

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



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**на тему «Модернізація електроприводу плунжерного насосу для
перекачування технічних рідин»**

Здобувач: Єремчук М. М.

4 курсу АЕМз-40 групи

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

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.06.2026р., протокол № 8.

В.о. завідувача кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

Одеса – 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра: автоматизації технологічних електромеханічних і
робототехнічних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 141 – Електрична інженерія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри ЕтаМ
д.т.н, проф. Петро Осадчук

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Здобувача Єремчука Микити Миколайовича

1. Тема роботи: «Модернізація електроприводу плунжерного насоса для перекачування технічних рідин».

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

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

Строк подання студентом роботи 12.06.2026р.

3. Вихідні дані до роботи: Модернізація електроприводу плунжерного насоса для перекачування технічних рідин.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: розгляд конструктивних особливостей механізму, розрахунок потужності та вибір електродвигуна, частотного перетворювача для нього, системи управління, розробка керування електроприводом плунжерного насоса, що відповідає сучасним вимогам.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації: 1. Принцип дії класичного плунжерного насоса. 2. Класифікація насосів. 3. Приклади різновиду насосів. 4. Схема триплунжерного насоса високого тиску 1.3Т-2/100Д2-А35. 5. Технічні характеристики вибраного триплунжерного насоса високого тиску 6. Кінематична схема електроприводу триплунжерного насоса. 7. Силові та кінематичні розрахунки електроприводу плунжерного насоса. 8. Природна механічна характеристика двигуна. 9. Основні технічні характеристики електродвигуна АІР250М4. 10. Паспортні дані обраного 2-ступінчастого циліндричного редуктора Ц2У-250. 11. Паспортні дані обраного перетворювача частоти фірми Schneider elernhic ATV650 90кВт. 12. Електрична схема трифазного живлення і схема блока управління частотного перетворювача ALTIVAR PROCESS ATV650. 13. Т-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна плунжерного насоса. 15. Схема імітаційної моделі електроприводу плунжерного насоса у режимі прямого пуску без частотного перетворювача. 16. Графіки зміни струму статора та електромагнітного моменту. 17. Схема імітаційної моделі електропривода плунжерного насоса зі використанням частотного перетворювача за векторним законом. 18. Графіки зміни швидкості

електроприводу плунжерного насоса при використанні частотного перетворювача за векторним законам різними частотами 40 гц, 25 гц, 15 гц 5 гц.

6. Консультанти розділів дипломної роботи

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

7. Дата видачі завдання: «01» лютого 2026р.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Завдання до виконання прийняв _____ Єремчук М. М.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Актуальність теми. Об'єкт та предмет дослідження. Мета роботи. Завдання дослідження. Методи дослідження. Наукова новизна отриманих результатів	10.02.2025	
2	Розрахунок параметрів триплунжерного насоса високого тиску 1.3Т-2/100Д2-А35. Попередній розрахунок потужності електричного двигуна і вибір електроприводу. Розрахунок механічних характеристик. Кінематична схема приводу. Розрахунок динамічного режиму електроприводу.	25.02.2025	
3	Дослідження процесів при частотному регулюванні. Прямий пуск електродвигуна. Моделювання динамічних режимів електроприводу у середовищі MATLAB/ Simulink. Використання методів імітаційного моделювання.	18.03.2025	
3	Техніко-економічний розрахунок	30.04.2026	
4	Охорона праці	25.05.2026	
5	Перевірка роботи на доброчинність	12.06.2026	
6	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи магістра	15.06.2026	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	22.12.2026	

Здобувач-дипломник _____ Єремчук М.М.

Керівник роботи _____ Шейда Голбад К.А.

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

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної

Здобувач-дипломник _____ Єремчук М.М.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації електроприводу плунжерного насоса для перекачування технічної рідини з метою підвищення енергоефективності, надійності та якості регулювання технологічного процесу. У роботі проаналізовано існуючі конструкції плунжерних насосів та систем їх електроприводу, визначено основні недоліки нерегульованих приводів. Обґрунтовано доцільність застосування сучасного регульованого електроприводу на базі частотного перетворювача. Розроблено математичну модель електроприводу плунжерного насоса та виконано її дослідження з використанням середовища MATLAB і пакета Simulink. Проведено імітаційне моделювання динамічних режимів роботи. У результаті дослідження встановлено, що застосування частотного регулювання дозволяє зменшити пускові струми, знизити енергоспоживання, зменшити механічні навантаження та підвищити стабільність роботи насосної установки. Розроблено практичні рекомендації щодо модернізації електроприводу та впровадження енергоефективної системи керування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: плунжерний насос, електропривод, частотний перетворювач, моделювання, енергоефективність, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

The диплом thesis is devoted to the modernization of the electric drive of a plunger pump for pumping technical fluids in order to improve energy efficiency, reliability, and the quality of process control. The work analyzes existing designs of plunger pumps and their electric drive systems and identifies the main disadvantages of non-regulated drives. The feasibility of using a modern variable-speed electric drive based on a frequency converter is substantiated. A mathematical model of the plunger pump electric drive has been developed and investigated using MATLAB and the Simulink package. Simulation modeling of dynamic operating modes has been carried out. The results show that the use of variable frequency control reduces starting currents, decreases energy consumption, lowers mechanical loads, and improves the operational stability of the pumping unit. Practical recommendations for the modernization of the electric drive and the implementation of an energy-efficient control system have been developed.

KEYWORDS: plunger pump, electric drive, frequency converter, modeling, energy efficiency, MATLAB/Simulink.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	9
1.1 Класифікація та області застосування плунжерних насосів.....	9
1.2. Конструкція та принцип дії плунжерних насосів	12
1.3. Основні технічні характеристики та режими роботи плунжерного насоса 1.3 Т-2/100 Д2-А3	16
1.4 Особливості навантажувальних характеристик триплунжерного насоса в системі електропривода	21
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	25
2.1 Розрахунок потужності електроприводу плунжерного насоса	25
2.2 Вибір редуктора	28
2.3 Вибір перетворювача частоти	31
2.4 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода.....	36
2.4.1 Розрахунок механічної характеристики двигуна	37
2.5 Параметри схеми заміщення.....	39
2.6 Побудова природної механічної характеристики двигуна	42
2.7 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна	44
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ	48
3.1 Математичне моделювання	48
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК.....	54
4.1 Визначення капітальних витрат	54
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	59
5.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори.....	60
5.3 Вимоги безпеки перед початком роботи.....	61
5.4 Вимоги безпеки під час роботи	61
5.5 Вимоги безпеки після закінчення роботи.....	62
5.6 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	62
5.7 Пожежна безпека	62

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2								
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація електроприводу плунжерного насоса для перекачування технічних рідин				Літера	Аркуш	Аркушів		
Розробив	Єремчук М. М.								у		5	69	
Керівник	Шейда Голбад К.А.												
Реценз.													
Консульт.													
									ОНТУ Гр, АЕМз-40				

5.8 Електробезпека	63
5.9 Виробнича санітарія	65
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	68

ВСТУП

Плунжерні насоси широко використовуються для перекачування технічних рідин таких як нафтопродукти, хімічні розчини, технічна вода, емульсії та інші середовища з підвищеною в'язкістю, зокрема у системах, де необхідне забезпечення високого тиску та точного дозування та мають важливе значення для промисловості завдяки своїй здатності працювати з високими тисками та забезпечувати точну подачу рідин. Ефективність і надійність їх роботи значною мірою визначається характеристиками електроприводу, який забезпечує необхідні режими функціонування насосного обладнання. Традиційні системи електроприводу часто характеризуються низькою гнучкістю керування, підвищеними втратами електроенергії та обмеженими можливостями автоматизації. Це обумовлює необхідність їх удосконалення шляхом впровадження сучасних технічних рішень, зокрема використання частотно-регульованих електроприводів, мікропроцесорних систем керування та енергоощадних двигунів. У зв'язку з цим питання вдосконалення електроприводу плунжерних насосів набуває особливої актуальності. У сучасних умовах розвитку промисловості та зростання вимог до енергоефективності, надійності й автоматизації технологічних процесів особливої актуальності набуває модернізація електроприводів виробничого обладнання.

Актуальність теми зумовлена сучасними вимогами до енергоефективності, надійності та автоматизації виробничих процесів у промисловості. Впровадження регульованих електроприводів на базі частотних перетворювачів дозволяє забезпечити плавне регулювання продуктивності насоса відповідно до технологічних потреб, знизити пускові струми, мінімізувати гідравлічні удари та зменшити динамічні навантаження на елементи системи.

Об'єктом дослідження є плунжерний насос для перекачування технічних рідин.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Предмет дослідження - електропривод плунжерного насоса.

Методи дослідження. У роботі використано математичне та імітаційне моделювання електроприводу плунжерного насоса. Модель системи розроблена в середовищі MATLAB/Simulink, де змодельоване електродвигун, частотний перетворювач і навантаження насоса. Дослідження проведено методом комп'ютерного експерименту з аналізом перехідних процесів (пуск, зміна навантаження) та впливу регулювання швидкості. Результати оброблено із застосуванням чисельних методів і порівняльного аналізу. Крім того, використано порівняльний метод, який полягає у зіставленні техніко-економічних показників до і після модернізації, а також метод аналізу літературних джерел для обґрунтування вибору технічних рішень.

Наукова новизна та практична новизна полягає у розробці математичної моделі електроприводу плунжерного насоса з урахуванням змінного навантаження та особливостей гідравлічного процесу перекачування. Удосконалено підхід до дослідження динамічних режимів роботи приводу із застосуванням імітаційного моделювання в середовищі MATLAB та Simulink. Отримано нові залежності, що характеризують вплив регулювання частоти обертання на навантаження, енергоспоживання та стійкість роботи системи.

Розроблено рекомендацій щодо модернізації електроприводу плунжерного насоса із використанням частотного регулювання, що забезпечує зниження енергоспоживання, зменшення динамічних навантажень і підвищення надійності обладнання. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані при модернізації існуючих насосних установок та впровадженні енергоефективних систем керування на підприємствах.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Класифікація та області застосування плунжерних насосів

Плунжерний насос — це об'ємний гідравлічний агрегат, у якому переміщення рідини здійснюється за рахунок зворотно-поступального руху робочого органа — плунжера (поршня спеціальної конструкції) у циліндрі. За своєю конструкцією він має циліндричну форму, причому його довжина перевищує діаметр. Такі елементи широко застосовуються в гідравлічних машинах, насосах і дизельних двигунах. Плунжер має форму гладкого суцільного стрижня, діаметр якого значно менший за внутрішній діаметр циліндра. На його поверхні відсутні будь-які ущільнювальні елементи. Герметизація робочого об'єму досягається за рахунок прецизійного припасування плунжера до напрямної втулки, яка встановлюється в кришці циліндра. Мінімальний зазор між цими двома деталями запобігає витоку рідини.

Відсутність прямого тертя ущільнювальних кілець по основній робочій поверхні забезпечує плунжерним насосам значно вищий експлуатаційний ресурс у порівнянні з поршневыми аналогами. Ця перевага особливо виразно проявляється при роботі з агресивними або забрудненими середовищами, які швидко виводили б зі строю стандартні ущільнення. Як наслідок, плунжерні системи здатні створювати більш стабільний і високий тиск. Водночас такі агрегати висувають підвищені вимоги до точності виготовлення. Необхідність забезпечення мінімальних зазорів між плунжером і втулкою потребує високоточної механічної обробки, що ускладнює та здорожчує їх виробництво.

Розглядаючи плунжерні насоси, слід розрізняти їх із буровими насосами, які є схожими за принципом дії, але мають вузькоспеціалізоване призначення. Незважаючи на загальну концепцію витіснення рідини, їх функції та конструкція суттєво відрізняються.

Функціональне призначення плунжерних насосів є дуже широким і

охоплює багато галузей — від хімічної промисловості до гідравлічних систем високого тиску. Бурові насоси мають одну конкретну задачу — забезпечення циркуляції бурового розчину під високим тиском у процесі буріння свердловин. Ці вимоги безпосередньо впливають на їх конструкцію. Бурові насоси найчастіше виконуються у горизонтальному дво- або триплунжерному виконанні (дуплекс або тріплекс) і оснащуються спеціалізованою клапанною системою, розрахованою на роботу з абразивними та в'язкими буровими розчинами. Натомість конструкція універсальних плунжерних насосів може бути значно більш різноманітною залежно від умов експлуатації.

Принцип дії базується на періодичній зміні об'єму робочої камери: під час ходу всмоктування в камері створюється розрідження, що забезпечує надходження рідини через всмоктувальний клапан, а під час нагнітання — рідина витісняється через напірний клапан у трубопровод.

На відміну від відцентрових насосів, плунжерні насоси належать до машин об'ємного типу, що дозволяє їм забезпечувати високий тиск (десятки і сотні мегапаскалів) при відносно невеликій подачі та високій точності дозування. Це визначає їх широке застосування в технологічних процесах, де необхідні стабільні параметри подачі та тиску.

Плунжерні насоси класифікують за рядом ознак:

- за кількістю плунжерів: одноплунжерні; двоплунжерні; триплунжерні (найбільш поширені у промисловості завдяки більш рівномірній подачі); багатоплунжерні.
- за характером руху робочого органа: одноходові (односторонньої дії); двоходові (двосторонньої дії), де нагнітання відбувається при обох ходах плунжера.
- за типом приводу: з механічним приводом (кривошипно-шатунний механізм); з гідравлічним приводом; з електричним приводом (у тому числі з регульованим електроприводом).
- за призначенням: дозувальні; бурові; гідравлічні випробувальні; насосні

агрегати загального промислового призначення.

- за робочими параметрами: низького, середнього та високого тиску; малої, середньої та великої подачі.

- за властивостями перекачуваного середовища: для чистих рідин; для в'язких і забруднених середовищ; для агресивних і хімічно активних рідин.

Плунжерні насоси широко використовуються в різних галузях промисловості. Значення плунжерних агрегатів є особливо високим у видобувній та переробній промисловості. У нафтогазовому секторі вони є невід'ємною частиною процесів буріння свердловин та інтенсифікації видобутку, зокрема під час гідророзриву пласта, а також застосовуються для транспортування вуглеводнів. Подібні задачі вирішуються і в хімічній промисловості, де насоси забезпечують точне дозування реагентів та перекачування в'язких або хімічно активних середовищ.

Енергетичний комплекс і важке машинобудування також активно використовують можливості цих насосів. Зокрема, вони виконують роль живильних насосів, що подають воду в парогенератори на електростанціях. У гідравлічних системах вони є джерелом високого тиску для роботи пресового обладнання, випробувальних стендів і різноманітних підіймальних механізмів. Будівельна галузь застосовує їх для подачі бетонних сумішей і розчинів, а також у гідросистемах важкої техніки.

Сфера застосування не обмежується лише важкою промисловістю. У системах водопідготовки та очищення стічних вод насоси високого тиску є ключовим елементом установок зворотного осмосу. Харчова промисловість використовує їх для перекачування високов'язких продуктів, таких як олії, сиropи або тісто, а також у процесах гомогенізації. Така універсальність свідчить про широкі технологічні можливості цих механізмів.

Завдяки своїм конструктивним особливостям плунжерні насоси забезпечують високу точність подачі, стабільність параметрів і надійну роботу в умовах значних навантажень. Разом з тим їх характерною особливістю є пульсаційний характер подачі та підвищені динамічні

навантаження, що обумовлює необхідність удосконалення конструкцій і систем електроприводу.

