

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-40.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-2

Петро Дожук

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Дожук Петро Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53: 004.89

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення системи управління електровідцентровим насосом для

(назва роботи)

видобутку нафти

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

П.П. Дожук

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання)

Л.І. Фешанич

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

В.С. Борин

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » _____ 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Дожуку Петру Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення системи управління електровідцентровим насосом для видобутку нафти

керівник роботи к.т.н., Лідія Ігорівна Фешанич

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практик, науково-технічні журнали, довідники, технологічний регламент, методичні вказівки, технічна література.

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

1. Сучасний стан проблеми управління процесом видобутку нафти з використанням установок електровідцентрових насосів.

2. Підбір компонентів та програмного забезпечення.

3. Розроблення системи керування (УЕВН).

4. Оптимізація системи керування та розроблення технічної документації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 20.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасний стан проблеми управління процесом видобутку нафти з використанням установок електровідцентрових насосів	20.11.25-25.11.25	
2	Підбір компонентів та програмного забезпечення	18.11.25-30.11.25	
3	Розроблення системи керування (УЕВН)	22.11.25-5.12.25	
4	Оптимізація системи керування та розроблення технічної документації	27.11.25-5.12.25	

Студент _____
(підпис)

П.П. Дожук _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Л.І. Фешанич _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі було проведено аналіз технологічного процесу видобутку нафти установками електровідцентрових насосів та розроблено автоматизовану систему керування на основі частотно-регульованого електроприводу. Досліджено УЕВН як об'єкт керування з урахуванням його нелінійних та інерційних властивостей. Розроблено алгоритмічне забезпечення системи регулювання тиску з ПД-регулятором та запропоновано метод віртуальної витратомірї для оцінки продуктивності без прямих вимірювань.

Математичне моделювання динамічних режимів та аналіз перехідних процесів підтвердили стійкість і ефективність системи у змінних умовах експлуатації. Розроблено електричні схеми та архітектуру системи на базі контролера Siemens Simatic S7-1200, перетворювача SINAMICS G120 та середовища TIA Portal. Техніко-економічний аналіз довів доцільність впровадження рішень та зниження енергоспоживання.

Пояснювальна записка до магістерської роботи має обсяг 67 сторінок, містить 21 рисунок, 1 таблицю та 17 літературних джерел.

Результати роботи можуть бути використані при модернізації систем керування установками електровідцентрових насосів на нафтовидобувних підприємствах, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації.

Ключові слова: АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, УСТАНОВКА ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА, ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ПД-РЕГУЛЯТОР, ВІРТУАЛЬНА ВИТРАТОМІРІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

ANNOTATION

In the master's thesis, the technological process of oil extraction using electric submersible pump (ESP) units was analyzed, and an automated control system based on a variable-frequency drive was developed. The ESP unit was investigated as a control object, taking into account its nonlinear and inertial properties. Algorithmic support for the pressure control system using a PID controller was developed, and a virtual flow metering method was proposed for productivity estimation without direct measurements.

Mathematical modeling of dynamic modes and analysis of transient processes confirmed the system's stability and efficiency under variable operating conditions. Electrical schematics and system architecture based on the Siemens Simatic S7-1200 controller, SINAMICS G120 converter, and TIA Portal environment were developed. The techno-economic analysis proved the feasibility of implementing the solutions and the reduction of energy consumption.

The master's thesis comprises 67 pages, 21 figures, 1 table, and 17 references.

The results of the work can be used in the modernization of control systems for electric submersible pump units at oil production enterprises, as well as in the educational process for training automation specialists.

Keywords: AUTOMATIC CONTROL, CENTRIFUGAL PUMP UNIT, VARIABLE-FREQUENCY DRIVE, PID CONTROLLER, VIRTUAL FLOW METERING, AUTOMATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВИДОБУТКУ НАФТИ З ВИКОРИСТАННЯМ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ	13
1.1. Конструкція і принципи роботи установок електровідцентрових насосів для видобутку нафти (УЕВН).....	13
1.2. Аналіз УЕВН з точки зору об'єкту управління	19
1.3. Аналіз пристроїв і систем автоматичного управління процесом видобутку нафти з використанням УЕВН.....	21
Висновки до розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. ПІДБІР КОМПОНЕНТІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	24
2.1. Порівняльний аналіз контролерів та вибір керуючого пристрою.....	24
2.2. Підбір програмного забезпечення	27
2.3. Насос ЕЦНМ5-50-1300 відцентровий занурювальний	28
2.4. Характеристика датчиків	29
2.5. Технічні характеристики частотного перетворювача Siemens SINAMICS	30
2.6. Вибір засобів візуалізації та людино-машинного інтерфейсу (HMI)	31
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ (УЕВН).....	34
3.1. Розроблення алгоритму управління	34
3.1.1. Обґрунтування методу віртуальної витратомірїї та масштабування розрахункових змінних	39

3.1.2. Теоретичні основи регулювання тиску в системах з частотно-регульованим електроприводом.....	41
3.2. Розроблення автоматизації в Siemens TIA Portal V17.....	42
Висновки до розділу 3	46
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ.....	47
4.1. Математичне моделювання динаміки системи автоматичного регулювання (САР)	47
4.1.1. Дослідження перехідних процесів та аналіз стійкості системи	49
4.1.2. Фізична інтерпретація результатів математичного моделювання	51
4.2. Розроблення та опис функціональної схеми автоматизації	52
4.3. Технічна реалізація та схема електричних з'єднань	53
4.4. Програмна реалізація алгоритмів керування в TIA Portal	54
4.5. Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності	55
4.6. Оцінка впливу автоматизованого керування на надійність та міжремонтний період УЕВН	56
4.7. Опис графічної частини та технічних рішень проекту	56
4.7.1. Опис схеми автоматизації функціональної (Додаток А).....	57
4.7.2. Опис схеми електричної принципової (Додаток Б)	57
4.7.3. Опис схеми мережевих з'єднань (Додаток В)	58
Висновки до розділу 4	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ЕВН – Електровідцентровий Насос

УЕВН – Установа з Електровідцентровим Насосом

HMI (Human Machine Interface) – Людинно-машинний інтерфейс (ЛМІ)

PLC (Programmable Logic Controller) – Програмований логічний
контролер (ПЛК)

PC Personal Computer) – Персональний комп'ютер (ПК)

CPU Central Processing Unit) – Центральний процесор (ЦП)

LD (Ladder Diagram) – Мова релейно-контактних схем (Релейна діаграма)

ST (Structured Text) – Мова структурованого тексту

FBD (Function Block Diagram) – Мова функціональних блокових діаграм

SFC (Sequential Function Chart) – Мова послідовних функціональних схем

UDFB (User Defined Function Block) – Функціональний блок користувача
(розроблений користувачем)

ВСТУП

Актуальність теми. Нафтогазовий комплекс сьогодні залишається однією з найбільш стратегічно важливих галузей економіки України, що забезпечує енергетичну стабільність держави. В умовах глобальної нестабільності енергоринків та виснаження легкодоступних запасів вуглеводнів, перед вітчизняними нафтовидобувними підприємствами гостро постає завдання підвищення ефективності експлуатації існуючого фонду свердловин. Більшість родовищ України знаходяться на завершальній стадії розробки, що характеризується зниженням пластового тиску, зростанням обводненості продукції та збільшенням впливу газового фактору. У сучасній практиці нафтовидобутку домінуючу роль відіграють механізовані способи підйому рідини, серед яких ключове місце займають установки занурних електровідцентрових насосів (УЕВН). Ця технологія стала безальтернативним стандартом для глибоких горизонтів. Проте значна частина свердловин все ще оснащена морально застарілими станціями керування, які використовують нерегульований електропривід. Регулювання дебіту в таких системах здійснюється методом дроселювання засувкою на гирлі, що є енергетично марнотратним та призводить до прискореного зносу обладнання.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем керування, здатних забезпечити оптимальний режим роботи насосного агрегату в умовах динамічної зміни параметрів припливу. Перехід до частотно-регульованого електроприводу дозволяє не лише знизити питомі витрати електроенергії, але й створює передумови для реалізації алгоритмів захисту від «сухого ходу» та зриву подачі, що є критично важливим для дороговартісного занурного обладнання. Таким чином, тема магістерської роботи, присвячена удосконаленню системи управління УЕВН, є своєчасною та актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконується у відповідності до пріоритетних напрямків

розвитку енергетичної стратегії України щодо підвищення енергоефективності промислового сектору та цифровізації технологічних процесів видобутку корисних копалин. Робота спрямована на вирішення прикладних завдань модернізації нафтопромислового обладнання в контексті концепції Індустрії 4.0.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності та надійності роботи установки електровідцентрового насоса шляхом удосконалення системи автоматичного керування з використанням частотного регулювання та алгоритмів непрямого визначення витрати. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз технологічного процесу механізованого видобутку нафти як об'єкта автоматизації, ідентифікувати основні збурюючі фактори (газ, механічні домішки, зміна в'язкості).

2. Виконати порівняльний аналіз сучасних технічних засобів автоматизації та обґрунтувати вибір елементної бази (ПЛК, перетворювач частоти, датчики) з урахуванням критеріїв надійності та вартості.

3. Розробити математичну модель та алгоритм «віртуальної витратомірї», що дозволить оцінювати дебіт свердловини без використання глибинних датчиків.

4. Створити прикладне програмне забезпечення для промислового контролера та розробити людино-машинний інтерфейс (НМІ) у середовищі ГІА Portal.

5. Дослідити динамічні характеристики замкнутої системи автоматичного регулювання (САР) та розрахувати економічну ефективність запропонованих рішень.

Об'єкт дослідження – процес механізованого видобутку нафти за допомогою установок електровідцентрових насосів.

Предмет дослідження – методи та засоби автоматичного керування режимами роботи УЕВН, алгоритмічне забезпечення частотно-регульованого електроприводу.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає:

- методи системного аналізу – для дослідження взаємозв'язків у системі «пласт–свердловина–насос»;
- методи теорії автоматичного керування – для синтезу параметрів ПД-регулятора та аналізу стійкості системи;
- методи математичного моделювання – для опису гідродинамічних процесів у насосі та розрахунку віртуальної витрати;
- методи об'єктно-орієнтованого програмування – при розробці програмного забезпечення контролера.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у:

1. Удосконаленні методу керування продуктивністю УЕВН, який, на відміну від відомих, базується на використанні адаптивної моделі насоса в реальному часі, що дозволяє підтримувати оптимальний ККД установки при зміні в'язкості рідини.
2. Набула подальшого розвитку методика налаштування контурів регулювання тиску для свердловин з високим газовим фактором, що забезпечує стійкість роботи системи в умовах виникнення газових пробок.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена система керування дозволяє реалізувати плавний пуск та зупинку насосного агрегату, що знижує динамічні навантаження на вал та подовжує міжремонтний період обладнання. Запропонований алгоритм віртуальної витратомірї дає змогу відмовитися від встановлення дорогих витратомірів на кожній свердловині. Результати роботи, включаючи принципові електричні схеми та програмні блоки ПІА Portal, готові до впровадження на нафтовидобувних підприємствах при модернізації фонду свердловин. Розрахунковий економічний ефект від впровадження становить понад 55 тис. кВт·год зекономленої електроенергії на рік на одну свердловину.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 67 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВИДОБУТКУ НАФТИ З ВИКОРИСТАННЯМ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

1.1. Конструкція і принципи роботи установок електровідцентрових насосів для видобутку нафти (УЕВН)

Технологічний комплекс УЕВН є складною геотехнічною системою, що складається з занурної частини (насосний агрегат, кабельна лінія), яка розміщується безпосередньо у стовбурі свердловини на колоні насосно-компресорних труб (НКТ), та наземної інфраструктури (трансформаторна підстанція, станція керування, гирлове обладнання).

Занурний насосний агрегат є головним виконавчим механізмом і включає в себе спеціалізований маслозаповнений електродвигун, оснащений блоком гідрозахисту, та безпосередньо відцентровий насос. Над насосною секцією обов'язково встановлюються зворотний та зливний клапани для забезпечення технологічних операцій. (Рисунок 1.1).

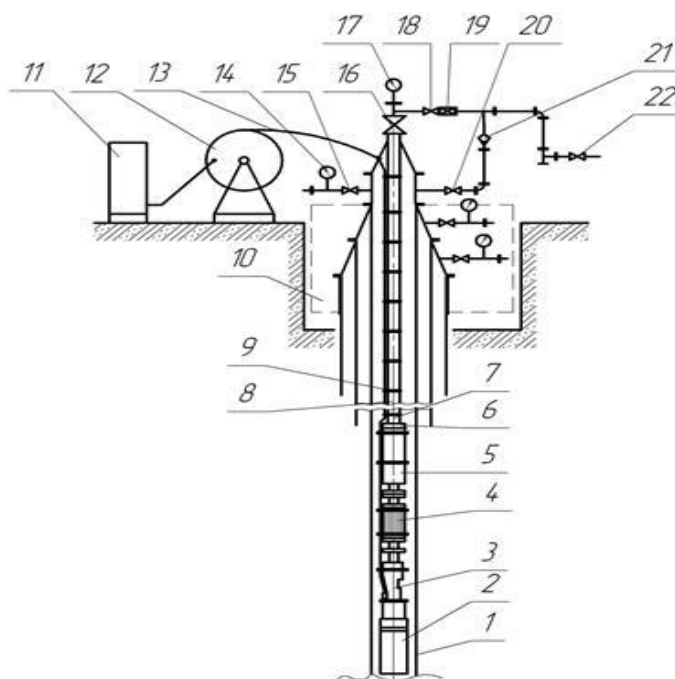


Рис. 1.1. Установа з електровідцентровим насосом

Відповідно до схеми (Рис. 1.1.), установка включає наступні елементи: 1 – експлуатаційна колона (обсадна труба); 2 – компенсатор; 3 – занурний електродвигун (ПЕД); 4 – протектор (гідрозахист); 5 – відцентровий насос; 6 – зворотний клапан; 7 – зливний клапан; 8 – колона насосно-компресорних труб (НКТ); 9 – металеві пояси для кріплення кабелю; 10 – колонна обв’язка гирла; 11 – станція керування (СК) та силовий трансформатор (ТМПН); 12 – кабельний барабан; 13 – силова кабельна лінія; 14, 17 – показуючі манометри; 15, 16, 18, 20, 22 – запірні арматури (засувки); 19 – пристрій регулювання витрати (штуцер); 21 – наземний зворотний клапан.

