перерізі, тобто кращі кавітаційні характеристики. Припустимий кавітаційний запас (NPSH required) зменшується у 1,5–2 рази порівняно з одностороннім насосом тієї ж продуктивності. Це дозволяє або знизити відмітку встановлення насоса, або зменшити діаметр всмоктувального трубопроводу.

По-друге, оскільки рідина підходить до колеса з двох боків з однаковим тиском, осьові сили на ротор у ідеальному випадку взаємно компенсуються. Це знімає обмеження з потужності насоса і спрощує конструкцію підшипникового вузла. Насоси з двостороннім всмоктуванням виробляються у горизонтальному виконанні з корпусом, що ділиться вздовж осі ротора - так звана горизонтально-роз'ємна конструкція. Це забезпечує зручний доступ до проточної частини для огляду і ремонту без демонтажу трубопроводів.

Типовими представниками цього класу є насоси серій Д (вітчизняне виробництво), а також продукція провідних виробників - Sulzer HSB, KSB Rdllo, Flowserve DVS. Їхня подача охоплює діапазон від кількох сотень до 20 000–25 000

м³/год при напорах 20–120 м, що робить їх ідеальним вибором для великих насосних станцій першого підйому та подавання у розподільні мережі.

У великих насосних станціях поверхневого водозабору, де рівень води у джерелі схильний до значних коливань, широко застосовуються вертикальні занурювальні насоси з подовженим валом (vertical turbine pumps або VTP). У таких агрегатах електродвигун розташовується на рівні підлоги насосної станції, а робоче колесо (або кілька ступенів) занурені у воду. Крутний момент передається через вертикальний вал, що може мати довжину від кількох до десятків метрів.

Перевагами вертикальних насосів з ведучим валом є відсутність проблем із всмоктуванням (оскільки колесо завжди занурене), можливість роботи при значних коливаннях рівня у джерелі та компактне розташування у насосній камері. Недоліком є складність монтажу, необхідність точного центрування секцій вала та ускладнений доступ до гідравлічної частини для ремонту.

Вертикальні насоси знаходять застосування у водозабірних спорудах на річках і водосховищах, де рівень води коливається в широких межах, а також у дренажних та зрошувальних насосних станціях. Їхня подача може досягати 100 000 м³/год і більше при відносно невисокому напорі, що робить їх незамінними у великих зрошувальних системах та гідроенергетиці.

Спіральні насоси великого діаметру з одним відкритим або напіввідкритим робочим колесом є найпотужнішими одноступінчастими відцентровими машинами у галузі водопостачання. Їхня назва відображає характерну форму спірального корпусу, у якому канал рівномірно розширюється від язичка до нагнітального фланця. Відкрита або напіввідкрита конструкція колеса (без переднього диска) дозволяє перекачувати воду з великим вмістом завислих часток - піску, водоростей, рибних мальків - без ризику засмічення або перетирання.

Характерна особливість спіральних насосів великого діаметру - низька частота обертання ротора (300–750 об/хв проти 1 450–3 000 об/хв у звичайних насосів). Це зумовлено великими значеннями коефіцієнта питомої швидкості (швидкохідності): $nq > 150$. Низька частота обертання обумовлює тихішу роботу, менший знос деталей і більший ресурс між капітальними ремонтами. Однак для приводу таких насосів потрібні повільнохідні електродвигуни або редуктори.

Спіральні насоси великого діаметру широко застосовуються на водозабірних насосних станціях першого підйому на річках і каналах, де необхідна подача у сотні тисяч кубічних метрів на добу. В Україні такі агрегати встановлені на Дніпровських насосних станціях, що живлять великі зрошувальні системи Херсонщини та Миколаївщини. Їхня одинична потужність може сягати 25–30 МВт при подачі одного насосного агрегата до 50 000 м³/год і більше.

Там, де потрібен значний напір при відносно помірній витраті, застосовують багатоступінчасті відцентрові насоси. У таких машинах кілька робочих коліс встановлені послідовно на одному валу. Кожен ступінь підвищує тиск рідини на величину, що визначається розмірами колеса і частотою обертання. Загальний напір насоса дорівнює сумі напорів усіх ступенів.

Конструктивно багатоступінчасті насоси виконуються переважно у горизонтальному секційному виконанні - кожна секція містить одне робоче колесо і направляючий апарат. Приєднання секцій між собою здійснюється болтовим з'єднанням фланців. Кількість секцій може варіюватися від 2 до 12 і більше. Така конструкція є технологічно гнучкою: змінюючи кількість секцій, можна «налаштувати» насос під необхідний напір без зміни основних вузлів.

Для бустерних насосних станцій, де необхідно підвищити тиск у вже існуючій мережі, а також для водопостачання висотних будівель та промислових об'єктів з великим перепадом висот широко застосовуються секційні насоси типу ЦНС (Центробіжний Насос Секційний). Вони здатні розвивати напір до 600–900 м при подачах від 50 до 2 000 м³/год.

1.5 Кавітація у відцентрових насосах та методи її попередження.

Кавітація є одним з найбільш небезпечних явищ, що виникають у відцентрових насосах при несприятливих умовах всмоктування. Вона полягає у місцевому пароутворенні у тих зонах проточної частини, де тиск рідини знижується нижче тиску пароутворення при даній температурі. Утворені парові порожнини (кавітаційні бульбашки) переносяться потоком у зони вищого тиску, де вони різко захлопуються, породжуючи гідравлічні удари мікроскопічного масштабу, але надзвичайно великої інтенсивності.

Наслідки кавітації для насоса є надзвичайно руйнівними: ерозія металу у зоні входу на лопаті (так звана кавітаційна ерозія або кавітаційне руйнування), вібрація та шум, зниження напору та ККД, а в запущених випадках - повна відмова насоса з необхідністю капітального ремонту або заміни робочого колеса. Тому запобігання кавітації є ключовою вимогою при проектуванні насосних станцій.

Основним критерієм оцінки кавітаційної стійкості насоса є припустимий кавітаційний запас (NPSH required або $\Delta h_{кр}$). Він показує, яку мінімальну надлишкову енергію (у метрах водяного стовпа) повинна мати рідина на вході до насоса, щоб кавітація не виникала. Чим менший NPSH required, тим більш кавітаційно стійким є насос і тим з більшої глибини або більшого відстані від відкритого джерела він може всмоктувати воду.

Серед конструктивних методів підвищення кавітаційної стійкості відцентрових насосів найбільш ефективними є такі. Застосування двостороннього всмоктування вдвічі зменшує швидкість у вхідному перерізі і тим самим знижує втрати тиску. Встановлення підживлювального колеса (індуктора) перед основним робочим колесом забезпечує попереднє підвищення тиску у всмоктувальному патрубку. Ретельне профілювання вхідних кромek лопатей та оптимізація кута входу потоку зменшують місцеве зниження тиску на лопатях. Збільшення діаметра вхідного перерізу робочого колеса при незмінній подачі знижує вхідну осьову швидкість.

З експлуатаційних заходів найбільш важливим є забезпечення достатнього підпору рідини на вході до насоса. Це досягається правильним проектуванням всмоктувального трубопроводу: мінімізацією його довжини і кількості місцевих опорів, вибором достатнього діаметра, встановленням насоса нижче рівня рідини у всмоктувальному резервуарі (підпірне розташування). Для насосів великої продуктивності підпірне розташування є практично обов'язковим.

1.6 Порівняльний аналіз конструктивних різновидів відцентрових насосів для промислового водопостачання.

Вибір оптимального типу відцентрового насоса для конкретної задачі промислового водопостачання є багатофакторним завданням, що враховує гідравлічні параметри (витрату і напір), умови всмоктування, якість рідини, що перекачується, умови встановлення, вимоги до надійності та можливості технічного обслуговування, а також економічні критерії - капітальні і операційні витрати.

Для систематизованого порівняння основних конструктивних різновидів наведемо їхні ключові технічні характеристики у вигляді зведеної таблиці. Дані таблиці орієнтовані на типові промислово виготовлені насоси, що застосовуються у системах водопостачання підприємств та муніципальних водоканалів.

Таблиця 1.2 – Порівняльні технічні характеристики конструктивних різновидів відцентрових насосів

Показник	Одноступінчасті горизонтальні	Багатоступінчасті секційні	Занурювальні свердловинні	Двостороннього всмоктування	Спиральні великого діаметру
Подача, м³/год	20 – 10 000	10 – 2 000	1 – 800	500 – 20 000	1 000 – 50 000
Напір, м	10 – 150	60 – 900	30 – 600	20 – 120	5 – 80
ККД, %	70 – 88	72 – 85	60 – 78	80 – 90	82 – 92
Потужність, кВт	5 – 5 000	10 – 3 000	5 – 1 500	100 – 20 000	500 – 40 000
Частота обертання, об/хв	730 – 3 000	1 450 – 3 000	1 450 – 3 000	500 – 1 500	300 – 750
Допустимий кавітаційний запас, м	2 – 8	3 – 10	н/д (занурення)	2 – 6	3 – 9
Типова область застосування	Водозабори, мережі ХВП	Бустерні станції, зрошення	Свердловини, дренаж	ВЗС, великі водозабори	Гідровузли, великі НС

Аналіз таблиці 1.2 дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, найвищий ККД мають насоси двостороннього всмоктування та спіральні насоси великого діаметру: їхній гідравлічний тракт є більш досконалим завдяки симетричній конструкції і великим прохідним перерізам. По-друге, для задач з подачею понад 1 000 м³/год фактично безальтернативними є насоси

двостороннього всмоктування, вертикальні насоси з ведучим валом або спіральні насоси - залежно від умов всмоктування і необхідного напору.

По-третє, багатоступінчасті секційні насоси незамінні там, де потрібен напір понад 150–200 м, але витрата є відносно помірною - до 2 000 м³/год. По-четверте, зі зменшенням одиничної потужності насоса (менш як 1 000 кВт) стає доцільним розгляд стандартних одноступінчастих горизонтальних насосів, що відрізняються найнижчою вартістю і найбільшою доступністю запасних частин. Детальні методики розрахунку і вибору насосів для конкретних умов промислового водопостачання розглядаються у наступних розділах роботи.

1.7 Регулювання режимів роботи відцентрових насосів великої продуктивності.

Системи промислового водопостачання рідко працюють в стаціонарному режимі з постійними витратою і тиском. Добовий і сезонний графіки водоспоживання змінюються у широких межах: пік споживання у денний час може вдвічі і більше перевищувати нічний мінімум. Ефективне управління роботою насосних агрегатів у таких умовах є ключовою задачею з точки зору як якості водопостачання, так і енергоефективності.

Регулювання подачі відцентрового насоса шляхом зміни частоти обертання робочого колеса є найбільш енергоефективним методом. Відповідно до законів подібності: подача змінюється пропорційно частоті обертання ($Q \sim n$), напір - пропорційно квадрату ($H \sim n^2$), а потужність - пропорційно кубу ($N \sim n^3$). Це означає, що зниження подачі вдвічі досягається при зменшенні частоти обертання лише вдвічі, але потужність при цьому зменшується у вісім разів!

Реалізується частотне регулювання за допомогою частотних перетворювачів (інверторів) - пристроїв силової електроніки, що змінюють частоту і напругу живлення асинхронного електродвигуна насоса. Сучасні частотні перетворювачі потужністю до кількох мегават забезпечують плавне регулювання частоти обертання у діапазоні 20–100% від номінальної. Вони також дозволяють реалізувати плавний пуск і зупинку насоса, що виключає гідравлічні удари у трубопроводах при перехідних процесах.

Для насосів великої продуктивності застосування частотного регулювання забезпечує річну економію електроенергії, яка може становити 25–45% від загального споживання насосних агрегатів, залежно від форми добового графіка водоспоживання. Термін окупності установки частотного перетворювача на великому насосному агрегаті, як правило, не перевищує 2–4 роки.

На великих насосних станціях зазвичай встановлюють кілька насосних агрегатів, які можуть працювати паралельно - на спільну нагнітальну магістраль. При паралельній роботі однакових насосів сумарна подача збільшується, але не вдвічі - через зростання гідравлічного опору мережі при більшій витраті. Характеристика системи з двома паралельними насосами будується підсумовуванням їхніх індивідуальних характеристик по горизонталі.

Гнучкість насосної станції суттєво зростає, якщо передбачити можливість увімкнення різної кількості агрегатів залежно від поточного водоспоживання. Так, при мінімальному нічному споживанні достатньо одного насоса, при піковому денному - трьох або чотирьох. Таке управління, реалізоване сучасними системами автоматизованого диспетчерського управління (АСДУ), дозволяє утримувати кожен агрегат поблизу точки ВЕР і уникати тривалої роботи насосів у неоптимальних режимах.

Послідовна робота насосів (один за одним у нагнітальній лінії) застосовується у двоступінчастих насосних станціях і системах з великим статичним напором. При послідовному включенні двох однакових насосів напір подвоюється при незмінній витраті. Цей режим типовий для насосних станцій другого підйому систем водопостачання, де вода подається до споживачів з водонапірних веж або напірних резервуарів, розташованих на значних позначках.

Найпростіший, але найменш ефективний метод регулювання подачі відцентрового насоса - дросельне регулювання, або регулювання задвижкою на нагнітальному трубопроводі. При прикритті задвижки зростає гідравлічний опір мережі, робоча точка зміщується вліво по характеристиці насоса - витрата зменшується. Насос при цьому продовжує споживати значну потужність (більшу частину номінальної), яка витрачається на нагрів рідини і навантаження задвижки.

Незважаючи на свою неефективність, дросельне регулювання і досі широко застосовується у старих насосних станціях, де відсутні частотні перетворювачі, а також як аварійний режим або для точного підтримання заданої витрати у невеликих діапазонах. Модернізація насосних станцій з переходом від дросельного до частотного регулювання є одним з найпоширеніших та економічно найбільш обґрунтованих заходів підвищення енергоефективності водопостачальних систем в Україні та у світі.

1.8 Тенденції розвитку насосного обладнання для промислового водопостачання.

Сучасний насособудівний ринок перебуває під впливом кількох глобальних технологічних трендів, що визначають напрямки розвитку промислових насосів на найближчі десятиліття. Ці тренди зумовлені, з одного боку, жорсткішими вимогами до енергоефективності та екологічності обладнання, з іншого - можливостями, що відкриваються завдяки прогресу у галузях матеріалознавства, цифрових технологій і силової електроніки.

Підвищення енергоефективності насосів залишається пріоритетним напрямком. Нові покоління відцентрових насосів великої продуктивності мають гідравлічний ККД 0,90–0,94, а з урахуванням ефективності електродвигуна і перетворювача частоти - загальний ККД насосного агрегата 0,82–0,88. Подальше підвищення ефективності досягається шляхом вдосконалення форми проточної частини методами обчислювальної гідродинаміки (CFD), застосування надфективних синхронних двигунів на постійних магнітах (IE4-IE5) та оптимізації режимів роботи за допомогою інтелектуальних систем управління.

Розвиток матеріалів для деталей проточної частини спрямований на підвищення стійкості до кавітаційної ерозії, абразивного зносу та корозії. Застосування дуплексних нержавіючих сталей, нікель-хромових сплавів і конструкційної кераміки суттєво збільшує ресурс насосів, що працюють у складних умовах. Порошкова металургія і адитивне виробництво (3D-друк металом) відкривають можливість виготовлення складних гідравлічних профілів, недосяжних традиційними методами лиття і фрезерування.

Цифровізація насосного обладнання є одним з найдинамічніших напрямків. Сучасні насосні агрегати оснащуються датчиками вібрації, температури, тиску і витрати, дані з яких передаються до систем моніторингу і аналізу у режимі реального часу. Алгоритми машинного навчання дозволяють виявляти ознаки майбутньої відмови (підшипників, ущільнень, деформацій робочого колеса) задовго до їх настання, переходячи від планово-попереджувального до предиктивного технічного обслуговування. Це різко скорочує ризик непланових зупинок і знижує сукупну вартість утримання насосного парку.