1.2. Конструкція та принцип дії плунжерних насосів

Ключовим конструктивним елементом, що визначає принцип дії та функціональні можливості плунжерних насосів є плунжер. Саме ця деталь, здійснюючи зворотно-поступальний рух у робочій камері, забезпечує витіснення рідини та формування високого тиску на виході насоса. Він являє собою прецизійно виготовлений стрижень із гладкою циліндричною поверхнею, який здійснює циклічні зворотно-поступальні переміщення всередині робочої камери агрегату. Його переміщення здійснюється під дією електроприводу

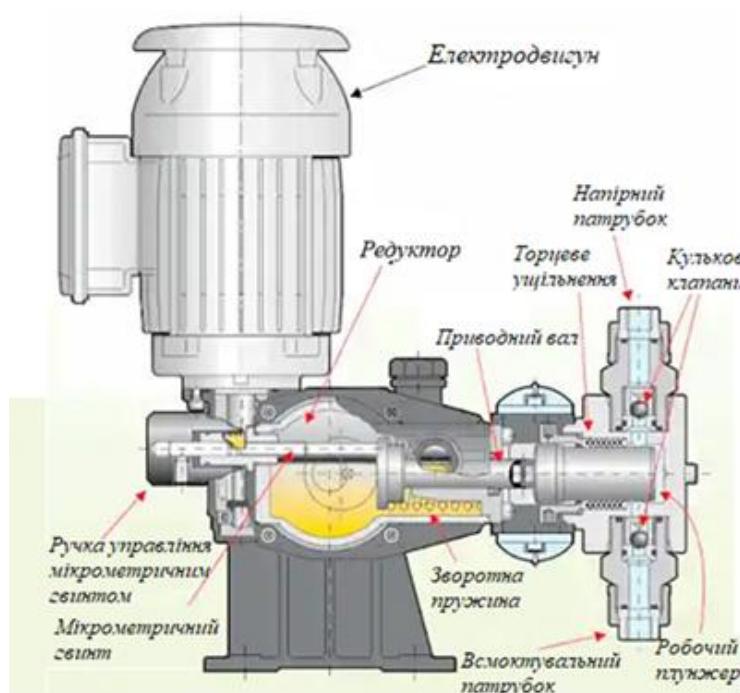


Рис.1.1 Конструкція плунжерного насосу

Принцип дії плунжера показано на рис. 1.2. Він базується на двох послідовних фазах. Під час руху в одному напрямку, наприклад при відході вглиб корпусу, у робочій камері створюється зона зниженого тиску. Це спричиняє відкриття всмоктувального клапана та надходження

перекачуваного середовища в насос. Зворотний хід плунжера виконує функцію нагнітання. Переміщуючись у протилежному напрямку, він стискає та витісняє робоче середовище з камери через нагнітальний клапан, формуючи при цьому значний тиск на виході системи.

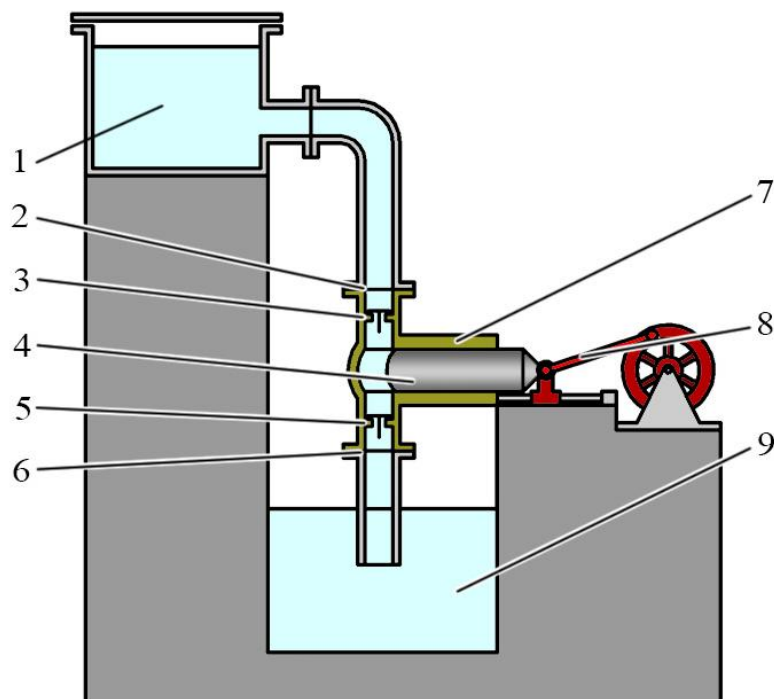


Рис. 1.2 Принцип дії плунжерного насосу

Циліндричний плунжер 4 встановлено в камері 7. Кривошипно-шатунний механізм 8 приводить плунжер у рух. При переміщенні плунжера вправо (за схемою) об'єм робочої камери збільшується, унаслідок чого тиск у ній знижується. Під дією зовнішнього тиску напірний зворотний клапан 3 закривається, а всмоктувальний клапан 5 відкривається. Рідина, внаслідок утвореного розрідження в робочій камері, починає надходити від джерела 9 у порожнину насоса через всмоктувальну лінію 6. При переміщенні плунжера вліво об'єм робочої камери зменшується, а тиск у ній зростає. Під дією цього тиску напірний клапан відкривається, а всмоктувальний закривається. Рідина з робочої камери витісняється в напірну лінію 2 і подається до споживача 1. Після досягнення плунжером крайнього положення робочий цикл повторюється.

Незалежно від конструкції насоса, процес перекачування один: коли змінюється закритий об'єм, закінчуються процеси всмоктування води та її зливу. Щоб легше було уявити такий принцип роботи нагадає медичний шприц. Рух плунжера починається праворуч, що збільшує тиск у камері, відкривається клапан нагнітання, через який рідина або суміш рухається в трубопровід. За весь час роботи енергія передається з метою подолання інерції, опору та статичної висоти у трубопроводі.

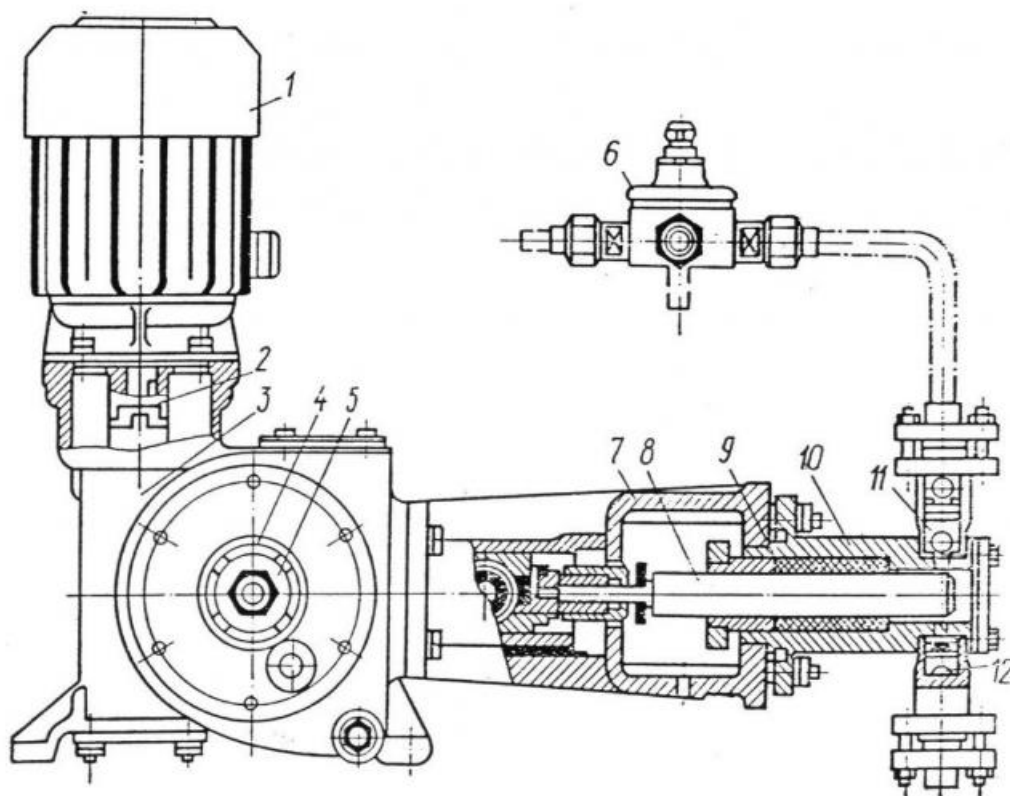


Рис. 1.3 Схема плунжерного насоса високого тиску

1 - електродвигун; 2 - напівмуфта; 3 - редуктор; 4,5 - регулювальні кільця;
6 - запобіжний клапан; 7 - кронштейн; 8 - плунжер; 9 - сальник; 10 -
циліндр; 11 - нагнітальний клапан; 12 - всмоктувальний клапан

Робота плунжера відбувається в умовах підвищених навантажень та екстремальних експлуатаційних режимів. Він зазнає значних механічних навантажень, працює під дією високого тиску та часто контактує з хімічно активними рідинами. Для протидії цим руйнівним факторам і забезпечення довговічності деталі виготовляють із матеріалів із спеціальними

властивостями, такими як леговані сталі, технічна кераміка або сучасні композити. Поверхня елемента піддається спеціальній обробці для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Ключова конструктивна відмінність плунжерних агрегатів від поршневих полягає у способі герметизації. Високоточне спряження плунжера з напрямною втулкою забезпечує необхідну герметичність робочого об'єму без використання додаткових ущільнювальних кілець, що спрощує конструкцію та підвищує її надійність.

Розвитком цієї технології стали багатоплунжерні конструкції, серед яких широкого поширення набула триплунжерна (триплексна) система. У таких насосах використовуються три однакові робочі елементи, кожен з яких працює у власному циліндрі. Як правило, їх осі розташовані зі зміщенням на 120° одна відносно одної навколо спільного приводного механізму. Головною експлуатаційною перевагою такої схеми є забезпечення більш рівномірного та безперервного потоку перекачуваного середовища.

Оскільки робочі цикли кожного з трьох плунжерів зсунуті по фазі, сумарна подача рідини на виході з насоса стає практично рівномірною. Це значно зменшує пульсації в гідравлічній системі та підвищує загальну ефективність установки. Крім того, розподіл загального навантаження між трьома робочими елементами замість одного дозволяє знизити знос кожного з них окремо, що безпосередньо збільшує ресурс і надійність усього агрегату. Такий підхід також дає можливість створювати більш компактні та легкі установки при збереженні високої продуктивності.

Плунжерне насосне обладнання з трьома робочими органами широко застосовується в різних галузях промисловості. Воно активно використовується у видобутку вуглеводнів, зокрема у складі бурових установок і комплексів для гідророзриву пласта. Крім того, такі насоси затребувані в хімічній промисловості, енергетиці та різноманітних гідравлічних системах, де необхідне створення високого тиску.

Конструкція цих насосів добре підходить для перекачування високов'язких середовищ, а також рідин з абразивними частинками або корозійно-активними властивостями. Їх ключовою перевагою є здатність розвивати дуже високий вихідний тиск.

1.3. Основні технічні характеристики та режими роботи плунжерного насоса 1.3 Т-2/100 Д2-А3

Триплунжерні кривошипні насоси типів ПТ і Т призначені для перекачування як нейтральних, так і агресивних рідин, які не взаємодіють із матеріалами гідравлічної частини. Допустима кінематична в'язкість робочого середовища становить до 800 мм²/с (8 Ст), а температура, залежно від виконання, може змінюватися в межах від 243 К до 473 К (від –30 до +200°С). Вміст твердих неабразивних частинок у рідині не повинен перевищувати 0,2 % за масою, а їх максимальний розмір — 0,2 мм.

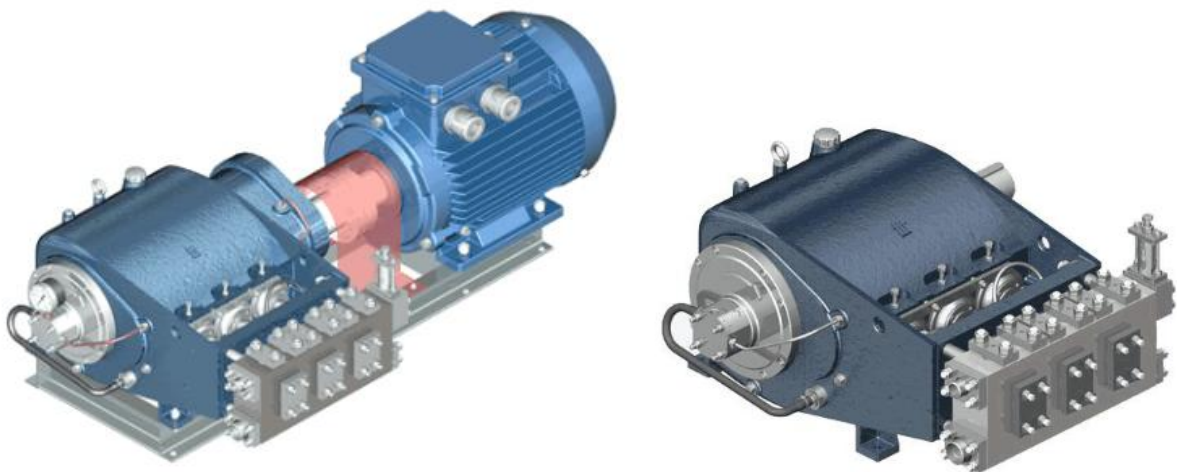


Рис.1.4 Загальний вигляд триплунжерного насоса 1.3Т-2/100 Д2-А3

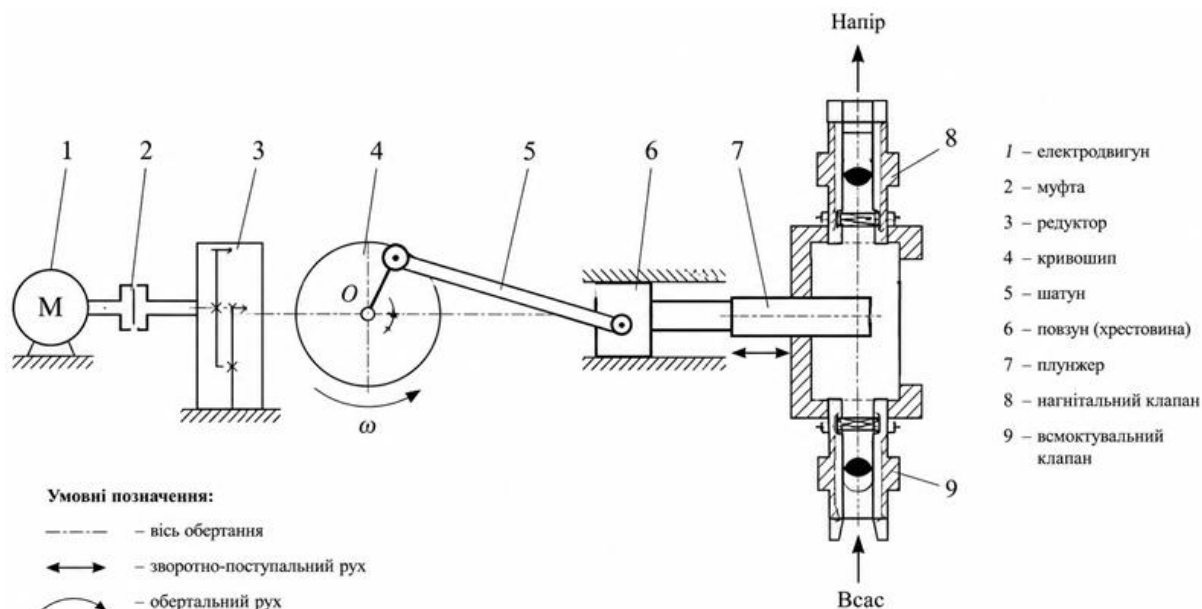


Рис. 1.5 Пристрій плунжерного насосу 1.3 Т-2/100 Д2-А3

Насоси та насосні агрегати типів ПТ і Т застосовуються у виробництвах, де необхідно створювати високий тиск при відносно невеликій подачі рідини.

На базі таких насосів створюються спеціалізовані установки (типу УН, УПГ), призначені для гідроочищення трубопроводів діаметром від 80 до 600 мм, а також очищення поверхонь технологічного обладнання, будівель і споруд.