Розглянемо детальніше ключові вузли:

1. Насосний агрегат. Це серце установки, яке складається з наступних компонентів:

- Електродвигун (ПЕД): Спеціалізована електрична машина змінного струму, розроблена для роботи в екстремальних умовах (високий гідростатичний тиск, температура до 150°C і вище). Двигун заповнений діелектричним маслом для охолодження та змащення підшипників. Гідрозахист, встановлений між двигуном і насосом, виконує критичну функцію: він компенсує температурне розширення масла при нагріванні двигуна та запобігає потраплянню агресивної пластової рідини всередину електричної частини.

- Насос (ЕВН): Багатоступеневий пристрій відцентрового типу. Конструкція передбачає наявність великої кількості ступенів (робоче колесо + направляючий апарат), що дозволяє підсумовувати напір кожного ступеня і забезпечувати підйом рідини з глибин, що можуть досягати 3000 метрів і більше.

- Зворотний клапан: Розміщується безпосередньо над насосом. Його функція – утримувати стовп рідини в трубах НКТ при зупинці насоса, що запобігає зворотній розкрутці турбіни (турбінному обертанню) та гідроударам при повторному пуску.

- Зливний клапан: Встановлюється вище зворотного клапана. Він необхідний для зливу рідини з колони НКТ у затрубний простір під час підйому обладнання для ремонту, щоб труби піднімалися "сухими".

2. Кабельна лінія. Є важливою ланкою, що з'єднує наземне джерело живлення з занурним двигуном. Вона складається з:

- Силових жил: Забезпечують передачу електричної енергії високої напруги до обмоток статора двигуна.

- Броні та ізоляції: Захищають кабель від механічних пошкоджень при спуску та від агресивного впливу пластового флюїду. У сучасних системах кабель також може містити сигнальні жили або оптоволокну для передачі телеметричних даних від занурних датчиків (термоманометрії).

3. Насосно-компресорні труби (НКТ). Виконують подвійну функцію: слугують герметичним каналом для транспортування видобутої рідини на поверхню та є несучим елементом, на якому підвішується все занурне обладнання та фіксується кабель.

4. Наземне обладнання. Забезпечує енергопостачання та керування:

- Трансформатор (ТМПН): Підвищує напругу промислової мережі (380 В) до необхідного рівня живлення занурного двигуна, який може складати від 400 до 3000 В залежно від глибини спуску та потужності.

- Станція керування: Це інтелектуальний центр системи. Вона містить силову частину (контактори або частотний перетворювач), контролери, системи захисту та інтерфейси для оператора. Станція забезпечує пуск, зупинку, контроль параметрів та автоматичний захист установки від аварійних режимів.

5. Обладнання устя свердловини. Фонтанна арматура забезпечує герметизацію гирла, відвід продукції в колектор, а також проведення технологічних вимірювань. Вона включає колонну головку, систему засувки, штуцери для регулювання витрати та манометри для контролю тиску.

Занурний електровідцентровий насос (ЗЕВН) конструктивно відноситься до класу динамічних лопатевих машин. Це секційна багатоступенева

конструкція, кількість ступенів у якій може варіюватися в широких межах (від 80 до 500 і більше). Така архітектура забезпечує високу надійність та ефективність у важких умовах. Корпуси секцій з'єднуються фланцями, а вали – шліцьовими муфтами, утворюючи єдиний валопровід. Довжина однієї секції може досягати 5,5 метрів.

Усередині циліндричного корпусу розміщується пакет ступенів, що складається з робочих коліс та нерухомих направляючих апаратів. Вал насоса спирається на систему радіальних підшипників ковзання, розташованих по всій довжині, та осьову опору у верхній частині. Особливістю конструкції є те, що робочі колеса не фіксуються жорстко на валу в осьовому напрямку ("плаваюча" посадка), а передача крутного моменту здійснюється через призматичну шпонку. Це дозволяє колесу самоцентруватися в потоці рідини.

Принцип роботи: Пластова рідина через вхідну сітку-фільтр потрапляє на перші ступені насоса. Обертання робочих коліс створює відцентрову силу, яка надає рідині кінетичну енергію та викидає її на периферію колеса. Потрапляючи в нерухомий направляючий апарат, швидкісний напір перетворюється на статичний тиск, і рідина спрямовується на вхід наступного ступеня. Цей процес повторюється багаторазово, сумуючи тиск кожного ступеня, що дозволяє створити необхідний напір для підйому рідини на поверхню.

Класифікація насосів здійснюється за поперечним габаритом на умовні групи: 5 (92 мм), 5А (103 мм) та 6 (114 мм). Незважаючи на високу ефективність та надійність, УЕВН мають певні недоліки, зокрема високу початкову вартість обладнання та необхідність залучення висококваліфікованого персоналу для монтажу та ремонту. Проте ці установки незамінні в нафтовій промисловості, а також знаходять застосування у системах водопостачання та відкачування пластових вод.

Сучасним трендом є використання модульних насосів (ЕВНМ), конструкція (Рисунок 1.2).

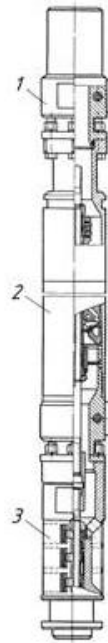


Рис. 1.2. Занурний модульний електровідцентровий насос

На рисунку зображено: 1 – вхідний модуль; 2 – модуль-секція; 3 – модуль-головка

Сучасним трендом є використання модульних насосів, які складаються з окремих уніфікованих вузлів: вхідного модуля, секцій та головки. Це спрощує логістику та монтаж. Вхідний модуль є основою насоса і оснащений сіткою для фільтрації механічних домішок.

Вхідний модуль (Рисунок 1.3) є основою насоса, через яку здійснюється забір рідини. Він оснащений сіткою для фільтрації механічних домішок.

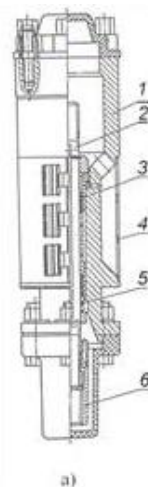


Рис. 1.3. Вхідний модуль

На рисунку зображено: 1 – основа; 2 – вал; 3 – втулка підшипника; 4 – сітка; 5 – захисна втулка; 6 – шлицева муфта

Модуль-секція (Рисунок 1.4) є основним елементом, що створює напір. Вона містить пакет ступенів та систему проміжних підшипників..

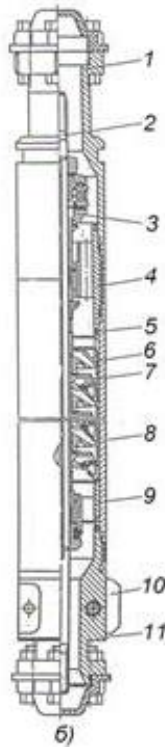


Рис. 1.4. Модуль-секція

На рисунку зображено: 1 – головка; 2 – вал; 3 – опора; 4 – верхній підшипник; 5 – кільце; 6 – направляючий апарат; 7 – робоче колесо; 8 – корпус; 9 – нижній підшипник; 10 – ребро; 11 – основа.

Модуль-головка завершує конструкцію насоса, маючи різьбу для приєднання до НКТ та зворотного клапана. Важливо зазначити, що при високому вмісті газу в рідині (25-55%) замість стандартного входного модуля використовується газосепаратор, який відділяє вільний газ перед входом у насос, запобігаючи кавітації.

Установка електровідцентрового насоса як об'єкт автоматичного керування характеризується суттєвою нелінійністю та багатофакторністю.

Основні параметри процесу, зокрема тиск, витрата та споживана потужність, залежать не лише від частоти обертання насоса, але й від змінних характеристик пласта, газового фактора та фізико-хімічних властивостей рідини.

Додатковою ускладнюючою обставиною є значна інерційність гідравлічної системи, обумовлена великою довжиною насосно-компресорних труб та наявністю стисливих фаз. Це призводить до затримок у реакції об'єкта на керуючі впливи, що ускладнює забезпечення стійкого регулювання.

Таким чином, УЕВН відноситься до класу складних динамічних об'єктів із параметрами, що змінюються у часі, що обґрунтовує доцільність застосування автоматизованих систем керування з використанням частотно-регульованого електроприводу.

1.2. Аналіз УЕВН з точки зору об'єкту управління

Для розробки якісної системи автоматизації критично важливо розглядати насосну установку як динамічний об'єкт керування зі своїми специфічними характеристиками. Електровідцентровий насос є керованим елементом у системі "пласт – свердловина – насос – трубопровід".

Основним керуючим впливом у сучасних системах є частота напруги живлення статора електродвигуна, зміна якої через частотний перетворювач призводить до зміни кутової швидкості обертання валу насоса. Це, в свою чергу, дозволяє плавно регулювати продуктивність та напір установки. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність та знижує механічні навантаження на обладнання завдяки плавним пускам.

Динаміка об'єкта описується трьома фундаментальними змінними:

1. Потік рідини (Q): Об'ємний видобуток за одиницю часу. Цей параметр лінійно залежить від швидкості обертання валу та геометрії проточної частини робочих коліс.

2. Напір (Н): Різниця енергетичних потенціалів (тисків) на вході та виході агрегату. Згідно з законами подібності, напір залежить від квадрата частоти обертання.

3. ККД та потужність: Параметри, що визначають економічну ефективність. Споживана потужність має кубічну залежність від частоти обертання.

На стабільність роботи УЕВН впливає низка стохастичних збурюючих факторів:

- Зміна пластового тиску та коефіцієнта продуктивності свердловини: Це призводить до зміни динамічного рівня рідини, що вимагає коригування режимів роботи насоса.

- Температурні коливання: Впливають на в'язкість нафти. Підвищення в'язкості призводить до зростання гідравлічного опору та споживаної потужності.

- Механічні домішки: Наявність піску або солей може призвести до забивання фільтрів та прискореного зносу робочих органів.

- Газовий фактор: Це найбільш критичне збурення. Потрапляння вільного газу на прийом насоса призводить до утворення газових каверн у проточній частині, що різко знижує напірну характеристику, зміщує робочу точку в зону низького ККД та викликає перегрів двигуна через погіршення тепловідводу. При вмісті газу понад критичне значення можливий повний зрив подачі ("газова пробка").

Детального аналізу потребує вплив газового фактора на гідродинамічні характеристики насоса. При зниженні тиску на прийомі насоса нижче тиску насичення нафти газом відбувається інтенсивне виділення вільного газу. Утворення газорідинної суміші призводить до зміни густини середовища, що перекачується. У проточній частині робочих коліс можуть формуватися стійкі газові каверни, які блокують прохідний переріз каналів. Це явище, відоме як "блокування насоса газом" або зрив подачі, супроводжується різким падінням

струмового навантаження двигуна (явище недовантаження) та припиненням охолодження статора потоком рідини.

Крім того, наявність механічних домішок (пропант після гідророзриву пласта, пісок, солі) діє як абразив, що зношує текстолітові шайби та радіальні підшипники насоса. Збільшення радіального люфту валу викликає підвищену вібрацію, яка може призвести до руйнування ізоляції кабельної лінії в місці введення в двигун або до механічного пошкодження муфтових з'єднань секцій. Тому система керування повинна мати алгоритми раннього виявлення вібраційної активності та трендів зміни струму, щоб вчасно зупинити установку до настання аварійних наслідків.

Частотне керування дозволяє компенсувати негативний вплив цих факторів. Змінюючи швидкість обертання, система може адаптуватися до поточного припливу рідини, підтримувати заданий тиск на прийомі або виводити насос з нестійких режимів. Однак слід враховувати і обмеження: робота на надто низьких частотах погіршує охолодження двигуна потоком рідини, а часті зміни режимів можуть прискорити втому матеріалів. Тому алгоритм керування має бути багатопараметричним та адаптивним.

1.3. Аналіз пристроїв і систем автоматичного управління процесом видобутку нафти з використанням УЕВН

Сучасні системи керування УЕВН є складними програмно-апаратними комплексами, що інтегрують засоби вимірювання, обчислення та силової електроніки. Розглянемо детально їх архітектуру та компоненти.

1. Програмовані логічні контролери (ПЛК). Це центральний елемент ("мозок") системи автоматизації. У контексті керування ЕВН, ПЛК (наприклад, Siemens S7-1200) виконують збір та обробку сигналів від датчиків, реалізацію алгоритмів керування (логічних та ПІД-регуляторів), захист обладнання та обмін даними з диспетчерським рівнем. Перевагами ПЛК є висока надійність,

модульність, можливість реалізації складних математичних моделей та гнучкість у переналаштуванні без зміни електричної схеми.