Інтеграція насосів у концепцію "розумного" водопостачання (Smart Water) передбачає їхню взаємодію з системами автоматизованого збирання і передачі даних лічильників (AMR/AMI), гідравлічними моделями мережі і хмарними платформами управління. Така інтеграція дозволяє в режимі реального часу оптимізувати розподіл навантаження між насосними агрегатами, мінімізуючи сукупну витрату електроенергії системи водопостачання при виконанні всіх вимог до тиску і витрати.

2 РОЗРАХУНОК НАВАНТАЖЕННЯ НАСОСА, ВИБІР АСИНХРОННОГО ДВИГУНА AIP315M4 ТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

2.1 Вихідні дані та постановка задачі.

У цьому розділі виконується комплексний інженерний розрахунок приводу відцентрового насоса продуктивністю 1000 м³/год. Розрахунок охоплює: визначення потужності на валу насоса та споживаної електричної потужності; перевірку і аналіз характеристик асинхронного двигуна AIP315M4; розрахунок параметрів системи керування; вибір і перевірку перетворювача частоти із запасом за струмом не менше 30%.

Двигун AIP315M4 є представником уніфікованого ряду трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором серії AIP - найбільш масового типу промислових електроприводів в Україні. Типорозмір 315 відповідає висоті осі обертання 315 мм, літера «М» - подовженому станині, «4» - чотириполусному виконанню (синхронна частота 1 500 об/хв при $f = 50$ Гц).

Розглянемо насос моделі Д1250-656 (рис 2.1) та його електропривід. Цей насос має продуктивність до 1000 м³/год, та розрахований на електродвигуни з частотою обертання до 1500 об/хв.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Об'ємна подача насоса	Q	1 000 м ³ /год (0,2778 м ³ /с)
Розрахунковий напір насоса	H	45 м вод. ст.
ККД насоса (гідравлічний + механічний)	η_n	0,86
ККД підшипників і муфти	$\eta_{\text{мех}}$	0,98

Параметр	Позначення	Значення
Щільність перекачуваної рідини (вода +20 °С)	ρ	998 кг/м ³
Прискорення вільного падіння	g	9,81 м/с ²
Коефіцієнт запасу потужності двигуна	K_z	1,15
Необхідний запас ПЧ за струмом	$K_{пч}$	1,30
Напруга живлення	U	380 В / 50 Гц
Режим роботи	-	S1 (тривалий)

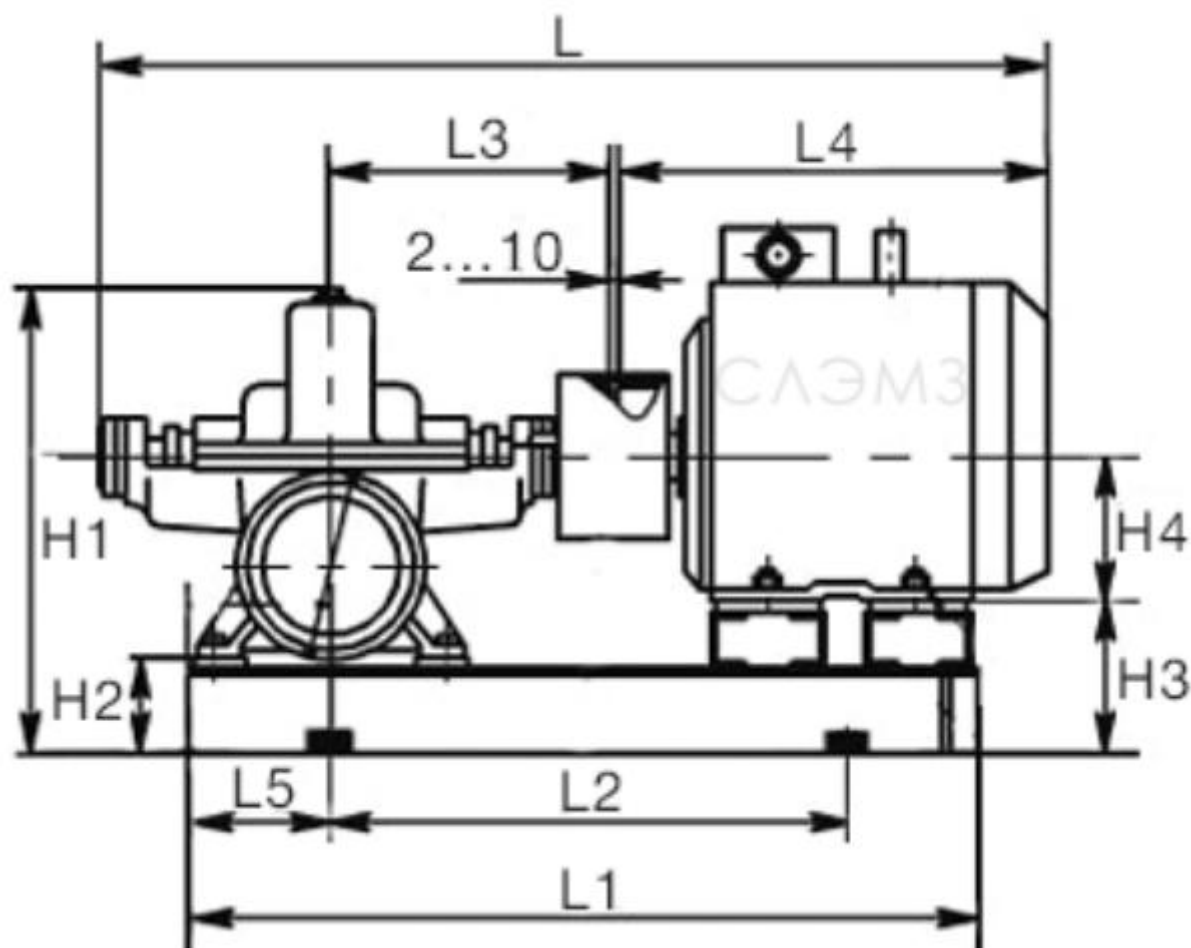


Рис. 2.1 – Насос Д1250-656.

2.2 Розрахунок гідравлічної та валової потужності насоса.

Гідравлічна (корисна) потужність, що передається рідині насосом, визначається з рівняння Бернуллі для стаціонарного потоку нестисливої рідини:

$$P_{\text{гiдр}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.1)$$

де $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $Q = 0,2778 \text{ м}^3/\text{с}$; $H = 45 \text{ м}$

Підставляємо числові значення:

$$P_{\text{гiдр}} = 998 \cdot 9,81 \cdot 0,2778 \cdot 45$$

$$P_{\text{гiдр}} = 998 \cdot 9,81 \cdot 12,50 = 122\,354 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{гiдр}} = 122\,354 \text{ Вт} \approx 122,4 \text{ кВт}$$

Потужність на валу насоса враховує гідравлічні та механічні втрати у проточній частині і підшипниковому вузлі:

$$P_{\text{вал}} = P_{\text{гiдр}} / (\eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{мех}}) = 122\,354 / (0,86 \cdot 0,98) \quad (2.2)$$

$$P_{\text{вал}} = 122\,354 / 0,8428 = 145\,181 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{вал}} = 145\,181 \text{ Вт} \approx 145,2 \text{ кВт}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $K_z = 1,15$ для насосів потужністю понад 100 кВт:

$$P_{\text{ном.дв.}} \geq K_z \cdot P_{\text{вал}} = 1,15 \cdot 145,2 = 167,0 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

$$P_{\text{ном.дв.}} \geq 167,0 \text{ кВт}$$

З ряду стандартних потужностей серії АІР обирається двигун АІР315М4 з номінальною потужністю 200 кВт. Це найближчий більший типорозмір, що задовольняє умові запасу.

2.3 Вибір та перевірка двигуна АІР.

Асинхронні двигуни серії АІР виготовляються відповідно до ДСТУ ІЕС 60034-1. При виборі двигуна для насосного приводу враховуються такі критерії: номінальна потужність не менша за розрахункову $P_{\text{ном.дв.}}$; синхронна частота обертання, що відповідає частоті обертання насоса; клас ізоляції F (155 °C); наявність примусового охолодження (IC411 - самовентиляція); можливість роботи від ПЧ.

Відповідно до розрахунку, вибирається двигун серії АІР315М4 з синхронною частотою обертання 1 500 об/хв (1 пара полюсів $p=2$, 4-полюсний двигун). Для насосних агрегатів типу Д2000 стандартна частота обертання робочого колеса становить 980–1 480 об/хв; 4-полюсний двигун із номінальною частотою 1 480–1 490 об/хв є оптимальним вибором.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики двигуна АІР315М4

Параметр	Позначення / одиниця	Значення
Тип двигуна	-	АІР315М4
Номінальна потужність	$P_{\text{ном}}$, кВт	200
Синхронна частота обертання	n_c , об/хв	1 500
Номінальна частота обертання	$n_{\text{ном}}$, об/хв	1 480
Номінальне ковзання	$s_{\text{ном}}$, %	1,33
Номінальна напруга	$U_{\text{ном}}$, В	380 (трифазна)
Номінальний струм	$I_{\text{ном}}$, А	360
Номінальний КПД	$\eta_{\text{дв}}$, %	94,9
Номінальний момент	$M_{\text{ном}}$, Н·м	1 287

Параметр	Позначення / одиниця	Значення
Висота осі обертання	h, мм	315
Ступінь захисту	IP	IP55
Клас ізоляції	-	F (155 °C)
Режим роботи	-	S1

Перевірка двигуна за нагріванням при тривалому режимі роботи S1:

$$P_{\text{ном}} = 200 \text{ кВт} \geq P_{\text{вал}} = 145,2 \text{ кВт}$$

Фактичне завантаження двигуна за потужністю:

$$\beta = P_{\text{вал}} / P_{\text{ном}} = 145,2 / 200 = 0,726 \approx 0,73 \quad (2.4)$$

Завантаження $\beta = 0,73$ - оптимальний режим роботи поблизу максимального ккд. Фактичний запас потужності двигуна:

$$K_{\text{зап}} = P_{\text{ном}} / P_{\text{вал}} = 200 / 145,2 = 1,377 \rightarrow 37,7\% > 15\% \quad (2.5)$$

Синхронна кутова швидкість поля статора:

$$\omega_1 = 2\pi \cdot n_{\text{с}} / 60 = 2\pi \cdot 1500 / 60 = 157,08 \text{ рад/с} \quad (2.6)$$

Номінальна механічна кутова швидкість ротора:

$$\Omega_{\text{ном}} = 2\pi \cdot n_{\text{ном}} / 60 = 2\pi \cdot 1480 / 60 = 154,98 \text{ рад/с} \quad (2.7)$$

Номінальне ковзання:

$$s_{\text{НОМ}} = (n_c - n_{\text{НОМ}}) / n_c = (1500 - 1480) / 1500 = 0,0133 \text{ (1,33\%)}$$

Перевірка номінального моменту за каталожними даними:

$$M_{\text{НОМ.розр}} = P_{\text{НОМ}} / \Omega_{\text{НОМ}} = 200\,000 / 154,98 = 1\,290 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{\text{НОМ.розр}} = 1\,290 \text{ Н}\cdot\text{м} \approx M_{\text{НОМ.кат}} = 1\,287 \text{ Н}\cdot\text{м} - \text{розбіжність } 0,2\%$$

Статичний момент опору насоса на валу двигуна при номінальному режимі:

$$M_{\text{нас}} = P_{\text{вал}} / \Omega_{\text{НОМ}} = 145\,181 / 154,98 = 937 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{\text{нас}} = 937 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Перевірка умови пуску (момент двигуна при пуску має перевищувати момент опору насоса). Для насосів з вентиляторною характеристикою момент опору при $n = 0$ практично дорівнює нулю, тому умова пуску виконується завжди при наявності будь-якого пускового моменту двигуна.

Перевірка номінального струму через рівняння балансу потужностей:

$$I_{\text{НОМ.розр}} = P_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}}) \quad (2.8)$$

Для визначення $\cos\varphi$ скористаємось відомими $P_{\text{НОМ}}$, $\eta_{\text{дв}}$ і $I_{\text{НОМ}}$:

$$\cos\varphi = P_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{дв}}) \quad (2.9)$$

$$\cos\varphi = 200\,000 / (1,732 \cdot 380 \cdot 360 \cdot 0,949) = 200\,000 / 224\,760 = 0,890$$

$$\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,890$$

Фактичний робочий струм при завантаженні $\beta = 0,73$:

$$I_{\text{факт}} \approx \beta \cdot I_{\text{НОМ}} = 0,726 \cdot 360 = 261,4 \text{ А} \quad (2.10)$$

$$I_{\text{факт}} = 261,4 \text{ А}$$

Повна споживана потужність з мережі:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{вал}} / \eta_{\text{дв}} = 145\,181 / 0,949 = 153\,000 \text{ Вт} \approx 153,0 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{ел}} = 153,0 \text{ кВт}$$

2.4 Принципи роботи перетворювачів частоти.

Перетворювач частоти (ПЧ) є напівпровідниковим пристроєм силової електроніки, що перетворює змінну напругу промислової частоти (50 Гц, 380 В) у змінну напругу регульованої частоти і амплітуди для керування швидкістю асинхронного двигуна. Сучасний ПЧ складається з таких функціональних блоків.

Вхідний випрямляч (rectifier) перетворює трифазну змінну напругу мережі на постійну. У більшості стандартних ПЧ застосовується некерований діодний міст. У ПЧ із активним фронтендом (AFE) - керований IGBT-випрямляч, здатний рекуперувати енергію у мережу і підтримувати $\cos\phi \approx 1$.

Ланка постійного струму (DC link) - конденсаторний фільтр, що згладжує пульсації після випрямляча. Напруга у ланці постійного струму для трифазного ПЧ від мережі 380 В:

$$U_{\text{DC}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{лін}} \approx 1,35 \cdot 380 = 513 \text{ В (робоче значення 560–600 В)}$$

Інвертор (inverter) - 6 IGBT-транзисторів у трифазній мостовій схемі. Перемикаючи транзистори за законом ШІМ, інвертор формує на виході послідовність імпульсів напруги, середнє значення якої відповідає синусоїді заданої частоти та амплітуди.

Система керування (DSP) реалізує алгоритм ШІМ, обробляє зворотні зв'язки за струмом і напругою, виконує захисні функції та забезпечує зв'язок з АСУ.

Синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція формує вихідну напругу шляхом порівняння синусоїдального керуючого сигналу з трикутним несучим ($f_n = 2\text{--}16 \text{ кГц}$). Для насосних застосувань переважно застосовується скалярне U/f -керування:

$$U/f = \text{const} \quad (2.11)$$

Закон забезпечує постійність магнітного потоку при зміні швидкості

При U/f -керуванні на малих частотах (нижче 5–10 Гц) вводиться IR-компенсація падіння напруги на активному опорі статора для підтримання потоку і моменту.

Сучасні промислові ПЧ реалізують такі захисти: від перевищення струму (OC); від перенапруги у ланці DC (OV); від зниження напруги (UV); від перегрівання IGBT (OT); теплову модель двигуна (OL); від обриву фази; від короткого замикання на виході (SC); від замикання на землю (GF).

Для насосних застосувань ключовими налаштуваннями є: мінімальна частота $f_{\min} \geq 25\text{--}30$ Гц (запобігання кавітації); час розгону 20–60 с (запобігання гідравлічному удару); вбудований ПД-регулятор тиску або витрати для автоматичного підтримання заданого параметра системи.

2.5 Розрахунок параметрів і вибір перетворювача частоти.

