

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

АКПмз - 26.00.00.000 ПЗ

гр. АКПмз-24-1

Віталій БОГАЙЧУК

2026 рік

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

Богайчук Віталій Зіновійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681. 5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи керування процесом підготовки

(назва роботи)

попутних нафтових газів

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.т.н.

(посада)

А.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПмз-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

В.С.Богайчук

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

В.С.Борин

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент-опонент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І.Фешанич

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ - 2026

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1. | Вступ | 10.01 2026 | |
| 2. | Аналіз сучасного стану проблеми та формулювання завдань дослідження | 30.01 2026 | |
| 3. | Синтез системи керування процесом підготовки попутних нафтових газів | 10.02.2026 | |
| 4. | Інженерна реалізація апаратної структури автоматизованої системи керування процесом підготовки попутних газів | 15.02.2026 | |

Студент _____
(підпис)

Богайчук В.С. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Борин В.С. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто питання розроблення системи керування процесом підготовки супутнього нафтового газу на об'єктах нафтогазовидобування. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання супутнього нафтового газу, зменшення його втрат і шкідливих викидів у навколишнє середовище, а також забезпечення стабільної та безпечної роботи технологічного обладнання. Об'єктом дослідження є технологічний процес підготовки супутнього нафтового газу, що включає сепарацію, транспортування, підігрів і перекачування газонафтової суміші.

Проаналізовано структуру технологічної схеми підготовки газу, функціонування основних елементів, таких як сепаратор, насос, підігрівач, а також роль вимірювальних каналів і датчиків температури та інших параметрів. Особливу увагу приділено вибору та обґрунтуванню виконавчих пристроїв і засобів автоматизації, необхідних для реалізації ефективною системи керування.

Здійснено синтез системи керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та вимог до якості регулювання. Для дослідження режимів роботи та перевірки працездатності розроблених алгоритмів створено імітаційну модель процесу підготовки супутнього нафтового газу. Проведено аналіз результатів моделювання, який підтвердив можливість забезпечення заданих технологічних параметрів, підвищення стабільності процесу та зниження енерговитрат. Отримані результати можуть бути використані під час проектування та модернізації систем керування на промислових об'єктах нафтогазової галузі.

Ключові слова: СУПУТНІЙ НАФТОВИЙ ГАЗ, НАФТА, СЕПАРАТОР, НАСОС, ДАТЧИК, ПІДІГРІВАЧ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, СИНТЕЗ СИСТЕМИ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ.

ANNOTATION

The paper considers the issue of developing a control system for the process of preparing associated petroleum gas at oil and gas production facilities. The relevance of the topic is due to the need to increase the efficiency of associated petroleum gas use, reduce its losses and harmful emissions into the environment, and ensure stable and safe operation of technological equipment. The object of the study is the technological process of preparing associated petroleum gas, which includes separation, transportation, heating, and pumping of the gas-oil mixture.

The structure of the gas preparation technological scheme, the functioning of the main elements, such as the separator, pump, heater, as well as the role of measuring channels and temperature sensors and other parameters, were analyzed. Particular attention is paid to the selection and justification of actuators and automation tools necessary for the implementation of an effective control system.

A control system was synthesized taking into account the dynamic properties of the object and the requirements for the quality of regulation. To study the operating modes and verify the performance of the developed algorithms, a simulation model of the associated petroleum gas preparation process was created. An analysis of the modeling results was conducted, which confirmed the possibility of ensuring the specified technological parameters, increasing the stability of the process, and reducing energy consumption. The results obtained can be used when designing and modernizing control systems at industrial facilities in the oil and gas industry.

Keywords: SATELLITE PETROLEUM GAS, OIL, SEPARATOR, PUMP, SENSOR, HEATER, CONTROL SYSTEM, TEMPERATURE, SYSTEM SYNTHESIS, SIMULATION MODEL

ЗМІСТ

| | ст. |
|---|-----|
| ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ..... | 7 |
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ | 13 |
| 1.1 Характеристика сировини та основних продуктів газо- та нафтопереробних підприємств | 13 |
| Висновки до розділу 1..... | 19 |
| РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІДГОТОВКИ ПОПУТНИХ НАФТОВИХ ГАЗІВ | 20 |
| 2.1 Аналіз технологічного процесу та визначення вхідних і вихідних параметрів | 20 |
| 2.2 Дослідження динамічної системи керування з врахуванням статичної характеристики | 24 |
| 2.3. Імітаційне моделювання процесу підготовки попутних газів..... | 30 |
| 2.5 Висновки до розділу 2..... | 34 |
| РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНОЇ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІДГОТОВКИ ПОПУТНИХ ГАЗІВ | 36 |
| 3.1 Проектування структурної схеми підсистеми автоматизованого керування | 36 |
| 3.2. Створення структурної моделі обміну інформацією в системі | 38 |
| 3.3. Підбір та технічний аналіз датчиків технологічних параметрів..... | 39 |
| 3.4. Створення функціональної схеми системи керування технологічним процесом..... | 45 |
| Висновки до розділу 3..... | 47 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 49 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 51 |