2. Сенсорне забезпечення (Датчики). Надійність керування залежить від точності вимірювань. Система включає:

- Датчики тиску: Контролюють тиск на буфері, у затрубному просторі та на прийомі насоса (через систему ТМС). Це дозволяє запобігати аварійним режимам та оптимізувати приплив.
- Датчики потоку: Забезпечують облік видобутої продукції.
- Датчики температури: Контролюють температуру обмоток двигуна та перекачуваної рідини, захищаючи обладнання від перегріву.
- Датчики вібрації: Дозволяють виявляти механічні дефекти на ранніх стадіях (зношення підшипників, дисбаланс), запобігаючи руйнуванню установки.

3. Частотні перетворювачі (ЧРП). Це виконавчі механізми, що керують швидкістю обертання двигуна шляхом зміни частоти живильної напруги. Сучасні інвертори забезпечують плавний пуск (зниження пускових струмів та механічних ударів), точне регулювання швидкості, захист від перевантажень, коротких замикань та несиметрії фаз. Також вони реалізують функції енергозбереження, оптимізуючи намагнічування двигуна залежно від навантаження.

4. Системи SCADA та НМІ. Забезпечують людино-машинний інтерфейс. SCADA-системи збирають дані з усіх свердловин родовища, архівують їх та надають диспетчеру в зручному графічному вигляді. Панелі НМІ на місцях дозволяють операторам переглядати поточний стан та змінювати налаштування безпосередньо біля свердловини.

5. Захисні та комунікаційні пристрої. Включають автоматичні вимикачі, реле захисту, пристрої контролю ізоляції. Комунікаційні модулі (Ethernet, Modbus, Profibus) забезпечують об'єднання всіх компонентів у єдину цифрову мережу для швидкого обміну даними.

6. Аварійні та діагностичні системи. Забезпечують безперебійне живлення (UPS) контролерів при збоях мережі та виконують предиктивну діагностику обладнання (наприклад, аналіз вібрацій або стану масла), що дозволяє переходити від планово-попереджувальних ремонтів до обслуговування за станом.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасна САК УЕВН є високотехнологічним комплексом, який забезпечує не лише керування насосом, але й комплексну оптимізацію процесу видобутку, підвищуючи його ефективність та безпеку.

Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи проведено детальне дослідження технологічного процесу видобутку нафти установками ЕВН. Встановлено, що ефективність роботи системи «насос-свердловина» суттєво залежить від зовнішніх збурень: коливань пластового тиску та вмісту газу. Аналіз існуючих методів керування показав їхню недосконалість, зокрема високі енерговитрати при дроселюванні. Визначено, що найбільш перспективним напрямком є впровадження частотного регулювання в поєднанні з технологіями віртуальної витратомірїї, що дозволить автоматизувати процес адаптації насоса до умов свердловини без встановлення ненадійних глибинних датчиків.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1. Порівняльний аналіз контролерів та вибір керуючого пристрою

Вибір апаратної платформи є ключовим етапом проектування, оскільки від характеристик центрального процесора (CPU) залежить швидкодія системи, точність обчислень математичної моделі та надійність в умовах нафтопромислу. Для реалізації алгоритму "віртуальної витратомірї" контролер повинен забезпечувати виконання операцій з плаваючою комою (Real) за час, що не перевищує 5-10 мкс, та мати достатній обсяг робочої пам'яті для зберігання архівів.

На ринку промислової автоматизації України розглядаються три конкурентні платформи одного класу:

1. Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1215C);
2. Schneider Electric Modicon M241 (TM241CE24R);
3. Rockwell Automation Micro850 (2080-LC50).

Для об'єктивного вибору проведено порівняльний аналіз їхніх технічних характеристик, результати якого зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз апаратних платформ

Характеристика	Siemens CPU 1215C	Schneider Modicon M241	Allen-Bradley Micro850
Швидкодія (біт/real), мкс	0.08 / 2.3	0.022 / 0.7	0.3 / 6.0
Робоча пам'ять (Work Memory)	125 КБ	64 МБ (RAM)	20 КБ (програмних кроків)

Продовження таблиці 1.1

Вбудовані інтерфейси	2x PROFINET (Ethernet)	Ethernet, USB, Serial	Ethernet/IP, USB, Serial
Підтримка протоколів	PROFINET IO, TCP/IP, Modbus TCP	Modbus TCP, SoMachine	EtherNet/IP, Modbus TCP
Аналогові входи (вбудовані)	2 (0-10 В, 10 біт)	Відсутні (потрібен модуль)	Відсутні (потрібен модуль)
Діапазон робочих температур	-20...+60 °C	-10...+55 °C	-20...+65 °C
Середовище розробки	TIA Portal (Ліцензія)	EcoStruxure (Безкоштовно)	CCW (Безкоштовно/Платна)

1. Schneider Electric Modicon M241. Це найбільш швидкодіючий контролер у групі. Час виконання бітової інструкції становить всього 0.022 мкс, що значно швидше за конкурентів.

- Переваги: Великий обсяг оперативної пам'яті (64 МБ) дозволяє реалізувати глибокі архіви даних безпосередньо в контролері. Наявність вбудованого Web-сервера спрощує віддалену діагностику.

- Недоліки: Відсутність вбудованих аналогових входів вимагає купівлі додаткового модуля розширення ТМЗ, що здорожчує систему на 15-20%. Середовище EcoStruxure Machine Expert, хоча і потужне, має складнішу інтеграцію з панелями НМІ сторонніх виробників.

2. Allen-Bradley Micro850 (Rockwell Automation). Стандарт для нафтової промисловості США. Відрізняється найширшим температурним діапазоном (до +65°C), що важливо для шаф керування, встановлених на відкритому сонці.

- Недоліки: Найнижча швидкодія при роботі з числами з плаваючою комою (6.0 мкс), що є критичним для обчислення складних формул витрати (рівняння Бернуллі). Крім того, вартість компонентів Allen-Bradley в Україні на 30-40% вища за європейські аналоги через логістику, а екосистема EtherNet/IP вимагає дорогих шлюзів для зв'язку з частотними перетворювачами інших брендів.

3. Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1215C). Збалансоване рішення, що займає проміжну позицію за швидкістю (0.08 мкс на бітову операцію), чого цілком достатньо для циклу керування насосом (100 мс).

Переваги:

- Інтеграція: Єдиний контролер з оглянутих, що має 2 вбудовані аналогові входи (0-10В), що дозволяє підключити датчики без купівлі додаткових модулів.
- Комунікація: Наявність 2 портів PROFINET працює як вбудований комутатор, дозволяючи підключити панель НМІ та частотний перетворювач послідовно ("ланцюжком"), економлячи на зовнішньому комутаторі.
- Математика: Потужна реалізація мови SCL у TIA Portal дозволяє переносити математичні моделі безпосередньо з MatLab/Excel.
- Ціна: Вартість комплекту "ПЛК + Панель" для Siemens є оптимальною за рахунок пакетних пропозицій (Starter Kit).

Висновок: На основі проведеного аналізу, для розробки системи обрано контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1215C). Вибір обґрунтовано наявністю вбудованих аналогових входів (економія бюджету), достатньою обчислювальною потужністю для математичної моделі та підтримкою протоколу PROFINET для прямого керування приводом SINAMICS G120 без додаткових перетворювачів інтерфейсів. (Рисунок 2.1).



Рис. 2.1. Контроллер Siemens SIMATIC S7-1200

2.2. Підбір програмного забезпечення

Успішна реалізація проекту автоматизації неможлива без використання сучасних інструментальних засобів проектування. Для розробки програмного забезпечення контролера та панелі оператора було обрано інтегроване середовище Siemens TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal). (Рисунок 2.2).

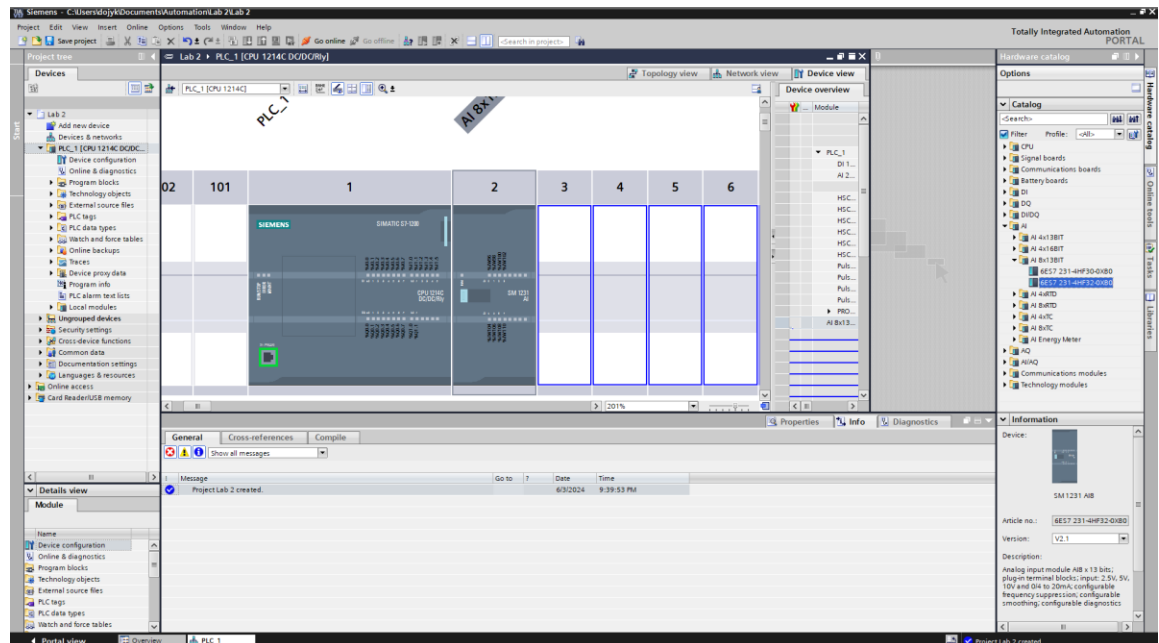


Рис. 2.2. Інтерфейс TIA Portal V17

Вибір TIA Portal базується на таких ключових перевагах:

- Єдина платформа: Середовище об'єднує інструменти для програмування контролерів (STEP 7), розробки візуалізації НМІ (WinCC) та налаштування приводів (Startdrive). Це дозволяє використовувати єдину базу даних змінних, виключаючи помилки адресації та значно прискорюючи розробку.
- Потужна діагностика: Вбудовані функції System Diagnostics автоматично генерують діагностичну інформацію про стан апаратних модулів, що спрощує налагодження та експлуатацію.
- Стандартизація: Підтримка мов програмування стандарту IEC 61131-3 (LAD, FBD, SCL, STL) дає інженеру гнучкість у виборі інструментів для реалізації складних алгоритмів.
- Масштабованість: Можливість легкого перенесення проекту на більш потужні контролери або додавання нових пристроїв без повної переробки коду.

2.3. Насос ЕЦНМ5-50-1300 відцентровий занурювальний

На основі аналізу характеристик типової нафтової свердловини (дебіт, глибина, діаметр колони) було обрано насосний агрегат на базі занурного відцентрового насоса ЕЦНМ5-50-1300. Зовнішній вигляд насоса (Рисунок 2.3).



Рис. 2.3. Насос ЕЦНМ5-50-1300

Обґрунтування вибору:

Типорозмір: Насос належить до 5-ї групи (поперечний габарит 113,5 мм), що дозволяє його вільний спуск та експлуатацію у свердловинах з внутрішнім

діаметром обсадної колони не менше 121,7 мм. Номінальна подача 50 м³/добу та напір 1300 м є оптимальними для забезпечення цільових показників видобутку з глибоких горизонтів. Модульна конструкція (індекс "М") дозволяє адаптувати насос під конкретні умови, включаючи можливість використання корозійностійкого виконання (ЕЦНМК) для середовищ із вмістом сірководню до 1,25 г/л. Конструкція передбачає використання проміжних радіальних підшипників з твердих сплавів по всій довжині секції, що мінімізує вібрації та знос. Насос розрахований на роботу з рідиною температурою до 90°C та вмістом механічних домішок до 0,1 г/л.

2.4. Характеристика датчиків

Для забезпечення точного та надійного контролю тиску в системі було обрано датчик тиску Rosemount 3051S (Рисунок 2.4).



Рис. 2.4. Rosemount 3051S

Цей прилад є еталоном у галузі завдяки своїм унікальним характеристикам:

- Виняткова точність: Похибка вимірювань не перевищує 0,04%, що є критично важливим для точного регулювання процесів у нафтовидобутку.

- Технологія MultiVariable™: Дозволяє одним приладом вимірювати не лише тиск, а й температуру та перепад тиску, що спрощує схему автоматизації.
- Діагностика: Підтримка технології Advanced Diagnostics дозволяє контролювати стан самого сенсора та виявляти проблеми на ранніх стадіях (наприклад, засмічення імпульсних ліній).
- Довговічність: Міцна конструкція з використанням корозійностійких матеріалів дозволяє експлуатувати датчик в агресивних середовищах нафтопромислів протягом тривалого часу без втрати точності.

2.5. Технічні характеристики частотного перетворювача Siemens SINAMICS

Для керування швидкістю обертання асинхронного двигуна насоса обрано універсальний частотний перетворювач SINAMICS G120 (Рисунок 2.5).



Рис. 2.5. Частотний перетворювач SINAMICS G120

Вибір цього перетворювача обґрунтований наступними факторами:

- Модульність: Складається з силового модуля та модуля керування, що спрощує обслуговування та модернізацію.
- Енергоефективність: Високий ККД (до 98%) та наявність спеціальних функцій енергозбереження (режим ECO, гібернація) дозволяють суттєво знизити експлуатаційні витрати.
- Функціональність: Підтримує як скалярне, так і векторне керування, що забезпечує точність регулювання швидкості та моменту. Вбудовані функції захисту двигуна гарантують безпеку обладнання.
- Комунікація: Підтримка протоколів PROFINET/PROFIBUS забезпечує легку інтеграцію в систему автоматизації на базі контролерів SIMATIC.
- Надійність: Пристрій розрахований на роботу в складних умовах електромережі, характерних для віддалених родовищ.

