

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

«Модернізація електроприводу системи очистки води від твердих відходів»

Здобувач: Лисенко О.С.

3 скор курсу, групи АЕМт-31

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 БАКАЛАВР

здобувачу вищої освіти

Лисенка Олега Сергійовича

Тема роботи: «Модернізація електроприводу системи очистки води від твердих відходів».

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: розрахункова витрата - 30 м³/год, потрібний напір насоса -25 м, геометрична висота підйому -12 м, втрати в трубопроводі - 13 м.

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 мацераторного насоса, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода мацераторного насоса. Формулювання вимог до електроприводу мацераторного насоса, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок статичних характеристик двигуна.

3 Дослідження роботи електроприводу мацераторного 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 мацераторного насоса

5 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

6. Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (10 шт.): 1 Титульний. 2 Мета, задачі, методи. 3 Види мацераторних 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: 05.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.03.2026	
2	Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми мацераторного насосу. Загальна характеристика мацераторного насосу, як об'єкта управління. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода мацераторного насосу. Параметрична схема та методи регулювання швидкості обертання електроприводу мацераторного насосу. Формулювання вимог до електроприводу мацераторного 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 мацераторного 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 мацераторного насосу.	03.06.2026	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2026	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.2026	
8	Перевірка роботи на доброчесність. Рецензування роботи	18.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	22.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Лисенко 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 _____ Лисенко О. С.

РЕФЕРАТ

Лисенко Олег Сергійович «Модернізація електроприводу системи очистки води від твердих відходів». Кваліфікаційна робота бакалавра. Одеса: ОНТУ, 2026. – 85 с. Іл.: 21. Табл.: 21.

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

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 мацераторного насосу та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

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

ABSTRACT

Lysenko Oleh Serhiyovych. "Modernization of the electric drive of a water purification system for solid waste removal". Bachelor's qualification work. Odesa: ONTU, 2026. – 85 p. Ills.: 21. Tables: 21.

The qualification work describes an automated electric drive of a macerator pump, its application areas, and design features. The requirements for the electric drive are formulated, the loads are calculated, and a motor for the macerator 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 macerator pump electric drive is calculated, and occupational health and safety measures are provided.

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

ЗМІСТ

1	Вступ та загальна характеристика мацераторних насосів	8
1.1	Класифікація мацераторних насосів.....	8
1.2	Конструкція та принцип дії мацераторного насоса.	10
1.3	Електропривід мацераторного насоса.	17
1.4	Пускові режими та захист двигуна.	18
1.5	Методологія вибору мацераторного насоса.....	20
2	РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА	22
2.1	Визначення параметрів установки.....	22
2.2	Розрахунок потужності на валу насоса.	23
2.3	Визначення частоти обертання та вибір типорозміру.	25
2.4	Перевірочні розрахунки.	26
2.5	Загальний принцип роботи перетворювача частоти.	29
2.6	Методи керування ПЧ - скалярний та векторний.	33
2.7	Переваги ПЧ з асинхронним двигуном з к.з. ротором.	34
2.8	Вибір перетворювача частоти для AIP132M4Y2.	37
3	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	42
3.1	Необхідність математичного моделювання електроприводу насоса.....	42
3.2	Параметри схеми заміщення для AIP132M4.	43
3.3	Математична модель у просторових векторах.	45
3.4	Рівняння статора та ротора у нерухомій системі $\alpha\beta$	46
3.5	Математична модель насоса.	48
3.6	Реалізація моделі в MATLAB/Simulink.....	50
4	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	55
4.1	Вихідні дані та умови розрахунку.	55
4.2	Аналіз споживання електроенергії.	56
4.3	Операційні витрати - повний облік.....	58

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.9				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Модернізація електроприводу системи очистки води від твердих відходів	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив		Лисенко О. С.						6	
Керівник		Ревенюк Т. А.							
Зав.кафедри		Жигайло О. М.				ОНТУ, АЕМм-31			

4.4	Інвестиційні витрати на впровадження ПЧ.	61
4.5	Розрахунок терміну окупності.	62
4.6	Нефінансові переваги впровадження ПЧ.	64
5	Охорона праці та техніка безпеки	66
5.1	Нормативна база та загальні вимоги.	66
5.2	Ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів.	67
5.3	Вимоги до персоналу та організація робіт.	70
5.4	Вимоги безпеки при монтажі.	71
5.5	Процедура LOTO - знеструмлення та блокування.	73
5.6	Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).	76
5.7	Вимоги безпеки при експлуатації.	77
5.8	Пожежна безпека, вибухонебезпека, та заходи з виробничої санітарії.	79
	ВИСНОВКИ.	82
	Перелік використаних джерел	83

					КРБ.АТЕіРС.141.641-03.9		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Лисенко О. С.			Модернізація електропирводу системи очистки води від твердих відходів	Літ.	Аркуш
Керівник		Ревенюк Т. А.					7
						ОНТУ, АЕМт-31	
Зав.кафедри		Жигайло О. М.					

1 ВСТУП ТА ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МАЦЕРАТОРНИХ НАСОСІВ

1.1 Класифікація мацераторних насосів.

Мацераторні насоси - це спеціалізований клас насосного обладнання, що поєднує в собі функції подрібнення твердих включень та транспортування рідини в єдиному агрегаті. Назва походить від латинського слова *macerare* - розм'якшувати, розтирати, що точно описує основний технологічний процес, який здійснює цей тип обладнання.

На відміну від звичайних відцентрових насосів, мацераторний насос перед перекачуванням рідини спочатку подрібнює всі тверді компоненти, що знаходяться у стічній воді, до розміру частинок, які не можуть засмітити трубопровід або пошкодити обладнання далі за технологічним ланцюгом. Це принципова відмінність, яка визначає унікальне місце мацераторних насосів у системах каналізації та водовідведення.

Виникнення промислових мацераторних насосів датується серединою XX століття, коли зростаючі обсяги промислових і побутових стічних вод поставили перед інженерами задачу надійного перекачування рідин із складним складом. Перші конструкції були досить громіздкими і призначалися виключно для великих очисних споруд. З часом, із розвитком матеріалознавства та точного машинобудування, з'явилися компактні занурювальні моделі, придатні для установки в невеликих каналізаційних колодязях.

Сьогодні мацераторні насоси застосовуються в найрізноманітніших галузях: від муніципальних каналізаційних мереж до харчової, целюлозно-паперової, фармацевтичної та нафтохімічної промисловості. Їх конструктивні особливості дозволяють ефективно справлятися з такими проблемними середовищами, як каналізаційні стоки з туалетним папером, серветками та гігієнічними засобами, тваринні відходи та гній у тваринництві, волокниста маса на паперових фабриках, харчові відходи з виробничих підприємств, шлам та осади очисних споруд.

Ключова перевага мацераторних насосів - це можливість значно скоротити діаметр напірного трубопроводу. Завдяки попередньому подрібненню твердих включень рідина набуває однорідної консистенції, яка легко проходить навіть через труби діаметром 32–50 мм. Це дозволяє суттєво скорочувати витрати на монтаж трубопроводних систем у будівлях і складних умовах прокладання.

За призначенням та конструктивним виконанням мацераторні насоси класифікуються за кількома ознаками. Розглянемо основні з них.

За способом встановлення:

Занурювальні (субмерсивні) - занурюються безпосередньо в перекачуване середовище. Мають герметичний, водонепроникний корпус і охолоджуються навколишньою рідиною. Найбільш поширений тип для каналізаційних станцій.

Сухоустановлювані - розміщуються поза резервуаром, рідина підводиться до них трубопроводом. Простіше обслуговуються, але потребують окремого приміщення (насосної) та ретельного торцевого ущільнення.

Горизонтальні консольні - традиційне виконання для поверхневого встановлення, зручне для промислових застосувань із великими продуктивностями.

За типом різального механізму:

З відкритим ротором та статорними ножами - найпростіша конструкція, де рухомі лопаті взаємодіють із нерухомими ножами на корпусі.

З двошвидкісним різальним ротором - містить два диски, що обертаються в протилежні боки, досягаючи вищого ступеня подрібнення.

З перфорованим ситом - після різального вузла встановлено сито з отворами визначеного розміру; частинки, що не пройшли через нього, повертаються на повторне подрібнення.

Мацератори типу "м'ясорубка" (горизонтальний шнек) - використовуються в особливо важких умовах, наприклад у тваринництві.

За потужністю та продуктивністю:

Побутові (0,4–1,5 кВт, до 10 м³/год) - для квартир, офісів, невеликих закладів.

Напівпромислові (1,5–15 кВт, 10–100 м³/год) - для готелів, лікарень, торгових центрів.

Промислові (15–200 кВт і більше, понад 100 м³/год) - для великих підприємств і каналізаційних насосних станцій.

Таблиця 1.1 – Класифікація мацераторних насосів.

Тип насоса	Потужність, кВт	Продуктивність, м³/год	Напір, м	Типове застосування
Побутовий мацератор	0,4–1,5	до 10	до 30	Квартири, офіси
Напівпромисловий	1,5–15	10–100	10–50	Готелі, лікарні
Промисловий занурювальний	15–75	100–500	10–40	КНС, очисні споруди
Великопотужний промисловий	75–200+	500–2000	5–25	Міські очисні споруди
Горизонтальний сухоустановл.	5–150	50–800	20–80	Промислові підприємства

1.2 Конструкція та принцип дії мацераторного насоса.

Принцип дії мацераторного насоса базується на поєднанні двох послідовних фізичних процесів: механічного подрібнення твердих включень і гідравлічного транспортування подрібненої суспензії. Обидва процеси здійснюються в єдиному корпусі, що приводиться в дію одним електродвигуном.

Стічна рідина, що містить різноманітні тверді включення (папір, волокна, шматки органіки, невеликі тверді предмети), надходить через вхідний патрубок до різального вузла. У різальному вузлі відбувається інтенсивне механічне подрібнення твердих компонентів за рахунок взаємодії рухомих та нерухомих ріжучих елементів - аналогічно до принципу роботи ножиць або бритви.

Після проходження через різальний вузол рідина набуває однорідної консистенції з дрібнодисперсними твердими частинками і надходить до робочого колеса відцентрового насоса. Відцентрова сила, що виникає при обертанні робочого колеса, повідомляє рідині необхідну кінетичну енергію, яка далі перетворюється в потенційну енергію тиску в дифузорі (спіральному корпусі). Рідина виходить через напірний патрубок і транспортується по трубопроводу до місця призначення.

Важливою особливістю є те, що різальний вузол і робоче колесо насоса, як правило, встановлені на одному валу та обертаються від одного двигуна з однаковою кутовою швидкістю. Це забезпечує компактність конструкції та спрощує передачу механічної енергії.



Рис. 1.1 – Структурна схема мацераторного насоса.

З точки зору гідравліки, мацераторний насос є різновидом відцентрового насоса, тому всі основні гідравлічні закономірності, що описують роботу відцентрових насосів, повною мірою застосовні і до нього. Розглянемо ключові гідравлічні параметри та явища.

В основі гідравлічної роботи насоса лежить рівняння Бернуллі в розширеній формі, що враховує підведення енергії від насоса. Для елементарного струменя рідини між перерізами входу та виходу робочого колеса:

$$p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) + z_1 + H_n = p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g) + z_2 + h_f \quad (1.1)$$

де: p - тиск [Па]; ρ - густина рідини [кг/м³]; g - прискорення вільного падіння [м/с²]; v - швидкість потоку [м/с]; z - геодезична висота [м]; H_n - напір насоса [м]; h_f - гідравлічні втрати [м].

Теоретичний напір відцентрового насоса визначається рівнянням Ейлера. Воно показує, що напір залежить від кутової швидкості обертання ротора та геометрії робочого колеса. Саме тому регулювання частоти обертання за допомогою частотного перетворювача є найефективнішим способом керування продуктивністю мацераторного насоса.

Крива $H-Q$ (напір - витрата) мацераторного насоса має певні відмінності від кривої звичайного відцентрового насоса. Через наявність різального вузла та особливостей перекачуваного середовища характеристика насоса стає більш пологою, особливо в зоні малих витрат.

При перекачуванні гетерогенних суспензій ефективний напір дещо знижується порівняно з чистою водою через збільшення в'язкості та густини суміші. Поправковий коефіцієнт для твердих включень становить від 0,85 до 0,95 залежно від концентрації та природи твердої фази.

Характерною особливістю є також нелінійна залежність потужності від витрати. На режимах малої витрати мацераторний насос споживає більше енергії на подрібнення, ніж у режимі номінальної роботи, що необхідно враховувати при проектуванні електроприводу.

Кавітація - утворення та руйнування парових бульбашок в зоні зниженого тиску - є серйозною загрозою для будь-якого відцентрового насоса, включаючи мацераторний. Наслідки кавітації: ерозія робочого колеса та корпусу, шум і вібрація, різке падіння напору та КПД, передчасне руйнування ущільнень та підшипників.

Для запобігання кавітації в мацераторних насосах необхідно витримувати мінімально допустимий тиск на вході (NPSH - Net Positive Suction Head). Виробники вказують значення NPSH_r (required - необхідний), що становить зазвичай 1,5–4,0 м для промислових мацераторів. Значення NPSH_a (available - наявний у системі) повинне перевищувати NPSH_r щонайменше на 0,5–1,0 м.

Підвищена схильність мацераторних насосів до кавітації пов'язана з тим, що різальний вузол створює додаткові місцеві втрати тиску на вході, а також турбулентність потоку, яка ускладнює рівномірний розподіл тиску перед робочим колесом.

Подрібнення твердих включень у мацераторному насосі відбувається за кількома механізмами, що реалізуються одночасно або послідовно в різальному вузлі.

Зсув (стрижка) - основний механізм.

Рухомі ріжучі кромки ротора ковзають повз нерухомі ріжучі кромки статора, як леза ножиць. При цьому тверда частинка, що потрапляє в зазор між рухомим і нерухомим ножем, зазнає дотичних напружень зсуву, що перевищують межу міцності матеріалу. Зазор між ріжучими кромками становить 0,1–0,3 мм і є критично важливим параметром - при його збільшенні ефективність подрібнення знижується.

Удар та стиснення.

На лопатях ротора та ребрах статора частинки зазнають ударних навантажень та стиснення. Цей механізм особливо ефективний для крихких матеріалів (скло, кераміка, кальцинати). Ударний механізм обумовлює шумову та вібраційну картину насоса.

Тертя та стирання.

В зонах малого зазору між ротором та корпусом частинки зазнають інтенсивного тертя з поверхнями сталевих деталей. Цей механізм важливий для в'язких і волокнистих матеріалів, які погано піддаються різанню.

Ступінь подрібнення (відношення вихідного розміру частинки до вхідного) для мацераторних насосів становить зазвичай від 5:1 до 20:1, а розмір вихідних частинок - не більше 3–8 мм. Деякі спеціалізовані моделі забезпечують тонке

Різальний вузол є найбільш технологічно складним і відповідальним елементом мацераторного насоса. Від його конструкції, матеріалів та точності виготовлення залежить ефективність подрібнення, довговічність насоса та споживана потужність.



Матеріали виготовлення ротора визначають його стійкість до зношування та корозії. Найбільш поширені: загартована хромо-молібденова сталь (твердість HRC 55–62); нержавіюча сталь AISI 316L з наплавленням твердого сплаву; дуплексна нержавіюча сталь (2205) для агресивних середовищ; у деяких випадках - біметалеві вставки з карбіду вольфраму в місцях найбільшого зносу.

Швидкість обертання ротора залежить від призначення насоса і становить 960–2900 об/хв для насосів з прямим підключенням двигуна (без редуктора).

Збільшення частоти обертання підвищує інтенсивність подрібнення, але одночасно збільшує знос та споживану потужність.

Статор являє собою нерухому різальну плиту або кільце, закріплене в корпусі насоса. Його ріжучі кромки взаємодіють із кромками ротора, утворюючи зсувну пару - аналог ножиць. Геометрія статора розраховується таким чином, щоб забезпечити максимальне перекриття ріжучих кромок при мінімальному зазорі.

Конструктивно статор може бути виконаний у вигляді плоскої плити з радіальними прорізами та зубцями, циліндричного кільця з аксіальними ріжучими виступами, або знімної касети з замінними ріжучими вставками (знімний статор значно спрощує технічне обслуговування).

Гострота ріжучих кромок є критичним фактором ефективності. Для підтримки заданих параметрів подрібнення необхідно регулярно перевіряти зазор між ротором і статором. Більшість виробників рекомендує регулювання через кожні 2000–4000 годин роботи залежно від умов.

У більш досконалих конструкціях після різальної пари встановлюють перфороване сито - пластину або циліндр з отворами заданого діаметра. Принцип роботи: частинки, розмір яких менший за діаметр отворів, проходять крізь сито і потрапляють до робочого колеса насоса. Частинки, що не пройшли - утримуються в зоні різального вузла та продовжують подрібнюватися до досягнення необхідного розміру.

Діаметр отворів сита визначає максимальний розмір частинок на виході і зазвичай становить 3, 5, 6 або 8 мм залежно від призначення насоса та вимог до ступеня подрібнення. Сита виготовляють із нержавіючої сталі або загартованої вуглецевої сталі з антикорозійним покриттям.

Гідравлічна частина мацераторного насоса включає робоче колесо, спіральний корпус (волюту) та патрубки вхідний і напірний. У конструктивному відношенні вона подібна до звичайного відцентрового насоса, але має певні адаптації для роботи з подрібненою суспензією.

Робоче колесо мацераторного насоса, як правило, відрізняється від стандартного: має більші прохідні перерізи між лопатями, щоб уникнути засмічення волокнами; меншу кількість лопатей (2–4) порівняно зі звичайними насосами (6–8);

посилений диск лопатей, бо через прямий контакт з частинками, що залишилися після подрібнення, підвищується механічне навантаження; профіль лопаті оптимізований для роботи з неоднорідними сумішами.

Матеріали робочих коліс: сірий чавун - для неагресивних стічних вод; хромистий чавун (25–28% Cr) - підвищена зносостійкість; нержавіюча сталь AISI 316 - для хімічно агресивних середовищ.

Спіральна камера (волюта) перетворює кінетичну енергію рідини, що виходить з робочого колеса, у потенційну енергію тиску. У мацераторних насосах волюта конструюється з урахуванням наявності абразивних частинок: кути переходу виконуються плавними, щоб уникнути застійних зон і накопичення відкладень; товщина стінок збільшена в місцях найбільшого зносу; поверхні, що контактують з потоком, можуть облицьовуватись зносостійкими матеріалами або покриттями.

Ущільнення вала - один із найбільш навантажених і відповідальних вузлів мацераторного насоса. Воно запобігає витіканню перекачуваної рідини в навколишнє середовище та попаданню повітря у проточну частину.

Найпоширеніший тип для сучасних промислових мацераторів це торцеве (механічне) ущільнення. Складається з двох притиснутих одна до одної відполірованих торцевих поверхонь - нерухомої (сідла) та рухомої (кільця ущільнення). Герметичність забезпечується за рахунок надзвичайно малого зазору між торцями (менше 1 мкм) та наявності мастильного шару рідини між ними.

Для мацераторних насосів застосовуються одинарні механічні ущільнення - для нешкідливих і помірно абразивних стоків, подвійні ущільнення з бар'єрною рідиною - для токсичних, агресивних або абразивних середовищ, де герметичність є критичною вимогою.

Матеріали пар тертя ущільнення: карбід кремнію (SiC) / карбід кремнію - для абразивних рідин; карбід вольфраму (WC) / вуглеграфіт - стандартна пара для більшості застосувань; карбід кремнію / вуглеграфіт - легке і агресивне середовище.

Сальникове набивне ущільнення застосовується рідше, переважно в більш простих або старих конструкціях. Являє собою кілька кілець спеціального набивального матеріалу (графітизований азбест, ПТФЕ, плетений шнур), стиснутих

нажимною втулкою. Допускає незначне контрольоване протікання - так зване «крапання» - 10–60 крапель/хвилину, яке є нормою і служить для мащення та охолодження.

Корпус мацераторного насоса повинен витримувати механічні навантаження від внутрішнього тиску, гідравлічних ударів і вібрації, а також протистояти корозійному і абразивному впливу перекачуваного середовища. Тому, найчастіше, для виготовлення корпусів використовують хромистий чавун.