Умовні позначення триплунжерного насоса 1.3 Т-2/100 Д2-А3

Таблиця 1.1

Позначення	Пояснення
1.3	Габарит насоса по навантаженням на робочі органи, швидкохідності та розмірам приводної частини
Т	Тип агрегату за конструкцією приводної частини з вбудованим редуктором
2	Подача агрегату, м3/год
100	Тиск на виході з насоса, МПа
Д	Виконання насоса за матеріалом гідравлічної частини з хромистих сталей типу 40Х13
2	Без охолодження (обігріву) гідравлічної частини з підведенням до ущільнення змащувальної, охолоджувальної, промивної або гідрозатворної рідини

Від двигуна 4 обертання передається через муфту 5 (або приводний шків) на вхідний вал 6. Через пару зубчастих коліс 2, 3 на вхідному валу і на колінчастому валу обертання передається на колінчастий вал 1. Колінчастий вал приводить в зворотно-поступальний рух 9 Повзуном хомутом 8. Плунжер ущільнюється манжетами, встановленими в сальниковій склянці 10. У клапанній коробці триплунжерного насоса є три всмоктувальні клапани 13 і три нагнітальних 12. При ході плунжера вліво в камері а створюється розрідження, тому нагнітальний клапан 12 закривається, а всмоктуючий клапан 13 відкривається і рідина під дією атмосферного тиску через зворотний клапан 17 приймального клапана (храрка) 18 всмоктуючого шлангу 19 надходить через всмоктуючий клапан в камеру. Плунжер 9, дійшовши до крайнього лівого положення, починає рухатися праворуч і заходить до правого крайнього положення (камера б). При цьому ході плунжера створюється стиск рідини (в камері б), всмоктуючий клапан 13 закривається, а нагнітальний 12 відкривається і пропускає рідину в нагнітальну лінію 20 гідроблоку, до якої кріпиться лінія нагнітання 21. манометр 14 та систему його захисту 15.

Технічні характеристики триплунжерного насоса 1.3Т-2/100 Д2-А3

Таблиця 1.2

Параметр	Значення
Тип насоса	Триплунжерний
Модель	1.3Т-2/100
Подача, м³/год	2
Тиск на виході, МПа	до 100
Частота обертання, об/хв	~300–500
Діаметр плунжера, м	0,03
Хід плунжера, м	0,05
Потужність приводу, кВт	75
Об'ємний ККД, %	80–90

Температура рідини, °С	від -30 до +200
Кінематична в'язкість, мм ² /с	до 800
Тип приводу	Електродвигун
Виконання	Д2-А3
Маса, із двигуном загальнопромислового використання, кг	1350

Конструкція агрегату складається з електродвигуна та насоса, змонтованих на спільній рамі. Як привід можуть використовуватися електродвигуни, двигуни внутрішнього згоряння або дизельні двигуни.

Передача руху від двигуна до насоса здійснюється через клинопасову передачу, редуктор або безпосередньо через муфту.

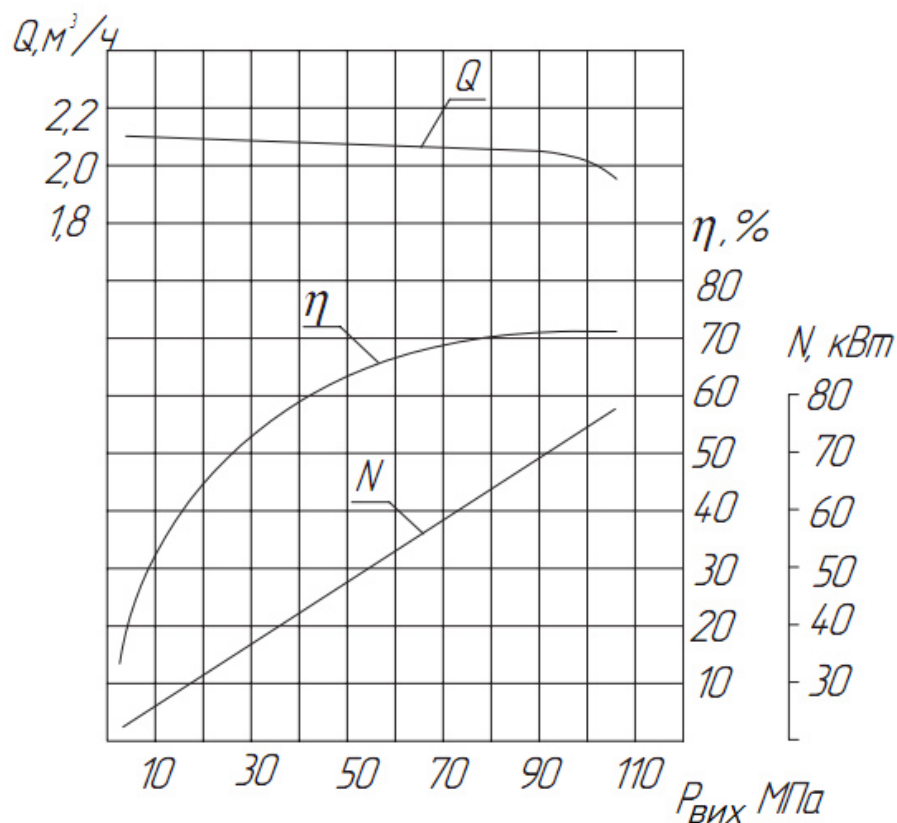


Рис. 1.7 Експлуатаційна характеристика насоса 1.3 Т-2/100 Д2-А3

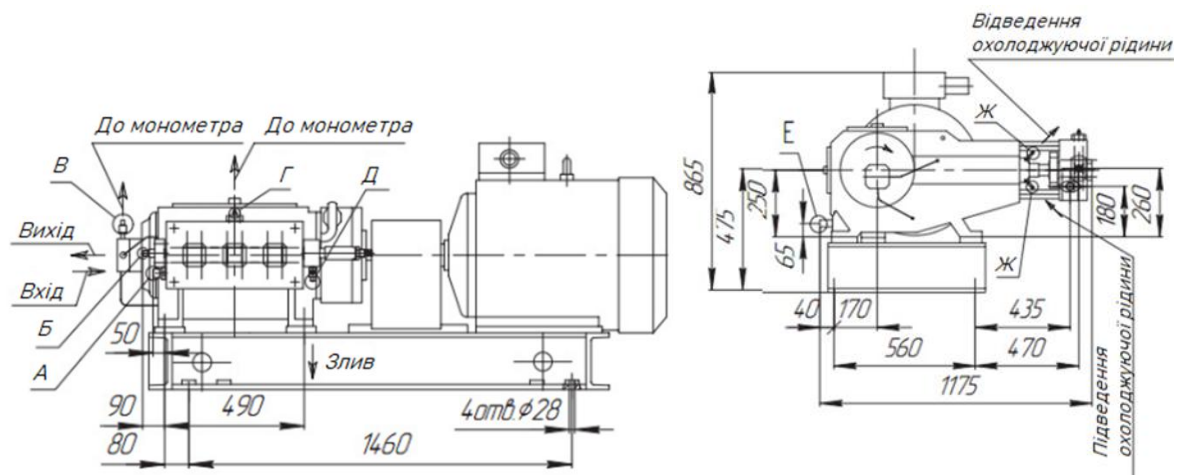


Рис. 1.8 Габаритні та приєднувальні розміри насоса 1.3 Т-2/100 Д2-А3:

А - всмоктувальний патрубок насоса; Б - приєднання всмоктувальної лінії (часто фланець або вузол підключення); В - контроль/манометр (гідроблок); Г - верхня частина гідроблока/місце підключення манометра (контроль тиску); Д - напірна лінія (вихід) або вузол після насоса (зона нагнітання); Е - кріпильна частина (станина або лапа насоса/двигуна); Ж - штуцери (патрубки) системи охолодження

Як видно з креслення (рис. 1.8) насос має примусове охолодження зони ущільнень і гідроблоку.

Насос складається з двох основних частин: приводної та гідравлічної. Приводна частина містить колінчастий вал, який перетворює обертальний рух двигуна на зворотно-поступальний рух плунжерів. Гідравлічна частина включає гідроблок, плунжери, сальникові ущільнення, всмоктувальні та нагнітальні клапани, а також запобіжний клапан. Запобіжний клапан налаштовується на номінальний робочий тиск, але за потреби може бути відрегульований на інше значення.

Агрегати можуть працювати у складі систем із регулюванням частоти обертання приводу, що забезпечує гнучке керування їх продуктивністю.

1.4 Особливості навантажувальних характеристик триплунжерного насоса в системі електропривода

Однією з характерних особливостей плунжерних насосів є наявність пульсацій подачі та тиску, що обумовлено самим принципом їх роботи

періодичним витісненням рідини з робочої камери. Навіть у триплунжерних насосах, де робочі органи зміщені за фазою на 120° , повністю усунути пульсації неможливо. Проте таке конструктивне рішення дозволяє значно зменшити їх амплітуду порівняно з одноплунжерними системами. Для додаткового згладжування нерівномірності потоку застосовують гідроаккумулятори (демпфери), які виконують роль буферних ємностей і вирівнюють тиск у системі. Важливим фактором також є раціональний вибір частоти обертання приводу, що дозволяє оптимізувати режим роботи насоса. Зменшення пульсацій має суттєве значення, оскільки це знижує вібрації, динамічні навантаження на трубопроводи та підвищує довговічність обладнання.

Іншою важливою особливістю є нерівномірність навантаження на електропривід. Крутий момент на валу насоса змінюється протягом робочого циклу, що пов'язано з чергуванням фаз всмоктування і нагнітання. У результаті електродвигун працює в умовах змінного навантаження, що призводить до виникнення додаткових динамічних навантажень, підвищених струмів і нагріву. Це ускладнює експлуатацію приводу та знижує його енергоефективність. У зв'язку з цим актуальним є застосування частотно-регульованого електроприводу, який забезпечує плавну зміну швидкості обертання, зменшує ударні навантаження та покращує енергетичні показники системи.

Суттєвим фактором, що впливає на надійність роботи насоса, є можливість виникнення кавітації. Це явище виникає при зниженні тиску на вході нижче допустимого рівня, внаслідок чого в рідині утворюються парові бульбашки, які при подальшому переміщенні схлопуються. Кавітаційні процеси супроводжуються локальними гідроударами, що призводить до пошкодження клапанів, ерозійного зносу плунжерів та інших елементів гідравлічної частини. Крім того, кавітація викликає підвищений шум і вібрацію, що негативно впливає на роботу всієї установки.

Важливу роль у забезпеченні надійної роботи насоса відіграє система

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		22

охолодження. Унаслідок високих тисків, інтенсивного тертя в ущільненнях і гідравлічних втрат відбувається нагрівання робочих елементів. Для запобігання перегріву застосовується примусове охолодження, яке, як правило, охоплює зону ущільнень і гідроблок. Це дозволяє підтримувати допустимий температурний режим, зменшити знос деталей і забезпечити стабільність роботи агрегата.

Особливості герметизації плунжерних насосів також мають принципове значення. На відміну від поршневих машин, плунжер не має ущільнювальних кілець, а герметичність забезпечується за рахунок високоточного спряження з прямою втулкою. Водночас у конструкції застосовуються сальникові ущільнення, які забезпечують додаткову герметизацію. У процесі роботи допускаються незначні контрольовані витoki рідини, що виконують функцію змащення і охолодження контактних поверхонь, запобігаючи їх перегріву та передчасному зносу.

У процесі експлуатації насоса відбувається знос його основних елементів, до яких належать плунжери, клапани та ущільнення. Це обумовлено високими механічними навантаженнями, дією тиску та впливом перекачуваного середовища. Тому насос потребує регулярного технічного обслуговування та контролю стану основних вузлів. Водночас конструкція агрегата є ремонтпридатною, що дозволяє здійснювати заміну окремих елементів без повної заміни обладнання.

До основних переваг триплунжерних насосів належать здатність створювати високий тиск при відносно невеликій подачі, висока точність дозування, можливість роботи з агресивними та в'язкими середовищами, а також більш стабільна робота порівняно з одноплунжерними насосами. Водночас вони мають і певні недоліки, серед яких слід відзначити складність конструкції, високу вартість виготовлення, наявність пульсацій потоку та підвищені вимоги до точності обробки деталей.

Таким чином, триплунжерні насоси характеризуються складними динамічними процесами, високими навантаженнями та специфічними

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						23
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

умовами експлуатації. Це обумовлює необхідність удосконалення їх електроприводу, зокрема шляхом впровадження частотно-регульованих систем керування, що дозволяє знизити динамічні навантаження, підвищити енергоефективність і забезпечити надійну та стабільну роботу насосного агрегата.

					<i>КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2</i>	Арк
						24
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

2.1 Розрахунок потужності електроприводу плунжерного насоса

Вибір електроприводу плунжерного насоса починається з визначення необхідної потужності, яка повинна забезпечити стабільну роботу агрегату при заданих режимах подачі та тиску перекачуваної технічної рідини. Оскільки плунжерні насоси належать до об'ємних машин, їх навантаження визначається переважно тиском нагнітання та продуктивністю. При проектуванні електроприводу плунжерного насоса необхідно визначити потужність, яка забезпечує:

- подачу робочої рідини з заданим витратним режимом;
- подолання гідравлічного опору системи;
- компенсацію механічних втрат у передачах та насосному механізмі.

Гідравлічна потужність насоса, основна енергетична складова, визначається через тиск і витрату:

$$P_{\text{гід}} = p \cdot Q \quad (2.1)$$

де p — номінальний робочий тиск рідини, зазвичай 0,85-0,9 від максимального, Па;

Q - об'ємна подача насоса, м³/с;

Теоретична подача плунжерного насоса визначається геометричними параметрами робочої камери та частотою обертання приводного валу. З урахуванням конструктивних параметрів насосної групи та об'ємного ККД визначається фактична подача, яка використовується далі при розрахунку потужності електроприводу:

$$Q_{\text{т}} = S \cdot \tau \cdot n \cdot z = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \tau \cdot n \cdot z \quad (2.3)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						25
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

де S - площа поперечного перерізу плунжера, м^2 ;

d — діаметр плунжера, м ;

τ — хід плунжера, м ;

n — частота обертання, об/с ;

z — кількість плунжерів.

$$Q_{\text{т}} = \frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \cdot 0,05 \cdot \frac{400}{60} \cdot 3 = 0,000707 \text{ м}^3/\text{с}$$

Реальна подача з урахуванням об'ємних втрат:

$$Q = Q_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{об}} = 0,000707 \cdot 0,85 = 0,000601 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.4)$$

де $\eta_{\text{об}}$ - об'ємний ККД насоса.

$$P_{\text{гид}} = 85 \cdot 10^6 \cdot 0,000601 = 51,085 \text{ кВт}$$

Реальна потужність на валу більша за гідравлічну через втрати:

$$P_{\text{вал}} = \frac{P_{\text{гид}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{51,085}{0,85} = 60,1 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

де $P_{\text{вал}}$ — потужність на валу насоса, кВт ;

$\eta_{\text{н}}$ — ККД насоса, 0,80-0,90.

Потужність електродвигуна з урахуванням приводу (муфта, редуктор, ремінна передача):

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{вал}}}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{60,1}{0,87} = 69,08 \quad (2.3)$$

де $P_{\text{дв}}$ — потужність електродвигуна, кВт ;

$\eta_{\text{н}}$ — ККД приводу (0,85-0,92).

Враховуючи коефіцієнт запасу

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{дв}} \cdot k_3 = 69,08 \cdot 1,2 = 82,9 \text{ кВт}$$

На відміну від відцентрових насосів, у плунжених насосах потужність не постійна, навантаження пульсуюче, пік навантаження вище середнього. Розрахункова потужність електроприводу становить 82,9 кВт, що перевищує номінальну потужність обраного двигуна 75 кВт. Однак, з урахуванням короткочасного характеру пікових навантажень, а також використання частотного регулювання дане відхилення не є критичним. Двигун з потужністю 82,9 кВт забезпечує допустимий тепловий та механічний запас по перевантаженню.

Обираємо загальнопромисловий асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором АІР 250 М4. Електродвигун АІР 250 М4 застосовується в багатьох галузях промисловості, в електроприводах різних пристроїв, механізмів і машин, які не вимагають регулювання частоти обертання (насоси, вентилятори, компресори і т.п.).