2.6. Вибір засобів візуалізації та людино-машинного інтерфейсу (НМІ)

Для забезпечення ефективної взаємодії оператора з технологічним процесом, візуалізації поточних параметрів видобутку та оперативного реагування на аварійні ситуації, система повинна бути оснащена засобами людино-машинного інтерфейсу (Human-Machine Interface). Враховуючи вибір контролера серії S7-1200 та середовища розробки TIA Portal, найбільш доцільним є використання панелей оператора серії SIMATIC Basic Panel. Для даного проекту обрано панель SIMATIC НМІ KTP1200 Basic (Рисунок 2.6).



Рис. 2.6. Панель оператора SIMATIC HMI KTP1200 Basic

Вибір саме цієї моделі обґрунтований наступними технічними та експлуатаційними характеристиками:

- **Дисплей:** Широкоформатний 12-дюймовий TFT-екран з високою роздільною здатністю дозволяє розмістити мнемонічну схему свердловини, графіки (тренди) тиску та кнопки керування на одному екрані без необхідності складної навігації.
- **Інтерфейс керування:** Сенсорний екран (Touch) забезпечує інтуїтивно зрозуміле керування, а наявність додаткових апаратних функціональних клавiш дозволяє призначити на них критично важливі команди (наприклад, "Аварійна зупинка" або "Скидання помилки").
- **Комунікація:** Вбудований інтерфейс PROFINET дозволяє підключити панель до контролера S7-1200 за допомогою стандартного Ethernet-кабелю, що спрощує монтаж та налаштування мережі.
- **Інтеграція:** Повна сумісність з TIA Portal дозволяє використовувати єдину базу тегів з контролером, що виключає помилки при адресації змінних.

- **Захищеність:** Ступінь захисту IP65 по передній панелі дозволяє експлуатувати пристрій у важких промислових умовах (пил, волога), характерних для операторських приміщень на нафтопромислах.
- **Функціональність:** Підтримка ведення журналів аварій (Alarm Logging) та відображення історичних даних (Trend View) є критично важливою для аналізу причин зупинки насосного агрегату.

Висновки до розділу 2

У даному розділі виконано обґрунтування технічного забезпечення системи автоматизації. Шляхом порівняльного аналізу доведено доцільність використання платформи Siemens: контролера S7-1200 та перетворювача SINAMICS G120. Такий вибір забезпечує єдність інформаційного простору завдяки мережі PROFINET та середовищу TIA Portal. Обрані датчики Rosemount 3051S гарантують високу метрологічну точність, необхідну для коректної роботи алгоритмів керування. Розроблена структура технічних засобів є надійною, масштабованою та відповідає сучасним промисловим стандартам.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ (УЕВН)

3.1. Розроблення алгоритму управління

Для реалізації ефективного керування електровідцентровим насосом, яке б враховувало такі змінні параметри як в'язкість нафти, тиск у пластовому шарі, необхідний напір та частоту обертання валу, необхідно базуватися на фундаментальних принципах гідродинаміки та механіки рідин.

Загальна формула, що описує взаємозв'язок цих параметрів, має досить складний вигляд, оскільки повинна враховувати взаємний вплив багатьох факторів. Основні залежності можна представити у вигляді наступного рівняння:

$$Q = \frac{K \cdot (H - H_f) \cdot \sqrt{P_r - P_d}}{\mu} \cdot \frac{N}{N_0} \quad (3.1)$$

де:

Q - об'ємний витрат (потік) нафти через насос ($\text{м}^3/\text{с}$),

K - конструктивний коефіцієнт насоса, що залежить від геометрії проточної частини,

H - повний напір (м),

H_f - гідравлічні втрати напору (м), які є функцією в'язкості рідини та швидкості потоку,

P_r - тиск пластового шару (Па), що є рушійною силою припливу,

P_d - тиск на виході насоса (Па),

μ - динамічна в'язкість нафти ($\text{Па} \cdot \text{с}$),

N - фактична поточна частота обертання насоса (об/хв),

N_0 - номінальна частота обертання насоса (об/хв).

Деталізація компонентів формули:

1. Об'ємна витрата (Q): Це кількість нафти, яка перекачується насосним агрегатом за одиницю часу.

2. Коефіцієнт (К): Цей параметр залежить від геометричних характеристик насоса, таких як діаметр робочого колеса (крильчатки), ширина лопаток тощо.

Щоб розрахувати коефіцієнт К для конкретного насоса, використовуючи його ККД (коефіцієнт корисної дії), потужність та розміри крильчатки, скористаємося наступними формулами.

Спочатку визначимо формулу гідравлічної потужності:

$$P_h = \rho * g * Q * H , \quad (3.2)$$

P_h — гідравлічна потужність (Вт),

ρ — густина рідини (кг/м³),

g — прискорення вільного падіння (≈ 9.81 м/с²),

Q — об'ємний витрат (м³/с),

H — напір нафти (м).

Формула механічної потужності:

$$P_m = \frac{P_h}{\eta} , \quad (3.3)$$

P_m — механічна потужність, що підводиться до насоса (Вт),

η — ККД насоса (безрозмірна величина, від 0 до 1).

Формула для розрахунку коефіцієнта К:

$$K = \frac{P_m}{\rho * g * D^2 * N} , \quad (3.4)$$

D — діаметр крильчатки (м),

N — частота обертання (об/с)

3. Напір нафти H і втрати напору H_f : Напір визначається як різниця висот (або енергетичних рівнів), через яку переміщується рідина. Втрати напору виникають внаслідок в'язкості рідини, тертя в трубах, фітингах та інших елементах гідравлічної системи.

4. Тиск пластового шару P_r і тиск на виході насоса P_d : Тиск пластового шару визначається геологічними умовами родовища і є первинним джерелом

енергії для припливу. Тиск на виході насосу — це тиск, з яким нафта подається в нагнітальну лінію трубопроводу.

5. В'язкість нафти μ : В'язкість безпосередньо впливає на гідравлічний опір руху нафти і, як наслідок, на ефективність роботи насоса. Більш в'язкі рідини вимагають значно більше енергії для перекачування.

6. Частота обертання насосу N : Від частоти обертання прямо залежить продуктивність насоса. Чим вища швидкість обертання, тим більший об'єм нафти може бути перекачаний за одиницю часу.

Запропонована формула дозволяє визначити характер зміни об'ємної витрати нафти через насос при варіації одного або декількох параметрів, таких як в'язкість, тиск, напір або частота обертання. Вона може бути використана для оптимізації режимів роботи насоса, забезпечення його ефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Розрахуємо коефіцієнт Q – потік нафти ($\text{м}^3/\text{с}$)

Характеристики насосу ЭЦНМ5-50-1200:

- Потужність насосу (P_m): $18 \text{ кВт} = 18,000 \text{ Вт}$

- ККД (η): 43%

- Густина рідини (ρ): 1400 кг/м^3

- Об'ємний витрат (Q): $0.05 \text{ м}^3/\text{с}$

- Напір (H): 1300 м

- Частота обертання (N): $3000 \text{ об/хв} = 50 \text{ об/с}$

- Діаметр крильчатки (D): 0.2 м

Крок 1: Визначення гідравлічної потужності

Обчислимо гідравлічну потужність (P_h) за формулою:

$$P_h = \rho * g * Q * H. \quad (3.5)$$

Підставимо значення:

$$P_h = 1400 * 9.81 * 0.05 * 1300. \quad (3.6)$$

$$P_h = 891810 \text{ Вт.}$$

Крок 2: Визначення механічної потужності

Тепер обчислимо механічну потужність, використовуючи ККД насоса:

$$P_m = \frac{891810}{0.43}. \quad (3.7)$$

$$P_m = 2074930 \text{ Вт.}$$

Отримане розрахункове значення значно перевищує номінальну потужність двигуна (18000 Вт), що свідчить про теоретичний характер розрахунку без урахування реальних обмежень. Тому для подальшого розрахунку коефіцієнта K використаємо паспортну потужність (18 кВт).

Крок 3: Обчислення коефіцієнта (K)

Для розрахунку коефіцієнта (K) на прикладі насоса ЭЦНМ5-80-1200, нам необхідні певні дані про насос, такі як його потужність, ефективність, діаметр крильчатки і частота обертання.

Використаємо формулу для коефіцієнта (K):

$$K = \frac{18000}{1400 * 9.81 * 0.2^2 * 50}. \quad (3.8)$$

Крок 4: Обчислення значення (K):

$$K = \frac{18000}{1400 * 9.81 * 0.04 * 50}, \quad (3.9)$$

$$K = \frac{18000}{27454.8}. \quad (3.10)$$

$$K = 0.655.$$

Таким чином, коефіцієнт K для насоса ЭЦНМ5-80-1200 становить приблизно 0.655.

Тепер проведемо розрахунок об'ємної витрати Q , використовуючи отриманий коефіцієнт та формулу:

$$Q = \frac{K * (H - H_f) * \sqrt{P_r - P_d}}{\mu} * \frac{N}{N_0}, \quad (3.11)$$

де:

$$K = 0.655$$

$$H = 1300 \text{ м}$$

$$H_f = \text{втрати напору } H_f = 100 \text{ м}$$

P_r = тиск пластового шару (припустимо $P_r = 200 * 10^5$ Па)

P_d = тиск на виході насосу (припустимо $P_d = 10 * 10^5$ Па)

μ = динамічна в'язкість нафти (припустимо $\mu = 0.1$ Па·с)

$N = 3000$ об/хв = 50 об/с

N_0 = номінальна частота обертання (припустимо $N_0 = 50$ об/с)

Підставимо значення у формулу:

$$Q = \frac{0.655 * (1300 - 100) * \sqrt{200 * 10^5 - 10 * 10^5}}{0.1} * \frac{50}{50} \quad (3.12)$$

Виконаємо обчислення покроково:

Різниця напорів: $H - H_f = 1300 - 100 = 1200$ м

Різниця тисків: $P_r - P_d = 200 * 10^5 - 10 * 10^5 = 190 * 10^5$

Квадратний корінь з різниці тисків: $\sqrt{190 * 10^5} = \sqrt{19000000} \approx 4351$ Па

Перемноження значень і ділення на в'язкість:

$$Q = \frac{0.655 * 1200 * 4351}{0.1}, \quad (3.13)$$

$$Q = \frac{3421.2 * 4351}{0.1}. \quad (3.14)$$

$$Q = 1489961,2.$$

Отже, розрахункове значення параметра Q становить приблизно 1489961,2 м³/с. (Це значення є внутрішньою змінною алгоритму, яка масштабується в реальні одиниці витрати).

На рисунках 3.1 та 3.2 можна візуально прослідкувати залежність об'ємної витрати Q від частоти обертання насосу N та від тиску пластового шару P_r .

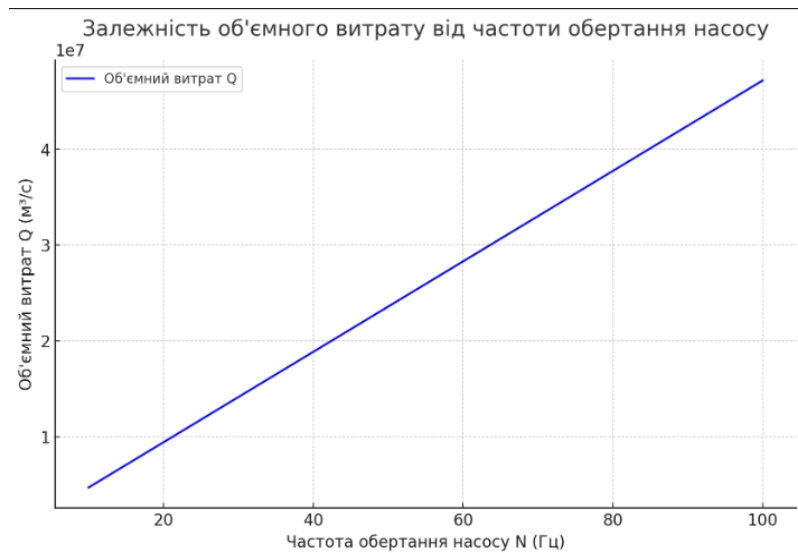


Рис. 3.1. Графік залежності Q від частоти обертання насосу

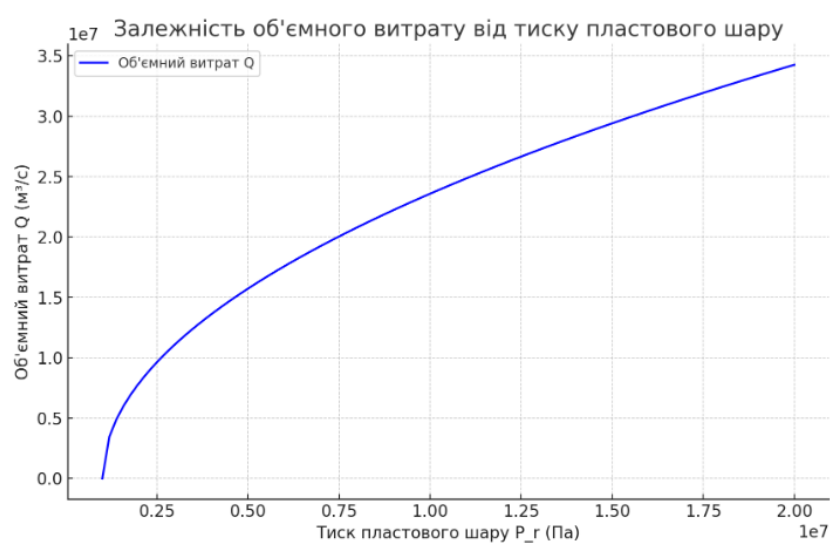


Рис. 3.2. Графік залежності Q від тиску пластового шару

3.1.1. Обґрунтування методу віртуальної витратомірії та масштабування розрахункових змінних

У реальних умовах експлуатації нафтових свердловин пряме вимірювання дебіту за допомогою глибинних або поверхневих витратомірів є технічно складним та економічно недоцільним. Глибинні витратоміри працюють в умовах підвищеного тиску, температури та агресивного середовища, що суттєво знижує їхню надійність і призводить до частих відмов. Поверхневі витратоміри, у свою

чергу, не завжди коректно відображають фактичний дебіт свердловини через наявність газової фази, пульсацій потоку та змінних режимів роботи насоса.