1.3 Електропривід мацераторного насоса.

Електропривід мацераторного насоса повинен відповідати ряду специфічних вимог, що визначаються характером навантаження: наявністю значних пускових навантажень при зустрічі ротора з твердими включеннями; потребою в плавному регулюванні швидкості для оптимізації режиму роботи; необхідністю захисту від перевантажень при застряганні твердих частинок; роботою в умовах підвищеної вологості та можливого занурення у рідину.

Вибір типу і потужності електродвигуна є одним із найважливіших етапів проектування мацераторного насоса. Недостатня потужність призведе до частих зупинок і перегорання обмоток, а надлишкова - до невиправданих капітальних і операційних витрат.



Рис. 1.3 - Структура модернізованого електроприводу мацераторного насоса.

Найбільш поширений тип двигуна для промислових мацераторних насосів. Асинхронний двигун (АД) відрізняється простотою конструкції, надійністю, відносно низькою вартістю і мінімальними вимогами до технічного обслуговування. Принцип роботи заснований на взаємодії обертового магнітного поля статора з струмами, індукованими в роторі.

Сучасна альтернатива класичному асинхронному двигуну, що набуває все більшого поширення в нових моделях мацераторних насосів. PMSM використовує ротор із вбудованими постійними магнітами на основі рідкоземельних елементів (зазвичай NdFeB - неодим-залізо-бор), тоді як статор аналогічний до асинхронного двигуна.

Переваги PMSM порівняно з асинхронним двигуном: вищий ККД (досягає 96–97% у класі IE4/IE5), відсутність ковзання - синхронна швидкість відповідає частоті живлення, краща регульовальна характеристика в широкому діапазоні швидкостей, менші розміри та маса при тій же потужності, нижча температура нагрівання, що збільшує ресурс ізоляції. Недоліки: вища вартість (через рідкоземельні магніти), обов'язкова потреба в частотному перетворювачі, ризик розмагнічування магнітів при надмірному нагріванні або перевантаженні.

Спеціальний тип асинхронного двигуна з перемикаємою кількістю полюсів (наприклад, 4/8 полюсів → 1475/735 об/хв). Дозволяє здійснювати двоступеневе регулювання продуктивності без використання частотного перетворювача. Застосовується у насосах, де потрібна невелика кількість фіксованих режимів роботи, а встановлення ПЧ небажане або надлишкове.

1.4 Пускові режими та захист двигуна.

Найпростіший і найдешевший спосіб запуску - безпосереднє підключення обмоток статора до мережі. При цьому в момент пуску виникає кидок пускового струму, що перевищує номінальний в 5–7 разів. Для мацераторних насосів це особливо критично, оскільки при старті ротор насоса може знаходитись у контакті з твердим включенням, що збільшує пусковий момент опору.

Прямий пуск допустимий для насосів малої потужності (до 7,5–11 кВт) при потужності мережевого трансформатора, яка забезпечує приймання пускових струмів без неприпустимого падіння напруги в мережі.

Пуск зірка-трикутник (Y-Δ), класична схема зниженого пуску, при якій на початку пуску обмотки статора з'єднуються зіркою (при цьому напруга на кожній обмотці зменшується в $\sqrt{3}$ раз), а після набору обертів перемикаються на трикутник (номінальне підключення). Пусковий струм знижується до 1,5–2 рази (приблизно в 3 рази менше, ніж при прямому пуску), але і пусковий момент зменшується пропорційно. Цей метод підходить для насосів із легким пуском (порожнє колесо), але може бути недостатній для мацераторів, де при пуску вже є навантаження від різального вузла.

Плавний пуск (тиристорний регулятор напруги) дозволяє плавно збільшувати напругу на обмотках статора від нуля до номінального значення за заданий час. Це забезпечує обмеження пускового струму (до 2–3 I_n), плавний набір швидкості без ривків, зниження механічних ударів у різальному вузлі та трубопроводі. Після набору номінальних обертів плавний пуск, як правило, шунтується контактором, що виключає теплові втрати в тиристорах під час роботи.

Пуск та робота від частотного перетворювача, найбільш досконалий і функціональний спосіб керування електроприводом мацераторного насоса. ПЧ перетворює змінний струм промислової частоти (50 Гц) у змінний струм із регульованою частотою та напругою, що дозволяє плавно змінювати швидкість обертання двигуна у діапазоні від 5–10% до 100% від номінальної.

Принцип роботи ПЧ включає три основні блоки: випрямляч (AC-DC) - перетворює мережеву змінну напругу на постійну (ланка постійного струму), фільтр ланки постійного струму - конденсаторний або дросельний, для згладжування пульсацій, інвертор (DC-AC) - формує трифазну змінну напругу заданої частоти методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ/PWM). Несуча частота ШІМ зазвичай становить 2–16 кГц і визначає рівень шуму двигуна та втрати в залізі.

Алгоритми керування ПЧ: скалярне керування ($V/f = \text{const}$) - простий і надійний метод, достатній для більшості застосувань мацераторних насосів;

векторне керування (Field-Oriented Control, FOC) - забезпечує точніше управління моментом і швидкістю, застосовується при вимогах до динамічних характеристик; пряме керування моментом (Direct Torque Control, DTC) - метод АВВ, що забезпечує найкращу динаміку і точність.

Переваги ПЧ для мацераторних насосів: плавний пуск без кидків струму (пусковий струм обмежується до 100–150% від номінального); можливість реверсу для розблокування ротора при застряганні включення; автоматична адаптація частоти обертання до поточного попиту (енергозбереження до 50% порівняно з дроселюванням); вбудована захисна функція від перевантажень, коротких замикань, втрати фази, перегріву.

1.5 Методологія вибору мацераторного насоса.

Правильний вибір мацераторного насоса потребує системного підходу і врахування великої кількості взаємопов'язаних параметрів. Нижче наведений покроковий алгоритм вибору.

1. Аналіз перекачуваного середовища: визначте хімічний склад рідини (рН, концентрація агресивних речовин, вміст солей); оцініть природу та максимальний розмір твердих включень; визначте концентрацію твердих речовин (% мас.); виміряйте або розрахуйте в'язкість та густину суспензії; визначте температуру середовища.

2. Визначення гідравлічних параметрів: розрахуйте необхідну продуктивність Q [м³/год] з урахуванням пікових навантажень і коефіцієнту нерівномірності; визначте геометричну висоту підйому $H_{\text{геом}}$ [м]; підрахуйте втрати тиску в трубопроводній системі h_f [м]; розрахуйте потрібний напір насоса: $H_n = H_{\text{геом}} + h_f + \text{запас}$ [м].

3. Вибір типу насоса: занурювальний або сухий; визначте тип різального вузла, виходячи з характеру твердих включень; оберіть ступінь подрібнення (розмір частинок на виході); визначте вимоги до матеріального виконання.

4. Вибір за каталогом: на характеристиці H - Q знайдіть насос, робоча точка якого знаходиться в оптимальній зоні (70–85% від максимальної витрати); перевірте $NPSH_r$ насоса і переконайтеся, що $NPSH_a$ системи перевищує його на 0,5–

1,0 м; перевірте, чи не перевищує максимальний тиск у системі допустимий тиск для насоса.

5. Вибір електроприводу: розрахуйте потужність на валу: $P_{\text{вал}} = \rho \times g \times Q \times H_n / (3600 \times \eta_{\text{насос}})$ [Вт]; розрахуйте потужність двигуна з урахуванням ккд передачі та запасу (зазвичай коефіцієнт запасу 1,15–1,25): $P_{\text{дв}} = P_{\text{вал}} / \eta_{\text{мех}} \times K_{\text{зап}}$; визначте режим пуску та доцільність застосування ПЧ.

6. Визначення типу керування і захисту: встановіть датчики рівня, тиску, температури; передбачте захисні функції відповідно до небезпечності середовища; оберіть тип комунікаційного інтерфейсу з вищим рівнем АСУ.

Роглянемо типовий приклад розрахунку.

Умова задачі: Необхідно підібрати занурювальний мацераторний насос для каналізаційної насосної станції з такими параметрами: розрахункова витрата $Q = 60$ м³/год; геометрична висота підйому $H_{\text{геом}} = 12$ м; довжина напірного трубопроводу $DN80 = 80$ м; 5 коліна 90° ; 1 зворотний клапан; перекачуване середовище - міські стічні води з вмістом твердих до 3% мас., максимальний розмір включень до 80 мм.

Розрахунок необхідного напору: втрати в прямих ділянках (при $v = 3,3$ м/с для $DN80$): $h_{\text{тр}} \approx 0,035 \times (80/0,08) \times 3,3^2 / (2 \times 9,81) \approx 18,4$ м; місцеві втрати (коліна + клапан): $h_m \approx 4,0$ м; разом гідравлічні втрати: $h_f = 18,4 + 4,0 = 22,4$ м. Потрібний напір: $H_n = 12 + 22,4 + 1,0$ (запас) $\approx 35,4$ м.

Вибір насоса: за характеристиками обираємо занурювальний мацераторний насос типу Flygt 3153 або аналог із параметрами $Q = 60$ м³/год при $H = 35$ м. Потужність двигуна - 15 кВт, $n = 1450$ об/хв (4-полюсний), ступінь захисту IP68, клас ізоляції F, різальний ротор із зазором до 20 мм, перфороване сито з отворами 6 мм.

Вибір електроприводу: оскільки витрата та рівень у резервуарі мають значну добову нерівномірність, рекомендується оснащення насоса частотним перетворювачем 15 кВт (наприклад, ABB ACS580 або Grundfos CUE 15 кВт). Очікувана економія електроенергії при інсталяції ПЧ - 25–35% порівняно з прямим пуском.

В наступному розділі будуть проведені детальні розрахунки для правильного вибору двигуна та ПЧ.

2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Визначення параметрів установки.

Перед тим як вибрати модель електродвигуна необхідно розрахувати максимальну потужність на валу. Розрахунок виконується для мацераторного насоса середнього класу, призначеного для каналізаційної насосної станції (КНС) виробничого підприємства. Перекачуване середовище - стічні води з вмістом волокнистих і м'яких включень (тканина, папір, органіка). В табл. 2.1 зазначені основні початкові умови які ми будемо брати до уваги в подальших розрахунках.

Таблиця 2.1 – Початкові умови для розрахунку навантаження.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Розрахункова витрата	Q	30	м³/год
Потрібний напір насоса	H _n	25	м
Геометрична висота підйому	H _{геом}	12	м
Втрати в трубопроводі	h _f	13	м
Gustin рідини (стоки)	ρ	1020	кг/м³
Температура перекачуваного середовища	T	20	°C
Вміст твердих включень (за масою)	C _т	≤ 3	%
Максимальний розмір включень	d _{max}	60	мм
Режим роботи насоса	-	S3-40%	-
Напруга живлення	U	380	В (3ф)
Частота мережі	f	50	Гц

2.2 Розрахунок потужності на валу насоса.

Враховуючи те що електродвигун буде приводити в дію мацераторний насос, то навантаження на валу буде мати декілька складових.

Перша складова це гідравлічна потужність - це потужність, яка безпосередньо передається рідині для подолання опору системи і підйому на задану висоту.

$$P_{\text{гідр}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n / 3600 \quad (2.1)$$

Де: $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$ - густина стічних вод; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння; $Q = 30 \text{ м}^3/\text{год}$; $H_n = 25 \text{ м}$.

Таким чином, гідравлічна потужність становить:

$$P_{\text{гідр}} = 1020 \cdot 9,81 \cdot 30 \cdot 25 / 3600 = 2096 \text{ Вт.} \quad (2.2)$$

Гідравлічна потужність: $P_{\text{гідр}} = 2,10 \text{ кВт}$

ККД відцентрового ступеня мацераторного насоса нижчий, ніж у звичайного відцентрового насоса, через наявність різального вузла, підвищену турбулентність потоку та збільшені зазори проточної частини. Орієнтовний ККД насосної частини:

$$\eta_{\text{насос}} = 0.62 \text{ (для мацераторних насосів } Q=25\text{--}40 \text{ м}^3/\text{год}) \quad (2.3)$$

Потужність, необхідна для привода насосної (гідравлічної) частини:

$$P_{\text{насос}} = P_{\text{гідр}} / \eta_{\text{насос}} = 2100 / 0,62 = 3387 \text{ Вт} \approx 3,39 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

Отже, потужність на приводі насосної частини: $P_{\text{насос}} = 3,39 \text{ кВт}$

Друга складова це - потужність різального вузла. Різальний вузол є додатковим споживачем механічної енергії, не врахованим в гідравлічному ККД. Споживана потужність визначається типом включень, ступенем подрібнення та розмірами вузла. Для проміжних включень (папір, тканина, м'яка органіка) при $Q = 30 \text{ м}^3/\text{год}$ орієнтовна питома потужність різання:

$$P_{\text{різ}}/Q \approx 0,11...0,16 \text{ кВт}/(\text{м}^3/\text{год}) \rightarrow \text{беремо } 0,14 \text{ кВт}/(\text{м}^3/\text{год}) \quad (2.5)$$

$$P_{\text{різання}} = 0,14 \cdot 30 = 4,2 \text{ кВт}$$

Для більш жорсткого середовища (побутові стоки з серветками, нетканими матеріалами) коефіцієнт зростає до 0,18–0,22 кВт/(м³/год). Для харчових відходів - до 0,25 кВт/(м³/год).

Потужність різального вузла: $P_{\text{різання}} \approx 4,2 \text{ кВт}$

Також, третю складову становлять механічні втрати (підшипники, торцеве ущільнення тощо). Механічні втрати враховують тертя в підшипниках і торцевому ущільненні вала. Для занурювального насоса з двома підшипниками та одинарним торцевим ущільненням:

$$P_{\text{мех}} = (0,05...0,08) \cdot (P_{\text{насос}} + P_{\text{різання}}) = 0,06 \cdot (3,39 + 4,2) = 0,455 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

Механічні втрати становлять: $P_{\text{мех}} \approx 0,46 \text{ кВт}$

Склавши усі попередні значення, отримаємо повну потужність на валу двигуна без урахування коефіцієнту запасу.

Сумарна потужність, яку повинен забезпечувати двигун при номінальному робочому режимі:

$$P_{\text{вал}} = P_{\text{насос}} + P_{\text{різання}} + P_{\text{мех}} \quad (2.7)$$

$$P_{\text{вал}} = 3,39 + 4,20 + 0,46 = 8,05 \text{ кВт}$$

Потрібна потужність на валу двигуна: $P_{\text{вал}} = 8,05 \text{ кВт}$

При виборі двигуна вводиться коефіцієнт запасу, який враховує: можливі пікові навантаження при зустрічі ротора з жорсткими включеннями; знос ріжучих кромek і збільшення витрат потужності різального вузла; нерівномірність складу стічних вод; відхилення напруги мережі ($\pm 10\%$).

$$K_{\text{зап}} = 1,20...1,30 \quad (\text{для мацераторних насосів з важким вмістом})$$

$$P_{\text{дв розр}} = P_{\text{вал}} \cdot K_{\text{зап}} = 8,05 \cdot 1,25 = 10,06 \text{ кВт}$$

Розрахункова потужність двигуна: $P_{\text{дв розр}} = 10,06 \text{ кВт}$

До вибору: двигун з $P \geq 10,06 \text{ кВт}$ за таблицею стандартного ряду $\rightarrow P = 11 \text{ кВт}$

Вибираємо стандартну потужність: $P_n = 11 \text{ кВт}$

2.3 Визначення частоти обертання та вибір типорозміру.

Для мацераторних насосів з прямою посадкою різального вузла і робочого колеса на вал частота обертання визначає як ефективність подрібнення, так і гідравлічні параметри насоса. В табл. 2.2 розглянемо доступні варіанти для серії АІР.

Таблиця 2.2 – Переваги та недоліки різних швидкостей обертання.

Кількість полюсів	Синхронна n_0 , об/хв	Номінальна n_n , об/хв	Оцінка для мацератора
$2p = 2$	3000	2910–2940	Висока швидкість $\rightarrow$ інтенсивне різання, але підвищений знос, шум 85+ дБА
$2p = 4$	1500	1440–1470	Оптимально: баланс різання, зносу та ефективності насоса
$2p = 6$	1000	960–980	Тихохідний: знижена ефективність різання, потрібен більший ротор

В нашому випадку, оптимальним вибором буде електродвигун з синхронною частотою обертання 1500 об/хв.

Ковзання при номінальному навантаженні: $s = (1500 - 1460)/1500 = 0,027 = 2,7\%$ - типово для асинхронного двигуна цієї потужності.

Серія АІР - це уніфікований ряд асинхронних трифазних двигунів із короткозамкненим ротором, що відповідає ГОСТ 19523-81 та стандартам ІЕС 60034. Типорозмір визначається висотою осі обертання (h) та типом корпусу (S, M, L).

Типорозмір АІР	Р _н , кВт	п _н , об/хв	І _н , А	η, %	М/М _н (пуск)	М/М _н (макс)
AIP112MA4	5,5	1440	12,0	85,5	2,0	2,4
AIP112MB4	7,5	1440	16,0	87,0	2,0	2,4
AIP132M4	11	1460	22,5	87,5	2,0	2,4
AIP160S4	15	1465	30,0	88,0	1,8	2,4
AIP160M4	18,5	1465	36,0	90,0	1,8	2,4

Враховуючи результати попередніх розрахунків, а саме. Потужність на валу Р_н=10,06 кВт, та швидкість обертання п=1500 об/хв, оптимальним вибором буде асинхронний двигун із короткозамкненим ротором: АІР132М4 Р_н = 11 кВт, п_н = 1460 об/хв.

2.4 Перевірочні розрахунки.

Проведемо перевірку правильності вибору за іншими показниками.

Номінальний крутний момент двигуна.

$$M_n = P_n \cdot 60 / (2\pi \cdot p_n) = 11000 \cdot 60 / (2\pi \cdot 1460) = 71950 / 9173 = 72,448$$

Номінальний момент двигуна: М_н = 71,9 Н·м

Момент навантаження на валу. Момент від насосної частини (відцентровий, залежить від швидкості):

$$M_{\text{насос}} = P_{\text{насос}} / \omega_n = 3390 / (2\pi \cdot 1460/60) = 3390 / 152,9 = 22,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.8)$$

Момент від різального вузла (приблизно постійний):

$$M_{\text{різання}} = P_{\text{різання}} / \omega_n = 4200 / 152,9 = 27,5 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.10)$$

Момент механічних втрат:

$$M_{\text{мех}} = P_{\text{мех}} / \omega_n = 460 / 152,9 = 3,0 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.11)$$

Сумарний момент навантаження на валу:

$$M_{\text{вал}} = M_{\text{насос}} + M_{\text{різання}} + M_{\text{мех}} = 22,2 + 27,5 + 3,0 = 52,7 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.12)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$K_{\text{зав}} = M_{\text{вал}} / M_n = 52,7 / 71,9 = 0,733 = 73,3\% \quad (2.13)$$

Це оптимальний діапазон завантаження (70–90%) для асинхронного двигуна. При завантаженні менше 50% - знижується $\cos\phi$ і ККД, більше 90% - зростає нагрів і знижується ресурс ізоляції.

Коефіцієнт завантаження: $K_{\text{зав}} = 73,3\%$ - оптимально

Перевірка пускового моменту. Момент опору при пуску визначається переважно різальним вузлом (насосна частина при $n=0$ не дає гідравлічного навантаження):

$$M_{\text{пусковант}} = M_{\text{різанняпуск}} + M_{\text{мех}} \approx 1,5 \cdot M_{\text{різання}} + M_{\text{мех}} \quad (2.14)$$

Коефіцієнт 1,5 враховує підвищений опір при першому контакті ножів з включеннями.

$$M_{\text{пусковант}} = 1,5 \cdot 27,5 + 3,0 = 41,25 + 3,0 = 44,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Пусковий момент двигуна AIP132M4:

$$M_{\text{пускдв}} = K_{\text{п}} \cdot M_{\text{н}} = 2,0 \cdot 71,9 = 143,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Умова надійного пуску: $M_{\text{пускдв}} > M_{\text{пускнавант}}$ (з запасом $\geq 1,5$):

$$K_{\text{пзапас}} = M_{\text{пускдв}} / M_{\text{пускнавант}} = 143,8 / 44,3 = 3,24 \gg 1,5$$

Умова пуску виконується з великим запасом ($3,24 > 1,5$).