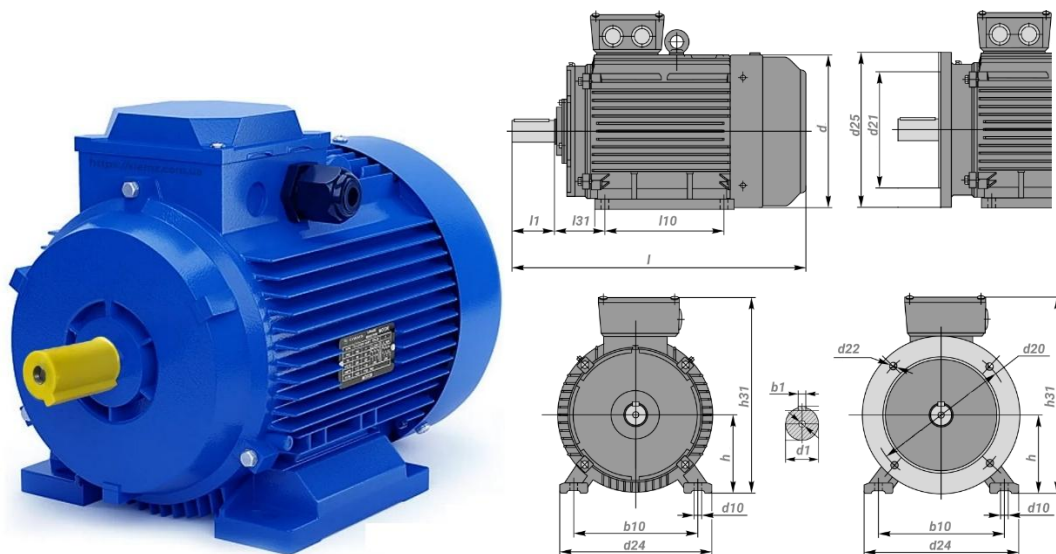


Рис. 2.1 Загальний вигляд та габаритні розміри електродвигуна АІР250М4

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2

Арк

27

Монтажні виконання - лапи IM1081, фланець IM3081.

Технічні характеристики електродвигуна AIR250M4

Таблиця 2.1

Параметр	Значення
Потужність $P_{\text{ном}}$	90 кВт
Частота обертання поля статора n_c	1500 об/хв
Швидкість обертання валу $n_{\text{ном}}$	1480 об/хв
Тип	Асинхронний
Напруга живлення $U_{\text{ном}}$	~3ф, 380/660 В
Номінальний струм $I_{\text{ном}}$	165,5 А
ККД, η	93,9%
$\cos\phi$	0,88
Ковзання, $S_{\text{ном}}$	0,0133
Номінальний крутний момент $M_{\text{ном}}$	584,694 Нм
Співвідношення моментів, що крутять Мп/Мн	2,2
Співвідношення моменту крутного Мтах/Мн	2,3
Відношення струму Іп/Ін	6,8
Момент інерції, J	0,4 кг·м ²
Діаметр валу	75 мм
Монтажне виконання	Лапи/фланець/комбіноване
Вага	505 кг
Передній/задній підшипник	6316-С3/6314-С3
Рівень шуму	до 86 дБ

2.2 Вибір редуктора

Передатне число редуктора визначаємо за формулою:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{насоса}}} = \frac{1500}{300 - 500} = 3 - 5 \quad (2.4)$$

де i - передатне число редуктора, $i = 3 \dots 5$

$n_{\text{дв}}$ -число обертів електродвигуна,

$n_{\text{насоса}}$ - число обертів насосу,

Крутний момент на валу електродвигуна визначається за відомою формулою:

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n} \quad (2.5)$$

Де M — крутний момент, Н·м;

P — потужність двигуна, кВт;

n — частота обертання вала двигуна, об/хв;

9550 — коефіцієнт переходу одиниць (з урахуванням ω та кВт $\rightarrow$ Вт).

Для двигуна:

$$P = 90 \text{ кВт}$$

$$n = 1500 \text{ об/хв}$$

$$M_{\text{вх}} = \frac{9550 \cdot 90}{1500}$$

$$M_{\text{вх}} = \frac{859500}{1500} = 573 \text{ Н·м}$$

Двигун типу АІР250М4 має номінальну частоту обертання 1500 об/хв, тому для приводу плунжерного насоса необхідно підібрати редуктор, який:

- знижує частоту обертання до робочої швидкості насоса;
- забезпечує передавання моменту не менше $M_{\text{вх}} = 573 \text{ Н·м}$;
- має запас по моменту (зазвичай 1.2–1.5).

Умова вибору редуктора:

$$M_{\text{ред}} \geq M_{\text{вх}} \cdot k_{\text{зап}}$$

де $k_{\text{зап}}$ — коефіцієнт запасу (1,5–2,0).

Знаходимо момент на виході зі редуктора:

$$M_{\text{вих}} = M_{\text{вх}} \cdot i = 573 \cdot (3 \dots 5) = 1720 - 2865 \text{ Н·м}$$

З урахуванням ККД, запасу і сервіс-фактор $\eta \approx 90$ розрахунковий

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		29

момент:

$$M_{\text{раз}} \approx 4000 - 5000 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Найбільш підходящий варіант редуктора для плунжерного насоса - циліндричний 2-х ступінчастий редуктор з клинопасової передачею.

Циліндричний редуктор Ц2У-250 або 1Ц2У-250 – загальнопромисловий двоступінчастий редуктор вузького типу, що використовується при повторно-короткочасних та постійних режимах роботи. Основна сфера застосування це приводи витягів, елеватори та виготовлення пінобетону. Завдяки вузькому типу зубчастих коліс, в порівнянні зі своїми попередниками, редуктор Ц2У-250 має високий крутний момент на вихідному валу при відносно невеликих габаритах.

Допустимі режими експлуатації редукторів з циліндричною передачею:

- постійне та плаваюче навантаження;
- можливе реверсивне включення;
- для тривалих режимів та частих включень;
- максимальна швидкість на вході – 1500 об/хв;
- концентрація пилу до 10 мг/м³.

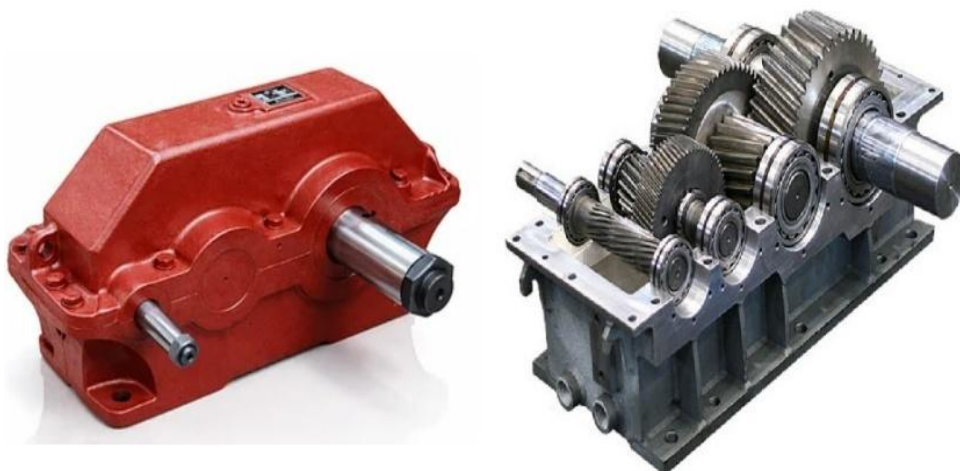


Рис. 2.2 Зовнішній та внутрішній вигляд двоступінчастого циліндричного редуктора 1Ц2У-250

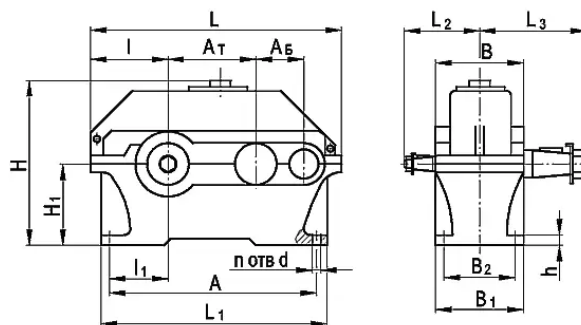


Рис. 2.3 Габаритні та приєднувальні розміри
Технічні характеристики редуктора 1Ц2У-250

Таблиця 2.2

Параметр	значення
Типорозмір редуктора	Ц2У-250
Номінальне передатне число	Від 2 до 40
Номінальне радіальне навантаження на тихохідному валу,	18000 Н
Номінальний крутний момент на тихохідному валу	5000, Нм
Об'єм олії	9, л
Вага	320, кг
ККД	0,97%

2.3 Вибір перетворювача частоти

Плунжерний насос — це поршневий (об'ємний) насос, у якого витрата практично прямо пропорційна швидкості обертання:

$$Q \propto n$$

де Q — подача насоса

n — частота обертання двигуна

Це означає: якщо зменшити швидкість на 20%, подача теж зменшиться на ~20%.

Основна задача перетворювача частоти (VFD - Variable Frequency Drive) у системі:

1. Регулювання продуктивності без механіки. Замість дроселювання

клапанами:

- менше втрат енергії;
- менше нагріву рідини;
- менше зносу.

2. Плавний пуск двигуна AIP250M4

Без VFD:

- пусковий струм $I_{\text{ном}} = 5 - 7$;
- удар по муфті, редуктору, плунжерам.

З VFD:

- плавний розгін 5–30 с
- пусковий струм $I_{\text{ном}} \approx 1,2 - 1,5$

3. Зниження пульсацій тиску. У плунжерних насосах є:

- пульсації витрати
- гідроудари

VFD дозволяє:

- уникати резонансних швидкостей
- стабілізувати частоту ходів

4. Енергозбереження. Для насосів виконується:

$$P \propto n^3$$

де P — потужність

n — швидкість

Навіть невелике зниження швидкості дає великий ефект.

Рівняння руху системи:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дв}} - M_{\text{навантаж}} \quad (2.6)$$

де J — момент інерції

ω — кутова швидкість

$M_{\text{навантаж}}$ — момент насоса

VFD дозволяє керувати $M_{\text{дв}}$ через частоту

Використання частотного перетворювача у приводі плунжерного насоса дозволяє:

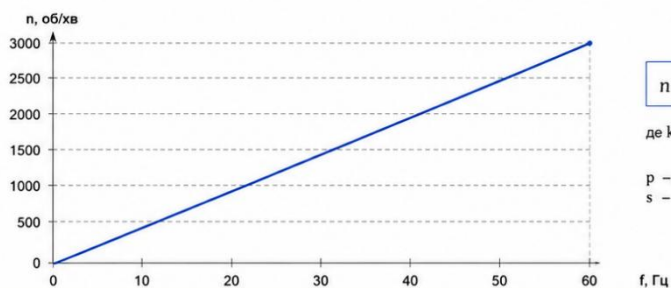
- регулювати подачу без механічного дроселювання;
- знизити динамічні навантаження на вал і плунжерний механізм;
- зменшити пульсації тиску в гідросистемі;
- знизити пускові струми двигуна;
- підвищити енергоефективність системи.

1 ШВИДКІСТЬ vs ЧАСТОТА

$$n \sim f$$

Швидкість обертання двигуна пропорційна частоті живлення.

n – швидкість обертання, об/хв
 f – частота живлення, Гц



$$n = k \cdot f$$

де $k = 60(1-s)/p$

p – кількість пар полюсів
 s – ковзання

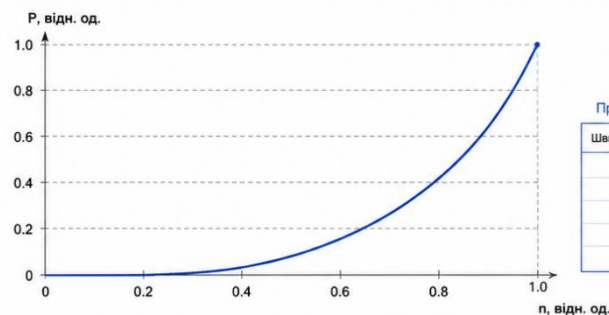
2 ПОТУЖНІСТЬ НАСОСА

$$P \sim n^3$$

Потужність насоса пропорційна кубу швидкості обертання.

P – потужність, кВт
 n – швидкість обертання, об/хв

→ Це головна причина економії енергії



$$P = k \cdot n^3$$

де k – коефіцієнт насоса

Приклад економії енергії:

Швидкість, % від ном.	Потужність, % від ном.
100 %	100 %
90 %	73 %
80 %	51 %
70 %	34 %
60 %	22 %

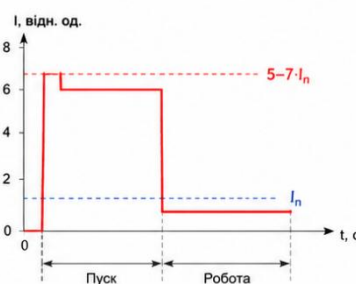
3 ПУСКОВИЙ СТРУМ

Без VFD (прямий пуск)

$$I_{\text{пуск}} = (5-7) \cdot I_n$$

Різкий стрибок струму в 5–7 разів більше номінального.

I_n – номінальний струм



З VFD (плавний пуск)

$$I_{\text{пуск}} \approx (1.1-1.5) \cdot I_n$$

Плавне наростання струму до номінального значення.



Рис. 2.4 Графічна поведінка системи

Обираємо перетворювач частоти Schneider Electric серії Altivar Process ATV650. Частотні перетворювачі Altivar Process ATV650 призначені для управління швидкістю та моментом обертання трифазних асинхронних та синхронних електродвигунів у промислових, технологічних та

інженерних системах із змінним та постійним моментом навантаження. Серія Altivar Process ATV650 орієнтована на застосування у важких промислових умовах та відповідальних технологічних процесах, включаючи насосні та вентиляційні установки, системи водопостачання та водовідведення, HVAC-системи, компресорні установки, а також процеси обробки рідини та газу, включаючи водоочищення, нафтогазову, гірничодобувну, метал.

Вбудовані функції захисту двигуна та перетворювача, розвинені засоби енергоаналітики та діагностики, підтримка протоколів Modbus RTU, Modbus TCP та Ethernet (з можливістю розширення за рахунок комунікаційних модулів), вбудований ЕМС-фільтр класу C2/C3 та зручна параметризація забезпечують надійну, стабільну та економічну роботу обладнання у промислових умовах.



Рис. 2.5 Частотний перетворювач ATV650 та панель керування

1 – стоп; 2 – локальне (дистанційне) керування; 3 - вихід з меню; 4 - функціональні клавіші для доступу до ідентифікатора приводу; 5 - графічний дисплей; 6 - доступ до головної сторінки; 7 - про параметри; 8 пуск; 9 - сенсорне колесо; 10 - порт rj45 modbus; 11 - порт mini usb; 12 – батарейка; 13 - роз'єм rj45.