Перетворювач частоти вибирається за номінальним вихідним струмом з урахуванням запасу $K_{\text{ПЧ}} = 1,30$:

$$I_{\text{ПЧ}} \geq K_{\text{ПЧ}} \cdot I_{\text{факт}} = 1,30 \cdot 261,4 = 339,8 \text{ А} \quad (2.12)$$

$$I_{\text{ПЧ}} \geq 339,8 \text{ А}$$

$$P_{\text{ПЧ}} \geq P_{\text{ном.дв}} \cdot K_{\text{ПЧ}} / \eta_{\text{ПЧ}} = 200 \cdot 1,30 / 0,97 = 268,0 \text{ кВт}$$

$P_{\text{ПЧ}} \geq 268,0$ кВт, вибирається ПЧ на 315 кВт (наступний стандартний типорозмір).

З урахуванням вимог ($I_{\text{ПЧ}} \geq 339,8$ А, $P \geq 268$ кВт) і умов застосування вибирається перетворювач частоти ABB ACS880-01-361A-3 (табл. 2.3):

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики ПЧ АВВ ACS880-01-361А-3

Параметр	Позначення / одиниця	Значення
Тип перетворювача		АВВ ACS880-01-361А-3
Номінальна вихідна потужність	$P_{\text{ном}}$, кВт	315
Номінальний вихідний струм	$I_{\text{ном}}$, А	361
Максимальний струм (60 с, 110%)	I_{max} , А	397
Вхідна напруга	$U_{\text{вх}}$	$3 \times 380\text{--}480 \text{ В} \pm 10\%$
Вихідна частота	$f_{\text{вих}}$	0–500 Гц
Напруга DC-ланки	U_{DC} , В	560–640
ККД ПЧ	$\eta_{\text{пч}}$, %	97,5
Несуча частота ШІМ	$f_{\text{ШІМ}}$, кГц	4 (регульована 1–16)
Ступінь захисту	IP	IP21 (шафовий монтаж)
Вбудований мережевий дросель	-	Так (2% UK)
Функція безпечного вимкнення моменту	STO	SIL 3 / PLe
Протоколи зв'язку	-	PROFIBUS, EtherNet/IP, PROFINET
Маса	m , кг	95
Виробник / країна	-	АВВ / Фінляндія

Перевірка за номінальним струмом:

$$I_{\text{ном.ПЧ}} = 361 \text{ А} \geq I_{\text{ПЧ.розр.}} = 339,8 \text{ А}$$

Фактичний запас за струмом відносно робочого струму двигуна:

$$361 / 261,4 = 1,381 \rightarrow \text{запас } 38,1\% > 30\%$$

Вибір підтверджено: ACS880-01-361A-3, $I_{\text{ном}} = 361 \text{ А}$, $P = 315 \text{ кВт}$, запас 38,1%

Перевірка за потужністю:

$$P_{\text{ном.ПЧ}} = 315 \text{ кВт} \geq P_{\text{ном.дв}} \cdot K_{\text{ПЧ}} = 200 \cdot 1,30 = 260 \text{ кВт}$$

Розрахунки показують, що вибраний ПЧ в повній мірі забезпечує живлення та керування двигуном AIP315M4, хз необхідними коефіцієнтом запасу.

2.6 Розрахунок параметрів системи керування.

Відповідно до законів подібності відцентрових насосів, основні параметри залежать від частоти обертання:

$$Q_2/Q_1 = f_2/f_1; \quad H_2/H_1 = (f_2/f_1)^2; \quad N_2/N_1 = (f_2/f_1)^3 \quad (2.13)$$

Таблиця 2.4 – Характеристики насоса при різних частотах ПЧ

Частота ПЧ, Гц	Відносна n/n_1	Подача Q, м³/год	Напір H, м	Потужність $P_{\text{вал}}, \text{кВт}$	Зниження P, %
50,0	1,000	1 000	45,0	145,2	-
47,5	0,950	950	40,6	124,3	14,4
45,0	0,900	900	36,5	105,9	27,1
42,5	0,850	850	32,5	89,1	38,6
40,0	0,800	800	28,8	74,0	49,0
37,5	0,750	750	25,3	60,8	58,1
35,0	0,700	700	22,1	49,8	65,7
32,5	0,650	650	19,0	39,8	72,6
30,0	0,600	600	16,2	31,4	78,4

Час розгону визначається умовою запобігання гідравлічному удару.
Швидкість поширення хвилі тиску у сталевому трубопроводі: $a \approx 1100$ м/с.

Критичний час для трубопроводу довжиною $L = 800$ м:

$$T_{кр} = 2L / a = 2 \cdot 800 / 1100 = 1,45 \text{ с} \quad (2.14)$$

$$T_{розг} = 15 \cdot T_{кр} = 15 \cdot 1,45 = 21,8 \text{ с} \text{ приймаємо } T_{розг} = 30 \text{ с}$$

$$T_{розг} = 30 \text{ с}; \quad T_{спов} = 45 \text{ с}$$

Теплові втрати у ПЧ при розрахунковому навантаженні:

$$P_{вих.ПЧ} = P_{вал} = 145,2 \text{ кВт}$$

$$P_{вх.ПЧ} = P_{вих.ПЧ} / \eta_{ПЧ} = 145,2 / 0,975 = 148,9 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{ПЧ} = 148,9 - 145,2 = 3,7 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{ПЧ} = 3,7 \text{ кВт} - \text{теплові втрати ПЧ}$$

Мінімальна витрата охолоджувального повітря для шафи ПЧ:

$$\Delta P_{шафи} = 0,15 \cdot 3700 = 555 \text{ Вт}$$

$$Q_{охл} = 555 / (1,2 \cdot 1005 \cdot 15) = 555 / 18090 = 0,031 \text{ м}^3/\text{с} = 111 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$Q_{охл} = 111 \text{ м}^3/\text{год} - \text{мінімальна витрата повітря для охолодження шафи ПЧ.}$$

2.7 Розрахунок річної економії електроенергії від застосування ПЧ.

Насос працює 20 годин на добу. Порівнюємо споживання при дросельному регулюванні і частотному:

Таблиця 2.5 – Добовий графік навантаження і споживання електроенергії

Час доби	Трив., год	Подача, %	Р _{пп} , кВт	Р _{пч} , кВт	W _{пп} , кВт·год	W _{пч} , кВт·год
6:00–8:00	2	60%	143	29,5	286,0	59,0
8:00–10:00	2	80%	148	70,1	296,0	140,2

Час доби	Трив., год	Подача, %	Р _{пп} , кВт	Р _{пч} , кВт	W _{пп} , кВт·год	W _{пч} , кВт·год
10:00–12:00	2	100%	153	153,0	306,0	306,0
12:00–13:00	1	85%	150	94,0	150,0	94,0
13:00–14:00	1	70%	145	52,6	145,0	52,6
14:00–16:00	2	100%	153	153,0	306,0	306,0
16:00–18:00	2	90%	151	112,2	302,0	224,4
18:00–20:00	2	75%	146	64,9	292,0	129,8
20:00–22:00	2	55%	142	25,5	284,0	51,0
РАЗОМ за добу	18	-	-	-	2 367	1 363

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W_{\text{рік}} = (2\,367 - 1\,363) \cdot 365 = 1\,004 \cdot 365 = 366\,460 \text{ кВт·год/рік}$$

$$\Delta W_{\text{рік}} = 366\,460 \text{ кВт·год/рік} \approx 366,5 \text{ МВт·год/рік}$$

При тарифі 6,50 грн/кВт·год річна грошова економія:

$$\Delta B_{\text{рік}} = 366\,460 \cdot 6,50 = 2\,381\,990 \text{ грн/рік} \approx 2,38 \text{ млн грн/рік}$$

Річна економія: 2 381 990 грн/рік - відносна економія ел/е: 42,4%

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Актуальність математичного моделювання електроприводу насоса.

Сучасне проектування систем електроприводу неможливе без математичного моделювання. Фізичне макетування та натурні випробування потужних насосних агрегатів є надзвичайно витратними й небезпечними: відпрацювання перехідних режимів, аварійних ситуацій, налаштування регуляторів на реальному обладнанні коштує у десятки разів дорожче, ніж на комп'ютерній моделі. Системи автоматизованого проектування MATLAB/Simulink стали фактичним стандартом галузі для дослідження динаміки електромеханічних систем.

Для коректного математичного опису асинхронного двигуна необхідно враховувати взаємозв'язок між електромагнітними і механічними процесами. Стандартний підхід у координатах трьох фаз (a, b, c) призводить до системи диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами - взаємна індуктивність між нерухомими обмотками статора і обмотками ротора, що обертаються, є функцією кута повороту ротора. Чисельне інтегрування такої системи можливе, але є обчислювально надлишковим і малопрозорим з точки зору фізичної інтерпретації.

Вирішення цієї проблеми дав метод перетворення координат, розроблений незалежно американським інженером Робертом Парком (R.H. Park, 1929) і радянським вченим Михайлом Горєвим (1926–1927). Суть методу полягає у переході від нерухомої трифазної системи координат (a, b, c) до узагальненої двофазної обертової системи (d, q), що обертається разом з деяким обраним вектором - зазвичай з вектором потокозчеплення статора, ротора або з вектором напруги мережі. У новій системі координат взаємні індуктивності стають константами, що радикально спрощує аналіз і числове моделювання.

У цьому розділі виводяться рівняння математичної моделі асинхронного двигуна у системі координат d–q, що обертається з довільною кутовою швидкістю; розглядається Т-подібна схема заміщення; визначаються параметри моделі для двигуна АІР315М4 за каталожними даними; будується структурна схема моделі для реалізації у середовищі MATLAB/Simulink.

3.2 Рівняння асинхронного двигуна у природній системі координат.

При побудові математичної моделі асинхронного двигуна приймаються такі спрощення та допущення, що не вносять суттєвих похибок у результати моделювання при нормальних умовах роботи:

- магнітне коло двигуна є лінійним (відсутність насичення); при необхідності облік насичення вводиться апроксимацією кривої намагнічування;
- втрати в сталі (вихрові струми і гістерезис) не враховуються або враховуються введенням активного опору у вітці намагнічування;
- обмотки статора і ротора є симетричними і синусоїдально розподіленими; вищі просторові гармоніки поля не враховуються;
- активні опори і індуктивності обмоток не залежать від температури і частоти (ефект витіснення струму в роторних стрижнях не враховується в базовій моделі);
- дія насичення і скін-ефекту може бути введена як нелінійні функціональні залежності у розширених версіях моделі.

Статор трифазного асинхронного двигуна має три обмотки (а, b, с), зміщені у просторі на 120° одна відносно одної. Ротор з короткозамкненими стрижнями моделюється як трифазна обмотка (А, В, С), що обертається з механічною кутовою швидкістю ω_r . Кут між магнітними осями фази а статора і фази А ротора позначається θ_r .

Для кожної з шести обмоток (три статора і три ротора) рівняння Кірхгофа записується у вигляді:

$$u_k = R_k \cdot i_k + d(\Psi_k)/dt \quad (3.1)$$

де u_k - напруга, R_k - активний опір, i_k - струм, Ψ_k - потокозчеплення k-ї обмотки

У матричному записі для статора:

$$[u_s] = [R_s] \cdot [i_s] + d[\Psi_s]/dt \quad (3.2)$$

де вектори статора:

$$[u_s]^T = [u_a \ u_b \ u_c]; \ [i_s]^T = [i_a \ i_b \ i_c] \quad (3.3)$$

$$[R_s] = R_s \cdot I_3 \quad (I_3 - \text{одинична матриця } 3 \times 3)$$

Аналогічно для ротора (у системі відліку ротора):

$$[u_r] = [0] \text{ (КЗ ротор)}; \ [0] = [R_r] \cdot [i_r] + d[\Psi_r]/dt \quad (3.4)$$

Потокозчеплення пов'язані зі струмами через матриці індуктивностей:

$$\Psi_s = L_{ss} \cdot i_s + L_{sr}(\theta_p) \cdot i_r \quad (3.5)$$

$$\Psi_r = L_{rs}(\theta_p) \cdot i_s + L_{rr} \cdot i_r$$

Ключовою проблемою є матриця взаємних індуктивностей $L_{sr}(\theta_p)$, елементи якої є функціями кута θ_p - кута повороту ротора:

$$L_{sr}(\theta_p) = L_m \cdot \begin{vmatrix} \cos(\theta_p) & \cos(\theta_p+2\pi/3) & \cos(\theta_p-2\pi/3) \\ \cos(\theta_p-2\pi/3) & \cos(\theta_p) & \cos(\theta_p+2\pi/3) \\ \cos(\theta_p+2\pi/3) & \cos(\theta_p-2\pi/3) & \cos(\theta_p) \end{vmatrix} \quad (3.6)$$

де L_m - максимальне значення взаємної індуктивності між осями обмоток статора і ротора

Наявність тригонометричних функцій кута ротора у коефіцієнтах системи диференціальних рівнянь і є причиною, що спонукає до переходу в іншу систему координат.

3.3 Перетворення Парка–Горєва.

Ідея перетворення Парка–Горєва полягає у заміні трьох реальних фазових обмоток статора двома фіктивними обмотками (d , q), що обертаються у просторі з довільно обраною кутовою швидкістю ω_k . Обмотка d (direct - пряма) орієнтована вздовж обраної осі, обмотка q (quadrature - квадратурна) - перпендикулярно до неї.

Додатково вводиться нульова складова (0 або homopolar), яка для симетричних трифазних кіл без нейтрального провідника дорівнює нулю і надалі не розглядається.

При правильному виборі швидкості обертання системи координат ω_k взаємні індуктивності між обмотками статора і ротора стають незмінними у часі - і система рівнянь перетворюється на систему з постійними коефіцієнтами, для якої значно простіше провести як аналітичний аналіз, так і числове моделювання.

Поширені варіанти вибору системи координат: синхронна система ($\omega_k = \omega_1 = 2\pi f$ - синхронна кутова швидкість), що зручна для аналізу усталених режимів і вектора просторового потоку; нерухома система ($\omega_k = 0$, статорна система $\alpha-\beta$), що зручна для реалізації алгоритмів орієнтованого за полем керування; роторна система ($\omega_k = \omega_p$), що використовується у деяких варіантах скалярного керування. У цій роботі для моделювання в Simulink застосовується синхронна система координат d-q, орієнтована за вектором потокозчеплення ротора (RFOC - Rotor Field Oriented Coordinates).

Пряме перетворення Парка переводить вектори фазних величин (струмів, напруг, потокозчеплень) у площину d-q. Для довільного кута θ_k - кута між віссю d і нерухомою магнітною віссю фази a - матриця прямого перетворення має вигляд:

$$P(\theta_k) = (2/3) \cdot \begin{vmatrix} \cos(\theta_k) & \cos(\theta_k - 2\pi/3) & \cos(\theta_k + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_k) & -\sin(\theta_k - 2\pi/3) & -\sin(\theta_k + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

Множник 2/3 забезпечує рівнопотужне (амплітудне) перетворення

Для трипровідної симетричної системи (сума фазних струмів дорівнює нулю) нульова складова завжди дорівнює нулю, і матриця скорочується до 2×3 :

$$[P_2(\theta_k)] = (2/3) \cdot \begin{vmatrix} \cos(\theta_k) & \cos(\theta_k - 2\pi/3) & \cos(\theta_k + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_k) & -\sin(\theta_k - 2\pi/3) & -\sin(\theta_k + 2\pi/3) \end{vmatrix} \quad (3.8)$$

Зворотне перетворення (від d-q до a-b-c):

$$P^{-1}(\theta_k) = P^T(\theta_k) = \begin{vmatrix} \cos(\theta_k) & -\sin(\theta_k) \\ \cos(\theta_k - 2\pi/3) & -\sin(\theta_k - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_k + 2\pi/3) & -\sin(\theta_k + 2\pi/3) \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

Властивість: $P \cdot P^{-1} = I$ (матриця перетворення є ортогональною при амплітудному нормуванні)

Фізичний зміст перетворення: компонента i_d є проекцією просторового вектора струму на вісь d і пов'язана з потоком (намагнічувальний струм); компонента i_q - проекція на вісь q і пов'язана з електромагнітним моментом. Ця фізична інтерпретація є основою векторного керування асинхронним двигуном.