Перевірка за максимальним моментом (перевантажувальна здатність). При зустрічі різального ротора з великим або жорстким включенням момент навантаження може короткочасно зрости до 1,5–2,0 рази. Перевіряємо, чи витримає двигун:

$$M_{\text{пкнавант}} = 2,0 \cdot M_{\text{вал}} = 2,0 \cdot 52,7 = 105,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_{\text{максдв}} = K_{\text{м}} \cdot M_{\text{н}} = 2,4 \cdot 71,9 = 172,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\text{Запас: } M_{\text{максдв}} / M_{\text{пкнавант}} = 172,6 / 105,4 = 1,64 > 1,2$$

Двигун витримає пікові перевантаження різального вузла з запасом 1,64.

Розрахунок номінального струму та перевірка.

$$I_{\text{н}} = P_{\text{н}} / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta) = 11000 / (1,732 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,875) \quad (2.15)$$

$$I_{\text{н}} = 11000 / 499,7 = 22,0 \text{ А}$$

(За каталогом AIP132M4: $I_{\text{н}} = 22,5 \text{ А}$)

Пусковий струм: $I_{\text{пуск}} = I_{\text{н}} \cdot K_{\text{і}} = 22,5 \cdot 6,9 \approx 155 \text{ А}$

Номінальний струм: $I_{\text{н}} = 22,5 \text{ А}$; Пусковий струм: $I_{\text{пуск}} \approx 155 \text{ А}$.

Я можна побачити, вибір двигуна AIP132M4 є оптимальним з точки зору навантаження на валу і коефіцієнту запасу. В табл. 2.3 наведені основні технічні параметри електродвигуна.

Таблиця 2.3 – Технічні параметри електродвигуна AIP132M4.

Параметр	Значення
Тип двигуна	AIP132M4Y2
Номінальна потужність P_n	11 кВт
Синхронна частота обертання n_0	1500 об/хв
Номінальна частота обертання n_n	1460 об/хв
Номінальне ковзання s	2,67%
Напруга живлення (схема Δ/Y)	380/660 В
Номінальний струм (380В)	22,5 А
ККД при повному навантаженні η	87,5%
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,87
Кратність пускового моменту $M_{\text{пуск}}/M_n$	2,0
Кратність максимального моменту $M_{\text{макс}}/M_n$	2,4
Кратність пускового струму $I_{\text{пуск}}/I_n$	6,9
Номінальний крутний момент M_n	71,9 Н·м
Момент інерції ротора J	0,085 кг·м ²
Висота осі обертання h	132 мм
Кліматичне виконання	Y2
Режим роботи	S1 (безперервний)
Маса двигуна	≈ 105 кг

2.5 Загальний принцип роботи перетворювача частоти.

Перетворювач частоти (ПЧ) - це електронний пристрій, який перетворює змінний струм мережевої частоти (50 Гц, 380 В) на змінний струм із регульованою

частотою та напругою. Саме ця здатність змінювати частоту живлення і є ключем до безступеневого керування швидкістю асинхронного двигуна.

Швидкість обертання магнітного поля асинхронного двигуна - синхронна швидкість n_0 - прямо пропорційна частоті живлення і обернено пропорційна кількості пар полюсів:

$$n_0 = 60 \cdot f / p \quad (2.16)$$

де f - частота живлення [Гц], p - кількість пар полюсів. Для AIP132M4 (4 полюси, $p = 2$): $n_0 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500$ об/хв. Якщо змінити f з 50 Гц до 40 Гц - n_0 стане 1200 об/хв, до 25 Гц - 750 об/хв. Це і є суть регулювання ПЧ.

Переважає більшість промислових ПЧ побудована за трьохланковою схемою: вхідна мережа (AC) → ланка постійного струму (DC) → вихідний інвертор (AC). Така архітектура відокремлює вхідну мережу від навантаження, що дає значну гнучкість у формуванні вихідної напруги.



Рис. 2.1 - Силовая схема перетворювача частоти.

1 – мережа, 2 – мережевий дросель, 3 – випрямляч, 4 – ланка DC, 5 – інвертор, 6 – двигун, 7 – блок керування.

Вхідний блок перетворює трифазну змінну напругу 380 В (50 Гц) на постійну. У більшості ПЧ до 110 кВт це некерований 6-пульсний діодний міст. Вихідна напруга DC-ланки: $UDC = \sqrt{2} \cdot 380 \approx 537 \text{ В} \approx 540 \text{ В}$. У потужніших або регенеративних ПЧ застосовують активний IGBT-випрямляч, який дозволяє повертати енергію гальмування назад у мережу.

Шестипульсний випрямляч споживає з мережі несинусоїдальний струм із характерними гармоніками 5-го і 7-го порядків. Для зменшення гармонічних спотворень (THD) застосовують вхідний мережевий дросель або ЕМС-фільтр.

DC-ланка виконує функції накопичення енергії та згладжування пульсацій. Вона складається з електролітичних конденсаторів великої ємності (основний накопичувач) і, часто, DC-дроселя (зменшує пульсації і захищає конденсатори). Напруга DC-ланки є стабілізованим джерелом для інвертора. Також у DC-ланці встановлюється гальмівний IGBT-транзистор (DC-чопер), який підключає зовнішній гальмівний резистор при рекуперативних режимах роботи (двигун у генераторному режимі, наприклад, при гальмуванні).

Інвертор – одна з найважливіших частин ПЧ. Він побудований на 6 IGBT-транзисторах, з'єднаних у тримостову схему. Кожен транзистор перемикається з частотою 2–16 кГц згідно з алгоритмом ШІМ (широтно-імпульсна модуляція). Завдяки цьому на виході формується послідовність імпульсів різної ширини, що після фільтрації індуктивністю обмоток двигуна дає синусоїдальний струм у двигуні.

Кожен IGBT захищений паралельним зворотним діодом, який забезпечує шлях для рекуперативних струмів при індуктивному навантаженні.

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ, англ. PWM - Pulse Width Modulation) - метод формування змінної напруги шляхом комутації постійної напруги DC-ланки (540 В) з високою частотою. Ключовий параметр - відношення тривалості відкритого стану транзистора до тривалості періоду (шпаруватість), яке змінюється за синусоїдальним законом (рис. 2.2).

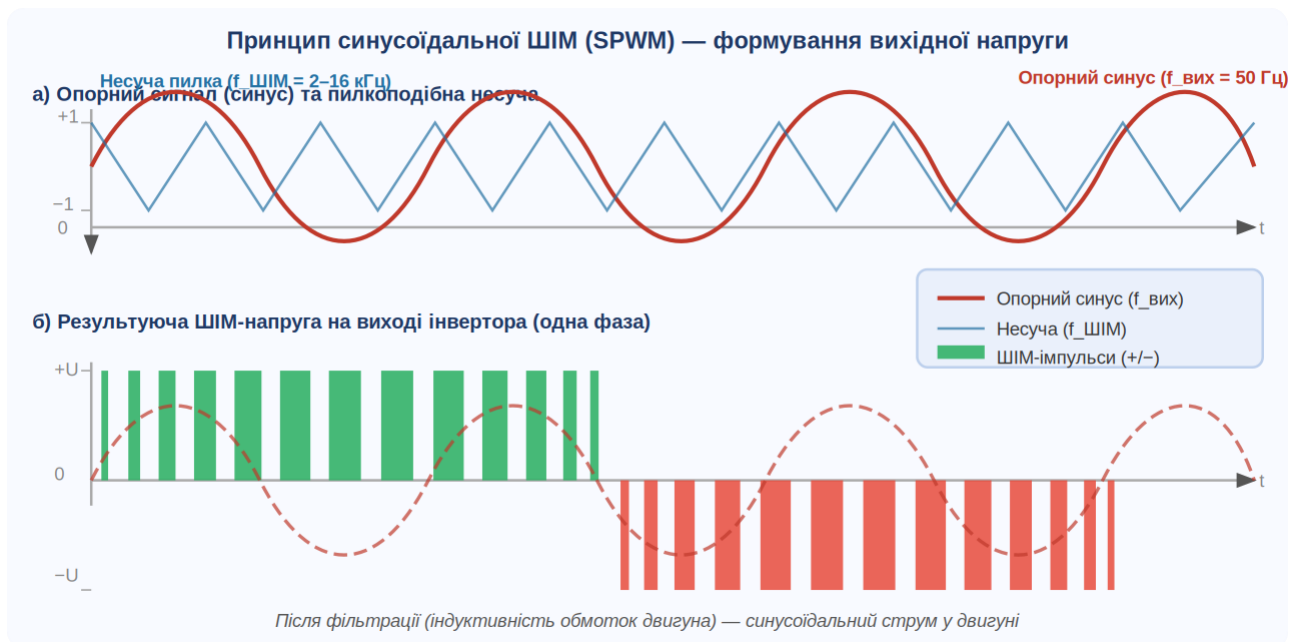


Рис. 2.2 - Принцип ШІМ.

а) опорний синусоїдальний сигнал і пилоподібна несуча; б) результуючі ШІМ-імпульси на виході інвертора.

Найпоширеніший алгоритм — СШІМ (синусідна ШІМ). Мікропроцесор генерує три опорних синусоїдальних сигнали (для фаз U, V, W), зсунутих на 120° . Ці сигнали порівнюються з пилоподібною несучою частоти $f_{\text{ШІМ}} = 2\text{--}16 \text{ кГц}$. Коли опорний синус перевищує несучу - відповідний верхній транзистор відкривається, нижній закривається (і навпаки).

Частота несучої $f_{\text{ШІМ}}$ визначає якість струму двигуна: вища частота - менші пульсації струму, тихіша робота двигуна, але більші комутаційні втрати в транзисторах і зростання електромагнітних перешкод. Компроміс: 4 кГц - для потужних ПЧ; 8–12 кГц - оптимум для насосів до 22 кВт.

Завдяки фільтруючій дії індуктивності обмоток статора двигун «бачить» практично синусоїдальний струм, навіть незважаючи на імпульсний характер вихідної напруги ПЧ.

Частота вихідного струму $f_{\text{вих}}$ задається мікропроцесором і може змінюватись від 0 до 200–400 Гц залежно від типу ПЧ. Амплітуда вихідної напруги пропорційна $f_{\text{вих}}$ (закон $V/f = \text{const}$ - докладніше у розділі 3). При $f_{\text{вих}} = 50 \text{ Гц}$ $U_{\text{вих}}$

= 380 В (номінальне). При $f_{вих} = 25$ Гц - $U_{вих} = 190$ В. Це забезпечує сталість магнітного потоку в двигуні і незмінність моменту в усьому діапазоні.

2.6 Методи керування ПЧ - скалярний та векторний.

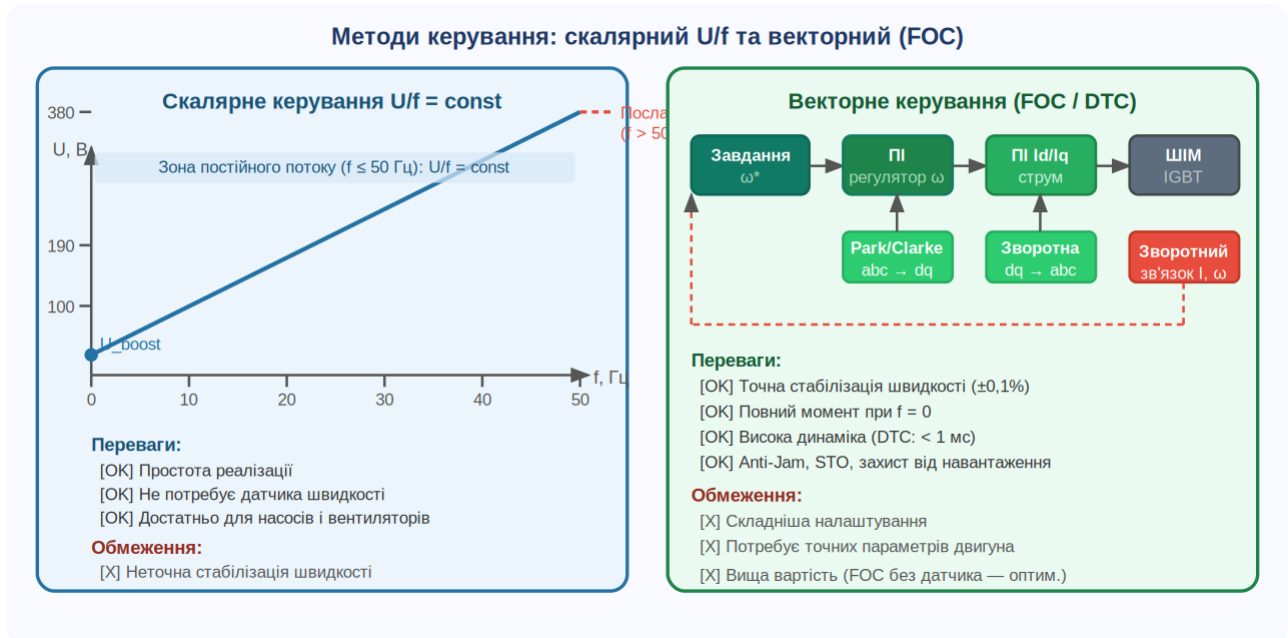


Рис. 2.3 – Порівняння методів керування: скалярний $V/f = \text{const}$ (ліворуч) та векторний (праворуч)

Скалярне керування $V/f = \text{const}$

Найпростіший і найпоширеніший метод. Суть: підтримувати постійне відношення $V/f = 380/50 = 7,6$ В/Гц на всьому діапазоні регулювання. Це забезпечує постійний магнітний потік у зазорі двигуна і, відповідно, постійний максимальний момент незалежно від частоти. При малих частотах (до 5–10 Гц) вводиться «підймальна» напруга U_{boost} , яка компенсує активний опад напруги на омичному опорі обмотки ($R_1 \cdot I$), що стає помітним при низьких напругах.

Для мацераторних насосів скалярне керування повністю достатнє: не потребує зворотного зв'язку по швидкості, має просту налаштування, стабільно працює в широкому діапазоні навантажень. ПЧ із скалярним керуванням дешевші і простіші в обслуговуванні.

Векторне керування розкладає вектор струму статора на дві складові у системі координат, орієнтованій на вектор потоку ротора: I_d - струм намагнічування (відповідає за магнітний потік), I_q - активний (момент-утворюючий) струм. Незалежне регулювання цих складових дозволяє керувати моментом і потоком незалежно, подібно до двигуна постійного струму.

Розрізняють векторне керування з датчиком швидкості (на валу - інкрементальний енкодер) і без датчика (sensorless vector control) - мікропроцесор оцінює положення ротора за математичною моделлю двигуна.

Переваги векторного керування особливо помітні при: необхідності розвитку повного моменту на нульовій швидкості (пуск під навантаженням); точному утриманні швидкості при різко змінних навантаженнях; швидкій динаміці (зміна моменту за мікросекунди у DTC). Для насосних застосувань векторне керування без датчика - оптимальний вибір верхнього рівня.

Пряме керування моментом (DTC - Direct Torque Control). Метод DTC (розроблений ABB) є різновидом векторного, але без ШІМ у класичному розумінні. Алгоритм безпосередньо порівнює розрахований момент і потік із заданими значеннями і миттєво вибирає оптимальний вектор напруги зі скінченного набору (таблиця комутацій). Час реакції на зміну моменту - менше 1 мс, що є рекордним показником. DTC є торговою маркою ABB і реалізований у серії ACS580/ACS880.

2.7 Переваги ПЧ з асинхронним двигуном з к.з. ротором.

Включення асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором за допомогою ПЧ, на сьогодні є фактично стандартом з кількох принципових причин. Розглянемо їх детально.

Плавний пуск без ударних навантажень. При прямому пуску АД з к.з. ротором споживає 5–7 номінальних струмів протягом 2–5 секунд. Для АР132М4 це $22,5 \cdot 7 = 158$ А, при $I_n = 22,5$ А. Такий кидок струму спричиняє: різке падіння напруги в мережі (до 15–20%), що впливає на інших споживачів; механічний удар у різальному вузлі мацератора (при кожному пуску ріжучі кромки різко прискорюються); гідравлічний удар у трубопроводі; термічне старіння ізоляції обмоток (кожен пуск «з'їдає» ресурс ізоляції).

ПЧ виключає ці проблеми: пуск відбувається з частоти 0 Гц із плавним наростанням. Струм пуску обмежується до 100–150% I_n . Для AIR132M4: $I_{\text{пускПЧ}} \approx 1,5 \cdot 22,5 = 33 \text{ А}$, замість 158 А при прямому пуску.

Плавний пуск: пусковий струм знижується майже у 5,5 рази, значною мірою знижуючи гідравлічні удари при пусках.

Економія електроенергії - закони подібності. Для насосів і вентиляторів діють закони подібності, що встановлюють залежність між швидкістю обертання і гідравлічними параметрами (рис. 2.4):

$$Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \quad H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3 \quad (2.17)$$

Кубічна залежність потужності від швидкості - це фундаментальний фізичний закон, який відкриває колосальний потенціал економії. Практичний приклад для мацераторного насоса: якщо зменшити швидкість на 20% ($n_2/n_1 = 0,8$), споживана потужність знизиться до $(0,8)^3 = 0,512$, тобто на 48,8%. При тривалості роботи приблизно 6000 год/рік, це сприяє значній економії як електроенергії так і поточних витрат на обслуговування.

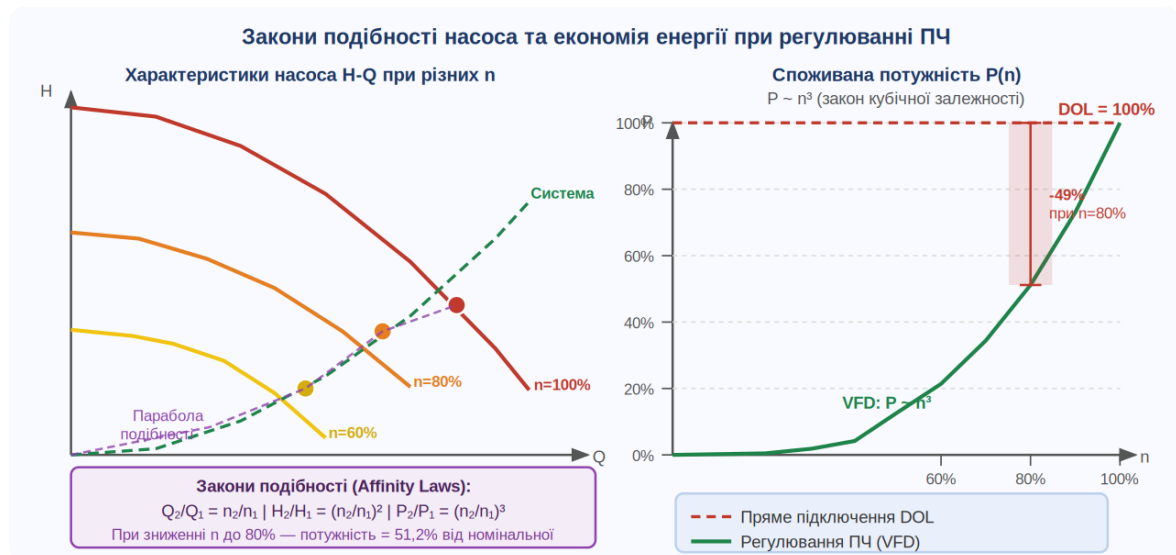


Рис. 2.4 — Закони подібності та економія енергії: H-Q криві при різних n (ліворуч); $P \sim n^3$ - кубічна залежність (праворуч).

АД з к.з. ротором при прямому підключенні не здатний розвивати номінальний момент на малих швидкостях - при низькій частоті напруга не може бути достатньою для підтримання потоку. ПЧ вирішує цю проблему алгоритмом $V/f = \text{const}$: двигун розвиває номінальний момент від $n = 0$ до n_n , що критично важливо для мацератора - пуск може відбуватись, коли ніж вже упирається у тверде включення.