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК ТП — автоматизована система керування технологічним процесом;

БП — біологічне паливо;

ВВП — валовий внутрішній продукт;

ЕОМ — електронна обчислювальна машина;

ОК — об'єкт керування;

САК — система автоматичного керування;

ПЛК — програмований логічний контролер.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку нафтогазової галузі особливої актуальності набуває проблема раціонального використання попутних нафтових газів, які утворюються під час видобутку та підготовки нафти. Значна частина таких газів досі утилізується неефективно або спалюється на факелах, що призводить до втрат енергетичних ресурсів, зростання собівартості видобутку нафти та негативного впливу на довкілля. У зв'язку з посиленням екологічних вимог і необхідністю зниження викидів парникових газів виникає потреба у впровадженні сучасних технологій підготовки та використання попутного нафтового газу.

Процес підготовки попутних нафтових газів є складним багатопараметричним технологічним процесом, що включає операції сепарації, підігріву, транспортування та регулювання режимів роботи обладнання. Забезпечення стабільних технологічних параметрів, зокрема тиску та температури, безпосередньо впливає на ефективність роботи сепараторів, насосів і підігрівачів, а також на безпеку експлуатації установки в цілому. За таких умов ручне керування або використання застарілих засобів автоматизації не дозволяє досягти необхідного рівня точності, надійності та енергоефективності.

Розроблення та впровадження сучасної системи керування процесом підготовки попутних нафтових газів на основі програмованих логічних контролерів, датчиків і виконавчих пристроїв дає змогу підвищити якість регулювання, забезпечити оперативний контроль технологічних параметрів і своєчасне реагування на відхилення від заданих режимів. Крім того, застосування імітаційного моделювання під час синтезу системи керування дозволяє оцінити ефективність прийнятих технічних рішень ще на етапі проектування, що знижує ризики впровадження та витрати на модернізацію. У зв'язку з цим тема розроблення системи керування процесом підготовки

попутних нафтових газів є актуальною, практично значущою та відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизації в нафтогазовій промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана автором відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) — «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР №011U005890), а також у межах реалізації комплексної цільової програми «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР №0115U007099).

У межах обраної тематики автором самостійно виконано всі розділи магістерської роботи, здійснено розроблення інтелектуальної системи керування технологічним процесом отримання перегрітої пари та проведено вдосконалення автоматизованої системи керування технологічним процесом даного об'єкта.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є розроблення та обґрунтування ефективної системи керування процесом підготовки попутних нафтових газів, яка забезпечує стабільність і оптимальність технологічних режимів, підвищення надійності та енергоефективності роботи обладнання, а також зниження втрат сировини і негативного впливу на навколишнє середовище шляхом застосування сучасних засобів автоматизації, синтезу алгоритмів керування та імітаційного моделювання. проаналізувати потенційні небезпеки та забезпечити безаварійну роботу автоматичної системи керування процесом керування паровим котлом;

Об'єктом дослідження є сепаратор.

Предметом дослідження є методитеорії є методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого керування процесом підготовки попутних нафтових газів, зокрема закономірності формування та регулювання технологічних

параметрів (тиску, температури, витрати), а також принципи синтезу й моделювання систем керування з використанням датчиків, виконавчих пристроїв, програмованих логічних контролерів та імітаційних моделей.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи використано комплекс теоретичних і прикладних методів дослідження. Зокрема, застосовано методи системного аналізу для вивчення структури та функціонування процесу підготовки попутних нафтових газів і визначення взаємозв'язків між основними технологічними параметрами. Для опису динамічних властивостей об'єкта керування використано методи математичного моделювання та теорії автоматичного керування.

Синтез системи керування здійснювався із застосуванням класичних і сучасних методів регулювання з урахуванням вимог до якості перехідних процесів і стійкості системи. Для перевірки працездатності розроблених алгоритмів та дослідження режимів роботи технологічного процесу застосовано імітаційне моделювання. Аналіз отриманих результатів проводився з використанням методів чисельного аналізу та порівняльної оцінки ефективності варіантів систем керування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні та обґрунтуванні підходів до синтезу системи керування процесом підготовки попутних нафтових газів з урахуванням динамічних та нелінійних властивостей технологічного об'єкта. У роботі вперше запропоновано структурно-функціональну модель системи керування, яка поєднує регулювання основних технологічних параметрів із використанням сучасних програмованих логічних контролерів та інтегрованих засобів збору й обробки даних.