Після застосування перетворення Парка до рівнянь напруг і потокозчеплень у природній системі координат (розгортання матричних множень і спрощення) отримуємо систему диференціальних рівнянь у координатах $d-q$. Для синхронної системи координат ($\omega_k = \omega_1$), що обертається з кутовою швидкістю поля статора, рівняння набувають вигляду:

Рівняння напруг статора:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + d\Psi_{sd}/dt - \omega_1 \cdot \Psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + d\Psi_{sq}/dt + \omega_1 \cdot \Psi_{sd} \end{aligned} \quad (3.10)$$

де індекс s - статор, d та q - компоненти у системі координат

Рівняння напруг ротора (для КЗ ротора $u_{rd} = u_{rq} = 0$):

$$\begin{aligned} 0 &= R_r \cdot i_{rd} + d\Psi_{rd}/dt - (\omega_1 - \omega_p) \cdot \Psi_{rq} \\ 0 &= R_r \cdot i_{rq} + d\Psi_{rq}/dt + (\omega_1 - \omega_p) \cdot \Psi_{rd} \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $\omega_p = p \cdot \Omega_p$ - електрична кутова швидкість ротора; p - число пар полюсів; Ω_p - механічна кутова швидкість; $(\omega_1 - \omega_p) = \omega_s$ - кутова швидкість ковзання.

Рівняння потокозчеплень:

$$\begin{aligned}
\Psi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\
\Psi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \\
\Psi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \\
\Psi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq}
\end{aligned}
\tag{3.12}$$

де $L_s = L_{\sigma s} + L_m$ - повна індуктивність статора; $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ - повна індуктивність ротора

L_m - головна індуктивність (індуктивність намагнічування); $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$ - індуктивності розсіювання

Рівняння електромагнітного моменту:

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot L_m \cdot (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \tag{3.13}$$

У системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора ($\Psi_{rd} = |\Psi_r|$, $\Psi_{rq} = 0$):

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot (L_m / L_r) \cdot \Psi_{rd} \cdot i_{sq} \tag{3.14}$$

Ця форма запису є основою векторного керування: M_e регулюється струмом i_{sq} при незмінному Ψ_{rd} .

Рівняння руху механічної частини приводу:

$$J \cdot d\Omega_p/dt = M_e - M_c - B \cdot \Omega_p \tag{3.15}$$

де J - момент інерції системи двигун + насос, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_c - статичний момент опору, $\text{Н} \cdot \text{м}$; B - коефіцієнт в'язкого тертя, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$.

3.4 Математична модель у формі рівнянь стану.

Для числового моделювання зручно виразити систему рівнянь у нормальній формі Коші - у вигляді, де ліворуч стоять похідні незалежних змінних стану.

Залежно від вибору вектора змінних стану існують кілька еквівалентних форм математичної моделі АД.

Найбільш поширеною в Simulink є модель у координатах (i_{sd} , i_{sq} , Ψ_{rd} , Ψ_{rq} , Ω_p) - струми статора і потокозчеплення ротора як змінні стану. Ця форма зручна тим, що потокозчеплення ротора входять безпосередньо і легко використовуються у алгоритмі векторного керування.

Для виведення системи рівнянь Коші виразимо струми ротора через потокозчеплення ротора і струми статора з рівнянь потокозчеплень:

$$i_{rd} = (\Psi_{rd} - L_m \cdot i_{sd}) / L_r \quad (3.16)$$

$$i_{rq} = (\Psi_{rq} - L_m \cdot i_{sq}) / L_r$$

Підставляємо у рівняння напруг і потокозчеплень статора, враховуючи що $L_s - L_m^2/L_r = \sigma \cdot L_s$ (де σ - коефіцієнт розсіювання Блонделя):

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r) \quad (3.17)$$

Після підстановки і перетворень отримуємо замкнену систему п'яти диференціальних рівнянь першого порядку - рівнянь стану асинхронного двигуна:

Похідна d-компоненти струму статора:

$$\begin{aligned} di_{sd}/dt = & (1/(\sigma \cdot L_s)) \cdot [u_{sd} - R_s \cdot i_{sd} + (L_m \cdot R_r / (L_r^2)) \cdot \Psi_{rd} \\ & + \omega_1 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq} + (\omega_p \cdot L_m / L_r) \cdot \Psi_{rq}] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Похідна q-компоненти струму статора:

$$\begin{aligned} di_{sq}/dt = & (1/(\sigma \cdot L_s)) \cdot [u_{sq} - R_s \cdot i_{sq} + (L_m \cdot R_r / (L_r^2)) \cdot \Psi_{rq} \\ & - \omega_1 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd} - (\omega_p \cdot L_m / L_r) \cdot \Psi_{rd}] \end{aligned} \quad (3.19)$$

Похідна d-компоненти потокозчеплення ротора:

$$d\Psi_{rd}/dt = (L_m \cdot R_r / L_r) \cdot i_{sd} - (R_r / L_r) \cdot \Psi_{rd} + (\omega_1 - \omega_p) \cdot \Psi_{rq} \quad (3.20)$$

Похідна q-компоненти потокозчеплення ротора:

$$d\Psi_{rq}/dt = (L_m \cdot R_r / L_r) \cdot i_{sq} - (R_r / L_r) \cdot \Psi_{rq} - (\omega_1 - \omega_p) \cdot \Psi_{rd} \quad (3.21)$$

Похідна механічної кутової швидкості ротора:

$$d\Omega_p/dt = (1/J) \cdot [(3/2) \cdot p \cdot (L_m / L_r) \cdot (\Psi_{rd} \cdot i_{sq} - \Psi_{rq} \cdot i_{sd}) - M_c - B \cdot \Omega_p] \quad (3.22)$$

Ці п'ять рівнянь (3.18 - 3.22) у сукупності із законом зміни кута $\theta_k = \int \omega_1 dt$ описують повну електромеханічну динаміку асинхронного двигуна. Кожне з них безпосередньо відповідає одному блоку інтегратора у Simulink-моделі.

Для аналізу усталеного синусоїдального режиму (рівноважний стан, похідні дорівнюють нулю) система рівнянь стану вироджується у алгебраїчну систему. У синхронній системі координат всі фізичні змінні у усталеному режимі стають постійними. Прирівнюючи похідні нулю у рівняннях потокозчеплень ротора (у системі координат ротора), отримуємо зв'язок між ковзанням s і складовими струму:

$$s = \omega_s / \omega_1 = (R_r \cdot i_{rq}) / (L_r \cdot (R_r / L_r \cdot \Psi_{rd})) \quad (3.23)$$

що у поєднанні із рівняннями намагнічувального кола дає добре відому формулу Клосса для механічної характеристики АД.

3.5 Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна.

Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна (рис.3.1) є еквівалентною електричною схемою, що описує електромагнітні процеси у двигуні з точки зору зовнішніх клем (затисків статора) для однієї фази. Схема є частотною - вона будується для усталеного синусоїдального режиму і оперує комплексними амплітудами (або діючими значеннями) струмів і напруг.

Класична Т-схема заміщення АД складається з трьох гілок. Ліва гілка містить послідовно ввімкнені активний опір статора R_s і індуктивний опір розсіювання статора $X_{\sigma s} = \omega_1 \cdot L_{\sigma s}$. Права гілка містить активний опір ротора R_r/s , поділений на ковзання s , і індуктивний опір розсіювання ротора $X_{\sigma r} = \omega_1 \cdot L_{\sigma r}$ (ці параметри наведені до статора через коефіцієнт трансформації). Середня (поперечна) гілка містить активний опір втрат у сталі R_{Fe} і індуктивний опір намагнічування $X_m = \omega_1 \cdot L_m$ - ці елементи ввімкнені паралельно у точці між лівою і правою гілками.

Опір R_r/s у правій гілці часто розкладається на дві складові:

$$R_r/s = R_r + R_r \cdot (1-s)/s$$

де R_r - активні втрати у роторному колі; $R_r \cdot (1-s)/s$ - механічне навантаження (опір, що поглинає механічну потужність)

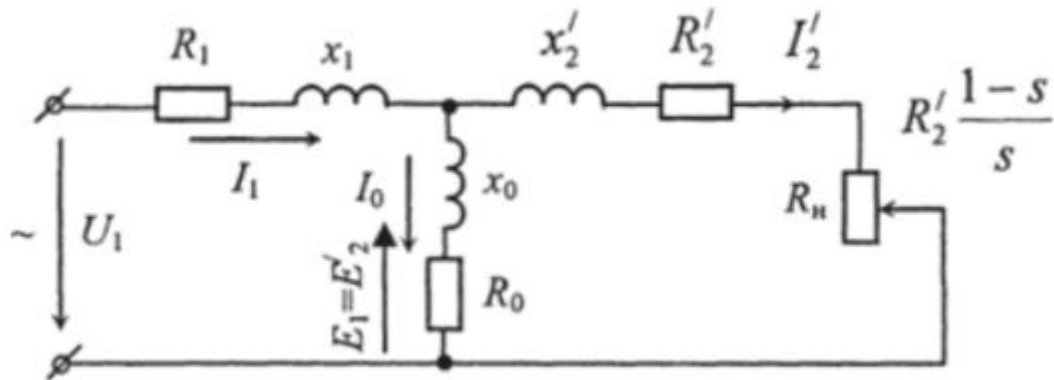


Рис. 3.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна.

Потужний баланс схеми заміщення: потужність, що розсіюється на R_r - це електричні втрати у роторі; потужність, що розсіюється на $R_r \cdot (1-s)/s$ - це корисна механічна потужність, яку двигун передає валу.

У практичних розрахунках намагнічувальну гілку нерідко переносять до входу схеми (з'єднання між R_s і $X_{\sigma s}$ і шиною), отримуючи Г-подібну схему заміщення. Це допущення виправдане при великих значеннях $X_m \gg X_{\sigma s}$ і є стандартом у більшості розрахункових методик ДСТУ та ІЕС. Г-схема забезпечує похибку менше 2–3% для двигунів потужністю понад 10 кВт.

Для Г-схеми параметри (R_s , $X_{\sigma s}$, R_r , $X_{\sigma r}$, X_m) визначаються за результатами двох стандартних дослідів: дослід холостого ходу (ХХ) і дослід короткого замикання (КЗ). У разі відсутності даних цих дослідів - як у нашому випадку - параметри визначаються аналітично за каталожними даними двигуна. Цей метод, заснований на роботах Іванова-Смоленського, є стандартним у практиці вітчизняного електромашинобудування.

Параметри Т-схеми заміщення безпосередньо відповідають індуктивностям і опорам у рівняннях стану:

$$\begin{aligned} L_s &= X_{\sigma s} / \omega_1 + L_m = (X_{\sigma s} + X_m) / \omega_1 \\ L_r &= X_{\sigma r} / \omega_1 + L_m = (X_{\sigma r} + X_m) / \omega_1 \\ L_m &= X_m / \omega_1 \\ R_s &= R_s \text{ (той самий)} \\ R_r &= R_r \text{ (той самий, але наведений до статора)} \end{aligned} \quad (3.24)$$

де $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314,16$ рад/с - кутова частота напруги живлення.

Коефіцієнт розсіювання Блонделя:

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r) = 1 - X_m^2 / ((X_m + X_{\sigma s}) \cdot (X_m + X_{\sigma r})) \quad (3.25)$$

3.6 Визначення параметрів схеми заміщення.

Таблиця 3.1 – Каталожні дані АІР315М4 для розрахунку параметрів

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність	$P_{\text{ном}}$	200 кВт
Номінальна напруга	$U_{\text{ном}}$	380 В (трифазна)
Номінальна частота	f_1	50 Гц
Число пар полюсів	p	2 (4-полюсний)

Параметр	Позначення	Значення
Синхронна частота	n_1	1 500 об/хв
Номинальна частота обертання	$n_{\text{ном}}$	1 480 об/хв
Номинальне ковзання	$s_{\text{ном}}$	0,0133
Номинальний ккд	$\eta_{\text{ном}}$	0,949
Номинальний $\cos\varphi$	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,890
Номинальний струм	$I_{\text{ном}}$	360 А
Номинальний момент	$M_{\text{ном}}$	1 287 Н·м

Базові величини

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 1500/60 = 157,08 \text{ рад/с}$$

$$\Omega_{\text{ном}} = 2\pi \cdot 1480/60 = 154,98 \text{ рад/с}$$

$$\sin\varphi_{\text{ном}} = \sqrt{(1 - 0,890^2)} = \sqrt{(1 - 0,7921)} = \sqrt{0,2079} = 0,456$$

Фазний струм і його складові

Для з'єднання обмоток статора зіркою Y (еквівалент для блока Simulink):

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{ном}} / \sqrt{3} = 380 / 1,732 = 219,4 \text{ В}$$

$$I_{\text{ном.ф}} = I_{\text{ном}} / \sqrt{3} = 360 / 1,732 = 207,9 \text{ А (при з'єднанні Y)}$$

Активна і реактивна складові фазного струму:

$$I_{\text{а}} = I_{\text{ном.ф}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}} = 207,9 \cdot 0,890 = 185,0 \text{ А}$$

$$I_{\text{р}} = I_{\text{ном.ф}} \cdot \sin\varphi_{\text{ном}} = 207,9 \cdot 0,456 = 94,8 \text{ А}$$

Активний опір статора R_s

Відносні втрати у міді статора (для двигунів 160–250 кВт $\beta_s \approx 0,38$):

$$\Delta P_{\text{заг}} = P_{\text{ном}} \cdot (1/\eta_{\text{ном}} - 1) = 200\,000 \cdot (1/0,949 - 1) = 200\,000 \cdot 0,0537 = 10742 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_s = \beta_s \cdot \Delta P_{\text{заг}} = 0,38 \cdot 10\,742 = 4\,082 \text{ Вт}$$

$$R_s = \Delta P_s / (3 \cdot I_{\text{ном},\phi}^2) = 4\,082 / (3 \cdot 207,9^2) = 4\,082 / 129\,717 = 0,03147 \text{ Ом}$$

$$R_s = 0,03147 \text{ Ом}$$

Активний опір ротора R_r

$$\Delta P_r = s_{\text{ном}} \cdot P_{\text{сл}} = s_{\text{ном}} \cdot P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 0,0133 \cdot (200\,000/0,949) = 0,0133 \cdot 210\,748 = 2\,803 \text{ Вт}$$

$$I_r \approx I_a = 185,0 \text{ А}$$

$$R_r = \Delta P_r / (3 \cdot I_r^2) = 2\,803 / (3 \cdot 185,0^2) = 2\,803 / 102\,675 = 0,02730 \text{ Ом}$$

$$R_r = 0,02730 \text{ Ом}$$

Критичне ковзання і сума опорів розсіювання

Кратність максимального моменту для АІР315М4: $\lambda_{\text{max}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} \approx 2,6$
(типове для серії 315):

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda_{\text{max}} + \sqrt{(\lambda_{\text{max}}^2 - 1)}) = 0,0133 \cdot (2,6 + \sqrt{(6,76-1)})$$

$$s_{\text{кр}} = 0,0133 \cdot (2,6 + \sqrt{5,76}) = 0,0133 \cdot (2,6 + 2,400) = 0,0133 \cdot 5,0 = 0,0665$$

$$s_{\text{кр}} = 0,0665$$

$$X_{\text{ос}} + X_{\text{ор}} = R_r / s_{\text{кр}} = 0,02730 / 0,0665 = 0,4105 \text{ Ом}$$