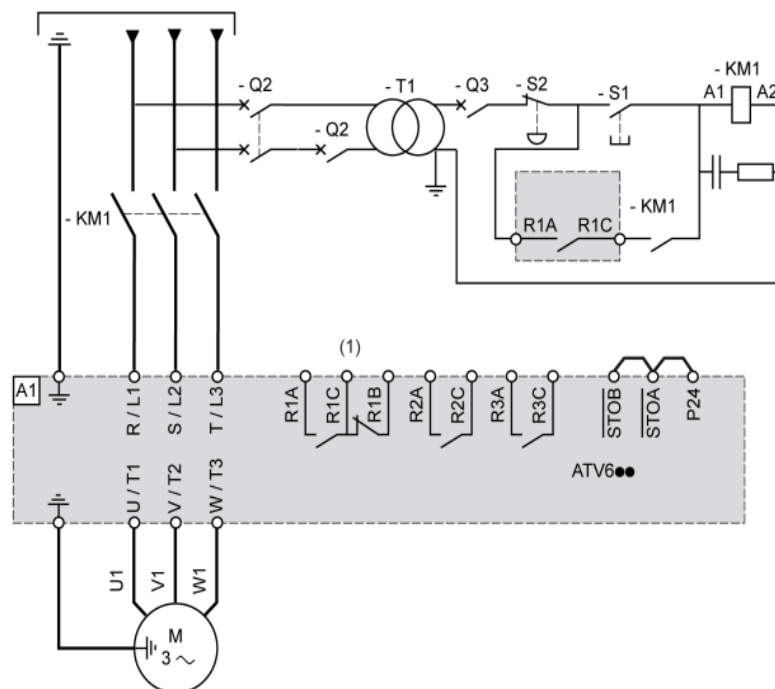


Рис. 2.6 Кінематична схема частотного перетворювача ATV650

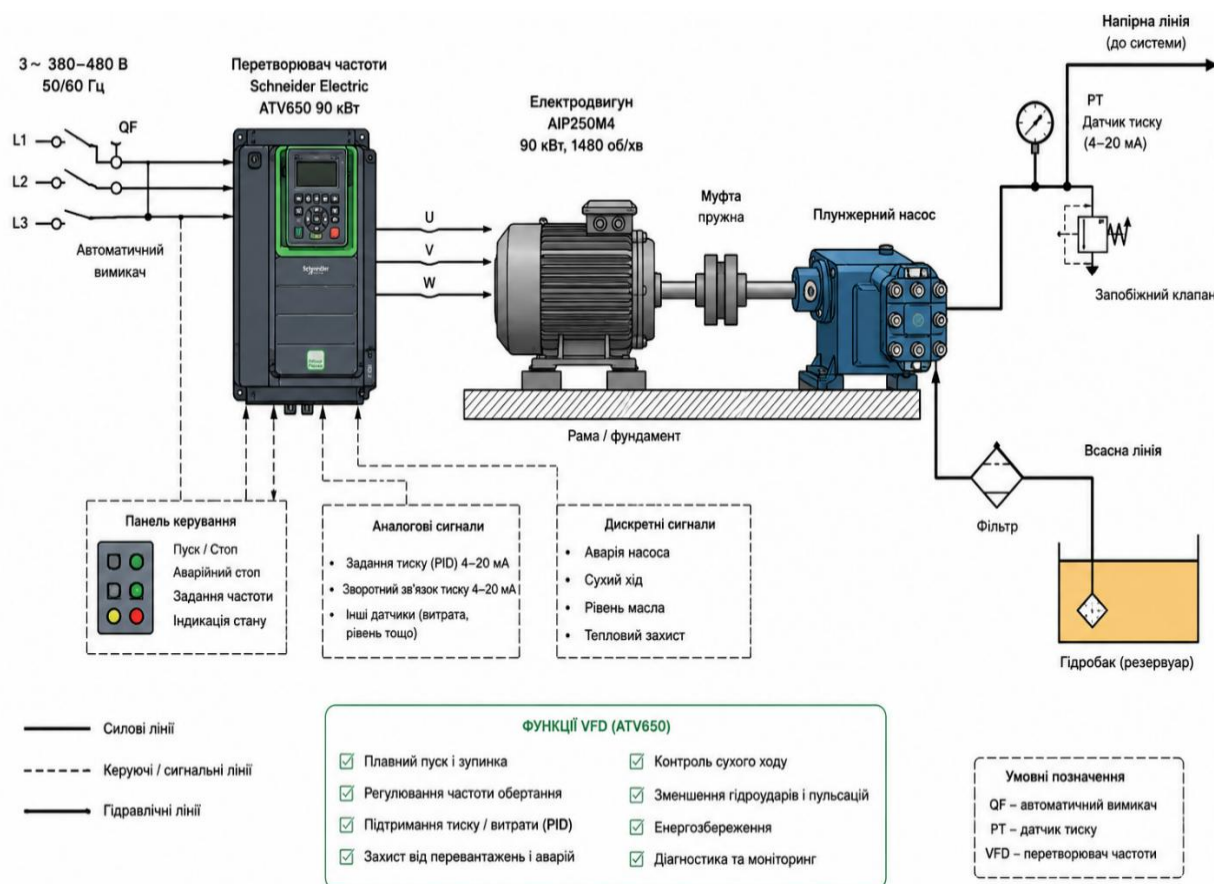


Рис. 2.7 Схема приводу плунжерного насоса з перетворювачем частоти

Параметр	Значення
Номинальна потужність	90/110 кВт
Протокол порту обміну даними	Modbus TCP Modbus послідовний
Кількість фаз мережі	3 фази
Напруга живлення	380/480 В
Вихідна напруга	<= номінальної напруги живлення
Номинальний вихідний струм	211 А
Вхідна частота сети	50/60 Гц
Вихідна частота приводу	0,1 - 500 Гц
Керування	Скалярне + Векторне
Максимальний струм у сталому режимі	145 А для важкий режим роботи 173 А для нормальний режим роботи
Ймовірний струм КЗ [Isc]	50 кА
Кількість дискретних входів	8
Кількість аналогових входів	3
Кількість релейних виходів	3
Мінімальний струм перемикачів Релейний вихід	R1, R2, R3: 5 мА при 24 В постійний струм
Апаратний інтерфейс	Ethernet 2-провідний RS 485
Тип гальмування	Постійним струмом

2.4 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода

Вихідні каталожні дані асинхронного двигуна АИР 160 S2

Потужність:

$$P_{\text{дв}} = 90 \text{ кВт}$$

Номинальна напруга:

$$U_{1\text{н}} = 380 \text{ В}$$

Динамічний момент інерції двигуна

$$J_{\text{дв}} = 0.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Частота напруги живлення

$$f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$$

Синхронна частота обертання

$$n_c = 1500 \text{ об/хв}$$

Номинальні оберти двигуна

$$n_{\text{НОМ}} = 1480 \text{ об/хв}$$

Відносний пусковий момент

$$M_{\text{п}} = 2,0$$

Відносний критичний момент

$$M_{\text{к}} = 2,3$$

Відносний пусковий струм

$$k_{\text{i}} = 6,8$$

$$\cos \varphi = 0,88$$

$$\sin \varphi = \sin(a \cos(\cos \varphi)) = 0,47497 \quad (2.7)$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = 0,88$$

Номинальний струм двигуна

$$I_{\text{НОМ}} = 165,5 \text{ А}$$

Часткове навантаження

$$p' = 0,68$$

$$\beta = 1,5$$

$$\cos \varphi_{p'} = 0,99 \cdot \cos \varphi = 0,8712 \quad (2.8)$$

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

2.4.1 Розрахунок механічної характеристики двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.9)$$

Номинальна кутова частота обертання

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 730}{30} = 154,99 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.10)$$

Номинальне ковзання

$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0} = \frac{3000 - 2930}{3000} \cdot 100\% = 0,01333 \quad (2.11)$$

Номинальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{15000}{76,445} = 580,68 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.12)$$

Номинальні фазна напруга і номинальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В} \quad (2.13)$$

$$I_{1\text{фн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{15000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 165,48 \text{ А} \quad (2.14)$$

$$I_{1\text{лн}} = I_{1\text{фн}} = 165,48 \text{ А}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{15000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,8613 \cdot 0,86} = 124,11 \text{ А} \quad (2.15)$$

Критичне ковзання

$$S_K = S_H \frac{[m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)]}]}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)} =$$
$$0,01333 \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,01333 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,01333 \cdot 1,5 \cdot (2,3 - 1)} = 0,06164 \quad (2.16)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						38
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$S_K = 0,06164$$

Струм холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_1 p'^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\phi H} \right]^2}{1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{124,11^2 - \left[\frac{0,68 \cdot (1 - 0,01333)}{1 - 0,68 \cdot 0,01333} \cdot 28,967 \right]^2}{1 - \left[\frac{0,68 \cdot (1 - 0,01333)}{1 - 0,68 \cdot 0,01333} \right]^2}} = 72,541 \text{ A} \quad (2.17)$$

де чисельник

$$I_1 p'^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\phi H} \right]^2 \rightarrow 124,11^2 - \left[\frac{0,68 \cdot (1 - 0,01333)}{1 - 0,68 \cdot 0,01333} \cdot 29,768 \right]^2 = 2849,879$$

знаменник

$$1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2 = 1 - \left[\frac{0,68 \cdot (1 - 0,01333)}{1 - 0,68 \cdot 0,01333} \right]^2 = 0,54157$$

2.5 Параметри схеми заміщення

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} \right) = 1 + \frac{72,541}{2 \cdot 6,8 \cdot 165,48} = 1,0322 \quad (2.18)$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot M_K \cdot P_{дв.н} \cdot C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_K} \right)} = \frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot (1 - 0,01333)}{2 \cdot 2,3 \cdot 90000 \cdot 1,0322 \cdot \left(1,5 + \frac{1}{0,06164} \right)} = 0,018225 \text{ Ом} \quad (2.19)$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0.018225 \cdot 1,5 \cdot 1.0322 = 0.028218 \text{ Ом} \quad (2.20)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_K}\right)^2 - \beta^2} = \left(\frac{1}{0,06164}\right)^2 - 1,5^2 = 16,154 \quad (2.21)$$

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,018225 \cdot 16,154 \cdot 1,0322 = 0,30389 \text{ Ом} \quad (2.22)$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 0.30389 = 0.12763 \text{ Ом} \quad (2.23)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,12763}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00040626 \text{ Гн} \quad (2.24)$$

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

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,30389}{1,0322} = 0,17076 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0.17076}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0.00054355 \text{ Гн} \quad (2.26)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

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

$$\sqrt{(219,393 \cdot 0,88 - 165,48 \cdot 0,32358)^2 + (219,393 \cdot 0,47497 - 165,48 \cdot 0,12763)^2} =$$

$$= 205,9 \quad (2.27)$$

Індуктивний опір контура намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{205,9}{72,541} = 2,8384 \text{ Ом} \quad (2.28)$$

Результуюча індуктивність

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{2,8384}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0090349 \text{ Гн} \quad (2.29)$$

Результуюче потокозчеплення

$$\psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 72,541 \cdot 0,0090349 = 0,92688 \quad (2.30)$$

Результуюча індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,00040626 + 0,0090349 = 0,009441 \text{ Гн}$$

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,00054355 + 0,0090349 = 0,009578 \text{ Гн}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,0090349^2}{0,009441 + 0,009578} = 0,995708$$

$$X_{1\sigma} = 0,12763$$

$$L_m = 0,009035$$

$$L_{1\sigma} = 0,000406$$

$$R_1 = 0,028218$$

$$L'_{2\sigma} = 0,000544$$

$$X_{KH} = 0,30389$$

$$X_{\mu} = 2,8384$$

$$R'_2 = 0,018225$$

$$\eta = \frac{22939}{1000} = 0,88$$

$$n_{\text{НОМ}} = 1480 \text{ об/хв}$$

Номинальний електромагнітний момент на валу двигуна

$$M' = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_H \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot 0,018225}{157,08 \cdot 0,01333 \left[0,30389^2 + \left(0,028218 + \frac{0,018225}{0,01333} \right)^2 + \left(\frac{0,028218 \cdot 0,018225}{0,01333 \cdot 2,8384} \right)^2 \right]} = 616,172 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.31)$$

$$M'' = \left(\frac{3}{2} \right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}} \right) \cdot \psi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\Phi H}^2 - I_0^2} \rightarrow M'' = 1103,378 \cdot \text{м} \quad (2.32)$$

2.6 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаємо діапазон та крок зміни ковзання

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

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

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \quad (2.33)$$

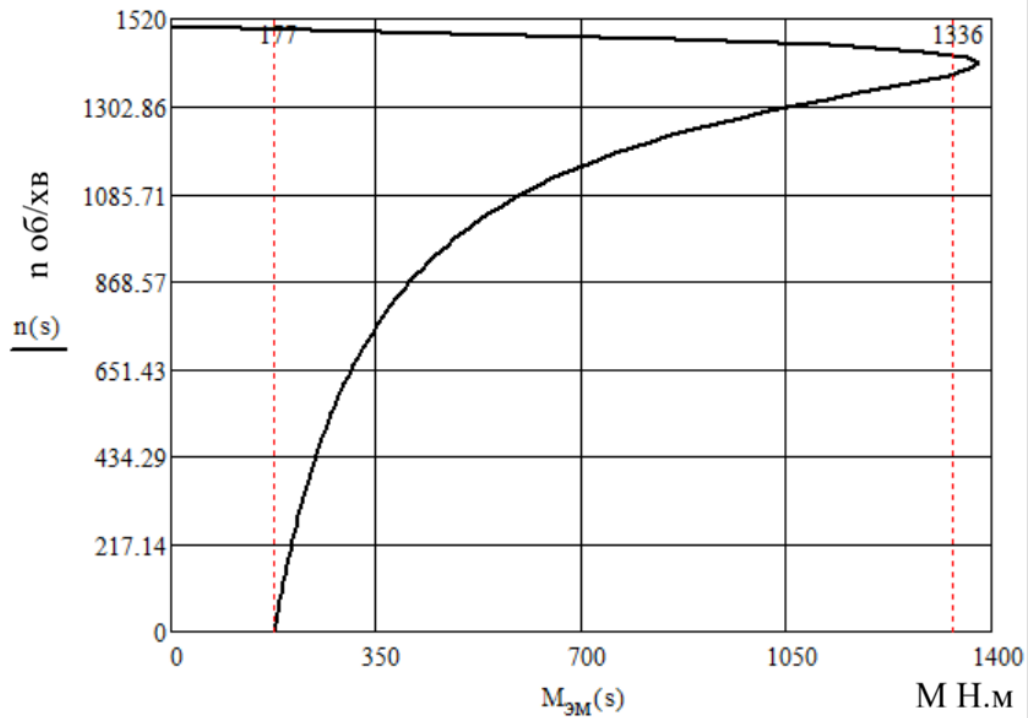


Рис. 2.8 Механічна характеристика двигуна

Порівняння розрахункових і паспортних даних двигуна

$$\omega_H = 154,99 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$M_{\text{нп}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{90000}{154,99} = 580,68 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.34)$$

$$M_{\text{к.пас}} = m_k \cdot M_{\text{нп}} = 2,3 \cdot 580,68 = 1335,564 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.35)$$

$$M_{\text{п.пас}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{нп}} = 2,0 \cdot 580,68 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1277,496 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.36)$$

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

$$\frac{3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot 154,99 \cdot 1,0322 \cdot (0,028218 + \sqrt{(0,028218^2 + 0,30389^2)})} = 1335,6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.37)$$

$$A = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0,028218}{0,018225} = 15483 \quad (2.38)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K}{S_H} + \frac{S_H}{S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 1335,6 \cdot (1 + 1,5483 \cdot 0,06164)}{\frac{0,06164}{0,01333} + \frac{0,01333}{0,06164} + 2 \cdot 1,5483 \cdot 0,06164} = 581,587 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.39)$$

$$S_{\Pi} = 1$$

$$M_{\text{пуск}} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + A \cdot S_K)}{\frac{S_K}{S_{\Pi}} + \frac{S_{\Pi}}{S_K} + 2 \cdot A \cdot S_K} = \frac{2 \cdot 1335,6 \cdot (1 + 1,5483 \cdot 0,06164)}{\frac{0,06164}{1} + \frac{1}{0,06164} + 2 \cdot 1,5247 \cdot 0,06164} = 177,602 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.40)$$

Розрахунок коефіцієнтів для рівняння навантажувальної компресорної характеристики

$$a = \frac{0,8M_{\text{нп}}}{n_{\text{ном}}^2} \rightarrow \frac{0,8 \cdot 580,68}{1480^2} = 0,00021208 \quad (2.41)$$

$$c = 0,2 \cdot M_{\text{нп}} \rightarrow 0,2 \cdot 580,68 = 116,136$$

Залежність моменту від швидкості для компресорного типу навантаження

$$M(n) = a \cdot n^2 + c \rightarrow 0,00021208 \cdot n^2 + 116,136$$

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

2.7 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна

Залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) \cdot (1 - s) \quad (2.42)$$

Механічний електромагнітний момент двигуна

$$M_{\text{ем}}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1\Phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \cdot R'_{2}}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right) \cdot S \left[\left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{2} \cdot f_{1H}}{S_H \cdot X_{\mu} \cdot f_1} \right)^2 \right]} \quad (2.43)$$