ПЧ безперервно вимірює споживаний струм двигуна, що є прямим відображенням моменту навантаження. При заклиненні різального ротора мацератора струм різко зростає. Алгоритм Anti-Jam (Anti-Clog, Антизасмічення) реалізує такий сценарій: виявлення зростання струму вище порогу (наприклад, $130\% I_n$) → автоматичне гальмування → реверс на задану кількість обертів → знову прямий хід. Цикл повторюється 2–5 разів перед генерацією аварії. Цей алгоритм є стандартним у ПЧ для насосів Grundfos, ABB, Danfoss і дозволяє уникнути понад 90% ручних прочисток мацератора.

АДКЗ не має колекторного вузла, щіток або кілець, що робить його найнадійнішим типом двигуна в несприятливому середовищі (вологість, хімічно агресивні середовища, пил). Разом з ПЧ отримуємо безступеневе регулювання без механічних передач, що виключає додаткові вузли зносу і втрати. Ресурс такого приводу - 50 000–80 000 годин.

Плавне наростання струму і моменту при пуску повністю виключає ударні механічні навантаження, що зменшує вібрацію та знижує рівень шуму установки. У деяких ПЧ передбачена функція пропуску резонансних частот: при розгоні ПЧ автоматично «перестрибує» через частоти, на яких виникає механічний резонанс трубопроводу або фундаменту.

Сучасні ПЧ збирають і зберігають дані про роботу приводу: споживаний струм, напруга, температура, кількість пусків, наробіток. Через інтерфейс RS485/Ethernet та протокол Modbus RTU/TCP всі ці дані доступні SCADA-системі або диспетчеру. Це дозволяє будувати системи предиктивного технічного обслуговування: ПЧ сигналізує про зниження ізоляції двигуна (ще до пробою), про зростання механічного навантаження (знос ножів), про кількість заклинювань за добу.

2.8 Вибір перетворювача частоти для AIP132M4Y2.

Номінальна потужність двигуна AIP132M4 - 11 кВт. Запас 30% є стандартною практикою для мацераторних насосів з огляду на: пікові токові навантаження при заклинненні і Anti-Jam реверсах; стрибки струму при різанні великих твердих включень; підвищений нагрів транзисторів ПЧ при частих пусках/зупинках.

$$P_{ПЧ} = P_{дв} \cdot K_{зап} = 11 \cdot 1,30 = 14,3 \text{ кВт} \quad (2.18)$$

Зі стандартного ряду потужностей ПЧ ($7,5 \rightarrow 11 \rightarrow 15 \rightarrow 18,5$ кВт) обираємо наступний типорозмір:

Потрібна потужність ПЧ: для 14,3 кВт РПЧ = 15 кВт

Вихідний номінальний струм ПЧ повинен перевищувати номінальний струм двигуна із запасом:

$$I_{ПЧ\text{вим}} = I_{ндв} \cdot K_{зап} = 22,5 \cdot 1,30 = 29,25 \text{ А}$$

Для класу ПЧ 15 кВт типовий номінальний струм: $I_{ПЧ15\text{кВт}} = 32 \text{ А}$ – що задовольняє вимогу.

Для мацераторного насоса побутових стоків (режим S1, IP55, Anti-Jam) ПЧ повинен забезпечувати:

- Клас навантаження: Heavy Duty (HND) або Normal Duty (ND) – для мацераторів з частими пусками та ударним навантаженням – обов'язковий Heavy Duty
- Ступінь захисту IP: $\geq$ IP55 для монтажу поруч із насосом; IP66 – при прямому зрошенні
- Функція Anti-Clog / Anti-Jam / деблокування: автоматичний реверс при виявленні засмічення
- Вбудований ПД-регулятор для регулювання за датчиком рівня або тиску (аналоговий вхід 4–20 мА)

- Захист двигуна: термісторний вхід РТС, електронна теплова модель, захист від обриву фази
- Комунікації: RS485 / Modbus RTU як мінімум; опційно – Profibus, EtherNet/IP
- Діапазон вхідної напруги: 380–480 В $\pm 10\%$, частота 48–62 Гц
- Гальмівний чопер: вбудований (для Anti-Jam реверсу з підключенням зовнішнього резистора)

За сукупністю критеріїв для застосування в мацераторному насосі каналізаційної КНС (побутові стоки, режим S1, Anti-Jam, Modbus, IP55) оптимальним вибором є ACS310-03E-34A1 виробника ABB. В таблиці 2.4 наведені основні технічні параметри ПЧ цієї моделі.

Таблиця 2.4 – Технічні параметри ПЧ ACS310-03E-34A1.

Параметр	Значення
Модель	ABB ACS310-03E-34A1
Серія	ACS310 (загально-промислова, насоси/вентилятори)
Номінальна потужність (ND, 380–480 В)	11 кВт
Номінальна потужність (HD, 380–480 В)	7,5 кВт
Номінальний вихідний струм (ND)	25 А
Номінальний вихідний струм (HD)	21 А
Вхідна напруга	3ф 380–480 В, 50/60 Гц $\pm 10\%$
Метод керування	Scalar (U/f) + Sensorless Vector (SLV)
Ступінь захисту	IP21 (стандарт) / IP55 (опція корпус R2)
Клас ЕМС фільтра	C2 (вбудований)

Параметр	Значення
Гальмівний резистор	Вбудований (підключення зовн. Резистора)
Функція Anti-Clog	Вбудована (параметр 20.09 Anti-Jam)
ПІД-регулятор	Вбудований, аналоговий вхід 4–20 мА / 0–10 В
Термісторний вхід РТС	(клема AI2 або окремий вхід)
Цифрові входи DI	6 × 24 В DC, програмовані
Аналогові входи AI	2 × 0–10 В / 4–20 мА
Релейні виходи RO	3 × 250 В AC 2 А
Комунікаційний порт	RS485 (Modbus RTU); слот для адаптерів Profibus / Profinet / EtherNet/IP
Панель оператора	Знімна, IP54, підтримує українську мову (прошивка)
Діапазон вихідної частоти	0–500 Гц (практично 0–60 Гц для АД)
Програмне забезпечення	Drive Composer Pro (налаштування, моніторинг, журнал подій)

На рис. 2.5 – зображена типова схема підключення та додаткових інтерфейсів ПЧ ACS310-03E-34A1. Живлення ПЧ підводиться від мережного автоматичного вимикача через ЕМС-фільтр (або вхідний дросель). Кабель живлення від ПЧ до двигуна – екранований, 4-жильний (3 фази + РЕ). Переріз жил кабелю для $I_n = 22,5$ А: 4 мм². Максимально допустима довжина кабелю без вихідного дроселя dU/dt: 50м. При більшій довжині – обов’язковий dU/dt-фільтр на виході ПЧ (захищає ізоляцію обмоток від перенапружень).

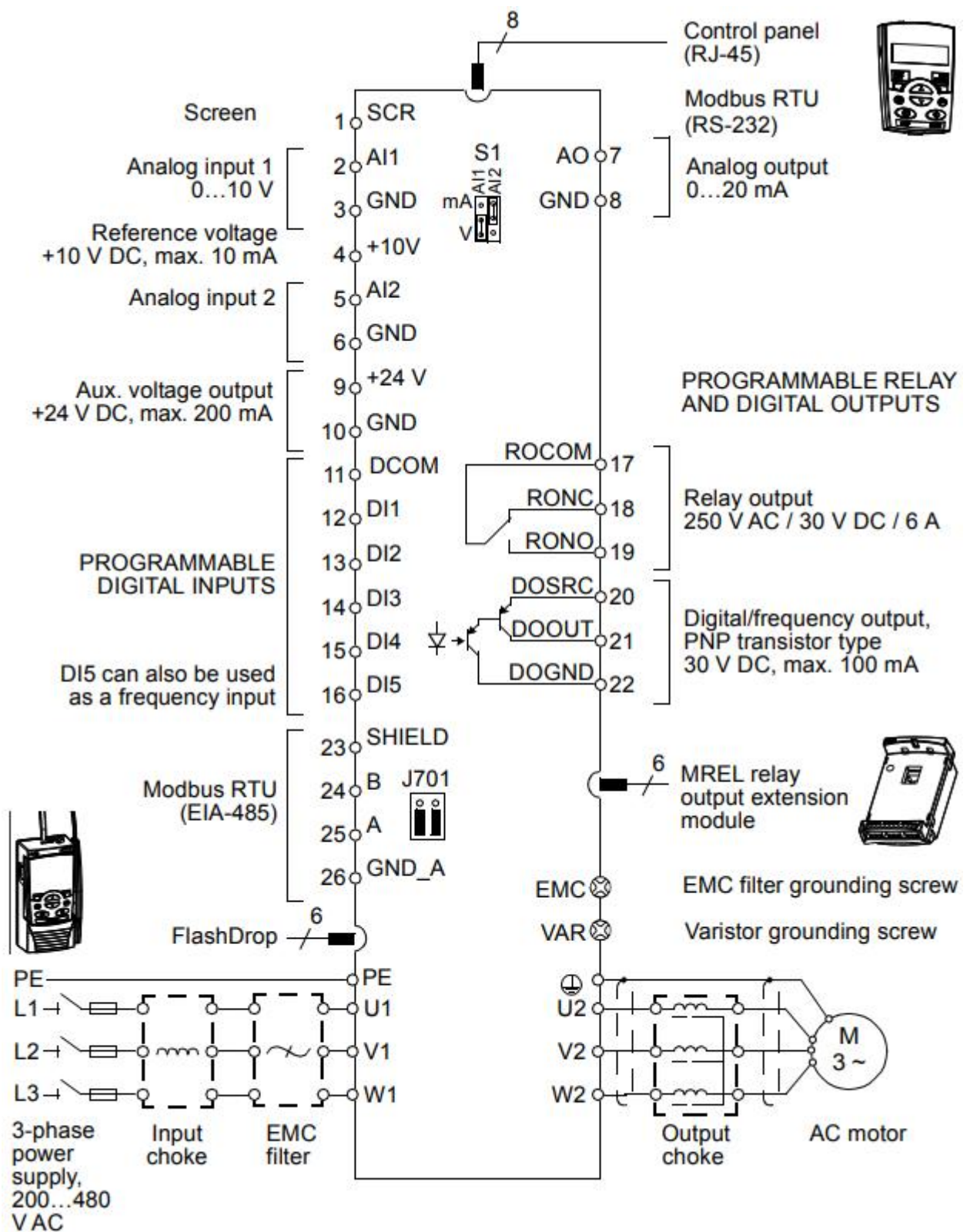


Рис. 2.5 – схема підключення ACS310-03E-34A1.

Перетворювач частоти є оптимальним рішенням для керування асинхронним двигуном з к.з. ротором у мацераторному насосі. Три ключові переваги визначають цей вибір: плавний пуск – зниження пускового струму, виключення гідравлічних

ударів і механічних навантажень на різальний вузол; економія енергії до 48% при роботі на зниженій швидкості завдяки кубічній залежності $P \sim n^3$; функція Anti-Jam – автоматичний реверс при заклиненні, що виключає більшість ручних прочисток. Для двигуна AIP132M4Y2 (11 кВт) із запасом 30% обрано ABB ACS310-03E-34A1. Річна економія електроенергії при роботі на 80% швидкості перевищує 87 000 грн, що забезпечує окупність ПЧ за 1,0–1,5 роки.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Необхідність математичного моделювання електроприводу насоса.

Математична модель електроприводу – це система рівнянь, що описує фізичні процеси в двигуні та механізмі в кількісній формі. Модель дозволяє: передбачати перехідні процеси (пуск, гальмування, зміна навантаження) без дорогих фізичних експериментів; синтезувати та налаштовувати регулятори (ПД, векторне керування) шляхом числового моделювання; оцінювати споживання електроенергії в різних режимах; виявляти аномальні режими (кавітацію, заклинювання ротора мацератора) за характерними відхиленнями модельних змінних від вимірюваних.

Для мацераторного насоса з АД з к.з. ротором математична модель охоплює три взаємопов'язаних рівні: електромагнітний (рівняння статора і ротора у просторових векторах), механічний (рівняння руху ротора з урахуванням моменту інерції) та гідравлічний (модель насоса – залежності Н-Q, М-Q та закони подібності).

Вихідним пунктом будь-якої математичної моделі АД є Т-подібна схема заміщення на фазу – еквівалентна електрична схема, яка в усталеному режимі точно відтворює струми, потужність та момент реального двигуна.

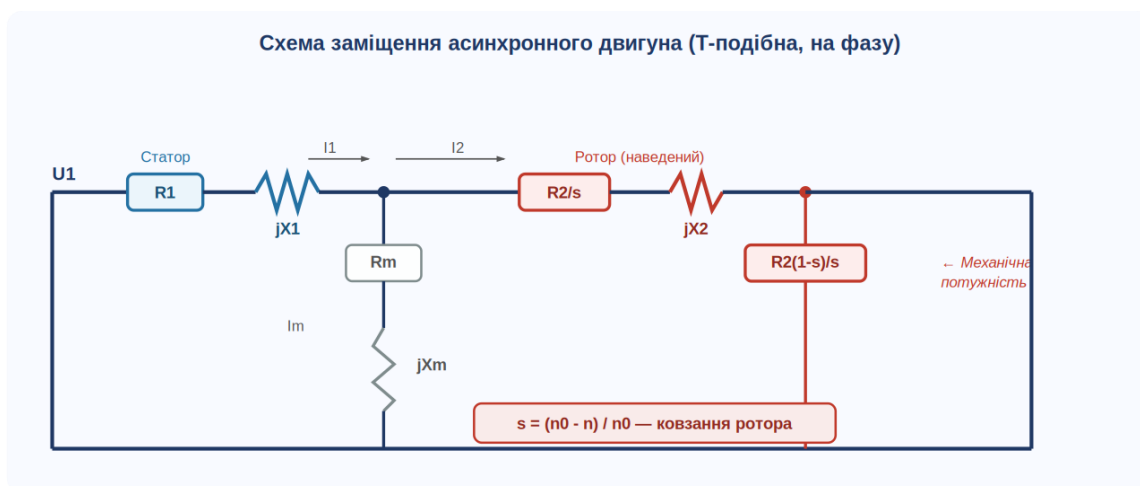


Рис. 3.1 – Т-подібна схема заміщення АД на фазу.

R_1, jX_1 – опори статора; R_m, jX_m – гілка намагнічування; $R_2/s, jX_2$ – наведені опори ротора; $R_2(1-s)/s$ – механічна потужність.

R_1 – активний опір обмотки статора [Ом]. Визначає омичні втрати в міді статора (теплові втрати). При нагріванні збільшується: $R_1(T) = R_{10} \cdot (1 + 0,00393 \cdot \Delta T)$. Для АІР132М4 при 20°C: $R_1 \approx 1,8$ Ом.

$jX_1 = j \cdot \omega_1 \cdot L_{1\sigma}$ – реактивний опір розсіювання статора [Ом]. Враховує потік розсіювання статорних обмоток, що не перетинає зазор. $X_1 \approx 0,1 \times (U_1^2 / P_H) \approx 3,2$ Ом.

R_m і jX_m – паралельна гілка намагнічування, що моделює потік у осерді. R_m – втрати в сталі (перемагнічування, вихрові струми). $X_m = \omega_1 \cdot L_m$ – основна індуктивність (намагнічувальна), визначає здатність двигуна створювати магнітний потік в зазорі. $L_m \gg L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ для ефективного двигуна.

R_2/s – наведений на статор опір ротора, де $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$ – ковзання. R_2 – активний опір стрижнів к.з. ротора. При $s = 1$ (нерухомий ротор, пуск): $R_2/s = R_2$ – мінімальний, пусковий струм максимальний. При $s \rightarrow 0$ (холостий хід): $R_2/s \rightarrow \infty$ – струм ротора $\rightarrow 0$. $R_2 \approx 1,5$ Ом для АІР132М4.

$R_2(1-s)/s$ – виділена частина опору, що відповідає механічній потужності, яку ротор перетворює в обертальний рух. Потужність, що виділяється на цьому опорі: $P_{\text{мех}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot (1-s)/s = M_{\text{ел}} \cdot \omega_r$.

3.2 Параметри схеми заміщення для АІР132М4.

Параметри визначаються дослідним шляхом (дослід холостого ходу + дослід короткого замикання) або розрахунково за ГОСТ 28327. Для АІР132М4 (7,5 кВт, 380 В, 1440 об/хв):

Таблиця 3.1 – Числові значення параметрів схеми заміщення.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Метод визначення
Опір статора (фаза)	R_1	1,80	Ом	Вимірювання (ст. мост)

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці	Метод визначення
Опір ротора (наведений)	R2	1,45	Ом	Дослід к.з.
Індуктивність розсіювання статора	L1σ	10,2	мГн	Дослід к.з.
Індуктивність розсіювання ротора	L2σ	10,2	мГн	Дослід к.з.
Головна індуктивність	Lm	172	мГн	Дослід х.х.
Повна індуктивність статора	$L_s = L1\sigma + Lm$	182.2	мГн	Розрахунок
Повна індуктивність ротора	$L_r = L2\sigma + Lm$	182.2	мГн	Розрахунок
Стала часу ротора	$Tr = L_r / R2$	0,126	с	Розрахунок
Коефіцієнт розсіювання	$\sigma = 1 - Lm^2 / (L_s \cdot L_r)$	0,111	-	Розрахунок
Момент інерції ротора	J	0,050	кг·м ²	Паспорт / вимір.
Число пар полюсів	p	2	-	Конструктив
Номінальне ковзання	sn	0,040	-	Розрахунок

Точні параметри суттєво впливають на якість моделі. Похибка R1 на 10% дає похибку моменту на 5–8% в перехідних режимах. Для виробничих розрахунків рекомендується ідентифікація параметрів через дослід холостого ходу і КЗ.

3.3 Математична модель у просторових векторах.

Концепція просторового вектора. Три симетричні синусоїдальні величини (струми, напруги, потокозчеплення) фаз А, В, С можна представити одним обертовим у комплексній площині вектором – просторовим вектором (space vector). Для трифазного струму:

$$I_s = (2/3) \cdot (iA + aiB + a^2 \cdot iC) \quad (3.1)$$

де $a = \exp(j \cdot 2\pi/3) = -0,5 + j \cdot (\sqrt{3}/2)$ - оператор повороту на 120° . Множник $2/3$ - амплітудне інваріантне масштабування (зберігає амплітуди). Просторовий вектор обертається в комплексній площині з кутовою швидкістю ω_1 і має амплітуду, рівну амплітуді фазного струму. Це потужний математичний інструмент: замість трьох скалярних рівнянь - одне векторне.

Перетворення Кларк ($abc \rightarrow \alpha\beta$) переводить трифазну систему в двовісну нерухому систему координат α, β (без обертання). Перетворення Парк ($\alpha\beta \rightarrow dq$) переводить у систему координат, що обертається разом із ротором або вектором потоку - саме тут рівняння АД набувають найпростішого вигляду.