Розподіл ($X_{\text{ос}} : X_{\text{ор}} = 0,4 : 0,6$ для серії АІР):

$$X_{\text{ос}} = 0,4 \cdot 0,4105 = 0,1642 \text{ Ом} \rightarrow L_{\text{ос}} = 0,1642/157,08 = 1,045\text{e-}3 \text{ Гн}$$

$$X_{\text{ор}} = 0,6 \cdot 0,4105 = 0,2463 \text{ Ом} \rightarrow L_{\text{ор}} = 0,2463/157,08 = 1,568\text{e-}3 \text{ Гн}$$

$$L_{\text{ос}} = 1,045 \text{ мГн}; \quad L_{\text{ор}} = 1,568 \text{ мГн}$$

Індуктивність намагнічування L_m

$$X_m \approx U_{\phi} / I_p = 219,4 / 94,8 = 2,314 \text{ Ом}$$

$$L_m = X_m / \omega_1 = 2,314 / 157,08 = 14,733\text{e-}3 \text{ Гн}$$

$$L_m = 14,733 \text{ мГн}$$

Повні індуктивності:

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m = 1,045 + 14,733 = 15,778 \text{ мГн}$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m = 1,568 + 14,733 = 16,301 \text{ мГн}$$

$$L_s = 15,778 \text{ мГн}; \quad L_r = 16,301 \text{ мГн}$$

Коефіцієнт розсіювання Блонделя:

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r) = 1 - (14,733)^2 / (15,778 \cdot 16,301)$$

$$\sigma = 1 - 217,061 / 257,218 = 1 - 0,8439 = 0,1561$$

$$\sigma = 0,1561 \text{ (15,61\%)}$$

Перевірка через ккд

$$\Delta P_s = 3 \cdot R_s \cdot I_{\text{ном.}\phi}^2 = 3 \cdot 0,03147 \cdot 207,9^2 = 3 \cdot 0,03147 \cdot 43\,222 = 4\,081 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_r = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 = 3 \cdot 0,02730 \cdot 185,0^2 = 3 \cdot 0,02730 \cdot 34\,225 = 2\,802 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx 0,02 \cdot P_{\text{ном}} = 0,02 \cdot 200\,000 = 4\,000 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\text{Fe}} \approx 600 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{\text{заг}} = 4\,081 + 2\,802 + 4\,000 + 600 = 11\,483 \text{ Вт}$$

$$\eta_{\text{розр}} = 200\,000 / (200\,000 + 11\,483) = 200\,000 / 211\,483 = 0,9457 = 94,57\%$$

$$\eta_{\text{розр}} = 94,57\% \approx \eta_{\text{кат}} = 94,9\% \text{ - розбіжність } 0,35\%, \text{ в межах допуску.}$$

Параметри механічної частини моделі

Момент інерції системи

Момент інерції ротора двигуна АІР315М4 (за довідником): $J_p \approx 3,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент інерції насоса Д1000-65 ($Q = 1\,000 \text{ м}^3/\text{год}$): $J_n \approx 5,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$J = J_p + J_n = 3,8 + 5,5 = 9,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$J = 9,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - повний момент інерції системи

Механічна характеристика навантаження (насос):

$$M_c(\Omega) = M_{c.\text{ном}} \cdot (\Omega/\Omega_{\text{ном}})^2 = 937 \cdot (\Omega/154,98)^2$$

$$M_c(\Omega) = 0,03903 \cdot \Omega^2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{c.\text{ном}} = 937 \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ при } \Omega_{\text{ном}} = 154,98 \text{ рад/с}$$

Коефіцієнт в'язкого тертя:

$$P_{\text{мех}} = 0,02 \cdot P_{\text{ном}} = 0,02 \cdot 200\,000 = 4\,000 \text{ Вт}$$

$$B = P_{\text{мех}} / \Omega_{\text{ном}}^2 = 4\,000 / 154,98^2 = 4\,000 / 24\,019 = 0,1665 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$$

$$B = 0,1665 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$$

3.7 Зведена таблиця параметрів моделі для Simulink.

Таблиця 3.2 – Параметри блока Asynchronous Machine для AIP315M4

Параметр блока Simulink	Позначення	Значення	Одиниця
Номінальна потужність	$P_{\text{ном}}$	200 000	Вт
Номінальна фазна напруга (RMS, Y)	U_{ϕ}	219,4	В
Номінальна частота	f_1	50	Гц
Число пар полюсів	p	2	-
Активний опір статора	R_s	0,03147	Ом
Індуктивність розсіювання статора	$L_{\sigma s}$	1,045e-3	Гн
Активний опір ротора (наведений)	R_r'	0,02730	Ом
Індуктивність розсіювання ротора	$L_{\sigma r'}$	1,568e-3	Гн
Індуктивність намагнічування	L_m	14,733e-3	Гн

Параметр блока Simulink	Позначення	Значення	Одиниця
Повна індуктивність статора	L_s	15,778e-3	Гн
Повна індуктивність ротора	L_r	16,301e-3	Гн
Коефіцієнт розсіювання Блонделя	σ	0,1561	-
Момент інерції системи	J	9,3	кг·м ²
Коефіцієнт в'язкого тертя	B	0,1665	Н·м·с/рад
Тип з'єднання (в моделі)	-	Y (зірка)	-

Примітка. Параметри наведені для Y-еквіваленту (Simulink працює у схемі Y). При з'єднанні двигуна у мережі за схемою Δ зовнішньо підключається напруга 380 В між лінійними провідниками, тоді як модель використовує фазну напругу 219,4 В.

3.8 Налаштування Simulink-моделі.

Параметри блока Asynchronous Machine

- Preset model → Custom; Mechanical input → Torque T_m ; Rotor type → Squirrel-cage
- Nominal power, Voltage (L-L RMS), Frequency → 200e3, 380, 50
- Stator resistance R_s , Leakage inductance L_{ls} → 0.03147, 1.045e-3
- Rotor resistance R_r , Leakage inductance L_{lr} → 0.02730, 1.568e-3
- Mutual inductance L_m → 14.733e-3
- Inertia, friction factor, pole pairs → 9.3, 0.1665, 2
- Initial conditions → [0 0 0 0 0] (нульові, холодний пуск)

Параметри solver і час моделювання

- Метод інтегрування: ode23tb або ode45, відносна похибка 1e-4, початковий крок 1e-4 с
- Час моделювання: пуск - не менше 10 с; усталений режим - 2–3 с після пуску; зміна уставки - 60–120 с

– Вихідні сигнали To Workspace: ω_p (рад/с), T_e (Н·м), i_s (А), U_{dc} , Q (м³/год)

Таблиця 3.3 – Критерії верифікації моделі AIP315M4 у Simulink

Показник	Розрахункове значення	Допустиме відхилення	Метод перевірки
Номінальна швидкість $n_{ном}$	1 480 об/хв	± 10 об/хв	Score: сигнал 'wm'
Номінальний момент $T_{e.ном}$	1 287 Н·м	± 26 Н·м (2%)	Score: сигнал 'Te'
Фазний струм $I_{ф.ном}$	207,9 А	± 6 А (3%)	Score: сигнал 'is(1)'
Критичне ковзання skp	0,0665	$\pm 0,003$	Крива $n(T)$ у точці M_{max}
ккд у номінальному режимі	94,57%	$\pm 0,5\%$	Розрахунок $P_{вих}/P_{вх}$
Час прямого пуску	1,5 с	$\pm 0,2$ с	Score: час до $n = n_{ном}$
Стала часу ротора T_r	0,597 с	$\pm 0,02$ с	Відгук Ψ_{rd} на ступінчасте збурення

3.9 Результати моделювання.

На рисунку 3.2 зображена схема моделі в середовищі Simulink, яка використовувалась для моделювання прямого пуску двигуна AIP315M4. На ній присутні усі необхідні компоненти для проведення моделювання, а саме: модель електродвигуна та трифазне джерело живлення. Для контролю результатів моделювання використовується трьохканальний осцилограф, на якому можна спостерігати за змінами швидкості обертання, моменту, та струму статора.

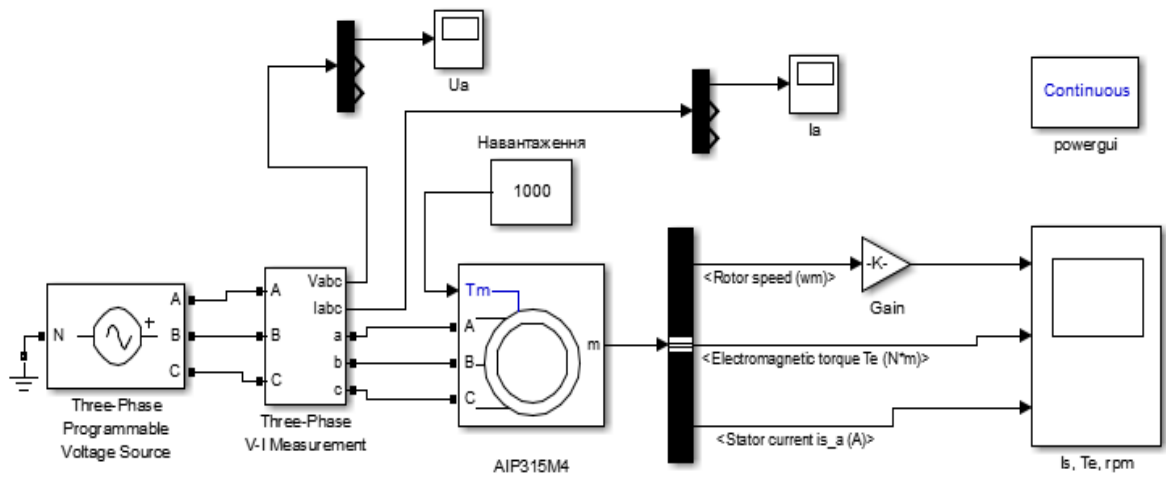


Рис. 3.2 – схема моделювання прямого пуску.

Результати роботи моделі зображені на графіках рис. 3.3.

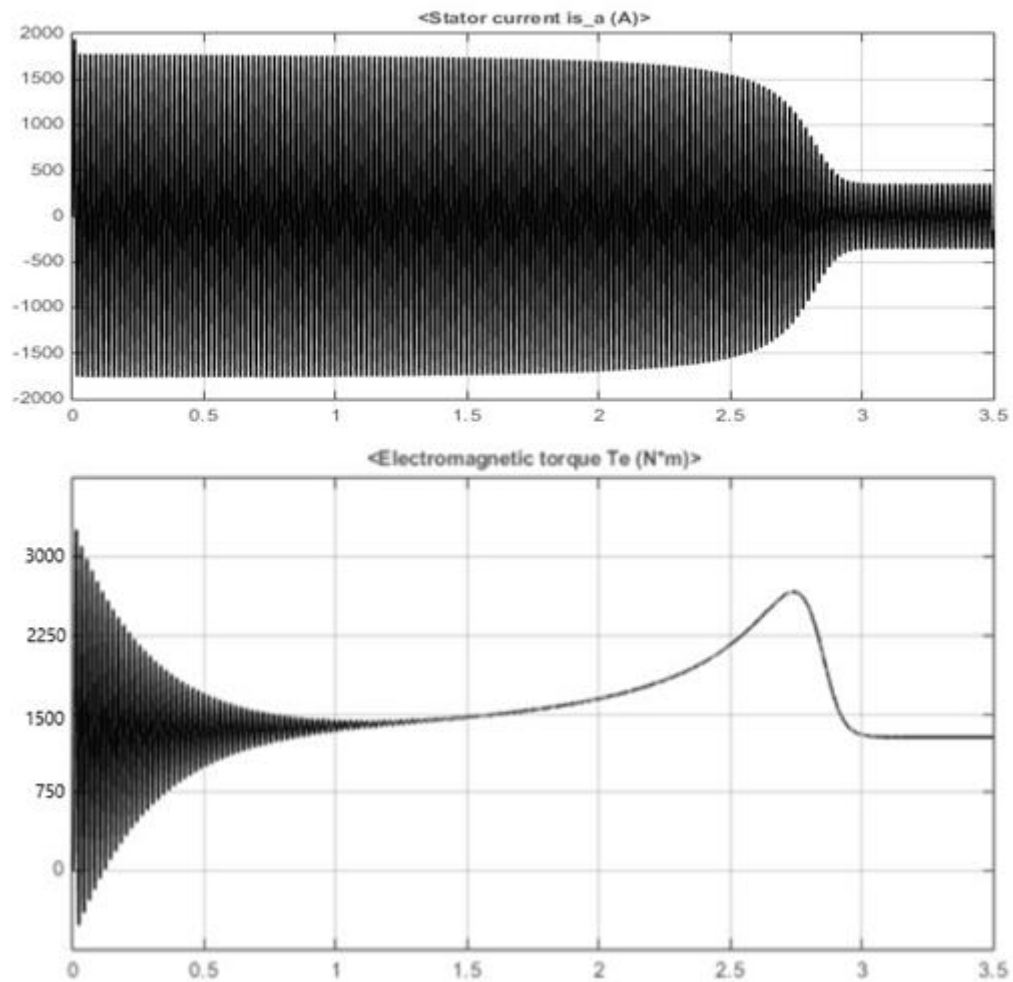


Рис.3.3 – Струм статора і момент при моделюванні прямого пуску.

Для моделювання роботи ПЧ скористуємося вбудованою в Матлаб моделлю powerpwm. Схема моделі зображена на рисунку 3.4.

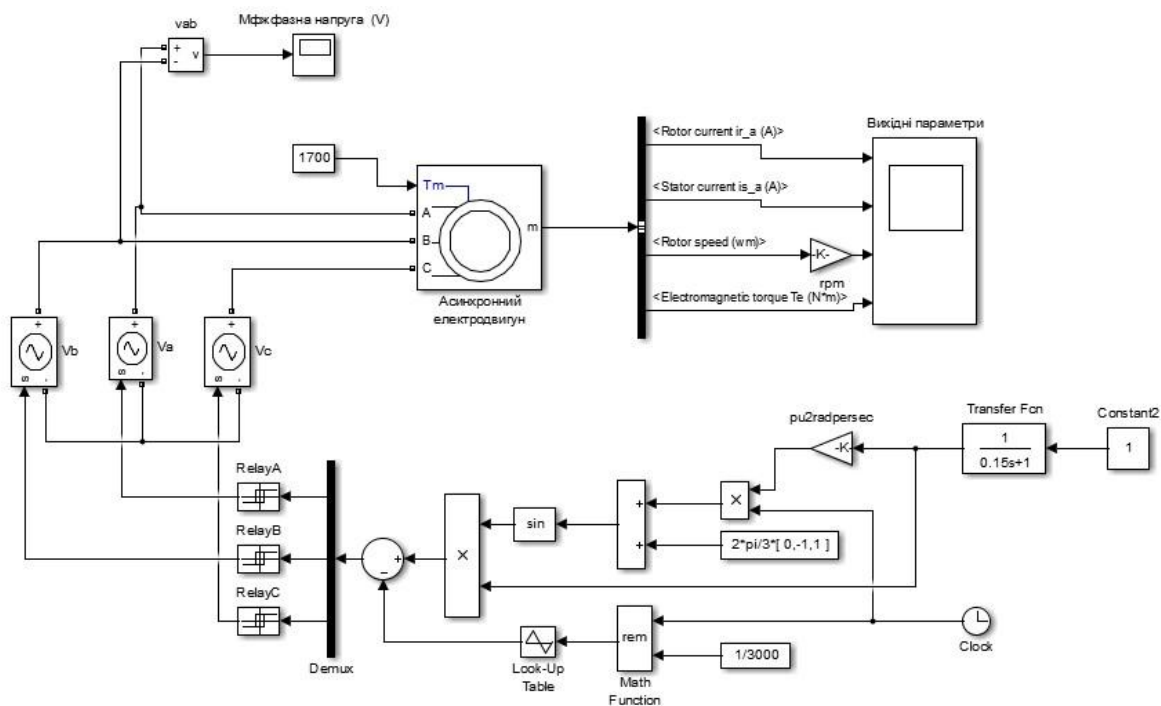


Рис. 3.4 – схема моделі ПЧ в Simulink (powerpwm).