У зв'язку з цим у сучасних системах автоматизації все ширше застосовуються методи віртуальної витратомірії, які базуються на непрямому визначенні витрати шляхом математичної обробки доступних вимірюваних параметрів. До таких параметрів належать тиск, споживана електрична потужність, струм електродвигуна та частота обертання насосного агрегату.

У рамках даної магістерської роботи параметр об'ємної витрати Q запропоновано використовувати як внутрішня розрахункова змінна алгоритму, яка не є безпосередньо фізичним дебітом у одиницях $\text{м}^3/\text{с}$. Отримане значення Q відображає відносний рівень продуктивності насосної установки та застосовується для аналізу тенденцій зміни режиму роботи УЕВН у часі.

Для приведення розрахункової змінної Q до фізично інтерпретованих значень у практичних системах використовується процедура масштабування та калібрування. Масштабування передбачає перетворення нормалізованої величини Q у діапазон реальних значень дебіту на основі паспортних характеристик насоса та експериментальних даних експлуатації свердловини. Калібрування виконується шляхом порівняння розрахункових значень з фактичними даними періодичних замірів продуктивності.

Такий підхід дозволяє використовувати алгоритм віртуальної витратомірії не як засіб точного комерційного обліку, а як інструмент оперативного керування та оптимізації режимів роботи насоса, що повністю відповідає завданням автоматичного регулювання продуктивності УЕВН. Основною перевагою даного методу є відсутність необхідності встановлення додаткових вимірювальних приладів, що знижує вартість системи та підвищує її загальну надійність.

3.1.2. Теоретичні основи регулювання тиску в системах з частотно-регульованим електроприводом

Регулювання тиску в установках електровідцентрових насосів із частотно-регульованим електроприводом базується на зміні швидкості обертання робочих коліс насоса шляхом керування частотою живлення асинхронного електродвигуна. Взаємозв'язок між частотою обертання, продуктивністю та напором насоса описується законами подібності відцентрових машин.

Відповідно до законів подібності, продуктивність насоса пропорційна частоті обертання валу, а напір — квадрату цієї частоти. Таким чином, навіть незначна зміна частоти живлення електродвигуна призводить до суттєвої зміни тиску у напірній лінії. Це створює передумови для ефективного автоматичного регулювання тиску шляхом формування керуючого впливу у вигляді завдання частоти для перетворювача.

Однак реальний технологічний об'єкт характеризується наявністю зовнішніх збурень, до яких належать коливання припливу пластової рідини, зміна газового фактора та варіація гідравлічного опору системи. У таких умовах просте пропорційне керування не забезпечує необхідної точності та стабільності регулювання. Це обумовлює доцільність використання ПД-регулятора, який дозволяє компенсувати як статичні, так і динамічні похибки.

Пропорційна складова регулятора формує керуючий сигнал, пропорційний миттєвій похибці між заданим і фактичним значенням тиску. Інтегральна складова забезпечує усунення статичної похибки, що виникає внаслідок повільних змін режиму роботи свердловини. Диференціальна складова підвищує швидкодію системи та покращує її демпфувальні властивості, зменшуючи коливання тиску при різких збуреннях.

Вибір тиску як регульованої величини є обґрунтованим з точки зору надійності та доступності вимірювань. Датчики тиску мають вищу метрологічну стабільність у порівнянні з витратомірами та краще пристосовані до складних

умов експлуатації нафтових свердловин. Крім того, стабілізація тиску дозволяє опосередковано впливати на продуктивність насоса та забезпечувати його роботу поблизу оптимальної робочої точки.

Таким чином, застосування ПД-регулятора в поєднанні з частотно-регульованим електроприводом забезпечує необхідну якість автоматичного регулювання тиску та адаптацію системи до змінних умов експлуатації.

3.2. Розроблення автоматизації в Siemens TIA Portal V17

Розробка програмного забезпечення виконувалася у кілька етапів, кожен з яких супроводжувався налаштуванням відповідних компонентів у середовищі TIA Portal.

1. Конфігурація апаратної частини (Hardware Configuration). На першому етапі було створено новий проект та додано центральний процесор CPU 1215C AC/DC/Rly. У налаштуваннях властивостей (Properties) контролера було активовано System Memory Byte для використання системних бітів (наприклад, FirstScan для ініціалізації). Також налаштовано IP-адресу інтерфейсу PROFINET для включення контролера в локальну мережу підприємства. (Рисунок 3.3).

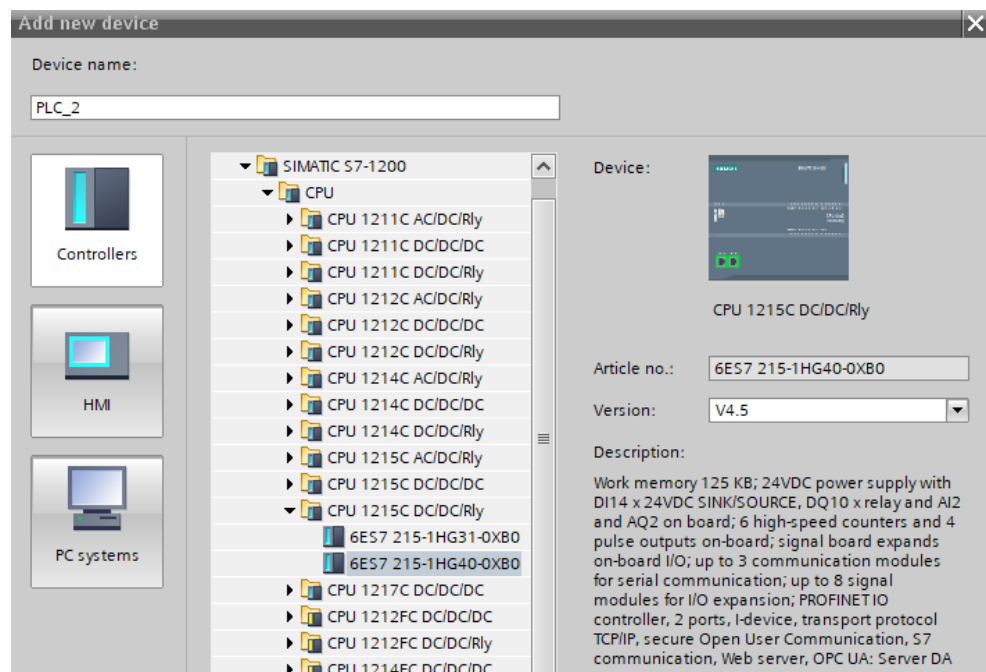


Рис. 3.3. Вибір CPU 1215C

Для обробки сигналів з аналогових датчиків тиску до конфігурації додано сигнальний модуль SM 1231 AI 4x16 BIT. У параметрах модуля обрано тип вимірювання "Current 4-20 mA" для відповідних каналів. Важливим кроком було налаштування фільтрації вхідного сигналу (Smoothing) для придушення високочастотних завад, що можуть виникати від роботи силового обладнання. (Рисунок 3.4).

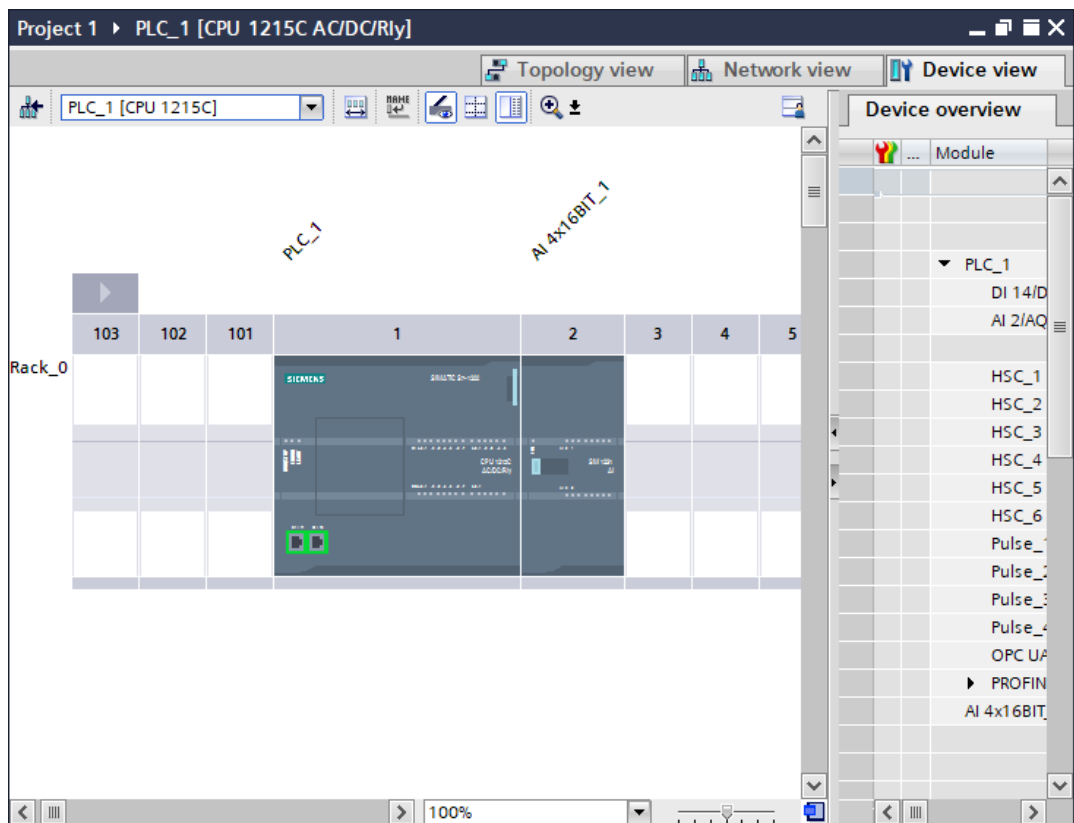


Рис. 3.4. CPU 1215C та Модуль SM 1231

2. Інтеграція панелі оператора (HMI). До проекту додано станцію керування PC Station та панель SIMATIC HMI KTP1200 Basic. У налаштуваннях "HMI Tags" створено таблицю змінних, які зв'язані з тегами контролера. Це дозволяє відображати значення тиску, струму та статусу насоса безпосередньо з пам'яті ПЛК без необхідності написання додаткових скриптів обміну даними. (Рисунок 3.5, 3.6).

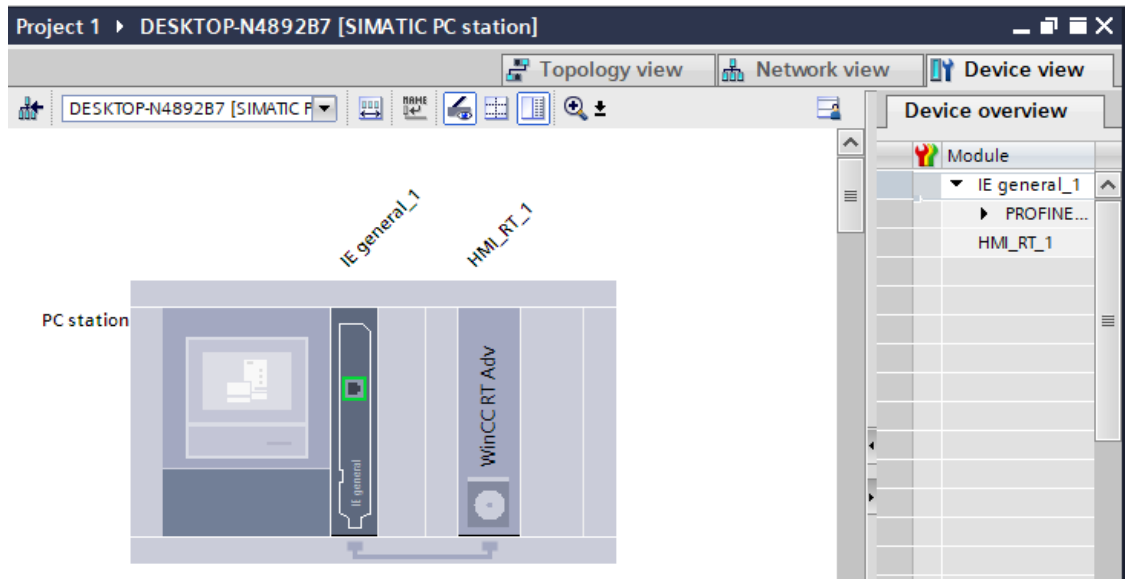


Рис. 3.5. PC station з встановленим компонентом HMI KTP1200

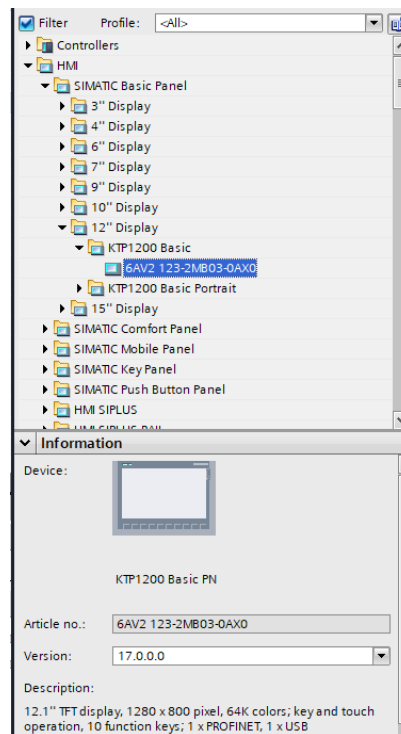


Рис. 3.6. Додавання модуля HMI

3. Налаштування частотного приводу. Для керування двигуном додано пристрій SINAMICS G120C. Інтеграція приводу в проект TIA Portal (Startdrive) дозволила налаштувати параметри двигуна (струм, напруга, потужність) та обмеження швидкості безпосередньо з інженерної станції. (Рисунок 3.7).