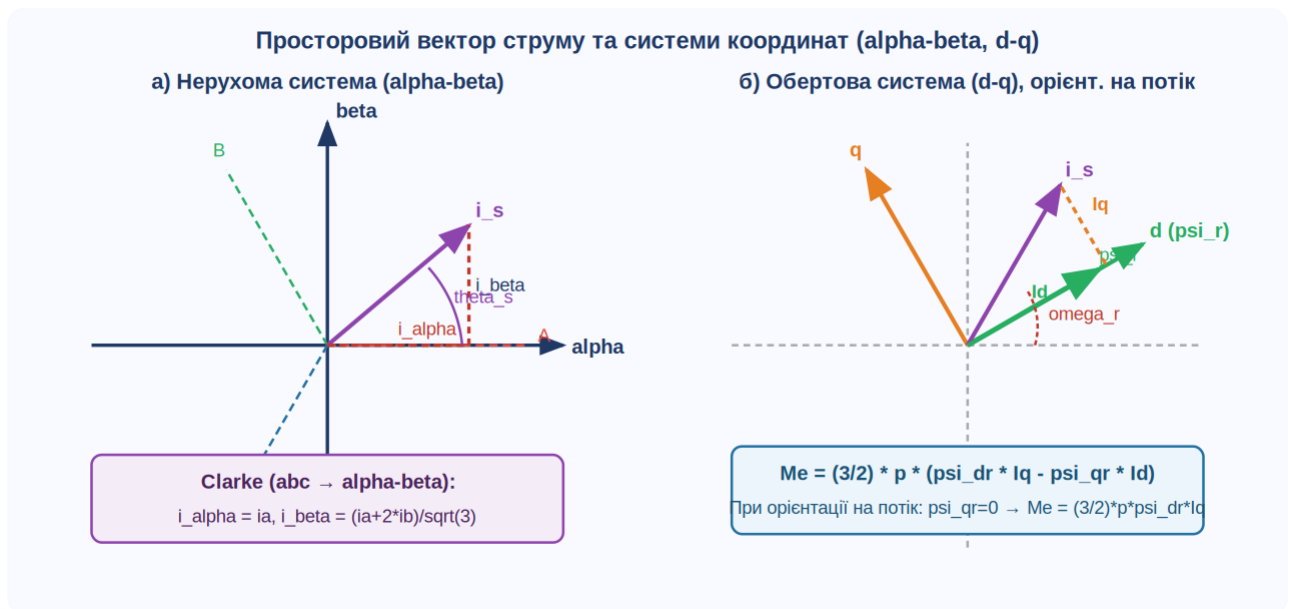


Рис. 3.2 – Просторовий вектор та системи координат: а) нерухома система α - β з розкладом вектора струму; б) обертова система d-q, орієнтована на вектор потоку ротора

3.4 Рівняння статора та ротора у нерухомій системі $\alpha\beta$.

У нерухомій системі координат (α , β) рівняння напруг статора і ротора у векторній формі:

$$\begin{aligned} u_s &= R_1 \cdot i_s + d(\psi_{s1})/dt \\ 0 &= R_2 \cdot i_r + d(\psi_{r1})/dt - j \cdot \omega_r \cdot \psi_{r1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

де u_s , i_s , ψ_{s1} - вектори напруги, струму і потокозчеплення статора; i_r , ψ_{r1} - вектори ротора (наведені на статор); $\omega_r = p \cdot \omega_{\text{мех}}$ - електрична кутова швидкість ротора [рад/с]. Потокозчеплення через індуктивності:

$$\begin{aligned} \psi_{s1} &= L_s \cdot i_s + L_m \cdot i_r \\ \psi_{r1} &= L_m \cdot i_s + L_r \cdot i_r \end{aligned} \quad (3.3)$$

Виражаючи i_r через ψ_{r1} і i_s , та підставляючи у рівняння напруг, отримуємо систему диференціальних рівнянь зі сталими змінними i_s і ψ_{r1} .

Повна модель у нерухомій системі $\alpha\beta$ у формі простору станів:

$$\begin{aligned}
d(i_{s\alpha})/dt &= (1/(\sigma \cdot L_s)) \cdot [u_{s\alpha} - (R_1 + L_m^2/(L_r \cdot T_r)) \cdot i_{s\alpha} \\
&\quad + (L_m/(L_r \cdot T_r)) \cdot \psi_{sir\alpha} + \omega_r \cdot (L_m/L_r) \cdot \psi_{sir\beta}] \\
d(i_{s\beta})/dt &= (1/(\sigma \cdot L_s)) \cdot [u_{s\beta} - (R_1 + L_m^2/(L_r \cdot T_r)) \cdot i_{s\beta} \\
&\quad + (L_m/(L_r \cdot T_r)) \cdot \psi_{sir\beta} - \omega_r \cdot (L_m/L_r) \cdot \psi_{sir\alpha}] \\
d(\psi_{sir\alpha})/dt &= (L_m/T_r) \cdot i_{s\alpha} - (1/T_r) \cdot \psi_{sir\alpha} - \omega_r \cdot \psi_{sir\beta} \\
d(\psi_{sir\beta})/dt &= (L_m/T_r) \cdot i_{s\beta} - (1/T_r) \cdot \psi_{sir\beta} + \omega_r \cdot \psi_{sir\alpha}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

де $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s \cdot L_r)$ - коефіцієнт розсіювання (інтеграл по загальному потоку); $T_r = L_r/R_2$ - стала часу ротора [с].

Ця система чотирьох рівнянь першого порядку разом із рівнянням руху утворює повну математичну модель АД. Вектор стану: $x = [i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \psi_{gr\alpha}, \psi_{gr\beta}, \omega]^T$ - п'ять скалярних змінних. Вхідний вектор: $u = [u_{s\alpha}, u_{s\beta}, M_{load}]^T$.

Електромагнітний момент виражається через компоненти просторових векторів струму і потоку:

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot (\psi_{sir\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{sir\beta} \cdot i_{s\alpha}) \tag{3.5}$$

або еквівалентно через скалярний добуток:

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot \text{Im}\{ \text{conj}(\psi_{sir}) \cdot i_s \} = (3/2) \cdot p \cdot |\psi_{sir}| \cdot |i_s| \cdot \sin(\delta) \tag{3.6}$$

де δ – кут між векторами потоку ротора і струму статора. При орієнтації на вектор потоку ротора ($\psi_{sir} = 0$, d-вісь суміщена з ψ_{sir}):

$$M_e = (3/2) \cdot p \cdot (L_m/L_r) \cdot \psi_{sir} \cdot I_{qs} \tag{3.7}$$

Ця формула пояснює принцип векторного керування: момент визначається лише I_q -складовою струму, а потік – тільки I_d -складовою. Незалежне керування I_d та I_q – аналог керування двигуном постійного струму.

Механічний рух ротора описується другим законом Ньютона для обертального руху:

$$J \cdot d(\omega r)/dt = p \cdot (M_e - M_{load} - B \cdot \omega r) \quad (3.8)$$

де J - момент інерції приводу [$\text{кг} \cdot \text{м}^2$] = сума $J_{\text{двигуна}}$ + $J_{\text{насоса}}$; M_e - електромагнітний момент [Нм]; M_{load} - момент опору навантаження (насоса) [Нм]; B - коефіцієнт в'язкого тертя [$\text{Нм} \cdot \text{с/рад}$]; ωr - механічна кутова швидкість ротора [рад/с].

Для АІР132М4 з мацераторним насосом: $J_{\text{сумарне}} = J_{\text{двигуна}} + J_{\text{насоса}} \approx 0,050 + 0,030 = 0,080 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Коефіцієнт тертя $B \approx 0,005\text{--}0,02 \text{ Нм} \cdot \text{с/рад}$ (малий, часто нехтується у спрощених моделях).

3.5 Математична модель насоса.

Модель насоса у гідравлічному сенсі описується характеристикою H - Q - залежністю напору від витрати при постійній частоті обертання. Аналітично:

$$H(Q, n) = A \cdot (n/n_0)^2 - B \cdot (Q/(n/n_0))^2 \quad (3.9)$$

або в більш компактному вигляді (парабольна апроксимація):

$$H(Q) = H_0 \cdot (n/n_0)^2 \cdot [1 - (Q/Q_0)^2 \cdot (n_0/n)^2] \quad (3.10)$$

де H_0 - напір при $Q = 0$ і $n = n_0$ (нульова витрата); Q_0 - витрата при $H = 0$ (максимальна витрата); n_0 - номінальна швидкість; n – поточна швидкість. Для АІР132М4/мацератора ($Q = 30 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 20 \text{ м}$): $H_0 \approx 24 \text{ м}$, $Q_0 \approx 43 \text{ м}^3/\text{год}$.

Характеристика системи трубопроводів (напір опору):

$$H_{\text{sys}}(Q) = H_{\text{static}} + R_{\text{sys}} \cdot Q^2 \quad (3.11)$$

де H_{static} - статична висота підйому (геометрична різниця рівнів) [м]; R_{sys} - гідравлічний опір мережі $[м/(м^3/год)^2]$. Робоча точка - перетин $H(Q)$ та $H_{sys}(Q)$.

Момент опору мацераторного насоса складається з двох принципово різних складових:

$$M_{load}(\omega) = M_{riz}(\omega) + M_{pump}(\omega) + M_{meh} \quad (3.12)$$

Момент різального вузла M_{riz} - практично постійний (не залежить від швидкості при нормальній роботі), оскільки сила різання визначається механічними властивостями матеріалу і геометрією ножів, а не швидкістю:

$$M_{riz} = const = k_c \text{ [Нм]} \quad (3.13)$$

Для АІР132М4-мацератора: $k_c \approx 8 \text{ Нм}$ (при штатному режимі, м'які побутові включення).

Гідравлічний момент від відцентрового колеса - квадратична залежність від швидкості (закон подібності $P \sim n^3$, $M \sim n^2$):

$$M_{pump}(\omega) = k_p \cdot \omega^2 \quad (3.14)$$

де $k_p = P_{насосном} / (\omega_{ном}^2) = 2752 / (150,8^2) = 2752 / 22741 = 0,121 \text{ [Нм} \cdot \text{с}^2/\text{рад}^2]$. Точніше: $k_p = (M_{ном} - M_{riz}) / \omega_{ном}^2 = (44,7 - 8) / 150,8^2 \approx 0,00161 \text{ [Нм} \cdot \text{с}^2/\text{рад}^2]$.

Повна залежність моменту навантаження:

$$M_{load}(\omega) = k_c + k_p \cdot \omega^2 = 8,0 + 0,00161 \cdot \omega^2 \text{ [Нм]} \quad (3.15)$$

При заклиненні різального ротора (застрявання включення) k_c різко зростає і може досягти $2-3 \times M_n$. Саме цей сценарій виявляється контролером ПЧ через стрибок струму.

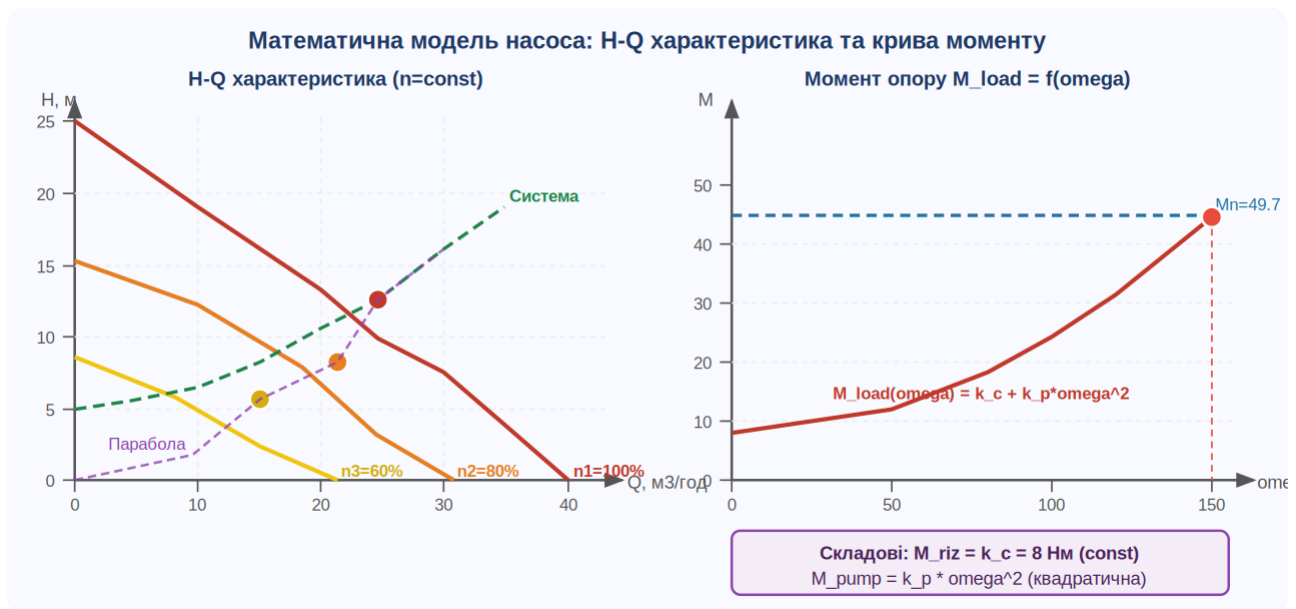


Рис. 3.3 – Математична модель насоса: ліворуч - Н-Q характеристики при різних n та системна крива; праворуч - $M_{load}(\omega) = k_c + k_p \cdot \omega^2$.

3.6 Реалізація моделі в MATLAB/Simulink.

Модель електроприводу насоса в MATLAB/Simulink обчислюється за допомогою Т-подібної схеми заміщення.

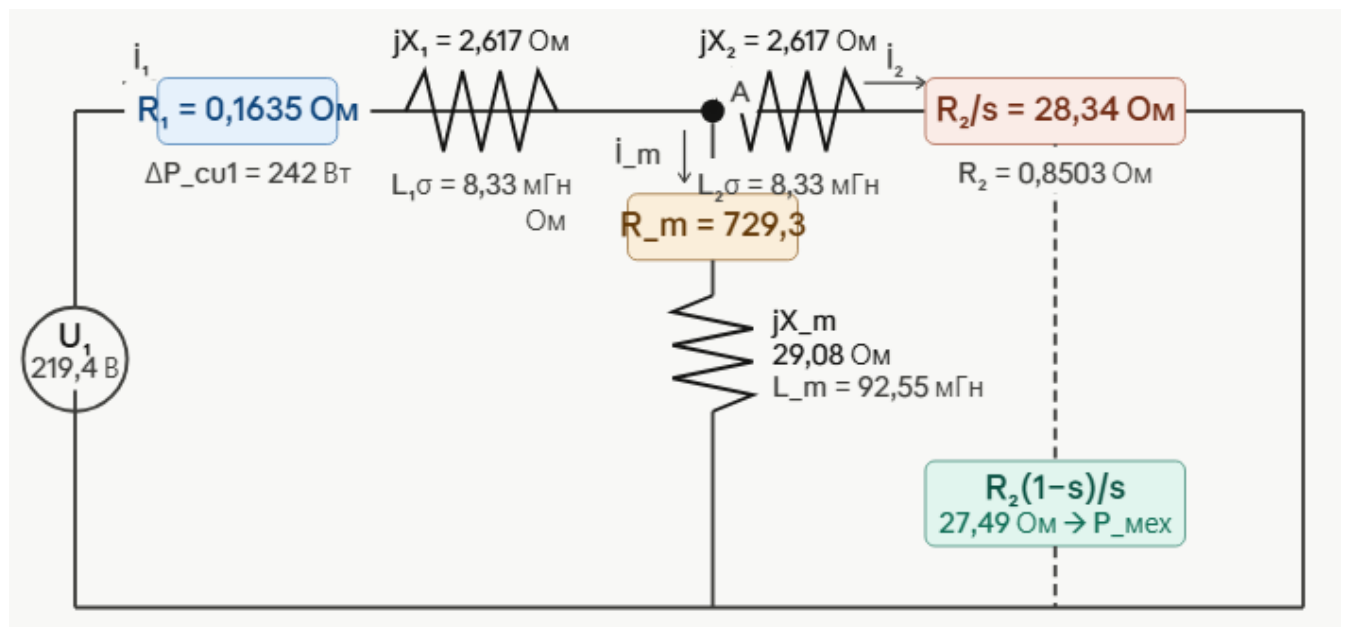


Рис. 3.4 – Т-подібна схема заміщення електродвигуна AIP132M4.

Підставляючи ці параметри в діалогове меню властивостей моделі електродвигуна ми можемо в процесі моделювання оцінити пускові характеристики електроприводу.

В таблиці 3.х представлені значення параметрів які необхідні для розрахунку схеми заміщення. Скориставшись ними визначимо опір ротора та статора, а також їхні індуктивності, й значення інших параметрів.

Отримані результати також представимо у вигляді таблиці (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Вхідні параметри для розрахунку Т-подібної схеми.

Параметр	Значення
P_H	11 кВт
n_0 / n_H	1500 / 1455 об/хв
s_H	3,00%
$\eta / \cos\varphi$	87,5% / 0,86
I_H	22,21 А
$I_{\text{пуск}}$	155,5 А ($K_i = 7,0$)
$M_H / M_{\text{макс}} / M_{\text{пуск}}$	72,19 / 202,14 / 202,14 Н·м

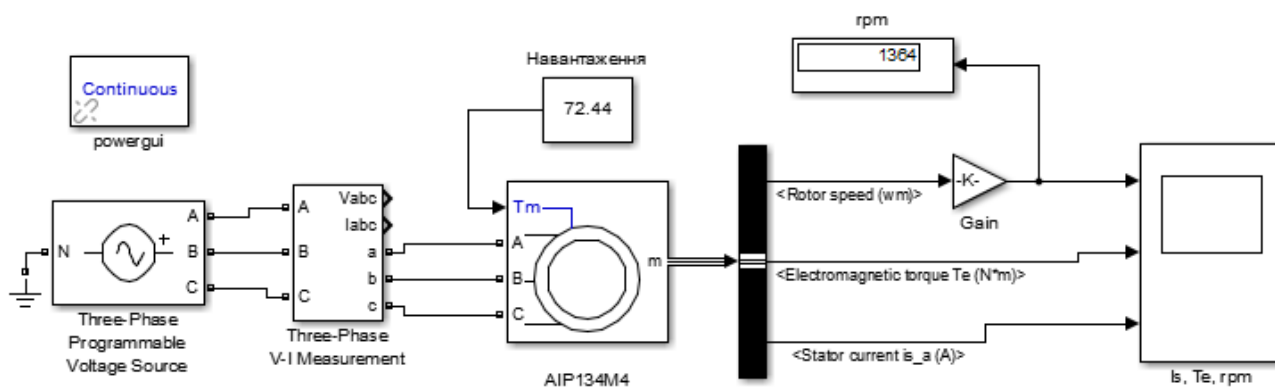


Рис. 3.5 – Схема моделі прямого пуску в Simulink.

На рис. 3.5 зображена схема Simulink, за допомогою якої проводилося моделювання прямого пуску електродвигуна AIP134M4.

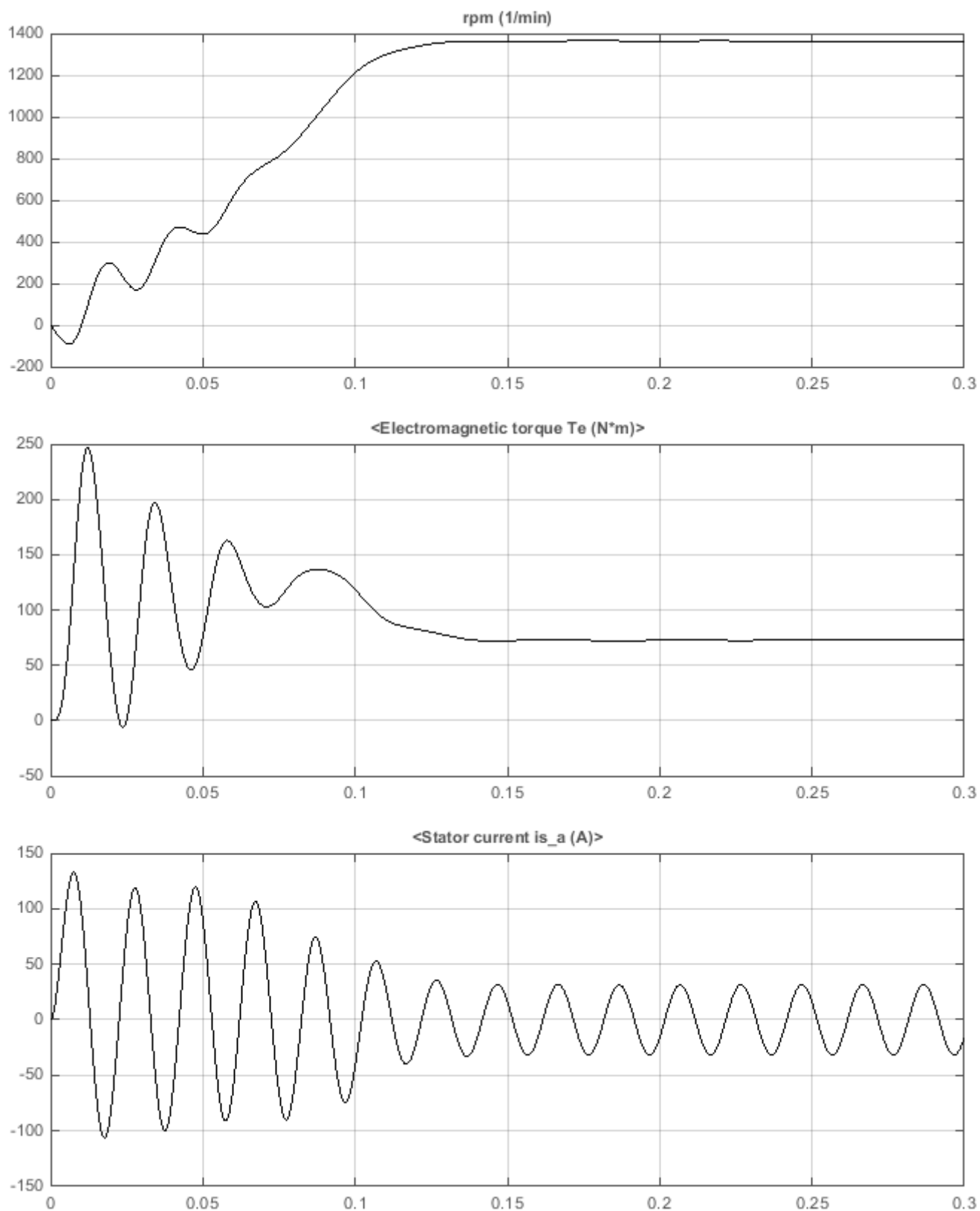


Рис. 3.6 – Результати моделювання режиму Прямого Пуску.