Схема моделі ПЧ значною мірою відрізняється від схеми прямого пуску. На цій схемі вже присутні три незалежних керованих джерела змінного струму, які імітують роботу інверторного ланцюга реального ПЧ. Змінюючи параметри на вході цих джерел струму, ми можемо змінювати вихідну напругу та частоту, що дає нам можливість, з деякими наближеннями, провести моделювання пуску електродвигуна за допомогою ПЧ.

На рис. 3.5 зображені результати роботи моделі у вигляді залежностей струму та моменту.

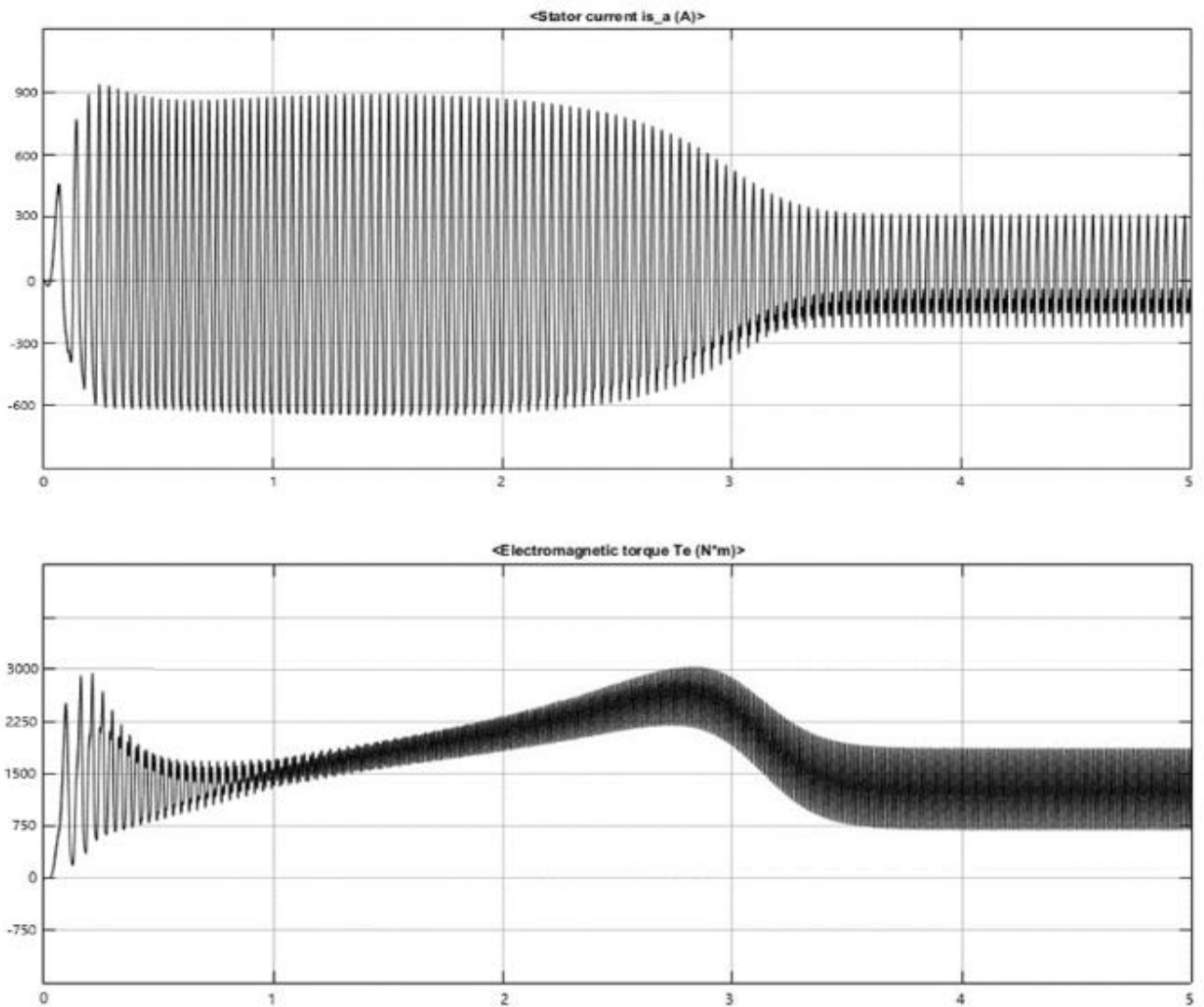


Рис. 3.5 – Результати роботи моделі ПЧ.

Як можна побачити, при використанні моделі пч, пусковий струм значною мірою знижується, у порівнянні із прямим пуском. Також, використовуючи ПЧ ми можемо регулювати швидкість розгону двигуна, що є дуже важливим коли в якості навантаження виступає насос водопостачання. Враховуючи нестискаємість води як рідини, регулювання швидкості пуску є дуже важливим і дозволяє запобігати розповсюдженню ударної хвилі в системі водопостачання та виходу її з ладу.

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

4.1 Постановка задачі.

У цьому розділі виконується техніко-економічне порівняння двох варіантів електроприводу насосного агрегата продуктивністю $Q = 1\,000\text{ м}^3/\text{год}$ з двигуном АІР315М4 (200 кВт): прямий пуск з дросельним регулюванням (ПП) і частотний привод (ПЧ) на базі ПЧ АВВ АС880-01-361А-3.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для економічного розрахунку

Параметр	Позначення / одиниця	Значення
Номінальна потужність двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	200
Потужність на валу насоса	$P_{\text{вал}}$, кВт	145,2
Споживана електрична потужність (ном.)	$P_{\text{ел}}$, кВт	153,0
Час роботи насоса на добу	$T_{\text{доб}}$, год/добу	20
Тариф на електроенергію	$\text{Ц}_\text{е}$, грн/кВт·год	6,50
Кількість робочих днів на рік	$N_{\text{р}}$, днів/рік	365
Час роботи на рік	$T_{\text{рік}}$, год/рік	7 300
Нормативний строк служби ПЧ	$T_{\text{сл}}$, років	15
Ставка дисконтування (для NPV)	r , %	15

4.2 Аналіз графіка навантаження насоса.

Характерний добовий графік водоспоживання промислового підприємства з двозмінним режимом роботи і нічною перервою. Насос працює 20 годин на добу. При дросельному регулюванні (ПП) двигун обертається з номінальною швидкістю

і споживає близько 75–80% від Рел незалежно від поточної подачі - надлишок напору «гаситься» на засувці. При частотному регулюванні (ПЧ) потужність змінюється за кубічним законом: $P \sim (Q/Q_{ном})^3$.

Таблиця 4.2 – Добовий графік навантаження і споживання електроенергії по варіантах

Час доби	Трив., год	Подача, %	Р _{шп} , кВт	Р _{пч} , кВт	W _{шп} , кВт·год	W _{пч} , кВт·год
6:00–8:00	2	60%	121	33,0	242,0	66,0
8:00–10:00	2	80%	126	78,5	252,0	157,0
10:00–12:00	2	100%	153	153,0	306,0	306,0
12:00–13:00	1	85%	128	94,5	128,0	94,5
13:00–14:00	1	70%	123	52,5	123,0	52,5
14:00–16:00	2	100%	153	153,0	306,0	306,0
16:00–18:00	2	90%	131	112,0	262,0	224,0
18:00–20:00	2	75%	124	64,8	248,0	129,6
20:00–22:00	2	55%	119	25,4	238,0	50,8
РАЗОМ за добу	18	-	-	-	2 105	1 386

При дросельному регулюванні потужність ПП розрахована з урахуванням незначного зміщення робочої точки по характеристиці насоса при прикриванні засувки. Мінімальне значення $P_{шп} \approx 78\%$ від Рел.ном, оскільки двигун продовжує споживати значну частину номінальної потужності навіть при зниженій подачі.

4.3 Розрахунок річного споживання і вартості електроенергії.

Річне споживання електроенергії становить:

$$W_{\text{рік.ПП}} = W_{\text{доб.ПП}} \cdot N_p = 2\,105 \cdot 365 = 768\,325 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.1)$$

$$W_{\text{рік.ПП}} = 768\,325 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \approx 768,3 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$W_{\text{рік.ПЧ}} = W_{\text{доб.ПЧ}} \cdot N_p = 1\,386 \cdot 365 = 506\,190 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$W_{\text{рік.ПЧ}} = 506\,190 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \approx 506,2 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$$

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W_{\text{рік}} = 768\,325 - 506\,190 = 262\,135 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \quad (4.2)$$

$$\Delta W_{\text{рік}} = 262\,135 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} \approx 262,1 \text{ МВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$\Delta W_{\%} = 262\,135 / 768\,325 \cdot 100\% = 34,1\%$$

Відносна економія електроенергії: 34,1%

Річна вартість електроенергії, з розрахунку вартості 1 кВт год 6.5 грн:

$$V_{\text{ел.ПП}} = 768\,325 \cdot 6,50 = 4\,994\,113 \text{ грн/рік} \quad (4.3)$$

$$V_{\text{ел.ПП}} = 4\,994\,113 \text{ грн/рік} \approx 4,99 \text{ млн грн/рік}$$

$$V_{\text{ел.ПЧ}} = 506\,190 \cdot 6,50 = 3\,290\,235 \text{ грн/рік}$$

$$V_{\text{ел.ПЧ}} = 3\,290\,235 \text{ грн/рік} \approx 3,29 \text{ млн грн/рік}$$

$$\Delta V_{\text{ел}} = 4\,994\,113 - 3\,290\,235 = 1\,703\,878 \text{ грн/рік}$$

Річна економія на електроенергії: $\Delta V_{\text{ел}} = 1\,703\,878 \text{ грн/рік} \approx 1,70 \text{ млн грн/рік}$

Таблиця 4.3 – Порівняння витрат на електроенергію: ПП vs ПЧ

Показник	ПП (прямий пуск)	ПЧ	Різниця
Добове споживання, кВт·год	2 105	1 386	–719
Річне споживання, МВт·год	768,3	506,2	–262,1
Річні витрати на ел/е, тис. грн	4 994,1	3 290,2	–1 703,9
Середня потужність, кВт	105,3	69,3	–36,0

Показник	ПП (прямий пуск)	ПЧ	Різниця
Відносна економія	-	-	34,1%

4.4 Капітальні витрати на впровадження ПЧ

Розглянемо з чого складаються капітальні витрати на модернізацію (табл. 4.4):

Таблиця 4.4 – Кошторис капітальних витрат на впровадження ПЧ

Стаття витрат	Кількість	Ціна, тис. грн	Сума, тис. грн
ПЧ АВВ ACS880-01-361A-3 (315 кВт, 361 А)	1 шт.	680,0	680,0
du/dt-фільтр вихідний (кабель >50 м)	1 шт.	42,0	42,0
Автоматичний вимикач вхідний (400 А)	1 шт.	22,0	22,0
Рубильник-роз'єднувач (bypass)	1 шт.	12,0	12,0
Силовий кабель до двигуна (3×95 мм², 40 м)	40 м	0,55 тис/м	22,0
Кабель управління і сигналізації	комп.	8,0	8,0
Датчик тиску 4–20 мА (для ПД)	1 шт.	7,5	7,5
Шафа управління ПЧ (IP54)	1 шт.	25,0	25,0
Демонтаж старого пускача ПП	1 к-т	15,0	15,0
Монтаж ПЧ і шафи управління	1 к-т	55,0	55,0
Прокладання силових кабелів	1 к-т	28,0	28,0

Стаття витрат	Кількість	Ціна, тис. грн	Сума, тис. грн
Пусконаладжувальні роботи (ПНР)	1 к-т	42,0	42,0
Навчання персоналу	2 особи	5,0	10,0
Проектна документація (ПД + РД)	1 к-т	35,0	35,0
Разом прямі витрати			1 003,5
Непередбачені витрати (5%)		×1,05	50,2
РАЗОМ капітальні витрати К			1 053,7

$K = 1\,053\,700 \text{ грн} \approx 1,054 \text{ млн грн}$

Загальні капітальні витрати $K = 1\,053\,700 \text{ грн}$

4.5 Загальна річна економія.

Додаткові складові річної економії від застосування ПЧ:

Зниження витрат на ТО завдяки плавному пуску і роботі поблизу ВЕР (зниження на 25%):

$$\Delta B_{\text{ТО}} = 90\,000 \cdot 0,25 = 22\,500 \text{ грн/рік} \quad (4.4)$$

Економія від зниження реактивного навантаження. Середня потужність ПП = 105,3 кВт при $\cos\varphi = 0,890$: $Q_{\text{ПП}} = 105,3 \cdot 0,510 = 53,7 \text{ кВАр}$. Середня потужність ПЧ = 69,3 кВт при $\cos\varphi_{\text{вх}} \approx 0,95$: $Q_{\text{ПЧ}} = 69,3 \cdot 0,329 = 22,8 \text{ кВАр}$:

$$\Delta B_Q = (53,7 - 22,8) \cdot 0,45 \cdot 7\,300 = 30,9 \cdot 0,45 \cdot 7\,300 = 101\,579 \text{ грн/рік}$$

Зменшення аварійності (консервативна оцінка):

$$\Delta B_{\text{авар}} \approx 5\,000 \text{ грн/рік}$$

Загальна річна економія:

$$\Delta B_{\text{заг}} = 1\,703\,878 + 22\,500 + 101\,579 + 5\,000 = 1\,832\,957 \text{ грн/рік} \quad (4.5)$$

Загальна річна економія: $\Delta B_{\text{заг}} = 1\,832\,957 \text{ грн/рік} \approx 1,83 \text{ млн грн/рік}$

Таблиця 4.5 – Структура річної економії від застосування ПЧ

Джерело економії	Сума, грн/рік	Частка, %
Економія електроенергії	1 703 878	92,9%
Зниження витрат на ТО	22 500	1,2%
Зменшення реактивного навантаження	101 579	5,5%
Зниження аварійності	5 000	0,3%
РАЗОМ	1 832 957	100%

$$B_{\text{опер.ПЧ}} = 8\,000 \text{ грн/рік (планове ТО ПЧ раз на рік)}$$

Чиста річна економія:

$$\Delta B_{\text{чист}} = \Delta B_{\text{заг}} - B_{\text{опер.ПЧ}} = 1\,832\,957 - 8\,000 = 1\,824\,957 \text{ грн/рік} \quad (4.6)$$

$$\Delta B_{\text{чист}} = 1\,824\,957 \text{ грн/рік} \approx 1,825 \text{ млн грн/рік}$$

4.6 Розрахунок терміну окупності.

$$PP = K / \Delta B_{\text{чист}} = 1\,053\,700 / 1\,824\,957 = 0,577 \text{ року} \quad (4.7)$$

$$PP = 0,577 \cdot 12 = 6,9 \text{ місяця}$$

Простий термін окупності: $PP = 6,9 \text{ місяців} \approx 7 \text{ місяців}$

Результат є виключно привабливим з інвестиційної точки зору. Вкладення у ПЧ повертаються протягом 7 місяців, що є одним з найкращих показників серед заходів з підвищення енергоефективності у промисловості.