Побудова електромеханічної характеристики двигуна

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

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

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2}} \quad (2.44)$$

$$\sin \varphi(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{2}}{S_H} \right)^2}} \quad (2.45)$$

$$I_0 = \frac{72541}{10000} = 72,541 \text{ A}$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi(s)} \quad (2.46)$$

$$I_{\text{НОМ}} = 165,5 \text{ A}$$

$$I_{H1}(s) = I_{\text{НОМ}}$$

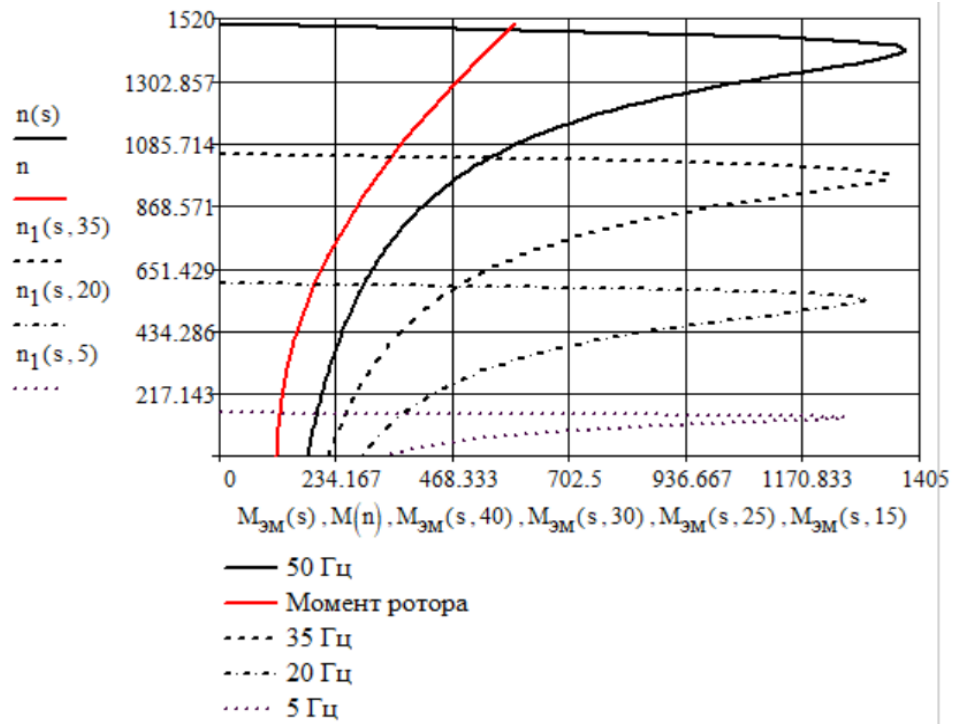


Рис. 2.9 Графіки механічних характеристик двигуна і насоса при регулюванні за скалярним законом

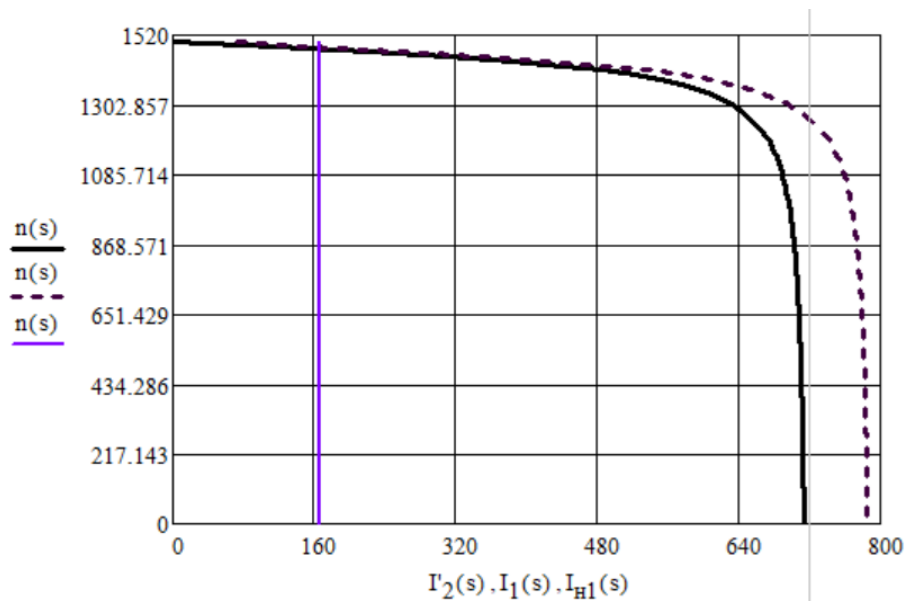


Рис. 2.10 Залежність струмів статора та частот обертання двигуна та плунжерного насоса

Розрахунок номінального струму статора

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} = \frac{219,393}{\sqrt{0,30389^2 + \left(0,028218 + \frac{0,018225}{0,01333}\right)^2}} = 153,62 \text{ A} \rightarrow (2.47)$$

$$\sin \varphi (s) = \frac{X_{\text{KH}}}{\sqrt{X_{\text{KH}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{H}}}\right)^2}} = \frac{0,30389}{\sqrt{0,30389^2 + \left(0,028218 + \frac{0,028218}{0,01333}\right)^2}} = 0,21279 \quad (2.48)$$

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

$$\sqrt{72,541^2 + 153,62^2 + 2 \cdot 72,541 \cdot 153,62 \cdot 0,21279}$$

$$I_1(s) = 183,314 \text{ A} \quad (2.49)$$

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

3.1 Математичне моделювання

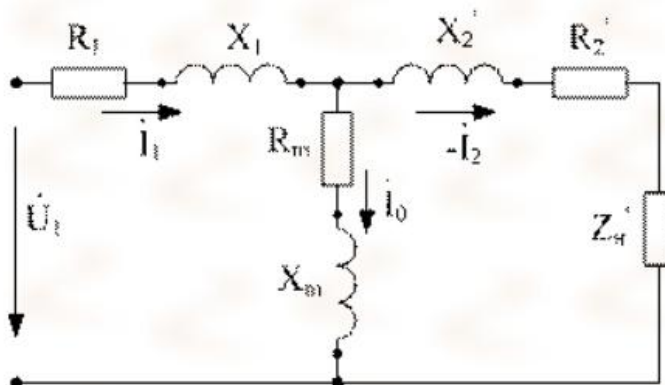


Рисунок 3.1 – Схема заміщення асинхронногодвигуна

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна

Таблиця 2.4

$X_{1\sigma}$	L_m	$L_{1\sigma}$	R_1	$L'_{2\sigma}$	$X_{кн}$	X_μ	R'_2
0,12763	0,009035	0,000406	0,028218	0,000544	0,30389	2,8384	0,018225

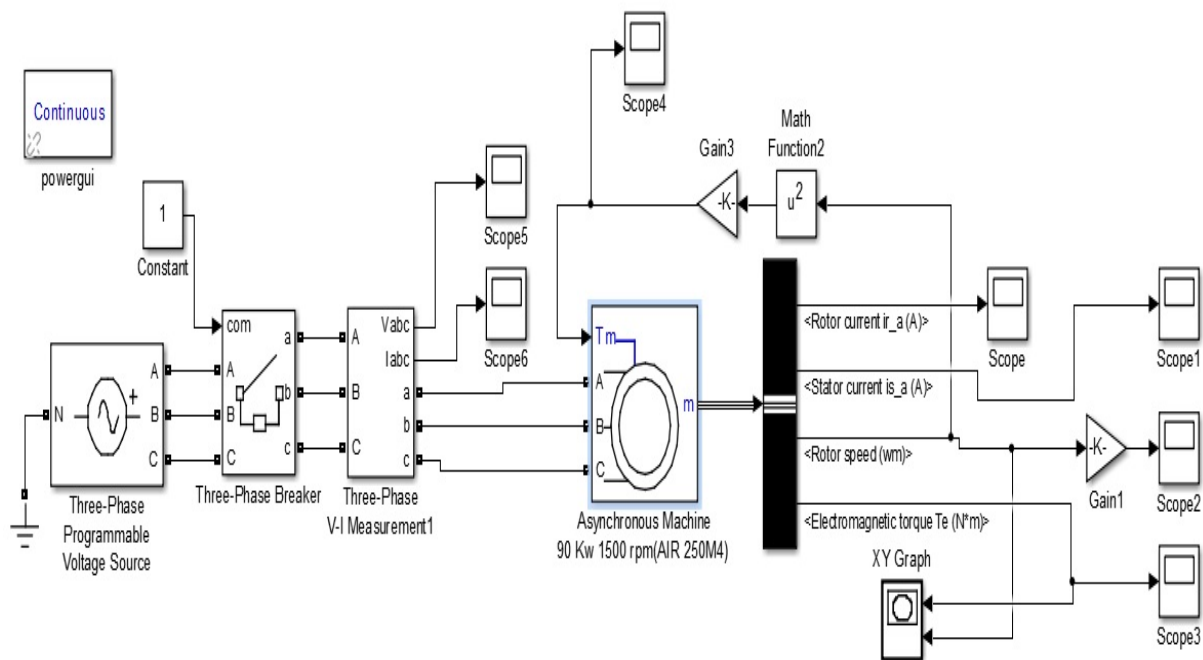


Рис. 3.2 Схема імітаційної моделі електроприводу плунжерного насоса у режимі прямого пуску без частотного перетворювача.

Block Parameters: Asynchronous Machine 90 Kw 1500 rpm(AIR 250M4)

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[90000, 380, 50]

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.028218 0.000406]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.018225 0.000544]

Mutual inductance Lm (H):

2.8384

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.4*6 0.03914 2]

Initial conditions

[1 0 0 0 0 0 0]

☐ Simulate saturation

Saturation Parameters [i1,i2,... (Arms) ; v1,v2,...(VrmsLL)]

1, 302.9841135, 420.4778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

OK Cancel Help Apply

Рис. 3.3 Вікно налаштування асинхронного електродвигуна у програмі MATLAB/Simulink

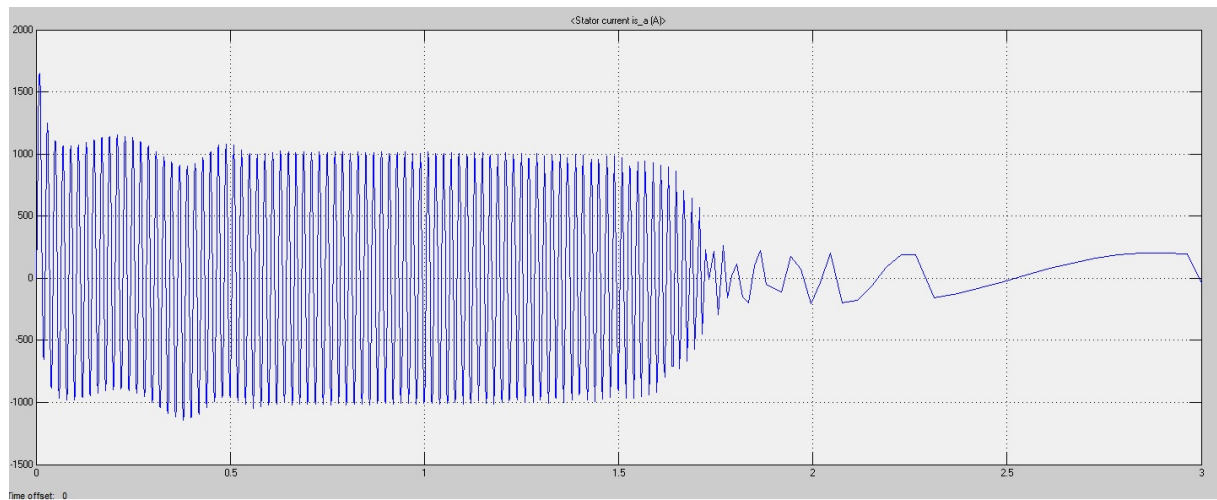


Рисунок 3.4 Графічний результат зміни струму статора електродвигуна плунжерного насосу

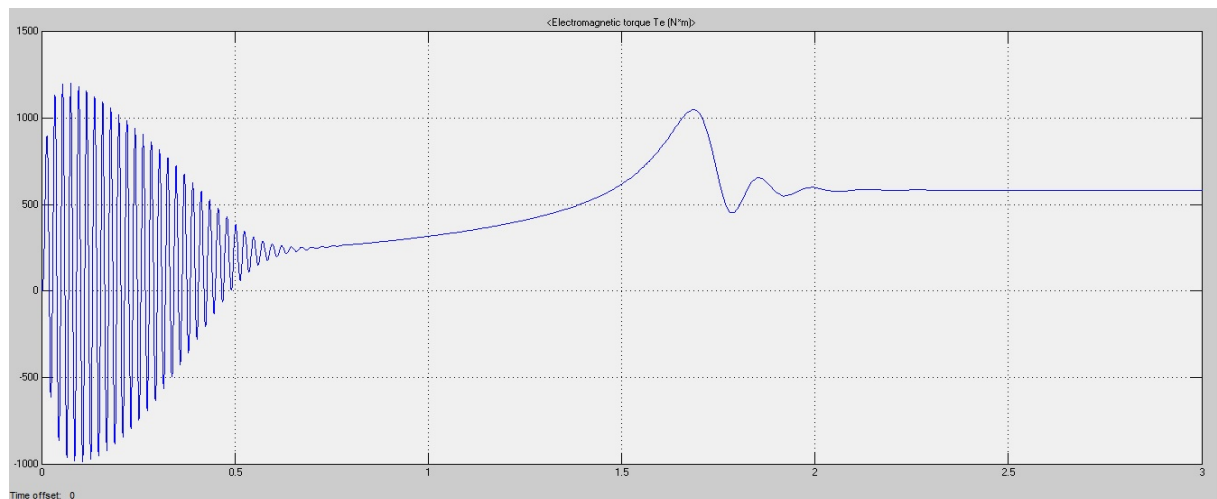


Рисунок 3.5 Графічний результат зміни електромагнітного моменту електродвигуна плунжерного насосу

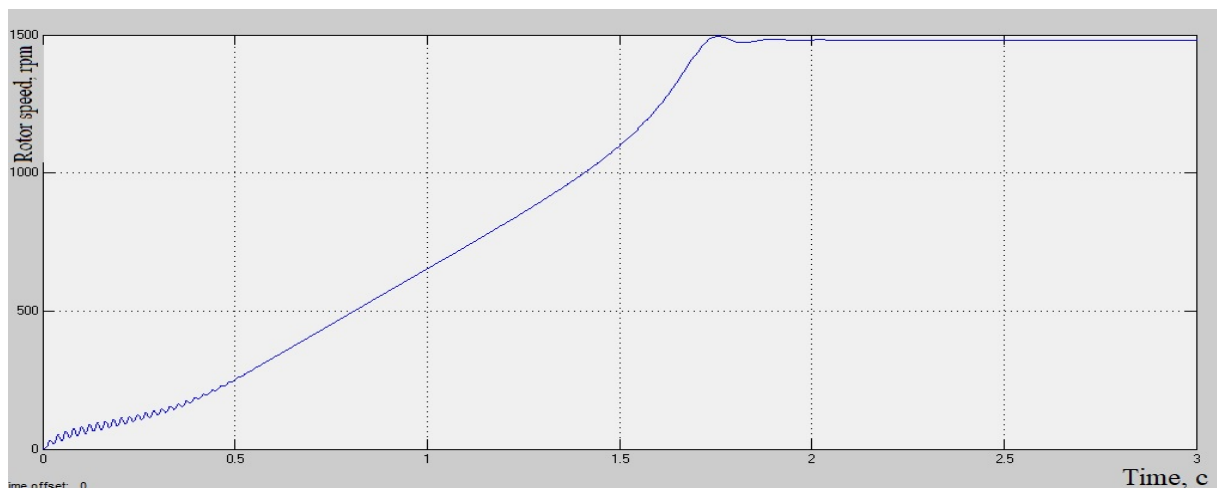


Рисунок 3.6 Графічний результат зміни швидкості ротора асинхронного електродвигуна плунжерного насоса без частотного регулювання.

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2

Арк

50

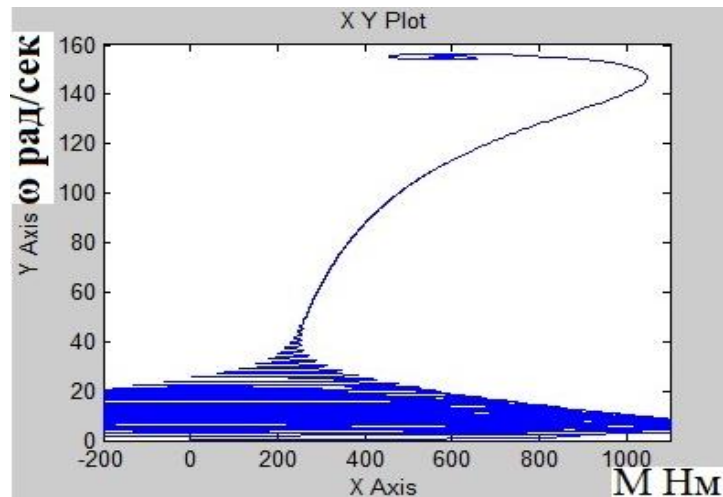


Рис. 3.7 Механічна характеристика електроприводу плунжерного насоса

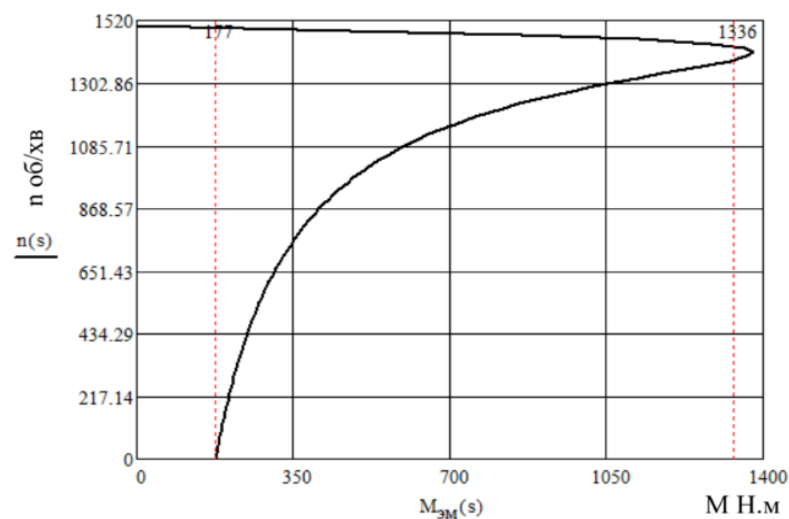


Рис. 3.8 Природна механічна характеристика двигуна



Рис. 3.9 Графік зміни швидкості при використанні частотного перетворювача частотою 40 Гц.