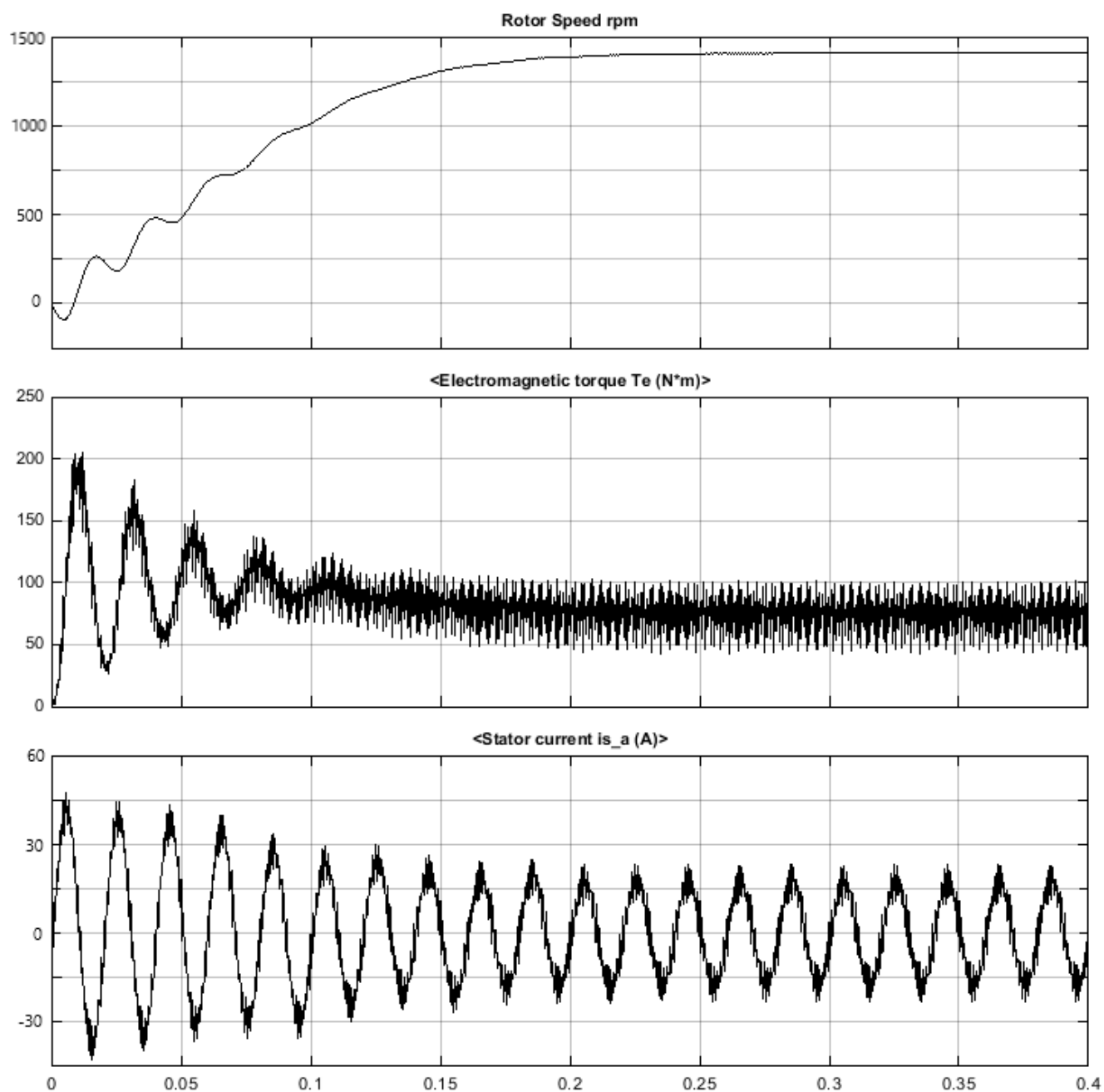


Рис. 3.8 – Результати моделювання пуску з ПЧ.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1 Вихідні дані та умови розрахунку.

Техніко-економічне обґрунтування виконане для об'єкта: каналізаційна насосна станція житлового комплексу або виробничого підприємства з мацераторним насосом. Обладнання: двигун AIP132M4Y2 (7,5 кВт, 1440 об/хв), схема управління - пряме вмикання - замінюється на частотний перетворювач ABB ACS580-01-025A-4 (11 кВт).

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні параметри системи з мацератором.

Параметр	Значення	Примітка
Двигун	AIP132M4Y2, 7,5 кВт, 380В	Базовий варіант та варіант з ПЧ
Потужність на валу насоса	6,73 кВт	Гідравліка + різання + тертя
ККД двигуна (номін.)	87,5%	При повному завантаженні
ККД ПЧ (номін.)	97,0%	При 100% навантаженні
Режим роботи	S1 - тривалий, безперервний	6 000 годин/рік = 16,4 год/добу
Тариф на електроенергію	7,5 грн/кВт·год	Станом на 2026 рік
Профіль навантаження - пік (100%)	40% часу	2 400 год/рік - максимальний потік
Профіль навантаження - норма (80%)	35% часу	2 100 год/рік - типовий режим
Профіль навантаження - мінімум (60%)	25% часу	1 500 год/рік - нічні години

Параметр	Значення	Примітка
Ставка дисконтування (NPV)	15%/рік	Типово для України 2026
Горизонт аналізу	10 років	Строк служби ПЧ
Частота засмічень ротора	24 рази/рік	2 рази/місяць - типово
Частота засмічень (з ПЧ + Anti-Jam)	2 рази/рік	Автоматичне усунення 92%

4.2 Аналіз споживання електроенергії.

Базовий сценарій - пряме вмикання. При прямому вмиканні двигун завжди обертається з номінальною швидкістю 1440 об/хв незалежно від поточного попиту на витрату. Регулювання витрати здійснюється дроселюванням (часткове прикриття засувки), що спричиняє додаткові гідравлічні втрати. При дроселюванні до 80% витрати двигун споживає ~92% від номінальної потужності, при 60% витрати - ~85%.

$$РПП_{повна} = Р_{вал} / \eta_{двиг} = 6,73 / 0,875 = 7,691 \text{ кВт}$$

$$РПП_{серед} = 7,691 \cdot (0,40 \cdot 1,00 + 0,35 \cdot 0,92 + 0,25 \cdot 0,85) = 7,188 \text{ кВт}$$

$$ЕПП = РПП_{серед} \cdot Н_{рік} = 7,188 \cdot 6000 = 43 \ 124 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

$$\text{Витрати}_{ПП} = ЕПП \cdot Т = 43 \ 124 \cdot 7,5 = 323 \ 430 \text{ грн} / \text{рік}$$

Споживання електроенергії при ПП: 43 124 кВт·год/рік на суму 323 430 грн/рік

Сценарій з перетворювачем частоти (ПЧ). ПЧ дозволяє точно задавати швидкість обертання насоса в залежності від поточного навантаження. Завдяки кубічному закону подібності $P \sim n^3$ зниження швидкості до 80% дає споживання лише 51,2% потужності, до 60% - 21,6%. ПЧ вносить власні втрати ~3% при повному навантаженні.

$$РПЧ(n) = РППовна \cdot (n/n_0)^3 / \eta_{ПЧ}$$

$$РПЧ_{серед} = 7,691 \cdot (0,40 \cdot 1,0/0,97 + 0,35 \cdot 0,512/0,97 + 0,25 \cdot 0,216/0,97) = 5,021 \text{ кВт}$$

$$ЕПЧ = 5,021 \cdot 6000 = 30\,125 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$\text{ВитратиПЧ} = 30\,125 \cdot 7,5 = 225\,938 \text{ грн/рік}$$

Споживання електроенергії з ПЧ: 30 125 кВт·год/рік на суму 225 938 грн/рік

$$\text{Економія} = 43\,124 - 30\,125 = 12\,999 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

$$\text{Грошова економія} = 12\,999 \cdot 7,5 = 97\,493 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Відносна економія} = (43\,124 - 30\,125) / 43\,124 \cdot 100\% = 30,1\%$$

Економія електроенергії: 12 999 кВт·год/рік = 97 493 грн/рік (30,1%)

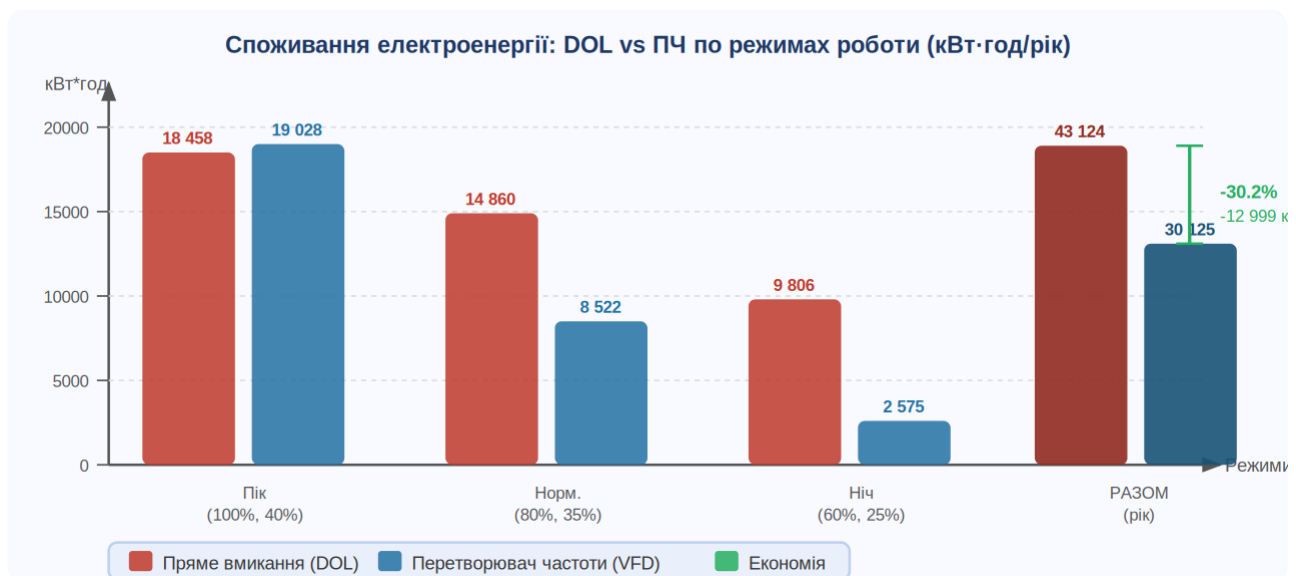


Рис. 4.1 – Споживання електроенергії по режимах: пік (100%), норма (80%), ніч (60%) і разом за рік. Порівняння ПП та ПЧ.

Таблиця 4.2 – Економія електроенергії в залежності від режиму роботи.

Режим роботи	Частка часу	Год/рік	РПП, кВт	РПЧ, кВт	ЕПП, кВт·год	ЕПЧ, кВт·год	Різниця, кВт·год
Пік (n=100%)	40%	2 400	7,691	7,928	18 458	19 028	-570
Норма (n=80%)	35%	2 100	7,075	4,063	14 860	8 533	6 327
Ніч (n=60%)	25%	1 500	6,537	1,714	9 806	2 571	7 235
РАЗОМ	100%	6 000	7,188 (сер.)	5,021 (сер.)	43 124	30 125	12 999

При роботі на піковому навантаженні (100%) ПЧ споживає на ~3% більше, ніж ПП, через власні втрати. Весь вигрaш досягається за рахунок часткового навантаження (80% і 60%). Це стандартна поведінка для ПЧ у насосних застосуваннях.

4.3 Операційні витрати - повний облік.

Економічна оцінка ПЧ не обмежується лише електроенергією. Перетворювач частоти впливає на весь комплекс операційних витрат: технічне обслуговування двигуна та насоса, усунення аварійних засмічень, ресурс двигуна, аварійні зупинки.

Витрати на технічне обслуговування. При прямому вмиканні кожен пуск двигуна супроводжується кидком струму $6,5 \cdot I_n = 104 \text{ A}$ і різким механічним ударом у різальному вузлі мацератора. При 365 пусках/рік (один на добу) це суттєво прискорює знос підшипників, торцевого ущільнення, ріжучих кромок і старіння ізоляції обмоток. Відповідно збільшуються операційні витрати на проведення технічного обслуговування та ремонтні роботи. В табл. 4.3 наведено порівняння проведення деяких робіт при прямому пуску та з використанням ПЧ.

Таблиця 4.3 – Періодичність та вартість проведення деяких робіт з ТО.

Вид технічного обслуговування	Періодичність	Вартість ПП, грн/рік	Періодичність (ПЧ)	Вартість ПЧ, грн/рік	Економія, грн/рік
Заміна підшипників двигуна	1 раз/рік	3 500	1 раз/2 роки	1 750	1 750
Заміна торцевого ущільнення насоса	1 раз/рік	4 000	1 раз/2 роки	2 000	2 000
Заточення/заміна ріжучих ножів	2 рази/рік	3 500	1 раз/рік	1 750	1 750
Профілактична перевірка ізоляції	1 раз/рік	1 500	1 раз/2 роки	750	750
Технічний огляд ПЧ (конденсатори, вентилятор)	-	0	1 раз/рік	3 500	-3 500
Масило та витратні матеріали	Регулярно	5 500	Регулярно	3 250	2 250
РАЗОМ ТО		18 000		13 000	5 000

Економія на ТО: 5 000 грн/рік завдяки зниженню пускових навантажень та рівномірному режиму роботи.

Витрати на усунення засмічень різального вузла. Без функції Anti-Jam оператор змушений вручну зупиняти насос, відкривати люк і видаляти включення, що застрягли між ножами ротора і статора. У мацераторах для побутових стоків це трапляється типово 2 рази на місяць при роботі без інтелектуальних систем захисту.

Витрати на одне усунення засмічення: витрати робочого часу - $1,5 \text{ год} \times 450 \text{ грн/год} = 675 \text{ грн}$; збитки від простою насосної станції - $1 \text{ год} \times 600 \text{ грн/год} = 600 \text{ грн}$. Разом: 1 275 грн на одне усунення.

$$\text{ВитратиПП} = 24 \text{ рази/рік} \cdot 1\,275 \text{ грн} = 30\,600 \text{ грн/рік}$$

Функція Anti-Jam у ПЧ ACS580 автоматично розблоковує ротор реверсом без участі персоналу в ~92% випадків. Лише у 8% випадків (нерозчинні включення) потрібне ручне втручання (~2 рази/рік).

$$\text{ВитратиПЧ} = 2 \text{ рази/рік} \cdot 1\,275 \text{ грн} = 2\,550 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Економія Anti-Jam} = 30\,600 - 2\,550 = 28\,050 \text{ грн/рік}$$

Економія від Anti-Jam: 28 050 грн/рік - друга за величиною стаття після електроенергії.

Збільшення ресурсу двигуна. Кожен прямий пуск еквівалентний ~30 хвилинам тривалої роботи з точки зору теплового старіння ізоляції (модель Монгена-Аррені). При 365 пусках/рік і додатковому тепловому навантаженні фактичний ресурс двигуна знижується орієнтовно з 15 до 8 років. З ПЧ (плавний пуск, обмежений струм) ресурс повертається до 15 років і більше.

Вартість двигуна (+ монтаж): AIR112M4 ~ 12000 + монтаж 4000 = 16000 грн

Ануалізована вартість ПП: $16000 / 8 = 2000$ грн/рік

Ануалізована вартість ПЧ: $16000 / 15 = 1067$ грн/рік

Економія на ресурсі двигуна = $2000 - 1067 = 933$ грн/рік

Економія від збільшення ресурсу двигуна: 933 грн/рік.

Таблиця 4.4 - Зведена таблиця річних операційних витрат.

Стаття витрат	ПП, грн/рік	ПЧ, грн/рік	Економія, грн/рік	Частка в економії
Електроенергія	323 430	225 938	97 493	73,9%
Усунення засмічень (Anti-Jam)	30 600	2 550	28 050	21,3%
Технічне обслуговування	18 000	13 000	5 000	3,8%
Ануалізована заміна двигуна	2 000	1 067	933	0,7%
Власні витрати ПЧ (амортизація 10 р.)	0	4 800	-4 800	-
РАЗОМ операційні	374 030	247 355	126 675	100%

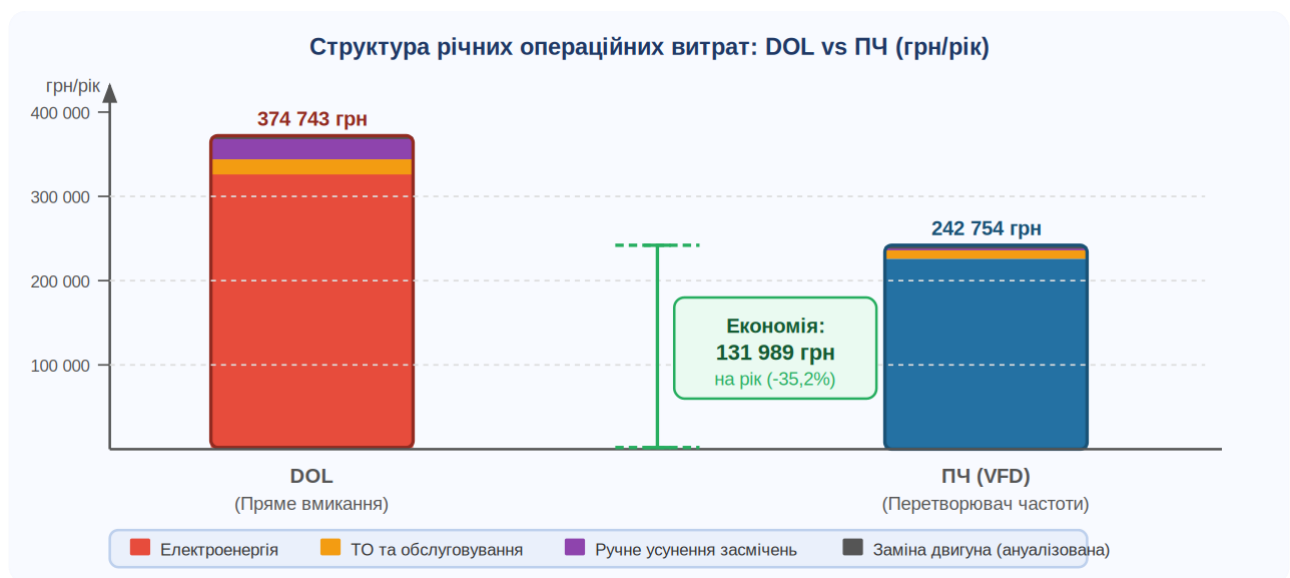


Рис. 4.2 – Структура річних операційних витрат: ПП vs ПЧ. Загальна річна економія 126 675 грн (-33,9%)

4.4 Інвестиційні витрати на впровадження ПЧ.