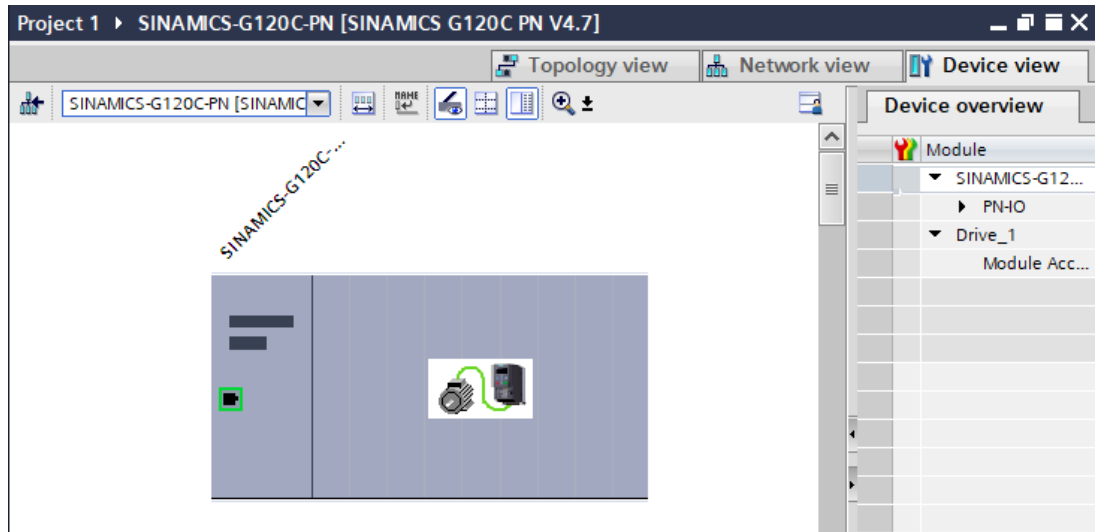


Рис. 3.7. Частотний перетворювач G120

У вкладці «Network view» графічно налаштовано логічні з'єднання PROFINET між контролером PLC_1, панеллю HMI та приводом SINAMICS. Система автоматично присвоїла імена пристроїв (PROFINET device name), які є ідентифікаторами в мережі. (Рисунок 3.8).

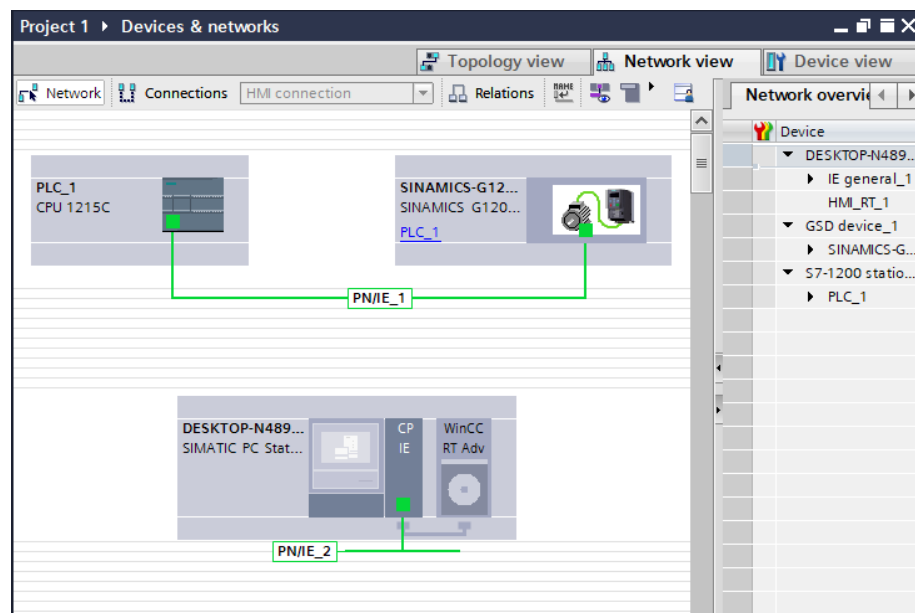


Рис. 3.8. Організація комунікаційного з'єднання

4. Розробка інтерфейсу користувача. На екрані Screen_1 панелі KTP1200 розміщено графічні примітиви. Використано об'єкти "I/O Field" для введення уставки частоти, напруги та швидкості. (Рисунок 3.9).

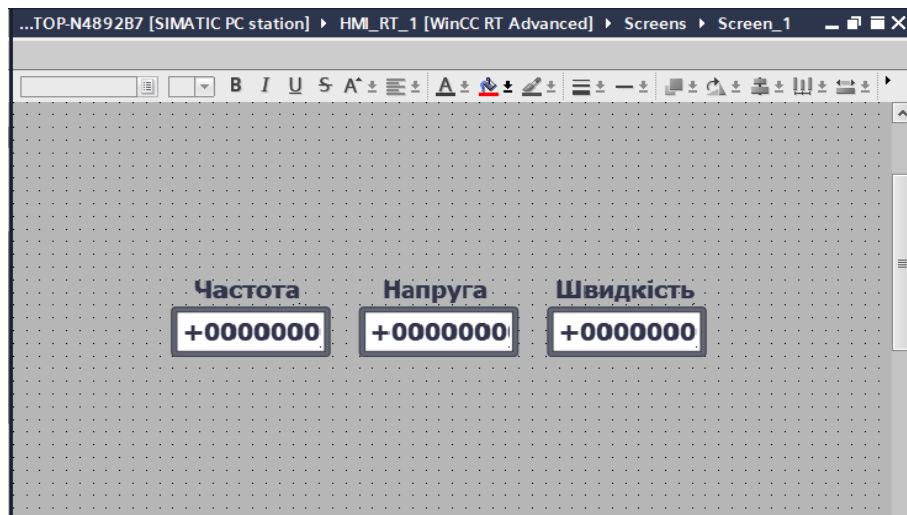


Рис. 3.9. Екран НМІ

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено алгоритмічне забезпечення системи автоматичного керування УЕВН. Обґрунтовано використання методу віртуальної витратомірїї, який дозволяє оцінювати зміну продуктивності насосної установки без застосування прямих витратомірів. Наведено теоретичні основи регулювання тиску в системах з частотно-регульованим електроприводом та показано доцільність застосування ПД-регулятора для компенсації зовнішніх збурень. Запропоновані алгоритмічні рішення є придатними для реалізації в промислових контролерах і забезпечують стабільну роботу УЕВН у широкому діапазоні режимів.

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

4.1. Математичне моделювання динаміки системи автоматичного регулювання (САР)

Для забезпечення стабільного видобутку нафти та підтримки необхідного тиску на прийомі насоса недостатньо лише статичного розрахунку робочої точки. Необхідно дослідити динамічні властивості системи, що дозволить синтезувати стійкий контур регулювання.

Розглянемо структуру замкненої системи керування на рисунку 4.1., де вхідним впливом є уставка тиску $P_{set}(t)$, а регульованою величиною — фактичний тиск $P_{act}(t)$. Система складається з наступних ланок: ПД-регулятор, частотний перетворювач, асинхронний двигун з насосом (об'єкт) та датчик зворотного зв'язку.

Передавальна функція перетворювача частоти (ПЧ)

Частотний перетворювач SINAMICS G120 разом з асинхронним двигуном можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку, оскільки електромагнітні процеси протікають значно швидше за гідромеханічні.

$$W_{fc}(s) = \frac{K_{fc}}{T_{fc}s+1} \quad (4.1)$$

де K_{fc} — коефіцієнт передачі перетворювача (відношення зміни частоти струму до керуючого сигналу), а T_{fc} — постійна часу, що визначається налаштуваннями темпу розгону (Ramp Up Time), зазвичай $T_{fc} \approx 0.2...0.5$ с.

Передавальна функція об'єкта керування (УЕВН)

Насосний агрегат, занурений у свердловину, характеризується інерційністю стовпа рідини та гідравлічним опором трубопроводу. Окрім того,

існує транспортне запізнення τ (tau), обумовлене часом проходження хвилі тиску від насоса до гирла свердловини.

$$W_{obj}(s) = \left(\frac{K_{obj}}{T_{obj}s+1} \right) e^{-\tau s} \quad (4.2)$$

де K_{obj} — коефіцієнт передачі об'єкта по каналу «частота – тиск», T_{obj} — гідравлічна постійна часу системи.

Передавальна функція вимірювального перетворювача

Датчик тиску Rosemount 3051S також має власну інерційність, яку можна описати аперіодичною ланкою:

$$W_{sens}(s) = \frac{K_{sens}}{T_{sens}s+1} \quad (4.3)$$

де K_{sens} — коефіцієнт перетворення тиску в електричний сигнал (мА/Па).

Синтез регулятора

Для компенсації збурень (зміна в'язкості нафти, газові пробки) в контролері SIMATIC S7-1200 реалізується ПД-закон регулювання. Передавальна функція регулятора в операторній формі:

$$W_{reg}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.4)$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи, яке визначає її стійкість, має вигляд:

$$1 + W_{reg}(s) \cdot W_{fc}(s) \cdot W_{obj}(s) \cdot W_{sens}(s) = 0 \quad (4.5)$$

Налаштування параметрів K_p , T_i , T_d здійснюється методом Циглера-Нікольса з подальшою оптимізацією за допомогою вбудованої функції автоналаштування (Pre-tuning / Fine tuning) технологічного об'єкта PID_Compact в середовищі TIA Portal.

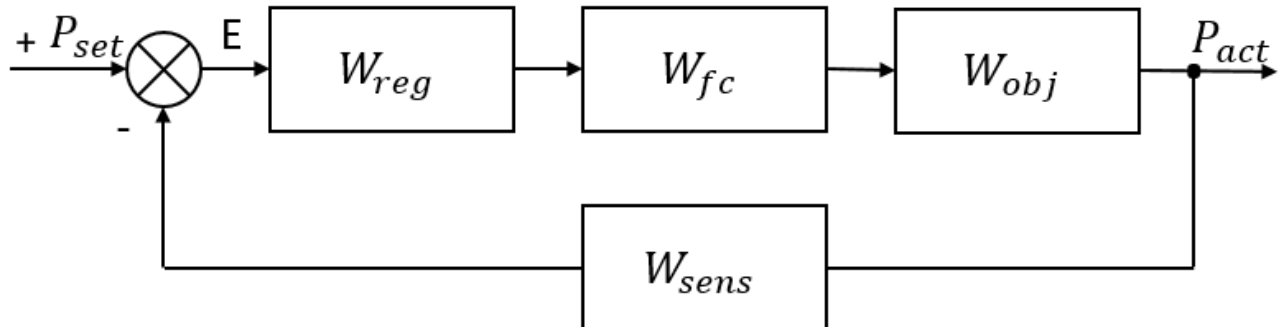


Рис. 4.1. Структурна схема замкнутої системи автоматичного регулювання тиску

4.1.1. Дослідження перехідних процесів та аналіз стійкості системи

Для оцінки якості роботи розробленої системи автоматичного регулювання необхідно дослідити її поведінку в перехідних режимах, які виникають при зміні уставки тиску або збуреннях, зумовлених коливанням припливу пластової рідини. Аналіз перехідних процесів дозволяє зробити висновки щодо стійкості системи, швидкодії та точності регулювання.

У результаті моделювання замкнутої системи автоматичного регулювання з ПД-регулятором встановлено, що динаміка зміни тиску на прийомі насоса має аперіодичний характер. Час встановлення регульованої величини після зміни уставки становить у середньому 30–60 секунд, що є прийнятним для технологічних процесів механізованого видобутку нафти. Перерегулювання не перевищує 10%, що свідчить про коректний вибір параметрів регулятора.