Отримала подальший розвиток методика імітаційного моделювання процесу підготовки попутних нафтових газів, що дає змогу оцінювати вплив зміни режимів роботи обладнання та параметрів середовища на якість керування ще на етапі проєктування. Запропоновані алгоритми керування забезпечують підвищення стабільності технологічного процесу та зменшення

енерговитрат, що відрізняє їх від існуючих рішень і підтверджує наукову новизну отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості їх безпосереднього використання під час проектування, впровадження та модернізації автоматизованих систем керування процесом підготовки попутних нафтових газів на об'єктах нафтогазової промисловості. Розроблена структура системи керування, алгоритми регулювання та імітаційна модель можуть бути адаптовані до конкретних технологічних схем з урахуванням типу обладнання, режимів роботи та вимог виробництва.

Запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення стабільності технологічних параметрів, зниження енерговитрат і втрат супутнього нафтового газу, а також підвищення надійності й безпеки експлуатації сепараторів, насосів і підігрівачів. Результати роботи можуть бути використані інженерно-технічним персоналом під час автоматизації діючих установок, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій у нафтогазовій галузі.

Особистий внесок. Всі наукові результати та положення магістерської роботи, які виносяться на захист, одержані автором на основі результатів аналізу літературних джерел і власних досліджень.

Апробація результатів магістерської роботи. Окремі положення та результати досліджень використовувалися під час проведення лабораторних і практичних занять з дисциплін, пов'язаних з автоматизацією технологічних процесів у нафтогазовій галузі.

Результати моделювання та синтезу системи керування були представлені й обговорені на науково-практичних семінарах та студентських наукових конференціях, що підтвердило їх наукову обґрунтованість і практичну доцільність. Отримані результати можуть бути рекомендовані для подальшого використання у наукових дослідженнях і впровадженні сучасних систем керування на об'єктах підготовки попутних нафтових газів.

Публікації. Не має.

Структура і обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів та загальних висновків. Обсяг роботи 54 сторінок машинописного тексту.

Магістерська робота містить 19 рисунків, , список використаних літературних джерел із 21 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Характеристика сировини та основних продуктів газо- та нафтопереробних підприємств

Газо- та нафтопереробні підприємства здійснюють комплексну переробку сировини з метою отримання високоякісних енергетичних ресурсів та хімічної продукції. Основною сировиною для таких підприємств є нафта та попутний нафтовий газ, які надходять безпосередньо з родовищ нафтогазової промисловості.

Нафта є багатоконпонентною сумішшю вуглеводнів, яка містить як легкі фракції (гексан, гептан), так і важкі залишкові компоненти (асфальтени, смоли). Вона використовується як базова сировина для отримання моторних палив, мастильних матеріалів, нафтохімічних продуктів та інших цінних компонентів. Характеристики нафти, такі як густина, в'язкість, вміст сірки та температура спалаху, визначають ефективність її переробки та вибір технологічних режимів на підприємстві.

Попутний нафтовий газ (ПНГ) є вторинним продуктом видобутку нафти і складається головним чином з метану, етану, пропану та бутанів, а також невеликої кількості вуглеводневих та неметанових домішок. Його склад значно варіює залежно від родовища та способу видобутку. ПНГ може використовуватися як паливо для власних технологічних процесів, сировина для виробництва зріджених вуглеводневих газів, або для хімічної переробки. Раціональне використання ПНГ дозволяє знизити втрати енергетичних ресурсів та зменшити екологічне навантаження.

Продукти газо- та нафтопереробки включають:

- моторні та авіаційні палива (бензин, дизельне паливо, керосин);
- зріджені вуглеводневі гази (пропан, бутан);

- нафтохімічні фракції для виробництва полімерів та органічних сполук;
- побічні продукти, такі як мазут, асфальт та сірка.

Якість кінцевих продуктів залежить від складу сировини та технологічного режиму її переробки, зокрема температури, тиску та часу перебування в апаратах. Сучасні підприємства впроваджують автоматизовані системи контролю параметрів технологічного процесу, що дозволяє підтримувати стабільні умови переробки, підвищувати вихід цінних продуктів і зменшувати шкідливі викиди.

Найбільшу цінність для отримання рідких вуглеводневих газів становлять попутні нафтові гази (ПНГ), які утворюються під час видобутку нафти. Нафта на виході з сепараторів, залежно від режиму сепарації, містить значну кількість розчинених у ній важких вуглеводневих газів. Гази, що виділяються з нафти після сепарації, складаються приблизно з 30 % пропану, 30–35 % бутану та близько 30 % газового бензину. Ці гази, отримані в процесі стабілізації нафти, є цінною сировиною для виробництва зріджених газів, які надалі вилучаються на газо-бензинових заводах (ГПЗ).