До інвестиційних витрат включаються: вартість самого ПЧ, супутнє обладнання (фільтри, кабелі, автомат), монтаж і налаштування. Не включаються витрати на заміну двигуна - він залишається той самий AIP132M4.

Таблиця 4.5 – Витрати на проведення модернізації з впровадження ПЧ.

Позиція	Тип/модель	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Перетворювач частоти	ABB ACS580-01-025A-4, 11 кВт, IP55	1 шт	32 000	32 000
Вхідний ЕМС-фільтр	ABB ACF430 (клас C2, 11 кВт)	1 шт	2 500	2 500
Вихідний dU/dt-фільтр	Schaffner FN5020, 16A	1 шт	2 000	2 000
Автоматичний вимикач	BA47-63 / 25A тип D, 3ф	1 шт	850	850

Позиція	Тип/модель	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Кабель двигуна (екранований)	YSLY-JZ 4×2.5 мм², 20 м	20 м	95 грн/м	1 900
Металева труба та кабельні вводи	Комплект	-	750	750
Монтаж у шафі/на панелі	Слюсарно-електричні роботи	16 год	450 грн/год	7 200
Налаштування та пуско- наладка	Програмування ПЧ, Auto-tuning двигуна	8 год	450 грн/год	3 600
Технічна документація	Схема, протокол налаштувань	-	1 200	1 200
РАЗОМ інвестиції				52 000 грн

Варіант економії: при самостійному монтажі кваліфікованим електриком підприємства загальні інвестиції можна знизити до ~38 000–42 000 грн (без вартості виробничого годинника). Для консервативного розрахунку приймаємо $I = 52\,000$ грн.

Загальні інвестиції становлять: $I = 52\,000$ грн (консервативна оцінка)

4.5 Розрахунок терміну окупності.

Простий термін окупності - найпоширеніший і найпростіший показник, що показує, за скільки років сумарна економія покриє початкові інвестиції без урахування вартості грошей у часі:

$$PP = I / Sp_{\text{іч}} = 52\,000 / 131\,676 = 0,39 \text{ року} = 4,8 \text{ місяця}$$

де $Sp_{іч} = 97\,493$ (електроенергія) + $28\,050$ (Anti-Jam) + $5\,000$ (ТО) + 933 (двигун) = $131\,476$ грн/рік - загальна річна економія (без амортизації ПЧ).

Простий термін окупності: 4,8 місяця - виключно короткий завдяки комплексній економії

Дисконтований термін окупності враховує вартість грошей у часі при ставці дисконтування $r = 15\%$ річних (прийнято для умов України з урахуванням інфляції та альтернативної вартості капіталу):

$$DPP: \sum_{y=1}^N Sp_{іч} / (1+r)^y \geq I$$

$$\text{Рік 1: } 131\,676 / 1,15 = 114\,501 \text{ грн} > 52\,000 \text{ грн} \rightarrow DPP = 1 \text{ рік}$$

Вже протягом першого року дисконтована економія ($114\,501$ грн) значно перевищує повні інвестиції ($52\,000$ грн). Це означає, що навіть з урахуванням знецінення грошей проект повністю окупається менш ніж за 1 рік.

Дисконтований термін окупності: менше 1 року при $r = 15\%$

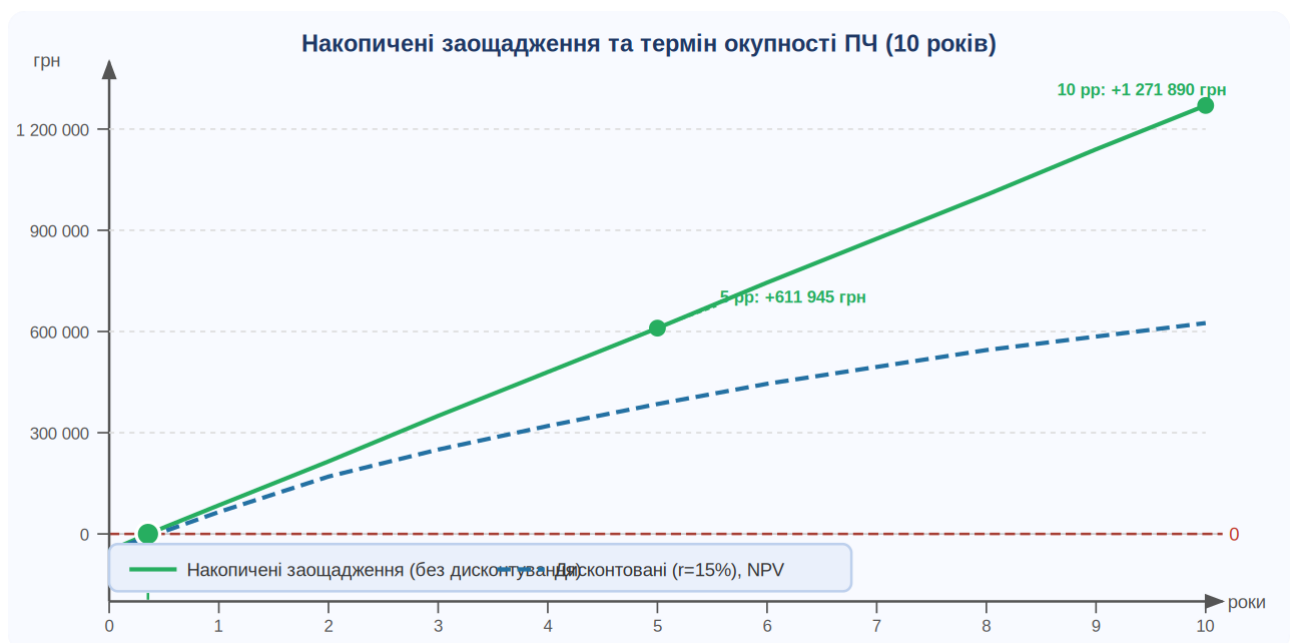


Рис. 4.3 – Накопичені заощадження (грн) за 10 років: проста крива (суцільна) та дисконтована NPV (пунктир). Точка беззбитковості настає через 4,8 місяця.

4.6 Нефінансові переваги впровадження ПЧ.

Окрім прямої фінансової вигоди, впровадження ПЧ забезпечує ряд важливих нефінансових переваг, що підвищують надійність і безпеку системи (табл. 4.6):

Таблиця 4.6 – Основні нефінансові переваги застосування ПЧ.

Перевага	Механізм	Ефект
Зниження аварійності насосної станції	ПЧ діагностує перевищення струму, витік через ущільнення (датчик вологості), перегрів (термістор) до виходу з ладу	Попередження аварій замість ліквідації наслідків
Скорочення простоїв	Anti-Jam автоматично усуває 92% засмічень без участі персоналу	Скорочення незапланованих зупинок з 24 до 2 на рік
Гідравлічні удари відсутні	Плавний розгін і гальмування виключає гідравлічні удари у трубопроводі	Збільшення строку служби трубопроводу та запірної арматури
Зниження шуму	Плавна робота на оптимальній швидкості знижує рівень шуму на 3–8 дБА	Покращення умов праці і відповідність санітарним нормам
Моніторинг та звітність	ПЧ через Modbus/SCADA передає дані про витрату, напір, споживану потужність, наробіток	Можливість предиктивного ТО, звітування перед управляючою організацією
Відповідність ESG/EnMS	Скорочення споживання ел/е на 30% = скорочення CO ₂ -викидів	~6,5 т CO ₂ /рік (кф. 0,5 кг CO ₂ /кВт·год · 12 999 кВт·год)

Таблиця 4.7 – Зведений фінансовий результат.

Показник	Результат
Інвестиції	52 000 грн (ПЧ + монтаж + фільтри)
Річна економія електроенергії	97 493 грн (12 999 кВт·год, -30,1%)
Річна економія на ТО	5 000 грн
Річна економія Anti-Jam	28 050 грн (22 рази/рік по 1 275 грн)
Річна економія ресурсу двигуна	933 грн
ЗАГАЛЬНА РІЧНА ЕКОНОМІЯ	131 476 грн/рік
Простий термін окупності	4,8 місяця
NPV за 10 років (r=15%)	608 974 грн
IRR	~ 253%
Накоп. заощадження за 5 р.	605 380 грн
Накоп. заощадження за 10 р.	1 262 760 грн

Впровадження частотного перетворювача ABB ACS580-01-025A-4 (11 кВт) для управління двигуном AIP132M4 (7,5 кВт) мацераторного насоса є економічно надзвичайно вигідним при тарифі 7,5 грн/кВт·год. Термін окупності 4,8 місяця - один із найкоротших серед заходів з енергозбереження в інженерних системах будівель. Загальна накопичена економія за 10 років перевищує інвестиції у 24 рази. NPV = 608 974 грн при ставці дисконтування 15%. IRR ~ 253% у 14–17 разів перевищує альтернативні фінансові інструменти. Проект беззбитковий при будь-якому реалістичному тарифі, навіть без врахування економії електроенергії. Рекомендується до впровадження без додаткових умов.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗБЕКИ

5.1 Нормативна база та загальні вимоги.

Охорона праці при монтажі та експлуатації електроприводів насосів для стічних вод регулюється комплексом законодавчих і нормативних актів. Дотримання їх вимог є обов'язковим і несе юридичну відповідальність для роботодавця та посадових осіб.

Таблиця 5.1 – Перелік основних НПА та їх застосування.

Нормативний документ	Сфера застосування	Ключові вимоги
Закон України «Про охорону праці» № 2694-ХІІ	Загальні засади ОП	Права та обов'язки роботодавця, нещасні випадки, фінансування ОП
НПАОП 0.00-1.21-98 (ПУЕ)	Влаштування електроустановок	Класи приміщень, захисні провідники, вимоги до кабелів
НПАОП 0.00-1.29-99 (ПТЕЕС)	Технічна експлуатація ел. установок	Порядок ТО, ремонту, допуску до роботи в ел. установках
НПАОП 0.00-5.01-07	Правила безпеки з нарядом-допуском	Система нарядів, допуск до небезпечних робіт
ДСН 3.3.6.042-99	Санітарні норми мікроклімату	Допустимі параметри у виробничих приміщеннях
ДСТУ EN 60529	Ступені захисту (IP)	Вибір обладнання за ступенем захисту IP для вологих зон
ДСТУ EN 61340	Захист від статичної електрики	Вимоги до заземлення та антистатичного ЗІЗ
ATEX Directive 2014/34/EU	Вибухонебезпечні зони	Вибір обладнання Ex для зон 1, 2, 21, 22

Нормативний документ	Сфера застосування	Ключові вимоги
НПАОП 45.22-1.01-12	Будівництво - охорона праці	Монтажні роботи, роботи на висоті, земляні роботи
ДБН В.2.5-75:2013	Каналізація будівель	Вимоги до насосних установок в будівлях

5.2 Ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Роботи з монтажу та обслуговування електроприводів насосів для стічних вод характеризуються поєднанням кількох груп небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), що посилюють один одного.

Електрична безпека. Ураження електричним струмом є основною причиною нещасних випадків зі смертельним наслідком при роботі з електроустановками. Специфіка мацераторного насосу із частотним перетворювачем:

Напруга DC-ланки ПЧ (540 В) зберігається у конденсаторах до 5 хвилин після вимкнення живлення. Торкання до клем U/V/W та DC+ / DC- небезпечно навіть після вимкнення автомата.

- Мережева напруга 380 В (трифазна) - основне джерело ураження при монтажі та ТО
- ПЧ генерує вищі гармоніки напруги та струму - навіть «виміряне» $\Omega\Omega$ нулем не гарантує безпеку без індикатора напруги
- Кабелі двигуна під напругою ПЧ можуть мати паразитні ємнісні струми через ШІМ-комутацію - важливо для довгих кабелів (>50 м)
- Занурювальні насоси: поєднання електрики і води - найвищий клас електробезпеки (мокрі умови)
- Статична електрика при розряді конденсаторів ПЧ - небезпека опіків та рефлекторного падіння

Механічна небезпека. Різальний вузол мацераторного насоса - надзвичайно небезпечний механічний пристрій. Ротор з ножами, що обертається зі швидкістю 1440 об/хв, завдає травм, несумісних з життям, за лічені мілісекунди.

- Обертіві деталі: ротор двигуна, роторний ніж мацератора, вал насоса - небезпека захвату
- Затягування одягу, волосся, незахищених рук у рухомі частини
- Гідравлічний удар при раптовому пуску або зупинці насоса - розрив трубопроводу
- Падіння насосного агрегату при підйомі та монтажі (маса AIP112M4 - 65 кг, насос - до 80 кг)
- Вібрація при роботі несправного насоса - хронічна шкода здоров'ю оператора

Хімічна та біологічна небезпека. Стічні води містять патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, гельмінти), що спричиняють кишкові інфекції, гепатит А, лептоспіроз, сальмонельоз. Контакт зі стічними водами без засобів захисту категорично заборонений.

- H_2S (сірководень) - безбарвний газ із запахом тухлих яєць. ГДК р.з. = 10 мг/м³. При 100–200 мг/м³ - параліч нюху і миттєва несвідомість. Утворюється в каналізаційних колодязях при анаеробному розкладанні органіки
- CH_4 (метан) - вибухонебезпечний газ. НКМЗ = 5% (об'ємних). Нижча концентрація вибухонебезпечна при наявності іскри або відкритого вогню
- CO_2 (вуглекислий газ) - витісняє кисень. При концентрації >4% - задуха
- Органічні розчинники, мастила, мийні засоби у стічних водах - подразнення шкіри та слизових
- Аерозолі стічних вод при роботі мацератора - ризик інгаляційного зараження

Небезпека замкнених просторів. Каналізаційні колодязі, насосні шахти, збірні резервуари відносяться до замкнених просторів з обмеженим доступом (Confined Space), що потребують дозволу (Permit Required Confined Space за OSHA 29 CFR 1910.146 або НПАОП 0.00-5.01-07). Небезпечна комбінація факторів у замкненому просторі: дефіцит кисню + токсичні гази + ризик потрапляння стічних вод + обмежений шлях евакуації.

Таблиця 5.2 – Основні ризики при експлуатації мацераторних насосів.

Небезпечний фактор	Можливий наслідок	Рівень ризику	Обов'язкові заходи захисту
Ураження струмом 380В/540В	Смерть, важкі опіки	КРИТИЧНИЙ	ЛОТО, ЗІЗ діелект., перевірка напруги
Різальний ротор мацератора	Ампутація, смерть	КРИТИЧНИЙ	Механічне блокування перед роботою
H ₂ S у колодязі	Смерть за секунди	КРИТИЧНИЙ	Газоаналіз, СІЗОД, вентиляція, правило 3 осіб
CH ₄ у колодязі	Вибух, пожежа	КРИТИЧНИЙ	Газоаналіз, АТЕХ обладнання, виключення іскор
Падіння у шахту	Важка травма, смерть	ВИСОКИЙ	Огородження, страховий пояс, каска
Патогени стічних вод	Інфекційні захворювання	ВИСОКИЙ	ЗІЗ, гігієна, вакцинація персоналу
Гідравлічний удар	Розрив трубопроводу	СЕРЕДНІЙ	Плавний пуск ПЧ, зворотний клапан
Вібрація від насоса	Хронічна травма	СЕРЕДНІЙ	Антивібраційні опори, ЗІЗ рук
Шум від насоса	Приглухуватість	НИЗЬКИЙ	Беруші, шумоізоляція

5.3 Вимоги до персоналу та організація робіт.

Кваліфікаційні вимоги. До виконання робіт з монтажу та технічного обслуговування електроприводів насосів для стічних вод допускаються лише особи, що відповідають усім кваліфікаційним вимогам.

Таблиця 5.3 – Вимоги до персоналу при виконанні робіт.

Вид роботи	Мінімальна кваліфікація	Група з ел. безпеки	Додаткові вимоги
Монтаж кабелів та підключення ПЧ	Електромонтажник 4-5 р.	IV (до 1000В)	Допуск до роботи в ел. установках, ЛОТО-підготовка
Налаштування ПЧ (параметрування)	Електронщик / інженер	IV або V	Сертифікат АВВ або навчання виробника ПЧ
ТО двигуна та насоса	Слюсар 3-4 р. + Ел.монт.	III+IV	Інструктаж ЛОТО, ЗІЗ для роботи зі стоками
Роботи у каналізаційному колодязі	Бригада 3 особи мінімум	III (для спостерігача)	Газоаналіз, СІЗОД, наряд-допуск, правило 3 осіб
Аварійне відновлення	Черговий електрик	IV–V	Щорічне навчання, наявність аптечки, засобів зв'язку

Перед допуском до роботи кожен працівник повинен пройти: вступний інструктаж з ОП (реєструється у журналі); первинний інструктаж на робочому місці; стажування 2–14 змін під керівництвом досвідченого фахівця; перевірку знань з охорони праці та отримання відповідної групи з електробезпеки; інструктаж з пожежної безпеки. Повторний інструктаж - не рідше одного разу на 6 місяців.

Система нарядів-допусків. Роботи підвищеної небезпеки (робота в ел. установках під напругою вище 1000 В, у замкнених просторах, на висоті понад 1,3

м, зварювальні роботи) виконуються **ВИКЛЮЧНО** за нарядом-допуском встановленої форми. Наряд-допуск підписують: відповідальний керівник робіт (особа з групою V), допускаючий (особа з групою IV або V), виконавець (особа з групою III–V). Строк дії наряду - не більше 15 календарних днів.

Медичні вимоги. Усі працівники, що контактують зі стічними водами або працюють у замкнених просторах, підлягають: обов'язковому попередньому медичному огляду перед прийняттям на роботу; щорічному плановому медичному огляду; вакцинації проти гепатиту А та правця (відповідно до Наказу МОЗ України № 246); позаплановому огляду після отримання травми або хімічного опромінення. Особи з серцево-судинними захворюваннями, епілепсією, психічними розладами не допускаються до роботи в замкнених просторах та на висоті.

5.4 Вимоги безпеки при монтажі.

Підготовка до монтажу. Перед початком будь-яких монтажних робіт необхідно виконати комплекс організаційно-технічних заходів, що гарантують безпеку персоналу та збереження обладнання.

1. Отримати дозвільну документацію: наряд-допуск (для ел. установок), ППР (проект провадження робіт), технологічну карту монтажу.
2. Знеструмити та заблокувати (LOTO) всі суміжні електричні кола. Особлива увага: секції живлення, що можуть мати автономні джерела живлення (резервні генератори, ДБЖ).
3. Перевірити відсутність напруги на всіх фазах вхідного та вихідного кабелів індикатором напруги - не мультиметром! (Мультиметр не захищений від наведеної напруги та ємнісних зарядів ПЧ).
4. Забезпечити примусову вентиляцію приміщення насосної станції або колодязя протягом не менше 15 хвилин перед входом.
5. Виміряти газовий склад повітря у колодязі: O_2 (19,5–23,5%), H_2S (< 10 мг/м³), CH_4 ($< 10\%$ НКМЗ), CO (< 20 мг/м³).
6. Підготувати ЗІЗ для всіх учасників: діелектричні рукавички, окуляри, каску, гумові чоботи (для роботи у вологому середовищі).
7. Встановити огороження та попереджувальні знаки навколо зони робіт.

Монтаж електроприводу - конкретні вимоги безпеки. Монтаж силового кабелю двигуна:

- Використовувати виключно екранований кабель для підключення двигуна до ПЧ. Оплетка кабелю заземлюється на обох кінцях (ПЧ та двигун) для захисту від ЕМП.
- Мінімальний радіус вигину кабелю - $10 \times$ зовнішній діаметр. Різке перегинання пошкоджує ізоляцію.
- Кабель прокладається в металевій трубі або металолотку, заземленому по всій довжині. Не допускається спільне прокладання з сигнальними та контрольними кабелями у одному лотку.
- Кабельні вводи (кабельні сальники) у корпус двигуна IP68 і ПЧ IP55 виконуються з дотриманням вимог виробника - неправильний монтаж знижує клас захисту.