Розрахунок дисконтованого терміну окупності (DPP)

Ставка дисконтування $r = 15\%$ річних. Коефіцієнт дисконтування $d(t) = 1/(1+0,15)^t$.

Таблиця 4.6 – Розрахунок дисконтованих грошових потоків і кумулятивного NPV

Рік t	Коеф. $d(t)$	Річна економія, грн	Дисконт. економія, грн	Опер. витрати, грн	Чистий потік, грн	Кумул. NPV, грн
0	1,000	-1 053 700	-1 053 700	0	-1 053 700	-1 053 700
1	0,870	1 824 957	1 587 712	8 000	1 816 957	534 012 ✓
2	0,756	1 824 957	1 379 667	8 000	1 816 957	1 913 679
3	0,658	1 824 957	1 200 822	8 000	1 816 957	3 114 501
5	0,497	1 824 957	907 004	8 000	1 816 957	5 141 000
7	0,376	1 824 957	686 184	8 000	1 816 957	6 764 000
10	0,247	1 824 957	450 865	8 000	1 816 957	8 867 000
15	0,123	1 824 957	224 471	8 000	1 816 957	11 597 000
NPV за 15 років						11 597 000 грн

Кумулятивний NPV переходить у позитивну зону вже у першому році.
Дисконтований термін окупності:

$$D_{PP} = 1 \cdot (1\,053\,700 / 1\,587\,712) = 0,663 \text{ року} \approx 8 \text{ місяців}$$

Дисконтований термін окупності: $D_{PP} \approx 8$ місяців

NPV за весь строк служби ПЧ (15 років):

$NPV = 11\,597\,000 \text{ грн} \approx 11,6 \text{ млн грн}$

$NPV = 11,6 \text{ млн грн}$

Індекс прибутковості:

$P_I = (NPV + K) / K = 11\,597\,000 / 1\,053\,700 = 11,01$

$P_I = 11,01$ - кожна інвестована гривня повертає 11,0 грн за 15 років

4.7 Прогноз економічного ефекту з урахуванням зростання тарифів.

Таблиця 4.8 – Прогноз річної економії при щорічному зростанні тарифів 8%

Рік	Тариф, грн/кВт·год	ΔW , тис. кВт·год/рік	Економія ел/є, тис. грн	Загальна економія, тис. грн
2025 (рік 1)	6,50	262,1	1 703,9	1 833,0
2026 (рік 2)	7,02	262,1	1 840,2	1 969,3
2027 (рік 3)	7,58	262,1	1 987,1	2 116,2
2028 (рік 4)	8,19	262,1	2 146,8	2 275,9
2029 (рік 5)	8,84	262,1	2 317,0	2 446,1
2030 (рік 6)	9,55	262,1	2 502,4	2 631,5
2031 (рік 7)	10,31	262,1	2 703,5	2 832,6
Сума за 7 років		1 834,7	15 201,0	16 104,6

За 7 років загальна економія складе близько 16,1 млн грн - у 15,3 рази більше за капітальні витрати (1,054 млн грн). При щорічному зростанні тарифів реальний ефект перевищуватиме прогноз, розрахований при постійному тарифі.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ МОНТАЖІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАСОСІВ ПРОМИСЛОВОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

5.1 Нормативно-правова база охорони праці на насосних станціях.

Охорона праці в Україні регулюється розгалуженою системою законодавчих і нормативних актів. Для об'єктів промислового водопостачання - насосних станцій, водозабірних споруд і систем водопідготовки - ці вимоги конкретизуються в галузевих нормативних документах, що враховують специфічні умови виробництва: підвищену вологість приміщень, наявність великогабаритного обладнання під напругою, роботу з хімічними реагентами та постійний вплив шуму і вібрації.

Основу правового регулювання становлять: Закон України «Про охорону праці» (із змінами і доповненнями), що встановлює загальні принципи державної політики в галузі охорони праці, права та обов'язки роботодавців і працівників; Кодекс законів про працю України (КЗпП); Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» в частині виробничих травм і профзахворювань.

На рівні підзаконних актів і нормативних документів ключовими є: НПАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок» (ПБЕ); НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (ПБЕЕСПС); СОУ 74.1-21677681-003-2009 «Насосні станції систем водопостачання і каналізації»; ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання»; ДБН А.3.2-2-2009 «Система стандартів безпеки праці». Окремо виділяється НПАОП 0.00-4.21-04 «Типове положення про службу охорони праці» та НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, на насосних станціях промислового водопостачання персонал може зазнавати впливу таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що систематизовані у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на насосних станціях водопостачання

Група факторів	Вид фактора	Джерело виникнення	Можливі наслідки для здоров'я
Фізичні (механічні)	Рухомі частини обладнання	Муфти, вали, робочі колеса насосів	Порізи, переломи, ампутації кінцівок
Фізичні (механічні)	Надлишковий тиск	Трубопроводи і насоси (до 10 атм)	Гідравлічний удар, розрив труб, опік
Фізичні (механічні)	Шум і вібрація	Насосні агрегати (70–100 дБА)	Туговухість, вібраційна хвороба
Фізичні (електричні)	Ураження ел. струмом	Двигуни 355 кВт, ПЧ (380–690 В)	Електротравма, фібриляція серця, загибель
Фізичні (електричні)	Напруга кроку та дотику	Пошкодження ізоляції, замикання на корпус	Електротравма різного ступеня тяжкості
Фізичні (теплові)	Гарячі поверхні	Підшипники, корпуси насосів (до 70 °С)	Термічний опік I–II ступеня
Фізичні (теплові)	Підвищена вологість	Насосний зал (відносна вологість >75%)	Погіршення ізоляції, ризик ел/ураження
Хімічні	Хлор і хлорпохідні	Станції хлорування питної води	Отруєння, хімічний опік дихальних шляхів
Хімічні	Коагулянти, флокулянти	Дозувальні насоси реагентного господарства	Подразнення шкіри і слизових оболонок

Група факторів	Вид фактора	Джерело виникнення	Можливі наслідки для здоров'я
Психофізіологічні	Підвищені фізичні навантаження	Монтаж обладнання масою до 6 000 кг	Травми м'язово-скелетної системи, хребта
Психофізіологічні	Робота у замкненому просторі	Підземні насосні камери, колодязі	Асфіксія, отруєння газами, паніка

Серед перерахованих факторів найбільшу небезпеку представляють ураження електричним струмом - у поєднанні з підвищеною вологістю приміщень - і механічні травми від рухомих частин великогабаритного обладнання. На ці два фактори припадає понад 70% від усіх виробничих травм у галузі водопостачання і водовідведення.

5.2 Вимоги безпеки при монтажі насосного обладнання.

Монтаж насосного обладнання потужністю 355 кВт і вище відноситься до робіт підвищеної небезпеки і виконується відповідно до технологічної карти або проекту виконання робіт (ПВР), затвердженого головним інженером підприємства. Перед початком монтажу оформляється наряд-допуск на виконання робіт підвищеної небезпеки встановленої форми згідно з НПАОП 0.00-4.03-04 «Положення про порядок видачі нарядів-допусків на виконання робіт підвищеної небезпеки».

До монтажних робіт допускаються особи, що досягли 18 років, пройшли медичний огляд, вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж на робочому місці, навчання за програмою безпечних методів праці і перевірку знань. Особи, що виконують електромонтажні роботи, повинні мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III (для робіт до 1 000 В) або IV (для робіт понад 1 000 В). Стропальники зобов'язані мати посвідчення встановленої форми і не

допускаються до роботи із вантажами масою понад ліміт, зазначений у їхньому посвідченні.

УВАГА! Виконання монтажних робіт без оформленого наряду-допуску, або при невідповідності фактичного складу бригади зазначеному у наряді, є грубим порушенням вимог охорони праці і підставою для негайного припинення робіт та притягнення відповідальних осіб до дисциплінарної і адміністративної відповідальності.

Монтажна зона насосного агрегата обгороджується переносними огороженнями або стрічковим маркуванням з написами «Обережно! Монтажні роботи» на відстані не менше 1,5 м від краю обладнання. Підлога монтажного майданчика повинна бути рівною, без вибоїн і слизьких ділянок. Освітленість робочого місця - не менше 200 лк для зони монтажу і 50 лк для допоміжних зон відповідно до ДБН В.2.5-28-2018.

Отвори у підлозі (кабельні канали, люки приямків) у зоні монтажу повинні бути перекриті суцільними настилами з надійним кріпленням або огорожені поручнями висотою не менше 1,1 м з проміжною перекладиною і бортовою дошкою заввишки 0,15 м. Робота поблизу відкритих ям і приямків без огороження категорично забороняється. При виявленні паливно-мастильних матеріалів або рідини на підлозі необхідно негайно прибрати їх і посипати місце адсорбуючим матеріалом.

Насосний агрегат АІМН355М4 разом з насосом Д2000-100 має сумарну масу близько 5 000–6 000 кг. Транспортування і встановлення таких вантажів виконується виключно вантажопідйомними механізмами (кран-балка, козловий кран або автокран) з вантажопідйомністю не менше ніж 1,5-кратна від маси вантажу. Вибір стропів виконується з урахуванням кута між гілками: при куті 120° допустиме навантаження зменшується вдвічі порівняно з вертикальним підвішуванням.

Перебування людей під піднятим вантажем або у зоні його можливого падіння категорично забороняється незалежно від характеру і стадії виконуваної роботи. Порушення цієї вимоги є найбільш поширеною причиною смертельних нещасних випадків при монтажних роботах.

При встановленні насосного агрегата на фундамент необхідно: переконатися у відповідності фундаменту проекту (відмітки опорних поверхонь, розташування анкерних болтів, марка бетону); встановити клинові підкладки відповідно до схеми вивірки; попередньо загвинтити анкерні болти і переконатися у стабільному положенні агрегата до зняття стропів; виконати вивірку горизонтальності рамної плити за рівнем у двох взаємно перпендикулярних напрямках (відхилення не більше 0,1 мм/м).

Центрування валів двигуна і насоса є відповідальною монтажною операцією, від точності якої залежить рівень вібрації і термін служби підшипників та ущільнень. Роботи виконуються виключно при повністю знеструмленому двигуні і з вивішеним плакатом «Не вмикати! Працюють люди» на рукоятці пускача або автоматичного вимикача. Повне розз'єднання валів (демонтаж напівмуфти) перед centruванням є обов'язковим. Проворот роторів при centruванні виконується вручну спеціальними ключами - не голими руками через ризик порізів від шпонок і задирок металу.

Норма точності centruвання: радіальне биття не більше 0,05 мм, кутове відхилення не більше 0,05 мм/100 мм для насосів потужністю понад 200 кВт відповідно до ДСТУ 2325-93 «Насоси відцентрові. Загальні технічні умови». Перевірка виконується індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм.

Перед підключенням трубопроводів необхідно перевірити їх внутрішню поверхню на відсутність сторонніх предметів, що можуть пошкодити робоче колесо при пуску. Різання і зварювання труб у монтажній зоні виконуються з дотриманням вимог пожежної безпеки: видалення горючих матеріалів у радіусі 5 м, наявність первинних засобів пожежогасіння.

Гідравлічне випробування змонтованих трубопроводів виконується при тиску $R_{проб} = 1,5 \cdot R_{роб}$, але не менше ($R_{роб} + 0,3$ МПа). Під час випробування всі люди перебувають на безпечній відстані від трубопроводів і не допускаються до них до завершення витримки під тиском і огляду фахівцем. Підтяжка болтових з'єднань під тиском суворо забороняється - це найбільш поширена причина виробничих травм при гідравлічних випробуваннях.

5.3 Електробезпека при монтажі і підключенні електрообладнання.

Насосний зал насосної станції відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою (НПАОП 0.00-1.21-98): підвищена вологість повітря (>75%); можливість одночасного дотику людини до металевих корпусів обладнання і струмопровідних підлог; наявність великої кількості металевих трубопроводів і кабельних конструкцій. При наявності відкритих струмоведучих частин або у підземних насосних камерах з постійно підтопленою підлогою приміщення відноситься до особливо небезпечних.

Таблиця 5.2 – Граничнодопустимі рівні напруги дотику і струму через тіло людини (ГОСТ 12.1.038-82)

Вид струму	Тривалість $\leq 0,1$ с	Тривалість 0,1–0,5 с	Тривалість 0,5–1,0 с	Тривалість понад 1 с
Змінний 50 Гц, В / мА	500 / 500	200 / 200	100 / 100	36 / 6
Постійний, В / мА	500 / 500	400 / 400	350 / 150	40 / 15
Безпечна напруга (вологі приміщення)	-	-	-	12–36 В (ДСТУ 2788-94)

Згідно з ГОСТ 12.1.038-82, тривалий вплив змінного струму 50 Гц силою понад 6 мА є вже загрозливим, а при 100 мА настає фібриляція шлуночків серця з імовірністю летального наслідку понад 50%. У вологих приміщеннях навіть ушкодження ізоляції з опором витoku 1 кОм при напрузі 220 В може спричинити струм 220 мА - смертельно небезпечний рівень. Саме тому всі захисні заходи у таких приміщеннях є обов'язковими, а не рекомендованими.

Захисне заземлення і занулення (система TN-S). Навмисне з'єднання металевих нетоковедучих частин двигуна, шафи ПЧ, трубопровідної арматури з заземлювальним пристроєм. У системі TN-S нульовий робочий провідник N і

захисний провідник РЕ є роздільними по всій довжині кола - це виключає появу аварійного потенціалу на корпусах обладнання при обриві нульового провідника. Опір заземлювального пристрою для установок до 1 кВ - не більше 4 Ом (НПАОП 0.00-1.32-01).

Пристрій захисного відключення (ПЗВ, RCD). Автоматичний апарат, що відключає мережу при появі диференційного струму на землю. Для насосних станцій застосовуються ПЗВ з уставкою 30 мА (захист від ураження струмом) і 300 мА (захист від пожежі). ПЧ ACS880 оснащений функцією контролю опору ізоляції з можливістю аварійного зупину при зниженні ізоляції нижче уставки.

Малі напруги. Для переносного ручного електроінструменту і місцевого освітлення у підземних і вологих приміщеннях застосовуються напруги 12 В і 36 В, отримані від знижувальних трансформаторів з обмотками, що не мають електричного зв'язку між собою.

Кінцювання і приєднання силового кабелю ПЧ–двигун виконуються за знятої напруги. Порядок знеструмлення: відключити автоматичний вимикач живлення ПЧ у НКУ; встановити замок або бирку на рукоятці; вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди»; перевірити відсутність напруги показчиком (не мультиметром!) на всіх фазах і нейтралі; встановити переносне заземлення на всіх фазах кабелю.

При підключенні трьохфазного кабелю до двигуна необхідно дотриматися правильного чергування фаз. Зміна будь-яких двох фаз змінює напрямок обертання двигуна на протилежний. Перевірку напрямку обертання виконують при першому пробному пуску без навантаження (муфта роз'єднана) - щоб уникнути пуску насоса у зворотному напрямку, що може призвести до розгвинчування ротора і серйозної аварії.

УВАГА! Після відключення ПЧ від мережі напруга на конденсаторах ланки постійного струму (560–640 В) зберігається протягом 5–10 хвилин. Перед відкриттям шафи ПЧ для виконання будь-яких робіт необхідно переконатися, що напруга DC знизилася до рівня менше 50 В, за показаннями вбудованого індикатора або мультиметра на клеммах DC+/DC–.