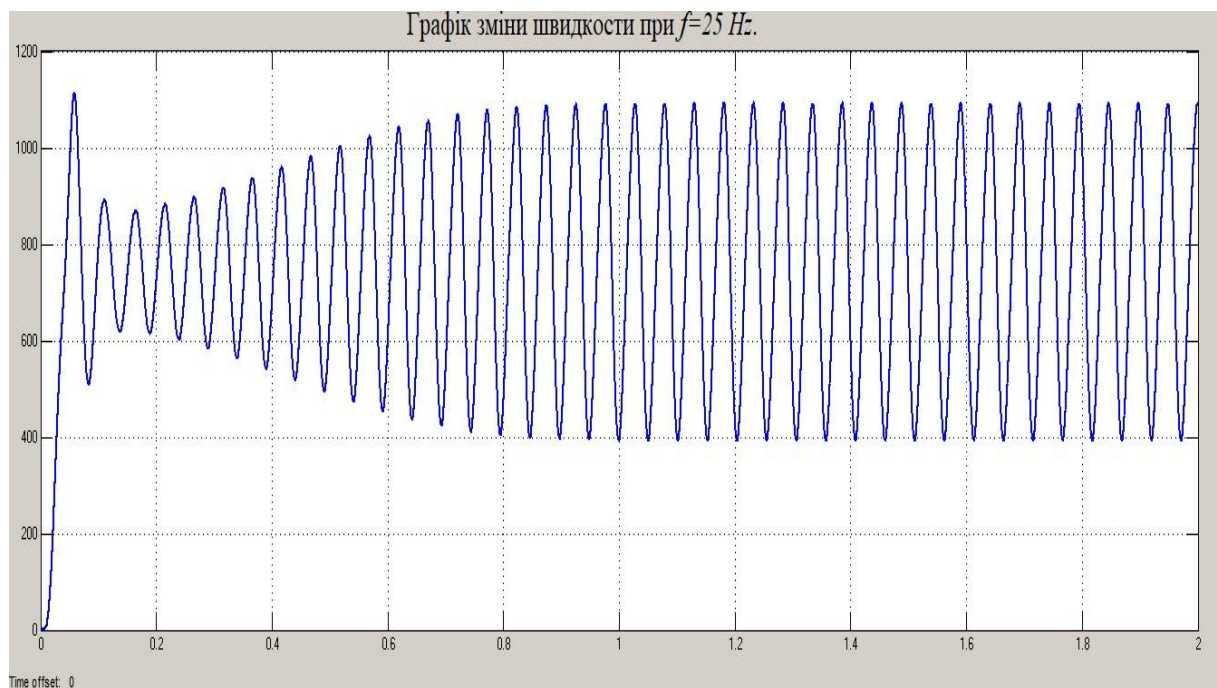


Рис. 3.10 Графік зміни швидкості при використанні частотного перетворювача частотою 25 Гц.

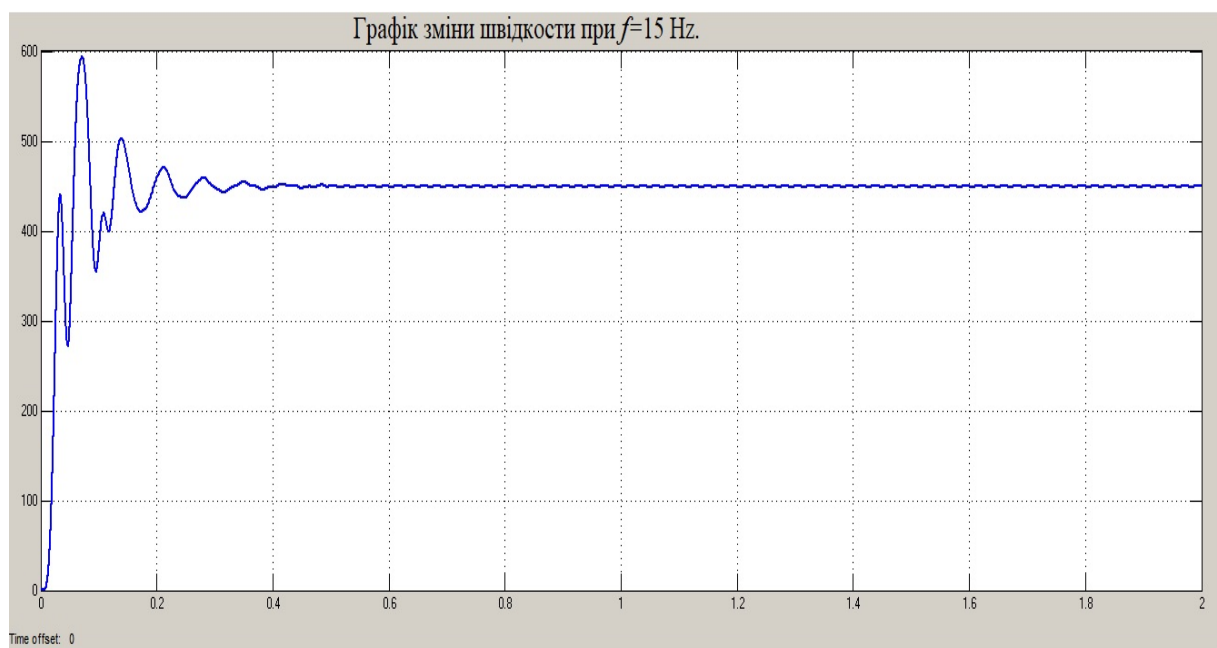


Рис. 3.11 Графік зміни швидкості при використанні частотного перетворювача частотою 15 Гц.

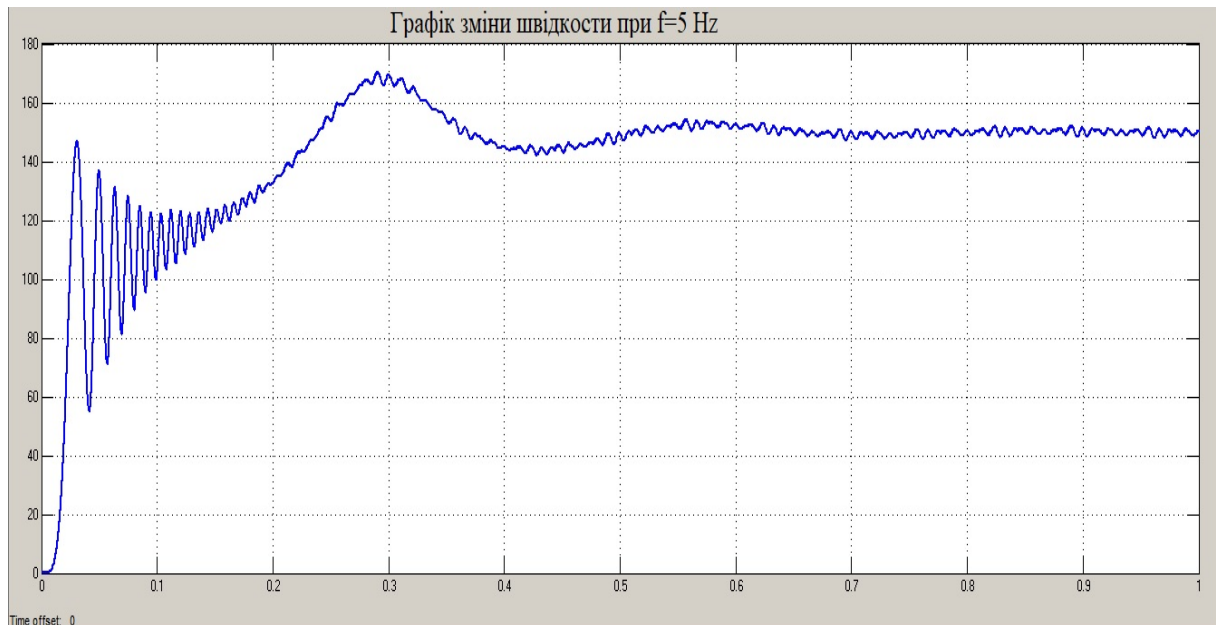


Рис. 3.12 графік зміни швидкості при використанні частотного перетворювача частотою 5 Гц.

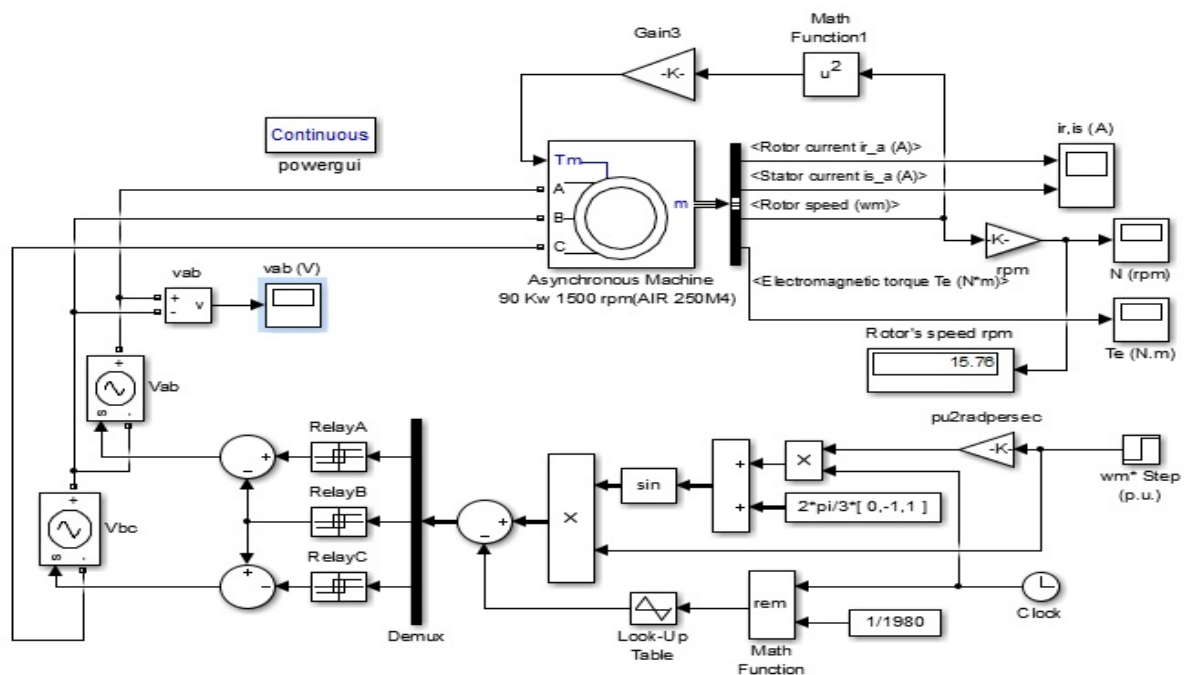


Рисунок 3.7 Схема імітаційної моделі електропривода плунжерного насоса з використанням частотного перетворювача за векторним законом.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

4.1 Визначення капітальних витрат

Для оцінки економічної доцільності модернізації електродвигуна плунжерного насоса необхідно виконати розрахунок основних техніко-економічних показників, а саме:

1. Капітальні витрати S_I — загальний обсяг інвестицій, необхідних для придбання, встановлення та введення в експлуатацію обладнання й супутніх елементів системи. До складу капітальних витрат входять:

- придбання основного обладнання;
- закупівля комплектуючих та допоміжних матеріалів;
- виконання демонтажних робіт;
- монтаж і пусконаладження;
- транспортні витрати.

2. Експлуатаційні витрати — щорічні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, ремонтом та підтриманням обладнання у працездатному стані.

3. Витрати на електроенергію — річна вартість електроенергії, споживаної модернізованим електроприводом у процесі експлуатації.

Розрахунок вартості обладнання.

Асинхронний двигун 4АМ 250М4 – 46000 грн.

РЕДУКТОР 1Ц2У-250 – 23000 грн.

Перетворювач частоти Altivar Process ATV650 - 416000грн.

Сумарна величина проектних капіталовкладень за формулою:

$$S_i = S_{об} + S_n + S_k \quad (4.1)$$

де $S_{об}$ - сумарна вартість обладнання, необхідного для реалізації проекту;

S_n — загальні витрати на налаштування нового обладнання, до яких

відносяться демонтаж, монтаж та наладка нового обладнання;
 S_k – придбання комплектуючих елементів, становлять приблизно 10% від вартості обладнання.

$$S_{об} = 46000 + 23000 + 415000 = 484000 \text{ грн}$$

Витрати на транспортування, демонтаж, монтаж і пусконаладжувальні роботи визначаються на основі діючих цін, тарифів і прейскурантів відповідних транспортних і монтажних підприємств. У розрахунках ці витрати приймаються на рівні 10-20% від вартості обладнання.

$$S_i = 484000 + 48400 + 48400 = 580800 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати складаються з річних витрат на ремонт та обслуговування модернізованого обладнання:

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

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

$V_{обс}$ - заробітна плата ремонтного і обслуговуючого персоналу.

За відсутності конкретних даних для визначення витрат на поточний ремонт ці складові щорічних експлуатаційних витрат можуть бути розраховані за методом укрупнених розрахунків у відсотках від капітальних витрат за варіантами, що порівнюються:

- для електричних машин (генераторів, двигунів, трансформаторів) – 2-3%;
- для електричних кабелів – 1,5-2%;
- для систем електропривода – 1-8%.

Після модернізації

$V_{обс}$ - заробітна плата ремонтного і обслуговуючого персоналу.

До модернізації

$$B'_p = 17424 + 11616 + 34848 = 63888 \text{ грн}$$

Річні витрати на обслуговування обладнання

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

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

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

t_i - середній час роботи одного працівника по обслуговуванню устаткування, (годин);

t_p - дійсний річний фонд часу одного працюючого.

За даними Держкомстату середня заробітна плата в Україні в 2026 році становить 30356 грн. на місяць, обов'язковий платіж ЕСВ 22%.

Визначаєм річні витрати на заробітну плату одного працівника. Графік роботи: двозмінний, рафік «доба через три» 24 години роботи; 72 години відпочинку.

Для асинхронного електродвигуна серії 4AM250M4 технічне обслуговування проводиться через кожні 720 годин роботи, а поточний ремонт — через 4320 годин експлуатації. Періодичність ремонтів визначається умовами експлуатації, режимом навантаження та вимогами системи планово-попереджувальних ремонтів підприємства. Час на обслуговування – 8 год, обслуговують 2 фахівця.