Монтаж частотного перетворювача:

- ПЧ встановлюється вертикально на DIN-рейку або на стіну в закритому шафі. Мінімальний зазор зверху та знизу - 100 мм для циркуляції охолоджувального повітря.
- Температурний діапазон навколишнього середовища: від -10 до $+40^{\circ}\text{C}$ при 100% навантаженні. При $40-50^{\circ}\text{C}$ необхідне зниження навантаження (derating).
- Захисне заземлення PE: мінімальний переріз провідника 10 мм^2 для ПЧ 11 кВт (ГОСТ/ІЕС). Заземлення до загальної шини PE щита управління.

Забороняється вмикати ПЧ з непідключеним двигуном або з розривом в PE-провіднику. Це може призвести до виходу з ладу ПЧ та ураження струмом персоналу.

Монтаж занурювального насоса у вологому колодязі є операцією підвищеної небезпеки і виконується за нарядом-допуском бригадою не менше трьох осіб.



Рис. 5.1 – Схема безпечного виконання робіт у каналізаційному колодязі: обов'язковий склад бригади, ЗІЗ, вентиляція, контроль газового середовища

- Перед спуском у колодязь: вимірювання газів, примусова вентиляція 15 хв, перевірка справності рятувального спорядження, зв'язку.
- Спуск здійснюється в ізолюючому протигазі (СІЗОД) або шланговому апараті, зі страхувальним поясом і тросом. Страхувальник постійно знаходиться зовні у готовності підняти постраждалого.
- Насос підіймається та опускається за допомогою ланцюга підіймача або ручної таліки. Забороняється підіймати насос масою понад 25 кг без механічного пристрою. АІР112М4 + насос: маса ~145 кг - виключно механічний підйом.
- Кабель живлення насоса фіксується у кабельних затисках без натягнення. Не допускається навантаження на кабель при підйомі насоса - тільки за допомогою рятувального ланцюга.

5.5 Процедура LOTO - знеструмлення та блокування.

LOTO (Lockout / Tagout - заблокувати / позначити) - стандартна міжнародна процедура, що гарантує неможливість ненавмисного вмикання обладнання під час

технічного обслуговування або ремонту. Є обов'язковою вимогою OSHA 29 CFR 1910.147, а також прийнята в Україні відповідно до НПАОП 0.00-5.01-07.

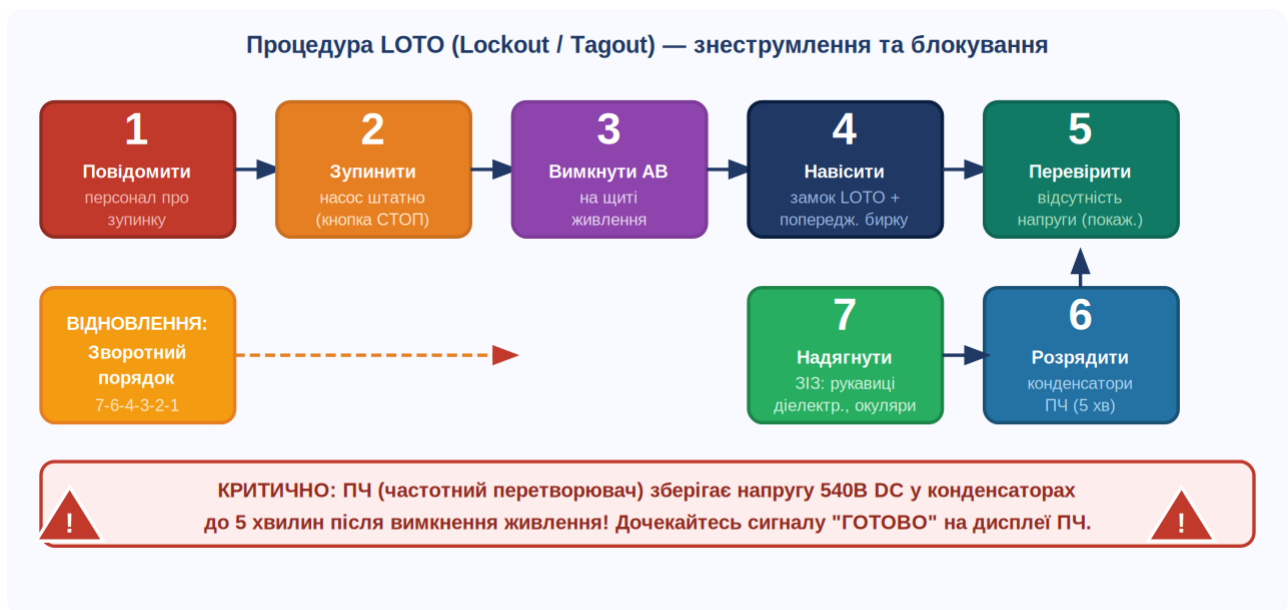


Рис. 5.2 – Послідовність процедури LOTO: 6 кроків знеструмлення та розрядження конденсаторів ПЧ. Відновлення - у зворотному порядку.

Особливості LOTO для електроприводу з ПЧ. Стандартна LOTO не враховує наявності конденсаторів у DC-ланці ПЧ. Для ACS580-11 кВт час розряду конденсаторів - до 5 хвилин. Протягом цього часу напруга між клемми DC+ та DC- може досягати 540 В постійного струму навіть при вимкненому мережевому автоматі. Тому процедура LOTO для ПЧ доповнюється обов'язковим кроком 6: очікування індикації 'ГОТОВО' на дисплеї ПЧ або вимірювання напруги на DC-шині повірним пробником з проведенням вимірювань у діелектричних рукавичках.

Таблиця 5.4 – Послідовність виконання процедури LOTO.

Крок	Дія	Відповідальний	Документування
1	Попередити всіх членів бригади та суміжний персонал про планову зупинку насоса	Відповідальний керівник	Запис у журналі оперативних переключень

Крок	Дія	Відповідальний	Документування
2	Зупинити насос штатним способом (кнопка СТОП або команда через НМІ)	Оператор	-
3	Переконатися, що насос повністю зупинився (нульові показники на дисплеї ПЧ)	Оператор	-
4	Вимкнути автоматичний вимикач живлення ПЧ на щиті управління	Електрик IV гр.	-
5	Навісити особистий замок LOTO на рукоятку АВ + прикріпити бирку з ПІБ, датою та метою блокування	Електрик IV гр.	Запис у журналі LOTO
6	Зачекати не менше 5 хвилин або до зникнення індикації живлення на дисплеї ПЧ	Усі члени бригади	Обов'язково!
7	Перевірити відсутність напруги на клеммах R/S/T та U/V/W повірним індикатором напруги	Електрик IV гр.	Запис результату вимірювання
8	Надягнути ЗІЗ (діелектричні рукавички, окуляри, засоби захисту від стоків)	Усі виконавці	-
9	Виконати заплановані роботи	Бригада	Акт виконаних робіт
10	ВІДНОВЛЕННЯ: прибрати інструменти, надягнути захисні кожухи, зняти замки LOTO у зворотному порядку	Відповідальний	Запис у журналі LOTO

Зняти замок LOTO має право ВИКЛЮЧНО та особа, яка його навісила. Якщо ця особа відсутня - застосовується спеціальна процедура аварійного зняття блокування за письмовим наказом відповідального керівника.

5.6 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ).

Вибір та застосування ЗІЗ регламентується ДСТУ EN 340, ДСТУ EN 388, ДСТУ EN 60903 та іншими стандартами. Для робіт з електроприводами насосів для стічних вод обов'язковий мінімальний комплект ЗІЗ визначається видом роботи.

Таблиця 5.5 – Основні засоби індивідуального захисту.

ЗІЗ	Стандарт	Вид роботи	Вимоги та клас захисту
Діелектричні рукавички	ДСТУ EN 60903	Ел. роботи до 1000В	Клас 00 (500В) або клас 0 (1000В). Перевірка перед кожним використанням
Захисна каска	ДСТУ EN 397	Усі роботи у колодязі, монтаж	Клас Е (електрична ізоляція до 440В). Мінімум клас N
Захисні окуляри	ДСТУ EN 166	Всі роботи зі стоками, монтаж	Рівень захисту 2С, антибризкова конструкція
Гумові чоботи	ДСТУ EN 20345	Робота у вологому середовищі	Клас безпеки S5, антипрокольна підошва, нефтоустойкі
Захисний комбінезон	ДСТУ EN 14126	Контакт зі стічними водами	Захист від інфекції, клас 3 (аерозоль). Одноразовий або дезінфекція
СІЗОД (протигаз)	ДСТУ EN 136	Робота у замкненому просторі	Ізольуючий (шланговий) або дихальний апарат. НЕ фільтруючий!

ЗІЗ	Стандарт	Вид роботи	Вимоги та клас захисту
Страхувальний пояс	ДСТУ EN 361	Робота у колодязі, на висоті	Повний страхувальний пояс (harness) + рятувальний трос
Газоаналізатор	ДСТУ EN 60079-29	Замкнені простори	Безперервне вимірювання O ₂ , H ₂ S, CH ₄ , CO
Діелектричний килимок	ДСТУ EN 61111	Ел. роботи в щитових	Клас 0 (до 1000В). Перевірка 1 раз на рік
Сигнальний жилет	ДСТУ EN 471	Усі роботи на об'єкті	Клас 2 (підвищена видимість)

ЗІЗ, що прострочили термін планової перевірки або мають видимі пошкодження, забороняється використовувати. Діелектричні рукавички перевіряються шляхом здування (надування повітрям) перед кожним застосуванням.

5.7 Вимоги безпеки при експлуатації.

Щоденний (оперативний) контроль. Черговий персонал насосної станції зобов'язаний виконувати щоденний обхід та перевірку відповідно до затвердженого регламенту. Контрольний обхід виконується в ЗІЗ (каска, чоботи, окуляри) і фіксується у журналі оперативних переключень.

- Перевірка показань приладів ПЧ: споживаний струм, напруга, температура двигуна, кількість спрацювань Anti-Jam за добу
- Огляд місць можливих витоків мастила та стічних вод (фланцеві з'єднання, торцеве ущільнення)
- Прослуховування характеру шуму та вібрацій насоса (підвищений шум - ознака кавітації або зносу підшипників)
- Перевірка рівня в приймальному резервуарі та правильності спрацювання поплавкових датчиків
- Перевірка цілісності кабельного вводу та заземлювального провідника

- Контроль температури в шафі управління - не вище +40°C
- Перевірка і запис показань лічильника електроенергії

7.2. Заборонені дії при експлуатації

НЕБЕЗПЕКА: КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:

- Відкривати кришку корпусу ПЧ або знімати захисні кожухи при ввімкненому живленні
- Торкатися різального вузла мацератора без механічного блокування ротора навіть при знеструмленому двигуні (залишковий рух після зупинки ПЧ)
- Заглядати у вхідний патрубок насоса при підведеному або відключеному живленні без механічного стопора ротора
- Запускати насос у режимі, відмінному від штатного, без погодження з відповідальним інженером
- Виконувати технічне обслуговування без наряду-допуску та процедури LOTO
- Спускатися у каналізаційний колодязь поодиноці
- Використовувати відкритий вогонь або утворювати іскри в зоні каналізаційного колодязя
- Скидати стічні води повз насосну станцію без належної очистки
- Залишати відкритими кришки колодязів без огорожень та сигнальних конусів

Дії при спрацюванні захисту ПЧ. Частотний перетворювач ACS580 фіксує аварійні ситуації у журналі подій (Fault Log) і виводить код помилки на дисплей. Перед скиданням помилки необхідно з'ясувати та усунути її причину - повторний запуск без усунення несправності є небезпечним.

Таблиця 5.6 – Дії оператора при помилках ПЧ.

Код помилки ACS580	Причина	Небезпека	Дії оператора
F0001 Overcurrent	- Коротке замикання або	ВИСОКА - можл. КЗ	- LOTO, перевірка двигуна та кабелів, перевірка ротора мацератора

Код помилки ACS580	Причина	Небезпека	Дії оператора
	заклинювання ротора		
F0002 - Overvoltage DC	Рекуперація > 120% UDC	ВИСОКА перенапр.	- Перевірити наявність гальмівного резистора, рекуп. режим
F0003 - Undervoltage	Провал напруги мережі	СЕРЕДНЯ	Перевірити автомат та якість мережі
F0004 - Overtemperature	Перегрів двигуна або ПЧ	ВИСОКА пожежа	- LOTO, перевірка вентиляції, температури оточення, ізоляції
F0006 - Motor stall	Заклинювання ротора мацератора	ВИСОКА	Anti-Jam реверс; якщо не допомогло - LOTO, ручне очищення
F0015 - Short circuit	КЗ у кабелі двигуна	КРИТИЧНА	LOTO, мегаомметр кабелів, перевірка обмоток двигуна
F0007 - Earth fault	Пошкодження ізоляції, витік на землю	КРИТИЧНА - ураж. струм	LOTO, мегаомметр кабелів та двигуна, ревзія гермоввоів
F0009 - Motor overload	Тривале перевантаження (тепловий захист)	ВИСОКА	LOTO, причина перевантаження (засмічення, нагрів середовища)
W0020 - Thermistor	Перегрів обмоток (РТС спрацював)	ВИСОКА	Зупинка, охолодження, перевірка умов експлуатації

5.8 Пожежна безпека, вибухонебезпека, та заходи з виробничої санітарії.

Простори, де можливе утворення вибухонебезпечної газоповітряної суміші (метан CH₄ від стічних вод), класифікуються відповідно до ДСТУ EN 60079-10 і директиви АТЕХ 2014/34/EU. Насосна станція стічних вод типово включає:

- Зона 1 - безпосередньо каналізаційний колодязь (регулярна наявність вибухонебезпечного середовища): для використання обладнання Ех категорій II 2G або II 2D
- Зона 2 - приміщення насосної станції, що примикає до шахти (рідкісна, але можлива наявність): обладнання Ех категорії II 3G
- Зона без класифікації - зовнішній периметр, де газ розсіюється природно: стандартне обладнання

В зонах 1 і 2 ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ використовувати: звичайні переносні світильники та ліхтарики (тільки Ех), телефони та рації без маркування АТЕХ, інструменти, що утворюють іскри (зварювання, болгарка), пальне для обігріву.

Кабелі в насосних станціях прокладаються кабелями з оболонкою, що не поширює горіння (НГ, нг-LS, нг-HF). Шафа управління з ПЧ забезпечується: автоматичним вогнегасником (порошковим або вуглекислотним) або повідомлювачем пожежі; вентиляцією для відведення тепла від ПЧ; зовнішнім аварійним вимикачем (кнопка «Аварійна зупинка» червоного кольору, розміщена поза шафою). Забороняється зберігати горючі матеріали (ганчірки, мастила, розчинники) у шафі управління або поряд з нею.

- Мінімальна вогнестійкість шафи управління: EI 30 (для приміщень з підвищеним ризиком пожежі)
- Встановити первинні засоби пожежегасіння: вогнегасник ВП-5 (порошковий) або ВВК-5 (вуглекислотний) - для електроустановок до 1000 В
- Вуглекислотний вогнегасник безпечніший для електрообладнання (не пошкоджує ПЧ та двигун)
- Мінімальна відстань від вогнегасника до шафи управління - не більше 15 м

Захист від впливу стічних вод. Стічні води містять широкий спектр патогенних мікроорганізмів та хімічних речовин. Дотримання санітарно-гігієнічних вимог є таким самим обов'язковим, як і дотримання електробезпеки.

- Забороняється приймати їжу, пити, курити на робочому місці у приміщенні насосної станції та поряд із каналізаційними колодязями

- Після будь-якого контакту зі стічними водами або поверхнями, що могли бути забруднені, - обов'язкове миття рук із засобом для дезінфекції шкіри
- Рани та порізи на руках: перев'язати водонепроникною пов'язкою, надягнути захисні рукавички, після роботи - обробити антисептиком і звернутись до медпункту
- Забруднений одяг знімається і поміщається у спеціальний пакет для дезінфекції у відведеному місці - окремо від особистого одягу
- Душова кімната обов'язкова на підприємствах, де персонал регулярно контактує зі стічними водами (ДСП 173-96)

Висновки розділу 5.

Монтаж та експлуатація електроприводів насосів для стічних вод відносяться до робіт з підвищеною небезпекою через унікальне поєднання ризиків: електрична напруга (включаючи DC-ланку ПЧ 540В), небезпечний різальний вузол мацератора, токсичні гази (H_2S , CH_4) у каналізаційних колодязях та патогени стічних вод. Безпека забезпечується обов'язковим застосуванням системи ЛОТО, процедури наряду-допуску, правила трьох осіб при роботі у замкненому просторі, повного комплекту ЗІЗ та газоаналізу середовища. Кваліфікований персонал, регулярні інструктажі, правильно оформлена документація та відповідне технічне обслуговування ПЧ і двигуна є гарантією безпечної та ефективної роботи насосної установки протягом усього строку служби.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані основні галузі використання та типові технічні рішення електроприводів мацераторних насосів, а також сформулювати основні вимоги до електроприводу, системи автоматичного керування обраного виду насосу.
2. Був проведений розрахунок тягових зусиль електроприводу, а також розрахунок потужності електродвигуна. Завдяки цьому здійснили вибір двигуна необхідної потужності. Було обрано асинхронний двигун серії AIP132M4 та визначені його основні параметри. Це дало змогу обрати перетворювач частоти необхідної потужності та струму ABB ACS310-03E-34A1.
3. Розроблена математична модель непрямого векторного керування АД. Розраховано параметри схеми заміщення обраного асинхронного двигуна серії AIP132M4.
4. Проведені розрахунки, необхідні для дослідження динамічних та статичних режимів електромеханічної системи шляхом моделювання.
5. Отримані висновки свідчать про високі показники якості розробленого електроприводу і його відповідність характеристикам, які були поставлені в проекті. Термін окупності складає 5 місяців.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 31606-2012 (міждержавний, прийнятий в Україні). Машины електричні обертові. Двигуни асинхронні потужністю від 0,12 до 400 кВт. Загальні технічні умови. — Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2014.
2. ДСТУ ГОСТ 183:2009. Машины електричні обертові. Загальні технічні умови. — Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
3. ДСТУ ІЕС 60034-1:2015. Машины електричні обертові. Частина 1. Номінальні значення показників та робочі характеристики. — Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2015.
4. ДСТУ ІЕС 60034-2-1:2017. Машины електричні обертові. Частина 2-1. Стандартні методи визначення втрат і коефіцієнта корисної дії за результатами випробувань. — Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2017.
5. ДСТУ EN 60034-30-1:2017. Машины електричні обертові. Частина 30-1. Класи енергоефективності двигунів змінного струму, що працюють від мережі (код ІЕ). — Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2017.
6. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Соцков О. О. Моделювання електромеханічних систем. — Кременчук: КДПУ, 2001. — 376 с.
7. Пересада С. М., Ковбаса С. М. Векторне керування асинхронними двигунами. — Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2012. — 168 с.
8. Радимов С. М., Мазуренко Л. І. Електричні машини: теорія, проектування, дослідження. — Київ: Кафедра, 2014. — 412 с.
9. Чиженко І. М., Сенько В. І., Ямненко Ю. С. Основи перетворювальної техніки. — Київ: Вища школа, 2003. — 430 с.
10. Шавьолкін О. О. Електроніка і перетворювальна техніка. — Київ: Кондор, 2011. — 405 с.
11. Бессонов Л. О. Теоретичні основи електротехніки: Електричні кола. 4-те вид., перероб. — Київ: Либідь, 1996. — 320 с.
12. Кулик Ю. О., Шевчук С. П. Електричні машини: підручник для студентів електротехнічних спеціальностей. — Вінниця: ВНТУ, 2013. — 244 с.

13. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. — Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. — 711 p.
14. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. — Oxford: Oxford University Press, 1998. — 729 p.
15. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. 5th ed. — New York: McGraw-Hill, 2012. — 752 p.
16. ПрАТ «Електромотор» (м. Полтава, Україна). Електродвигун АІР132М4: каталог технічних характеристик — потужність 11 кВт, частота обертання 1500 об/хв, номінальний струм, ККД, cosφ, маса, габаритні розміри. [Дата звернення: червень 2026]. URL: elmotor.com.ua
17. ABB Ltd. ACS580 Standard Drives — технічна документація: каталог продукції, специфікації потужності, струму, ступенів захисту та функцій керування частотних перетворювачів серії ACS580 для насосних і вентиляторних застосувань. [Дата звернення: червень 2026]. URL: new.abb.com/drives