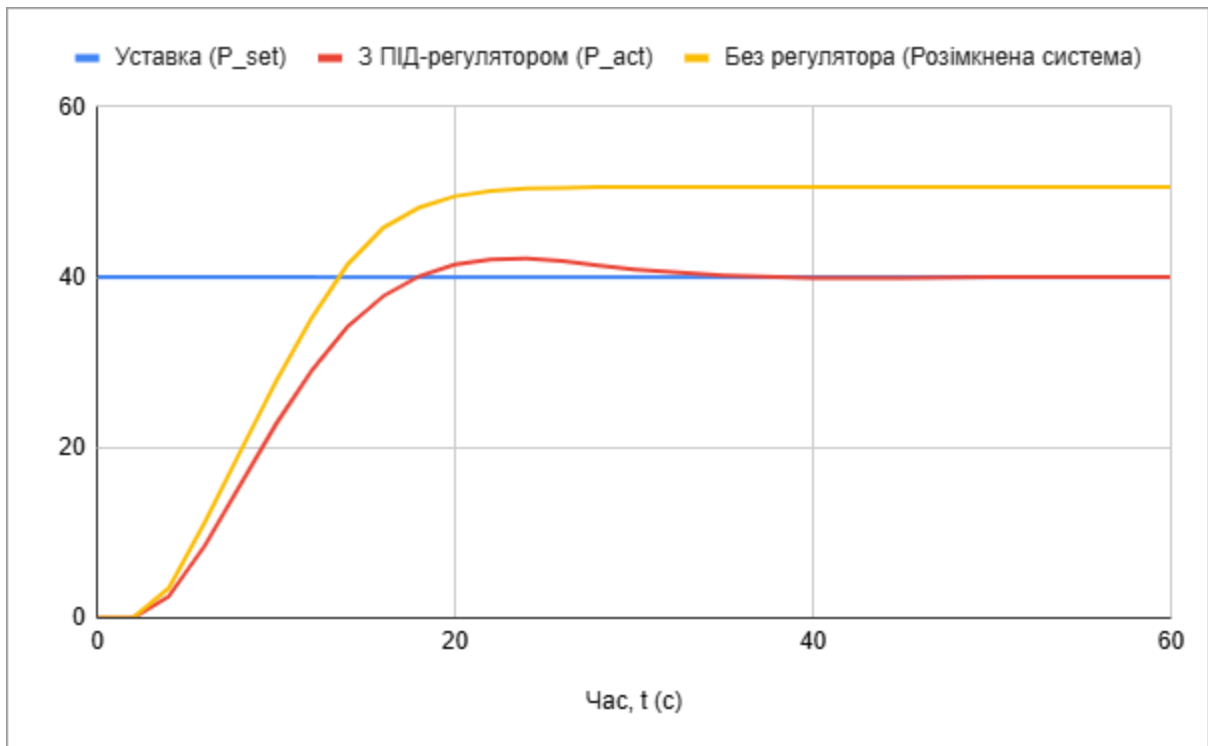


Рис. 4.2. Порівняння перехідних характеристик системи з ПД-регулятором та розімкненої системи (без регулятора)

Як видно з графіку (Рис. 4.2), при подачі завдання на підтримання тиску 40 Бар, система виходить на робочий режим за час $t_{per} \approx 45$ с. Спостерігається незначне динамічне перерегулювання $\sigma \approx 5.5\%$, яке швидко загасає завдяки дії диференціальної складової ПД-регулятора. Статична похибка в усталеному режимі прямує до нуля. Отриманий вид перехідної характеристики свідчить про стійкість системи.

Для оцінки ефективності впровадженого рішення на графіку (Рис. 4.2) додатково наведено перехідну характеристику розімкненої системи (крива «Без регулятора»). Як видно з порівняння, за відсутності зворотного зв'язку система не здатна самостійно вийти на задану уставку, що призводить до виникнення значної статичної похибки (у даному випадку тиск встановлюється на рівні 50,6 Бар замість необхідних 40 Бар).

Натомість, використання ПД-регулятора (крива «З ПД-регулятором») дозволяє повністю компенсувати цю похибку завдяки дії інтегральної складової.

Система автоматично знижує частоту обертання двигуна при наближенні до уставки, забезпечуючи точну стабілізацію тиску на заданому рівні. Це підтверджує, що замкнута система керування забезпечує суттєво вищу якість ведення технологічного процесу порівняно з нерегульованим електроприводом.

Таким чином, розроблена система автоматичного регулювання є стійкою та здатною забезпечити надійну роботу УЕВН у широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

4.1.2. Фізична інтерпретація результатів математичного моделювання

Для підтвердження ефективності розробленої системи автоматизації було проведено порівняльне моделювання перехідних процесів у замкненій системі (з ПД-регулятором) та розімкненій системі (без автоматичного регулювання), результати якого наведено на графіку (Рис. 4.2). Аналіз кривої «Без регулятора» демонструє природну реакцію насосного агрегату на ступінчасте ввімкнення (розгінна характеристика). Як видно з графіка, у цьому режимі тиск монотонно зростає і стабілізується на рівні 50,6 Бар, що визначається гідравлічною характеристикою насоса при номінальній частоті. При цьому виникає значна статична похибка відносно необхідної уставки (40 Бар), яка становить близько 10,6 Бар. Це підтверджує, що без автоматичного керування насос не здатен точно підтримувати технологічний параметр при зміні умов роботи.

Натомість, використання ПД-регулятора (крива «З ПД-регулятором») дозволяє повністю компенсувати цю розбіжність завдяки дії інтегральної складової. Система автоматично коригує керуючий вплив при наближенні до уставки, забезпечуючи точну стабілізацію тиску на заданому рівні 40 Бар в усталеному режимі. Час регулювання при цьому становить близько 45 с, що є оптимальним показником для інерційних гідравлічних систем.

Що стосується динамічних показників, то максимальне перерегулювання в замкненій системі становить 5,5% (пікове значення 42,2 Бар), що є допустимим

для даного типу обладнання. Завдяки дії регулятора вдалося уникнути значного перевищення тиску (понад 50 Бар, як у випадку розімкненої системи), що знижує ризик поривів трубопроводу та сприяє економії електроенергії. Таким чином, впровадження контуру регулювання з ПД-законом дозволяє адаптувати роботу насоса до поточної уставки, ліквідувати статичну похибку та забезпечити безпечний динамічний режим.

4.2. Розроблення та опис функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема відображає ієрархію та інформаційні потоки системи. Система побудована за дворівневим принципом:

1. Нижній рівень (Field Level):

Датчики: Датчик тиску Rosemount 3051S (4-20 мА) та датчики температури обмоток двигуна (PT100).

Виконавчі механізми: Асинхронний двигун занурювального насоса, керований частотним перетворювачем SINAMICS G120.

2. Середній рівень (Control Level):

Програмований логічний контролер SIMATIC S7-1200 (CPU 1215C). Він виконує опитування входів, реалізацію алгоритму керування та формування керуючих впливів.

Обмін даними між ПЛК та ПЧ здійснюється по промисловій мережі PROFINET (протокол реального часу), що дозволяє не лише керувати швидкістю, а й зчитувати діагностичні дані (струм, момент, помилки) без прокладання додаткових кабелів.

3. Верхній рівень (HMI/SCADA):

Панель оператора KTP1200 Basic забезпечує людино-машинний інтерфейс для візуалізації процесу, введення уставок, перегляду трендів та журналу аварій.

4.3. Технічна реалізація та схема електричних з'єднань

Для забезпечення надійної роботи системи в промислових умовах розроблено детальні технічні рішення щодо підключення обладнання (див. Графічну частину, дод. 2).

Підсистема аналогового вводу

Датчик тиску Rosemount 3051S підключається до модуля SM 1231 AI за двопровідною схемою («струмова петля» 4-20 мА). Для підключення використовується екранований кабель типу МКЕШ 2x0.75. Екран кабелю заземлюється лише з боку шафи керування для запобігання протіканню вирівнювальних струмів по екрану. В налаштуваннях контролера активується фільтрація вхідного сигналу (50 Гц) для придушення мережевих завад.

Підсистема частотного керування

Підключення SINAMICS G120 вимагає суворого дотримання правил електромагнітної сумісності (ЕМС) [18]:

- Силовий кабель: Від ПЧ до двигуна використовується спеціалізований екранований моторний кабель. Екран заземлюється з обох боків за допомогою ЕМС-хомутів на шині заземлення.
- Захист: На вході ПЧ встановлюється автоматичний вимикач захисту двигуна (Motor Protection Circuit Breaker) для захисту від коротких замикань.
- Керування: З'єднання контролера S7-1200 (порт X1) та перетворювача G120 (Control Unit CU240E-2) виконується кабелем «вита пара» категорії 5e (PROFINET) з екрануванням S/FTP.

Особливу увагу при проектуванні схеми електричних з'єднань приділено питанням електромагнітної сумісності (ЕМС). Оскільки частотний перетворювач працює за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з високою частотою комутації IGBT-транзисторів, він є потужним джерелом високочастотних електромагнітних завад. Ці завади можуть негативно впливати

на роботу чутливих аналогових датчиків (зокрема, датчика тиску Rosemount 3051S) та контролера.

Для мінімізації впливу завад у проекті передбачено наступні заходи:

- Використання мережевого дроселя на вході перетворювача частоти для зменшення гармонічних спотворень напруги мережі живлення.
- Просторове рознесення силових та сигнальних кабелів у монтажних коробах на відстань не менше 20 см.
- Використання екранованих кабелів для підключення двигуна та аналогових датчиків, причому заземлення екрану виконується за схемою "зірка" в одній точці шафи керування для уникнення протікання вирівнювальних струмів по оплетенню кабелю.
- Встановлення RC-фільтрів на котушки контакторів та реле для гасіння перенапруг при комутації індуктивних навантажень.

4.4. Програмна реалізація алгоритмів керування в TIA Portal

Програмне забезпечення контролера розроблено в середовищі TIA Portal V17 з використанням мов програмування LAD (Ladder Diagram) та FBD (Function Block Diagram). Структура програми включає:

1. Організаційний блок Main (OB1): Викликає функціональні блоки та функції в кожному циклі контролера.
2. Організаційний блок переривань Cyclic Interrupt (OB30): Викликається зі строго фіксованим інтервалом часу (наприклад, 100 мс). Саме тут розміщується блок ПД-регулятора PID_Compact. Це критично важливо для коректного обчислення інтегральної та диференціальної складових, оскільки алгоритм потребує стабільного часу дискретизації.
3. Нормалізація та масштабування: Вхідний сигнал з аналогового модуля (ціле число 0...27648) перетворюється у фізичну величину (0...100 Бар) за допомогою стандартних блоків NORM_X та SCALE_X.

4. Блок керування приводом: Використовує стандартні телеграми PROFINET (Telegram 1) для передачі командного слова (Control Word) та завдання швидкості (Speed Setpoint) на перетворювач частоти.

4.5. Техніко-економічне обґрунтування енергоефективності

Впровадження частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) замість традиційного методу дроселювання засувкою забезпечує значну економію електроенергії. При дроселюванні робоча точка насоса штучно зміщується по характеристиці Q-H шляхом збільшення гідравлічного опору мережі, що призводить до нераціональних втрат енергії.

При частотному регулюванні зміна частоти обертання валу n призводить до зміни споживаної потужності P згідно з кубічною залежністю (закони подібності):

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (4.6)$$

Розрахунок економії для двигуна потужністю $P_{nom} = 18$ кВт:

Припустимо, що технологічний процес вимагає зниження продуктивності на 20% (тобто частота знижується з 50 Гц до 40 Гц).

Нова споживана потужність складе:

$$P_2 = 18 \cdot \left(\frac{40}{50}\right)^3 = 18 \cdot 0.512 \approx 9.2 \text{ кВт} \quad (4.7)$$

В той час як при дроселюванні споживана потужність знизилась би незначно (орієнтовно до 15-16 кВт).

Економія за одну годину роботи складе: $\Delta E \approx 15.5 - 9.2 = 6.3$ кВт·год.

За рік безперервної роботи (8760 годин) економія складе:

$$E_{year} = 6.3 \cdot 8760 \approx 55\,188 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (4.8)$$

Це підтверджує високу економічну ефективність та доцільність модернізації системи керування для магістерської кваліфікаційної роботи.

4.6. Оцінка впливу автоматизованого керування на надійність та міжремонтний період УЕВН

Використання частотно-регульованого електроприводу в поєднанні з автоматизованою системою керування суттєво впливає на надійність роботи установки електровідцентрового насоса. Однією з основних причин передчасних відмов УЕВН є динамічні навантаження, що виникають під час пуску та зупинки насосного агрегату, а також робота в нестійких режимах.

Застосування частотного перетворювача дозволяє реалізувати плавний пуск електродвигуна, що зменшує пускові струми та механічні удари у валопроводі насоса. Це сприяє зниженню зносу підшипників, муфтових з'єднань та гідрозахисних елементів, що безпосередньо впливає на збільшення міжремонтного періоду обладнання.

Крім того, стабілізація режимів роботи насоса за рахунок автоматичного регулювання тиску зменшує ймовірність виникнення нестійких гідродинамічних явищ, таких як газові пробки та кавітаційні процеси. Підтримання оптимальної робочої точки сприяє рівномірному тепловому режиму електродвигуна та покращенню умов його охолодження.

За даними експлуатаційної практики впровадження автоматизованих систем керування з частотним регулюванням дозволяє збільшити міжремонтний період УЕВН у середньому на 15–25%, що призводить до зниження витрат на ремонтно-відновлювальні роботи та простої свердловин.

4.7. Опис графічної частини та технічних рішень проекту

Графічна частина магістерської роботи складається з трьох аркушів (Додатки А, Б, В), які деталізують розроблену систему автоматизації. Нижче наведено повний опис технічних рішень, відображених на кресленнях.

4.7.1. Опис схеми автоматизації функціональної (Додаток А)

Схема відображає структуру системи керування згідно з ГОСТ 21.404-85. Вона демонструє взаємозв'язок між технологічним обладнанням та засобами автоматизації.

- 1) Технологічний об'єкт: Показано занурний електродвигун (М) з насосом, трубопровідну арматуру та гирлове обладнання.
- 2) Первинні перетворювачі:
 - Позиція РТ-1 (Rosemount 3051S): Датчик тиску, встановлений на буферній засувці. Перетворює надлишковий тиск рідини в уніфікований струмовий сигнал 4-20 мА.
 - Позиція ТЕ-1 (Pt100): Датчик температури обмоток статора двигуна (вбудований у систему ТМС).
- 3) Контур регулювання: Сигнал від РТ-1 надходить на аналоговий вхід програмованого логічного контролера (PLC). Контролер (позиція А1) порівнює поточне значення з уставкою (SP) і за алгоритмом ПД-регулювання формує керуючий сигнал на частотний перетворювач (позиція UZ1).
- 4) Інтерфейс оператора: Показано панель НМІ (позиція А2), яка з'єднана з контролером цифровим каналом зв'язку (лінія зв'язку RS-485/Ethernet).