Особливості електробезпеки при роботі з перетворювачем частоти:

- Функція Safe Torque Off (STO) не є повноцінним засобом знеструмлення - вона лише забороняє формування крутного моменту, але не знімає напругу з силових ланцюгів. STO призначена виключно для функціональної безпеки при відкритті огорожень у ході роботи.
- ПЧ може бути дистанційно запущений з АСУ по мережевому протоколу навіть при відкритих дверях шафи, якщо не виконано блокування. Перед роботою у шафі необхідно відключити мережеве живлення і фізично заблокувати можливість дистанційного управління.
- Вихідна напруга ПЧ має форму ШІМ-імпульсів з крутими фронтами (dU/dt до 5 кВ/мкс), що є небезпечними для стандартних приладів вимірювання - для вимірювань потрібен осцилограф з диференціальним входом, а не звичайний мультиметр.
- Персонал, що самостійно обслуговує ПЧ, повинен мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче IV і пройти спеціальне навчання у авторизованому сервісному центрі АВВ або на підприємстві за програмою виробника.

5.4 Техніка безпеки при пусконаладжувальних роботах.

Підготовка до першого пуску та перелік обов'язкових перевірок.

Перший пуск насосного агрегата після монтажу є найбільш відповідальним етапом, що вимагає присутності відповідального ІТП і чіткого дотримання послідовності перевірок. Сторонні особи виводяться з насосного залу. Виконуються такі обов'язкові перевірки:

1. Механічна частина: відсутність сторонніх предметів у зоні обертання; легкість ручного прокручування ротора; щільність затяжки болтових з'єднань рами; наявність і правильність встановлення захисних кожухів муфти відповідно до НПАОП 0.00-1.20-98.
2. Трубопровідна частина: відкрито засувки на всмоктуванні; закрита або частково відкрита засувка на нагнітанні (пуск на закриту); насос і всмоктувальна лінія заповнені водою; відкриті крани манометрів і вакуумметрів.

3. Електрична частина: опір ізоляції обмоток двигуна не нижче 1 МОм (вимірювання мегомметром 1 000 В); заземлення корпусів двигуна, ПЧ і насоса перевірено; установки захистів ПЧ налаштовано; рампа розгону - 45 с.
4. Система керування і КВПіА: датчик тиску відкалібровано (4 мА = 0 МПа, 20 мА = максимальний тиск); сигналізація температури підшипників, захисту від осьового зміщення і потоку ущільнення перевірена; кнопка аварійного зупину місцева і на щиті - справні.

При першому пуску від ПЧ персонал перебуває на відстані не менше 2 м від агрегата і спостерігає за: показаннями манометра і вакуумметра (відповідність розрахунковим); значенням споживаного струму на дисплеї ПЧ (відхилення понад $\pm 10\%$ від розрахункового потребує зупинки); вібрацією корпусу (дотиком долоні до фундаментної рами - груба оцінка до 4,5 мм/с); появою сторонніх шумів, диму або іскор.

Нормальне значення вібрації насосного агрегата - не більше 4,5 мм/с СКЗ (клас ISO 10816-3, зона A/B). При перевищенні 7,1 мм/с агрегат підлягає негайній зупинці для з'ясування причини: дисбаланс, неточне центрування, резонанс конструкції, дефект підшипника.

5.5 Охорона праці при технічному обслуговуванні.

До самостійного обслуговування насосних агрегатів допускаються особи не молодше 18 років з кваліфікацією не нижче 3-го розряду за спеціальністю «Машиніст насосних установок», що пройшли навчання, стажування (не менше 10 змін під керівництвом наставника) і отримали допуск до самостійної роботи. Персонал, що обслуговує електрообладнання, зобов'язаний мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III, а черговий електромонтер з правом самостійних перемикачів - не нижче IV.

Планове ТО виконується за затвердженим графіком. Порядок підготовки агрегата до ТО:

5. Подати команду зупину через АСУ або місцевий пульт і дочекатися повної зупинки ($\omega = 0$).

6. Відключити автоматичний вимикач живлення ПЧ і перевести рукоятку у положення «0».
7. Встановити замок або бирку, вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди».
8. Витримати не менше 5 хвилин (розряд конденсаторів DC-ланки ПЧ). Перевірити відсутність напруги індикаторним покажчиком.
9. Закрити засувки на всмоктуванні і нагнітанні, зняти тиск через дренажний кран. Лише після цього - роботи з корпусом і трубопроводами насоса.

При заміні торцевого ущільнення або сальника насоса, що перекачував хімічно оброблену воду, необхідно застосовувати захисні рукавиці з нітрилу або гуми, захисні окуляри і відводити зливну рідину у дренажну систему (не на підлогу). Демонтаж робочого колеса (маса 80–120 кг) виконується виключно з підймальним механізмом.

Технічне обслуговування насосів у підземних насосних камерах, колодязях і кесонах відноситься до робіт у замкнених просторах (ЗП), що є особливо небезпечними через можливе зниження концентрації кисню і накопичення токсичних газів. Перед спуском у ЗП обов'язково: виміряти концентрацію кисню (норма 19,5–23,5%), сірководню (ГДК 10 мг/м³) і СО (ГДК 20 мг/м³) газоаналізатором; забезпечити примусове вентилявання протягом не менше 10 хвилин; призначити спостерігача на поверхні, що ні в якому разі не залишає своє місце і тримає рятувальний пояс із страхувальним тросом. Роботи виконуються бригадою не менше трьох осіб.

5.6Протипожежна безпека.

Приміщення насосного залу за ступенем пожежної небезпеки відноситься до категорії «Д» (НАПБ Б.03.002-2007) - відсутні горючі гази і легкозаймисті рідини. Проте кабельний підвал або кабельний поверх відносяться до категорії «В» і потребують автоматичної пожежної сигналізації. Характерними причинами пожеж є: перегрів обмоток двигуна при тривалому перевантаженні (захист - теплова

модель у ПЧ); коротке замикання у кабельній мережі (захист - автоматичні вимикачі); займання мастильного матеріалу при витокі з підшипникових вузлів.

Відповідно до НАПБ А.01.001-2004, у кожному приміщенні насосної станції площею понад 50 м² розміщуються: вогнегасник порошковий ВП-6 (або ВП-9) - 2 штуки; вогнегасник вуглекислотний ВВК-5 - 1 штука (виключно для гасіння електрообладнання під напругою); ящик з піском 0,5 м³; пожежний кран з рукавом.

УВАГА! Для гасіння електрообладнання під напругою дозволяються **ЛИШЕ** порошкові або вуглекислотні вогнегасники! Застосування водяних або повітряно-пінних вогнегасників для гасіння обладнання, що перебуває під напругою, категорично забороняється - це призводить до ураження електричним струмом і загибелі рятувальника.

При виникненні пожежі персонал зобов'язаний: негайно повідомити пожежно-рятувальну службу (101 або 112); оголосити евакуацію; відключити живлення ПЧ і двигуна; приступити до гасіння первинними засобами до прибуття пожежної охорони. Евакуація через аварійні виходи, позначені знаками «Вихід» з підсвічуванням від резервного акумуляторного живлення.

5.7 Захист від шуму і вібрації. Мікроклімат та вентиляція.

Рівень звукового тиску від двигуна АІМН355М4 і насоса Д2000-100 у стаціонарному режимі досягає 85–95 дБА на відстані 1 м. Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99, допустимий рівень звукового тиску для постійних робочих місць у виробничих приміщеннях - 80 дБА (8 годин). Перевищення цього рівня потребує або технічних заходів зниження шуму, або застосування ЗІЗ органів слуху.

Гігієнічні норми вібрації встановлені ДСН 3.3.6.039-99: допустимий рівень загальної вібрації на постійному робочому місці - 0,4 м/с² у вертикальному напрямку. Передача вібрації на будівельні конструкції знижується встановленням пружинних або гумово-металевих амортизаторів під рамою агрегата, гнучкими вставками на трубопроводах і акустичним облицюванням стін машинного залу.

При неможливості технічними заходами знизити рівень шуму нижче 80 дБА, застосовуються ЗІЗ органів слуху: беруші (вкладиші), що знижують шум на 15–25

дБА, і навушники - на 25–35 дБА. Застосування ЗІЗ-ОС є обов'язковим при рівнях шуму понад 80 дБА і фіксується у картці виробничого контролю умов праці.

Підземні насосні станції характеризуються підвищеною вологістю (75–95%) і ризиком конденсації вологи на холодних поверхнях обладнання. Надземні станції схильні до перегріву у літній час через тепловиділення обладнання. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, для категорії робіт Пб встановлені нормативи: температура 17–27 °С залежно від сезону; відносна вологість 15–75%; швидкість руху повітря 0,3–0,4 м/с.

У машинному залі проектується механічна припливно-витяжна вентиляція з кратністю не менше 5–8 об/год у робочий час. Для шафи ПЧ АВВ ACS880 забезпечується витрата охолоджувального повітря 224 м³/год при температурі навколишнього середовища не вище +40 °С. При вищій температурі необхідне кондиціонування або примусове охолодження шафи.

5.8Надання першої допомоги при виробничих травмах.

Правильні і своєчасні дії рятувальника - вирішальний чинник при ураженні електричним струмом. Послідовність:

- 10.Негайно відключити струм - вимикач, запобіжник або перерубати провід сухим дерев'яним предметом. Не торкатися постраждалого голими руками до відключення!
- 11.Якщо відключити швидко неможливо - відтягнути постраждалого за сухий одяг, тримаючи свою руку у гумовій рукавиці або через суху тканину; стояти лише на сухому ізолюваному місці.
- 12.Перевірити дихання і пульс. При їх відсутності - серцево-легенева реанімація: 30 натискань на грудину (частота 100–120/хв, глибина 5–6 см) + 2 вдихи. Продовжувати до прибуття лікаря.
- 13.Одночасно викликати «швидку» (103 або 112). Не залишати постраждалого до прибуття медиків.

УВАГА! Навіть при швидкому відновленні свідомості постраждалий від електроструму підлягає обов'язковій госпіталізації - ураження може мати відкладені наслідки для серця через кілька годин після інциденту!

5.9.2 Перша допомога при механічних травмах і хімічних ураженнях

При порізах і рваних ранах: тиснути на рану стерильним тампоном 5–10 хвилин для зупинки кровотечі; накласти стерильну пов'язку; при глибоких ранах і сильній кровотечі - джгут вище рани з фіксацією часу накладення; евакуація до лікаря. При переломах - знерухомити кінцівку шиною, не намагатися вправляти самостійно, прикласти лід, евакуювати.

При хімічних ураженнях (хлор, коагулянти): вивести потерпілого на свіже повітря; при ураженні шкіри - промити проточною водою 15–20 хвилин; при ураженні очей - промивати при відкритих повіках не менше 15 хвилин; при вдиханні токсичних парів - спокій і свіже повітря, у тяжких випадках - штучне дихання; у всіх випадках - викликати «швидку».

5.9 Організаційні заходи охорони праці.

Вступний інструктаж - проводиться з усіма новоприйнятими особами до початку роботи; веде фахівець з охорони праці; фіксується у журналі реєстрації вступного інструктажу.

Первинний інструктаж на робочому місці - з новоприйнятими і переведеними; проводить безпосередній керівник; завершується перевіркою знань.

Повторний інструктаж - для робіт підвищеної небезпеки не рідше одного разу на квартал, для решти - раз на рік.

Позаплановий інструктаж - при введенні нових нормативних документів, зміні технологічного процесу, після нещасного випадку, при перерві у роботі понад 30 днів.

Цільовий інструктаж - перед виконанням разових робіт (монтаж, ремонт, ліквідація аварії) і при видачі нарядів-допусків.

Таблиця 5.3 – Зведені вимоги охорони праці при виконанні характерних робіт на насосній станції

Вид роботи	Основна небезпека	Гр. ел/безпеки	Ключові заходи безпеки
Монтаж насосного агрегата	Механічне травмування; вантажопідйомні операції	II (загальна)	Наряд-допуск; ПВР; огороження зони; справні стропи і вантажопідйомник; каска і рукавиці
Електромонтаж двигуна і ПЧ	Ураження ел. струмом (380 В)	III–IV	Знеструмлення; заземлення; плакати «Не вмикати»; перевірка ізоляції; покажчик напруги
Перший пуск і ПНР	Механічна, електрична, гідравлічний удар	III	Наряд-допуск; евакуація сторонніх; справна кнопка аварійного зупину; спостереження за параметрами
Обслуговування шафи ПЧ	DC-напруга 560–640 В після відключення мережі	IV	Витримка 5–10 хв; перевірка UDC мультиметром; відключення дистанційного управління
Заміна ущільнень насоса	Підвищений тиск; хімічна рідина	II	Знеструмлення; закриття засувки; злив рідини; ЗІЗ (рукавиці, окуляри); дренаж зливу
Роботи у підземних камерах	Нестача кисню; токсичні гази (H ₂ S, CO)	II+	Газоаналіз; вентиляція 10 хв; спостерігач на поверхні; рятувальний пояс з тросом; мінімум 3 особи у бригаді
Зварювальні роботи	Пожежа; УФ-випромінювання	-	Дозвіл на вогневі роботи; видалення горючих матеріалів р=5 м;

Вид роботи	Основна небезпека	Гр. ел/безпеки	Ключові заходи безпеки
			вогнегасник ВП-6 поруч; щиток зварювальника
Гідравлічне випробування	Розрив трубопроводу під тиском	-	Огородження; безпечна відстань від трубопроводів; заборона підтяжки болтів під тиском

Розслідування нещасних випадків на виробництві проводиться відповідно до Порядку, затвердженого постановою КМУ № 1232 від 17.04.2019. При нещасному випадку роботодавець зобов'язаний: негайно забезпечити першу допомогу постраждалому; зберегти місце нещасного випадку до прибуття комісії (крім загрози безпеці людей); упродовж однієї години повідомити орган Держпраці, страховий фонд і прокуратуру (у разі загибелі або групового нещасного випадку). Приховування нещасного випадку є кримінально карним діянням.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто типові технічні рішення та сфери впровадження електроприводів ескалаторів, а також сформовано вимоги до системи автоматизації та керування.
2. Проведено розрахунки статичних зусиль і потужності, на підставі яких обрано асинхронний двигун AIP132S4. За його параметрами підібрано відповідний за струмом та потужністю перетворювач частоти ABB ACS880-01-361A-3.
3. Створено математичну модель асинхронного електропривода з непрямым векторним керуванням та розраховано параметри схеми заміщення двигуна.
4. Проведено розрахункове обґрунтування для подальшого моделювання статичних та динамічних режимів роботи системи.
5. Підтверджено високу динамічну точність і якість роботи проектного привода. Термін окупності капітальних інвестицій за спрощеним методом (співвідношення початкових витрат до чистого прибутку/економії) складає 7 місяців.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (із змінами та доповненнями). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
2. ДСТУ 2325-93. Насоси відцентрові. Загальні технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1993. 24 с.
3. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон України, 2013. 172 с.
4. НПАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ: Міненергівугілля України, 2001.
5. НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ: Держнагляд охорони праці України, 1998.
6. Karassik I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2008. 1771 p.
7. Volk M. Pump Characteristics and Applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. 632 p.
8. Gieras J. F. Advancements in Electric Machines. Dordrecht: Springer, 2008. 240 p.
9. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D., Pekarek S. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013. 672 p.
10. Park R. H. Two-reaction theory of synchronous machines — generalized method of analysis. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1929. Vol. 48, No. 3. P. 716–727.
11. ABB Group. Технічний каталог. Низьковольтні асинхронні двигуни загального призначення серії AIP: номінальні потужності, моменти інерції, кратності пускових струмів і моментів, габаритні та установчі розміри. Версія 2023. URL: <https://new.abb.com/motors-generators>
12. ABB Oy. ACS880 Industrial Drives. Hardware Manual: ACS880-01 Drives (0.55 to 500 kW). Helsinki: ABB Oy, 2023. 186 p. URL: <https://library.abb.com>
13. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 824 p.

14. International Electrotechnical Commission. IEC 60034-1:2022. Rotating electrical machines — Part 1: Rating and performance. Geneva: IEC, 2022. 168 p.