При графіку роботи «доба через три» працівник працює 24 години, після чого має 72 години відпочинку. Тривалість одного циклу становить:

$$T_{\text{ц}} = 24 + 72 = 96 \text{ год}$$

За один цикл працівник відпрацьовує 24 години, тобто 25 % календарного часу. Дійсний річний фонд робочого часу визначається так:

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						56
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$F_d = 365 \cdot 24 \cdot 0,25 = 2190 \text{ год}$$

Годинна ставка одного працівника

$$z_r = \frac{30356 \cdot 12}{2190} = 166,33 \text{ грн}$$

$$B_{\text{обс}} = \frac{365 \cdot 12}{4320} \cdot 8 \cdot 2 \cdot 166,33 = 2698,24 \text{ грн.}$$

ЄСВ та інші доплати зазвичай приймають 22 %:

$$5396,48 \cdot 1,22 = 3291,86 \text{ грн}$$

До модернізації поточний ремонт проводився кожні 3000 годин роботи, час на обслуговування – 8 год, обслуговування проводили 2 фахівця.

$$B'_{\text{обс}} = \frac{365 \cdot 12}{3000} \cdot 8 \cdot 2 \cdot 166,33 \cdot 1,2 = 4662,56 \text{ грн.}$$

Вартість втрат електроенергії для електродвигунів, генераторів:

$$B_e = \Psi_e \cdot h \cdot \kappa_z \cdot P_{\text{ном}} \cdot \frac{(1-\eta+\alpha)}{\eta} \quad (4.4)$$

де Ψ_e - середній тариф за 1 кВт·час 15,02 грн. (за індексом Минфіна тариф на передачу електроенергії – 9,50 грн., на розподіл електроенергії для непобутових споживачів – 3,02грн., НДС – 20%)

h - кількість годин роботи двигуна протягом року, для цього показника рекомендовані такі значення: плунжерний насос - 6000 годин/рік

κ_z – середній коефіцієнт завантаження двигуна, за відсутністю даних про середньорічну потужність, значення може бути прийнято в розмірі 0,6-0,8

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт.

η - к.к.д. електродвигуна, після модернізації становить 97%;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						57
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

α - відносна величина втрат в розподільчих мережах споживача, віднесена до спожитої потужності двигуна (приймається в розмірі 1–4%).

$$B_e = 15,02 \cdot 6000 \cdot 0,7 \cdot 90 \cdot \frac{(1 - 0,97 + 2,7)}{0,97} = 1346225,67 \text{ грн}$$

ККД асинхронного двигуна без частотного перетворювача – 87%

До модернізації

$$B'_e = 15,02 \cdot 6000 \cdot 0,7 \cdot 90 \cdot \frac{(1 - 0,87 + 2,7)}{0,87} = 15662234,48 \text{ грн}$$

Річна економія на електроенергії складає **14316008,81** грн.

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{S_i + B_p + B_{\text{обс}} + B_e}{\dot{B}_p + \dot{B}_{\text{обс}} + \dot{B}_e} = \frac{580800 + 26136 + 3291,86 + 1346225,67}{63888 + 4662,56 + 15662234,48} = 0,9 \text{ роки}$$

Отримані результати роботи сушільного агрегату до модернізації і після свідчать про її доцільність. Результати встановлення трифазного асинхронного двигуна і частотного перетворювача:

- споживання електроенергії зменшилося на 1 433363,63 грн. на рік.
- збільшення ефективності роботи двигуна до 97%;
- збільшився термін служби механічних частин двигуна;
- суттєво знизилися час на капітальний ремонт.

Доцільно рекомендувати модернізацію плунжерного насоса з використанням частотного перетворювача.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні вимоги

Робота з плунжерними насосами належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки обладнання працює під високим тиском і має рухомі механічні частини, наявністю обертових механізмів, та електричної напруги, що можуть становити небезпеку для обслуговуючого персоналу.

До роботи на плунжерних насосних агрегатах допускаються працівники, які пройшли спеціальне навчання, перевірку знань з охорони праці та інструктажі відповідно до встановленого порядку на підприємстві. Персонал повинен мати відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки (не нижче III групи для електротехнічного персоналу), бути ознайомленим з конструкцією обладнання, принципом його роботи та можливими небезпечними факторами виробничого процесу.

До роботи допускаються особи, які:

- досягли 18-річного віку;
- пройшли медичний огляд і не мають протипоказань до виконання даного виду робіт;
- пройшли вступний, первинний та періодичний інструктаж з охорони праці;
- вивчили інструкції з експлуатації плунжерного насоса та електропривода;
- ознайомлені з правилами роботи з електрообладнанням напругою до 1000В.

Основними небезпечними та шкідливими факторами є:

- наявність електричної напруги;
- рухомі частини насосного агрегату;
- підвищений рівень вібрації та шуму;
- можливі гідравлічні удари в системі;
- підвищена температура електродвигуна та редуктора;
- електромагнітні поля від перетворювача частоти.

Працівники повинні:

- своєчасно приступати до роботи та завершувати її відповідно до встановленого графіка;
- дотримуватись регламентованих технологічних перерв;
- виконувати виключно ті роботи, які передбачені змінним завданням;
- не перебувати на робочому місці у позаробочий час без дозволу керівника.

5.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

У процесі експлуатації вакуумних насосів можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Фізичні фактори:

- рухомі частини обладнання;
- небезпечна електрична напруга, шлях якої може проходити через тіло людини;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання;
- несприятливі параметри мікроклімату (температура та рух повітря);
- недостатній рівень освітлення робочої зони.

Хімічні фактори:

- вплив токсичних та подразнюючих речовин на організм працівника.

Психофізіологічні фактори:

- нервово-емоційні навантаження, монотонність виконуваних операцій.

Працівникам, зайнятим на роботах зі шкідливими або небезпечними умовами праці, видаються безкоштовно засоби індивідуального захисту відповідно до встановлених норм (спецодяг, спецвзуття, рукавиці тощо). За потреби також забезпечується видача мийних засобів.

Під час виконання робіт працівники зобов'язані дотримуватись правил особистої гігієни та санітарних норм, зокрема:

- виконувати роботи лише у справних засобах індивідуального захисту;

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						60
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- підтримувати чистоту на робочому місці протягом зміни;
- приймати їжу тільки у спеціально відведених місцях;
- після завершення роботи очищати відкриті ділянки тіла від забруднень.

5.3 Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком роботи персонал зобов'язаний:

- перевірити справність та наявність засобів індивідуального захисту;
- забезпечити роботу припливно-витяжної вентиляції за 15–20 хвилин до запуску обладнання;
- перевірити заземлення, стан огорожень приводів, рівень мастила, герметичність ущільнень і трубопроводів;
- перевірити справність клапанів і дозуючих пристроїв;
- при необхідності перевірити напрям обертання електродвигуна;
- у разі виявлення несправностей негайно повідомити керівника робіт і не розпочинати експлуатацію до їх усунення.

5.4 Вимоги безпеки під час роботи

Під час експлуатації обладнання необхідно:

- не перевищувати робочий тиск, встановлений паспортом виробника;
- дотримуватись правильної послідовності запуску та зупинки насоса;
- контролювати рівень мастила та своєчасно його поповнювати;
- періодично видаляти накопичену вологу з системи;
- контролювати температуру електродвигуна та запобігати перегріву;
- стежити за рівнем вібрації обладнання.

Забороняється:

- працювати при несправному обладнанні;
- перебувати в стані алкогольного або наркотичного сп'яніння;
- палити та вживати алкоголь на робочому місці.

У разі виявлення несправностей робота негайно припиняється до їх усунення.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						61
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

5.5 Вимоги безпеки після закінчення роботи

Після завершення роботи обладнання повинно бути зупинено у встановленому порядку:

- перекрито впускні та дозуючі вентиля;
- вимкнено насос та електроживлення;
- перекрито подачу води та мастила;
- перевірено стан обладнання після зупинки.

У разі виявлення відхилень інформація передається відповідальній особі.

5.6 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

До аварійних ситуацій належать:

- розгерметизація обладнання з витокм робочого середовища;
- загоряння обладнання або електроустановок;
- відключення електроживлення або вихід з ладу засобів захисту.

При травмуванні працівника необхідно:

- негайно надати першу допомогу;
- викликати медичну службу;
- повідомити керівництво;
- зберегти обстановку на місці події (за можливості).

5.7 Пожежна безпека

Під час експлуатації плунжерних насосів існує небезпека виникнення пожежі внаслідок короткого замикання електрообладнання, перегріву електродвигуна, пошкодження кабельних ліній, виток мастильних матеріалів або загоряння ізоляції. Для забезпечення пожежної безпеки насосна установка повинна відповідати вимогам чинних норм пожежної безпеки та бути забезпечена первинними засобами пожежогасіння.

У приміщенні насосної станції повинні знаходитися:

- вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-5 або ВВК-8 — для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою;

- порошкові вогнегасники типу ВП-5 або ВП-9 — для ліквідації загорянь мастил, кабельної ізоляції та електрообладнання;
- ящик із сухим піском;
- пожежний щит;
- азбестове полотно або протипожежне покривало;
- внутрішній пожежний кран (за наявності водопроводу).

Гасіння електрообладнання під напругою водою або пінними вогнегасниками забороняється.

Для попередження пожежі необхідно:

- регулярно перевіряти стан електропроводки та контактних з'єднань;
- не допускати перевантаження електродвигуна;
- контролювати температуру підшипників та корпусу двигуна;
- своєчасно очищати обладнання від пилу та залишків мастила;
- забезпечувати справність вентиляції;
- не допускати витоків мастильних матеріалів.

Куріння та використання відкритого вогню в насосному приміщенні категорично забороняється. У виробничому приміщенні повинні бути встановлені попереджувальні знаки пожежної безпеки та схема евакуації персоналу.

У разі виникнення пожежі необхідно:

1. Негайно відключити електроживлення насосної установки.
2. Повідомити пожежну службу та керівника робіт.
3. Евакуювати персонал із небезпечної зони.
4. Розпочати гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння.

При загорянні електрообладнання використовувати тільки вуглекислотні або порошкові вогнегасники.

5.8 Електробезпека

Плунжерний насосний агрегат обладнаний електроприводом, який працює від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В, тому під час

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		63

експлуатації існує небезпека ураження персоналу електричним струмом. Основними причинами електротравм можуть бути пошкодження ізоляції кабелів, порушення заземлення, дотик до струмоведучих частин, коротке замикання та несправність пускозахисної апаратури. Для забезпечення електробезпеки необхідно виконувати такі вимоги:

- усі металеві неструмоведучі частини електрообладнання повинні бути надійно заземлені;
 - електродвигун, шафа керування та пускова апаратура повинні мати справну ізоляцію;
 - кабельні лінії повинні бути захищені від механічних пошкоджень;
- роботи з електрообладнанням дозволяється проводити тільки при знятій напрузі;
- перед виконанням ремонтних робіт необхідно вивішувати попереджувальний плакат «Не вмикати! Працюють люди!»;
 - обслуговування електрообладнання повинно виконуватись персоналом, який має відповідну групу допуску з електробезпеки.

Для захисту електропривода застосовуються:

- автоматичні вимикачі;
- теплові реле;
- запобіжники;
- пристрої захисного відключення;
- захисне заземлення.

Опір заземлювального пристрою повинен відповідати вимогам ПУЕ та забезпечувати безпечне відведення струму замикання в землю.

Під час роботи забороняється:

- торкатися оголених струмоведучих частин;
- експлуатувати обладнання зі знятим захисним кожухом;
- використовувати несправний електроінструмент;
- виконувати роботи у вологому одязі або мокрими руками;
- залишати відкритими дверцята електричних шаф.

У разі ураження людини електричним струмом необхідно:

1. Негайно відключити напругу.
2. Звільнити потерпілого від дії струму.
3. Викликати медичну допомогу.
4. За необхідності виконати штучне дихання та непрямий масаж серця.
5. Повідомити керівника робіт.

5.9 Виробнича санітарія

Під час експлуатації плунжерного насосного обладнання необхідно забезпечити належні санітарно-гігієнічні умови праці, які відповідають вимогам чинних нормативних документів та забезпечують безпечну роботу обслуговуючого персоналу. До основних факторів виробничого середовища, що впливають на умови праці, належать:

- температура та вологість повітря;
- рівень шуму та вібрації;
- запиленість і загазованість повітря;
- освітленість робочої зони;
- вентиляція виробничого приміщення.

Для нормальної роботи персоналу в насосному приміщенні повинні підтримуватись оптимальні параметри мікроклімату:

- температура повітря — 18–25 °С;
- відносна вологість — 40–60 %;
- швидкість руху повітря — не більше 0,3 м/с.

Підвищення температури може виникати внаслідок нагрівання електродвигуна, редуктора та насосного обладнання, тому в приміщенні необхідно передбачити ефективну припливно-витяжну вентиляцію.

Для забезпечення нормального повітрообміну насосне приміщення обладнується припливно-витяжною вентиляцією. Вентиляція забезпечує:

- видалення надлишкового тепла;

- зниження концентрації парів мастильних матеріалів;
- підтримання допустимої температури повітря;
- покращення умов праці персоналу.

Перед початком роботи вентиляція повинна бути увімкнена не менше ніж за 15–20 хвилин.

Освітлення виробничого приміщення повинно забезпечувати безпечне обслуговування обладнання та проведення ремонтних робіт. У насосних приміщеннях застосовується:

- природне освітлення;
- штучне загальне та місцеве освітлення.

Нормована освітленість робочої зони повинна становити не менше 200 лк. Світильники повинні мати захисні плафони та відповідати умовам експлуатації виробничих приміщень.

Для зменшення рівня шуму та вібрації передбачаються:

- встановлення обладнання на віброізоляційних опорах;
- застосування амортизаторів;
- своєчасне балансування обертових частин;
- контроль стану підшипників та кріплень.

Рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати допустимих санітарних норм.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано модернізацію електропривода плунжерного насоса для перекачування технічних рідин з метою підвищення надійності, енергоефективності та покращення експлуатаційних характеристик насосної установки. У ході роботи було проведено аналіз конструктивних та експлуатаційних особливостей плунжерних насосів, досліджено режими їх роботи та характер навантаження на електропривод. Встановлено, що традиційні системи привода без регулювання швидкості характеризуються високими пусковими струмами, значними динамічними навантаженнями, підвищеним рівнем вібрацій та нерівномірністю роботи насосного агрегата. Для модернізації електропривода було обрано асинхронний електродвигун 4AM250M4, редуктор 1Ц2У-250 та перетворювач частоти Altivar Process ATV650. Використання частотного регулювання дозволило забезпечити плавний пуск і зупинку насоса, знизити пускові струми, зменшити механічні удари та покращити регулювання продуктивності установки.

Проведені техніко-економічні розрахунки показали економічну доцільність модернізації. Впровадження перетворювача частоти дозволяє зменшити споживання електроенергії, підвищити міжремонтний ресурс обладнання та скоротити експлуатаційні витрати.

У розділі охорони праці розглянуто питання електробезпеки, пожежної безпеки, виробничої санітарії та безпечної експлуатації плунжерного насосного обладнання. Запропоновані заходи забезпечують безпечні умови праці та знижують ризик виникнення аварійних ситуацій. Отже, модернізація електропривода плунжерного насоса на базі асинхронного двигуна та частотного перетворювача є технічно та економічно обґрунтованим рішенням, яке дозволяє підвищити ефективність роботи насосної установки, зменшити енергоспоживання та підвищити надійність експлуатації обладнання.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2	Арк
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Навчально-методичний посібник. / В.І.Дуганець, І.М.Бендера, В.А. Дідур та ін. За ред. В.І. Дуганця, І.М.Бендери, В.А. Дідура. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В. 2013. – 566 с. URL: <https://cutt.us/tT4oV>.
2. Насоси, повітродувки, компресори. Навчальний посібник для вузів ІМ. І. Колотило - Харків: ХДТУБА. - 1997. - 128 с.
3. Мандрує І.В. Гідравлічні та аеродинамічні машини (насоси, вентилятори, газодувки, компресори): Підручник: - Львів; «Магнолія плюс», видавець В.М. Піча, 2004.-340 с.;
4. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін. За ред. М.Г. Поповича. – К. Вища шк., 1993. – 494 с.
5. Електропривод: Навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Ю. М. Хондола, І. П. Ільчов; За ред.. О. Ю. Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. 586 с. 5
6. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М. В. Загірняк та ін. 2-ге вид., перероб. і доповн. Харків: Точка, 2017. 206 с.
7. Квітка С. О., Безменнікова Л. М., Вовк О. Ю., Квітка О. С. Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2013. Вип. 3, т. 2. С. 164-171
8. Моржов В.І. Математичне моделювання систем та процесів. Лабораторний практикум К. НАУ, 2018. 46с.
9. Лебідь Р.Д. Математичні методи моделювання систем. Навчальний посібник. К. КМУЦА, 2020. 158с.
10. Гетьман О.О. Економіка підприємства: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / О.О.Гетьман, В.М. Шаповал – К.:

Центр навч. літ., 2006 – 488с

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

					<i>КРБ.АТЕіРС.1.641-03.4.2</i>	Арк
						69
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		