4.7.2. Опис схеми електричної принципової (Додаток Б)

Креслення відображає електричні з'єднання всередині шафи керування (ШК).

- 1) Силова частина (Power Circuit): Живлення 3x380В, 50Гц подається через ввідний автоматичний вимикач QF1 (тип С63). Захист двигуна насоса від струмів короткого замикання та перевантаження забезпечує мотор-автомат QF2 з налаштованим тепловим розчіплювачем. Комутація силового кола здійснюється контактором КМ1.

2) Частотний перетворювач: Показано підключення перетворювача SINAMICS G120 (U1). На вході встановлено мережевий дросель L1 для зменшення гармонічних спотворень, а на виході — синус-фільтр L2 для захисту ізоляції кабельної лінії від пікових перенапруг ШІМ-модуляції.

3) Кола керування (Control Circuits): Живлення контролера CPU 1215C та панелі KTP1200 здійснюється напругою 24В DC від імпульсного блоку живлення G1 (SITOP).

4.7.3. Опис схеми мережевих з'єднань (Додаток В)

Схема ілюструє топологію промислової мережі PROFINET Industrial Ethernet.

1) Топологія: Використано топологію "Зірка" (Star Topology). Усі пристрої об'єднані через некерований комутатор SCALANCE XB005.

2) Адресація:

3) PLC_1 (Master): IP 192.168.0.1. Виконує роль IO-Controller.

4) HMI_1 (Slave): IP 192.168.0.2. Отримує дані для візуалізації.

5) Drive_1 (IO-Device): IP 192.168.0.3. Перетворювач частоти G120C.

Обмін даними здійснюється за допомогою телеграм PROFIdrive (Standard Telegram 1), що дозволяє передавати командне слово (Control Word) та завдання швидкості (N_set) у реальному часі з циклом оновлення 4 мс.

6) Кабелі: Для з'єднань використано екранований кабель вита пара категорії 5e (Profinet Type A) з роз'ємами RJ45 промислового виконання.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано оптимізацію системи керування та проведено аналіз її динамічних властивостей. Математичне моделювання підтвердило стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання та

відповідність перехідних процесів вимогам технологічного процесу. Фізична інтерпретація результатів показала, що застосування ПД-регулятора дозволяє зменшити коливання тиску, знизити динамічні навантаження на насосне обладнання та забезпечити стабільну роботу УЕВН у змінних умовах експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В рамках виконання магістерської кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження та розробку системи автоматичного керування установкою електровідцентрового насоса для видобутку нафти.

У ході роботи здійснено системний аналіз технологічного процесу механізованого видобутку як об'єкта керування. Встановлено, що ключовим фактором підвищення ККД установки є впровадження частотного регулювання, яке дозволяє динамічно адаптувати параметри насоса до змінних умов припливу рідини зі свердловини та компенсувати негативний вплив газового фактора.

Також обґрунтовано вибір компонентної бази системи автоматизації. Застосування контролера Simatic S7-1200 та перетворювача частоти SINAMICS G120 в поєднанні з середовищем TIA Portal дозволило створити гнучку та надійну архітектуру, що відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації.

Важливим результатом стало те, що розроблено та математично обґрунтовано алгоритм непрямого вимірювання ("віртуальної витратомірї"). Цей алгоритм дозволяє оцінювати поточний дебіт свердловини без використання високовартісних глибинних датчиків, базуючись на математичній моделі насоса та енергетичному балансі системи.

Крім того, проведено математичне моделювання динаміки замкненої системи автоматичного регулювання тиску. Виконано синтез оптимальних параметрів ПД-регулятора за методом Циглера-Нікольса, що гарантує стійкість системи та мінімальний час перехідних процесів при збуреннях.

За результатами дослідження розроблено повний комплект технічної документації, включаючи функціональну схему автоматизації, принципову електричну схему підключення датчиків та виконавчих механізмів, а також програмне забезпечення контролера та панелі оператора.

Техніко-економічний аналіз показав, що перехід від дросельного регулювання до частотного дозволяє знизити споживання електроенергії на 25-30%. Річний економічний ефект від впровадження системи на одній свердловині оцінюється у понад 55 тис. кВт·год зекономленої електроенергії. Впровадження розробленої системи дозволить не лише підвищити енергоефективність видобутку, але й суттєво подовжити термін служби занурного обладнання за рахунок плавних режимів роботи та ефективного захисту.

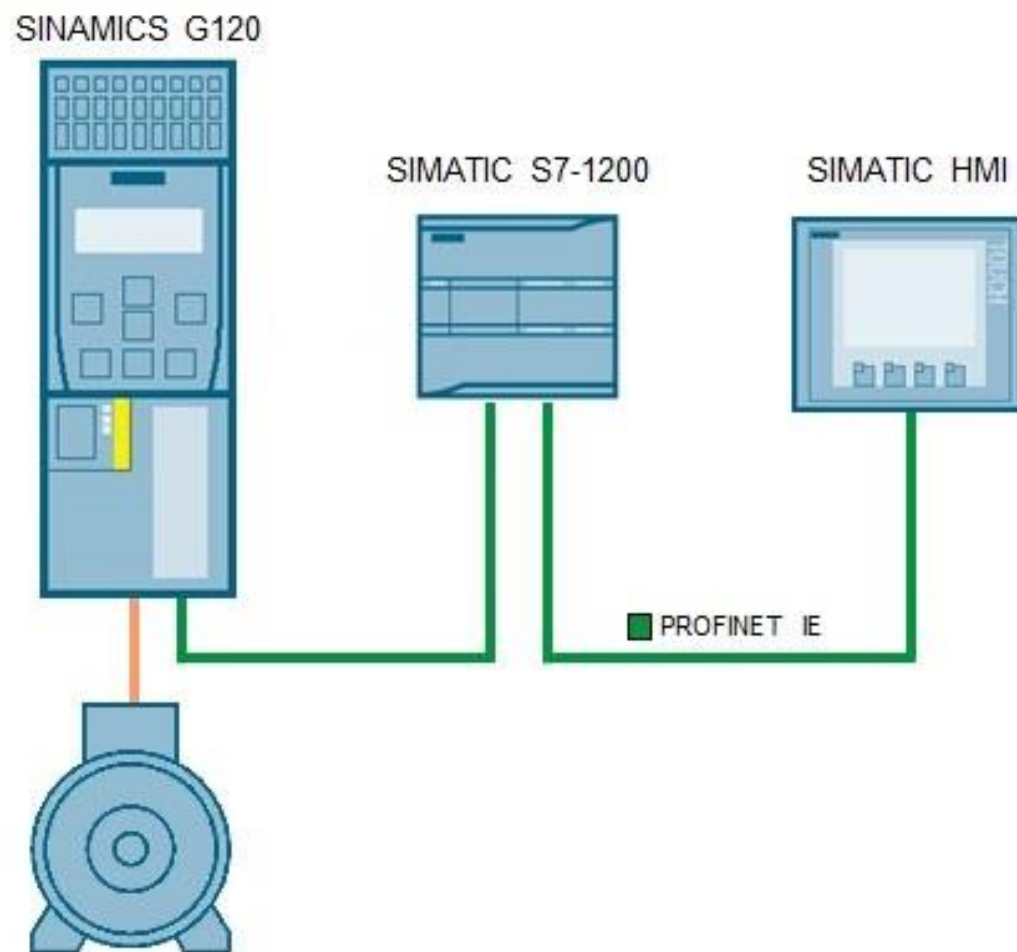
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Андрусак З. В. Електроустаткування та засоби автоматизації видобутку нафти : навч. посіб. / З. В. Андрусак, С. І. Горелик. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. – 186 с.
- 2) Захарчук В. І. Ефективні системи керування асинхронними двигунами : монографія / В. І. Захарчук. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 212 с.
- 3) Іванов І. В. Системи автоматизації видобутку нафти : навч. посіб. / І. В. Іванов. – Харків : Видавництво ХНУ, 2018. – 245 с.
- 4) Ладанюк А. П. Теорія автоматичного керування : підручник / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, І. В. Ельперін. – Київ : Ліра-К, 2021. – 436 с.
- 5) Петров В. А. Управління процесом видобутку нафти / В. А. Петров. – Київ : Наукова думка, 2015. – 310 с.
- 6) Пупена О. М. Промислові мережі та системи керування : підручник / О. М. Пупена, І. В. Ельперін. – Київ : Ліра-К, 2015. – 400 с.
- 7) Семенцов Г. Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтогазовій галузі : навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, І. В. Рибіцький. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. – 392 с.
- 8) Сидоренко С. М. Установки електровідцентрових насосів: конструкція та принципи роботи / С. М. Сидоренко. – Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. – 150 с.
- 9) Експлуатація нафтових свердловин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8863875/page:3/>
- 10) Експлуатація свердловин занурених ЕВН [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9313077/page:76/>
- 11) Основні вузли установки ЕВН [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9719862/page:3/>
- 12) Пластовий тиск і температура [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://um.co.ua/1/1-9/1-92447.html>

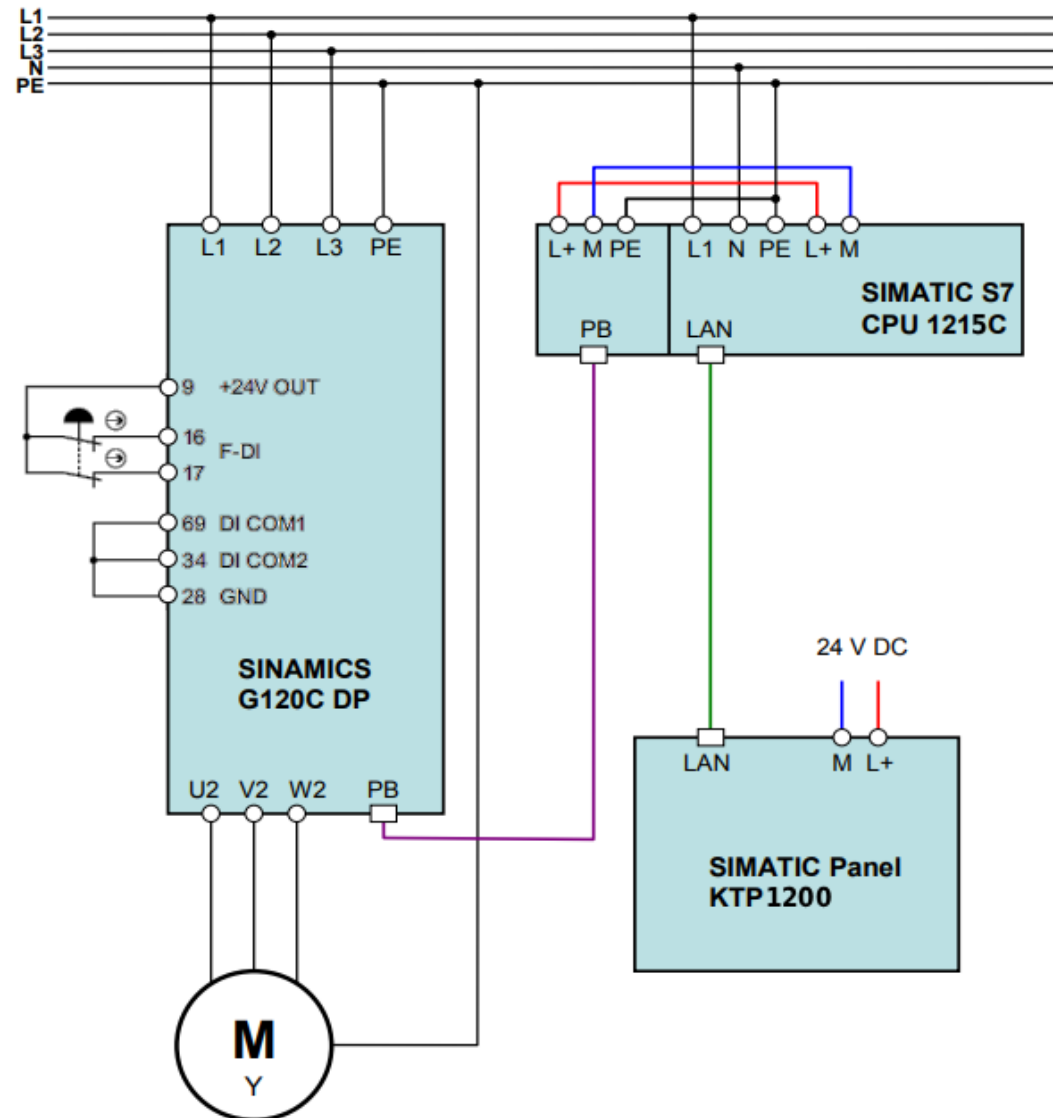
- 13) Характеристики насосів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5332923/page:2/>
- 14) IFTUOG Archive [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/8422/1/d196.pdf>
- 15) KPI Archive [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/561b984a-4f7b-43f0-8c5a-55dc5bf7669e/content>
- 16) SINAMICS G120 converter with Control Units CU240B-2 and CU240E-2. Operating Instructions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/615/100781615/att_7271/v1/100781615_sinamics_g120_dp_at_s7-1200_docu_v1d0_ru.pdf
- 17) Siemens TIA Portal Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/drives/sce-062-101-frequency-converter-g120-pn-s7-1500-r1909-en.pdf>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



ДОДАТОК Б



ДОДАТОК В