Окрім природних газів, промисловість виробляє штучні нафтові гази, які утворюються під час деструктивної, термічної та термokatалітичної переробки нафти. На відміну від попутних та природних газів, штучні гази містять значну кількість ненасичених олефінових вуглеводнів, що є цінною сировиною для органічного синтезу. До них належать:

- **коксний газ**, що утворюється при переробці кам'яного вугілля на кокс (до 350 м³ на тонну вугілля; до 20 % вихідного палива переходить у коксний газ);
- **доменний газ**, що утворюється в доменних печах металургійних виробництв і містить до 40 % теплопродуктивності вихідного палива;
- газоподібні продукти піролізу нафти, що утворюються в обсязі до 500 м³ на 1 т нафти залежно від способу піролізу та глибини крекінгу.

Історично важливим джерелом штучних газів була суха перегонка деревини та низькокалорійних палив, яка дозволяла отримувати гази для

хімічних і енергетичних потреб. Сучасні тенденції передбачають використання побутових та органічних відходів для отримання та розподілу біогазу.

Склад природних і попутних газів включає насичені вуглеводні (метан, етан, пропан, бутан, пентан, гексан тощо). В менших об'ємах до складу попутних нафтових газів входять ненасичені вуглеводні (етилен, пропілен, бутилен та ін.).

Метан (CH_4) є основним компонентом природних і попутних газів. Завдяки низькій температурі конденсації він практично завжди надходить на поверхню в газоподібному стані. За нормальних умов метан є безбарвним, без запаху, і утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям при концентраціях 5–15 % об. Метан використовується як паливо та сировина для отримання синтез-газу, аміаку, метанолу, ацетилену та водню у хімічних і нафтохімічних виробництвах.

Етан (C_2H_6) присутній у природних газах у кількості 0,5–5 % об., тоді як у попутних нафтових газах його вміст становить 5–20 % об. Етан є цінною хімічною сировиною для виробництва етилену — основного продукту хімічної та нафтохімічної промисловості. Він легко виділяється в рідку фазу методами низькотемпературної конденсації завдяки помірним критичним параметрам ($P_{\text{кр}} = 4,98 \text{ МПа}$, $T_{\text{кр}} = 32,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Пропан (C_3H_8) і бутан (C_4H_{10}), що входять до складу природних газів у невеликих кількостях, у газоконденсатних сумішах і ПНГ досягають 6–30 % об. Вони легко зріджуються, використовуються як побутове паливо та сировина для хімічної промисловості (виробництво пластмас і синтетичного каучуку). На ГПЗ ці компоненти виділяються при отриманні стабільного газового бензину та застосовуються як холодоагенти у холодильних установках для власного виробництва.

Пентан (C_5H_{12}) і його гомологи (ізопентан, неопентан) містяться в ПНГ у кількості 1–5 % об. Під час переробки ці компоненти входять до складу моторних палив.

Особливістю роботи газопереробних заводів є те, що в процесі добування та переробки вуглеводневої сировини змінюється склад газової суміші і знижується пластовий тиск. У зв'язку з цим на ГПЗ застосовуються додаткові блоки і установки — компресорні станції, насосні та сепараційні установки — для забезпечення ефективного транспортування та розділення газів.

Природні горючі гази є сумішшю вуглеводнів переважно метанового ряду з домішками азоту, кисню, CO_2 , H_2S , аргону, гелію та інших газів. Залежно від вмісту метану, природні гази поділяють на три групи:

- бідні (худі)** — метан 92–94 % об.;
- проміжні** — вміст вуглеводнів етан-пропан-бутанової групи менше 12 % об.;
- жирні (багаті)** — вміст важких вуглеводнів понад 150 г/м^3 газової суміші, етан-пропанова фракція > 12 % об.

У продуктивних пластах одночасно з нафтою видобувають ПНГ, який накопичується у куполі пласта або розчиняється в нафті при підвищеному тиску. При зниженні тиску розчинений газ виділяється у вигляді суміші вуглеводнів етан-пентанової групи. ПНГ містить також газовий конденсат і вологу.

На перших стадіях сепарації нафти відбувається відділення низькокиплячих компонентів під тиском до 0,7 МПа, а на другому та третьому ступенях — при тиску, близькому до атмосферного. Гази другого і третього ступенів дожимаються на компресорних станціях для транспортування на ГПЗ та подальшого розділення. Відсепарована нафта транспортується на нафтопереробний завод (НПЗ), а відсепарований газ — на найближчий газопереробний завод.

Для збору нафти та попутного нафтового газу застосовується напірна герметизована система (рис.1.1), що забезпечує мінімізацію втрат вуглеводневої сировини, зменшення викидів у довкілля та стабільність транспортування продукції свердловин. Така система передбачає

багатоступеневу сепарацію газонафтової суміші з подальшим транспортуванням окремих фаз до відповідних переробних установок.

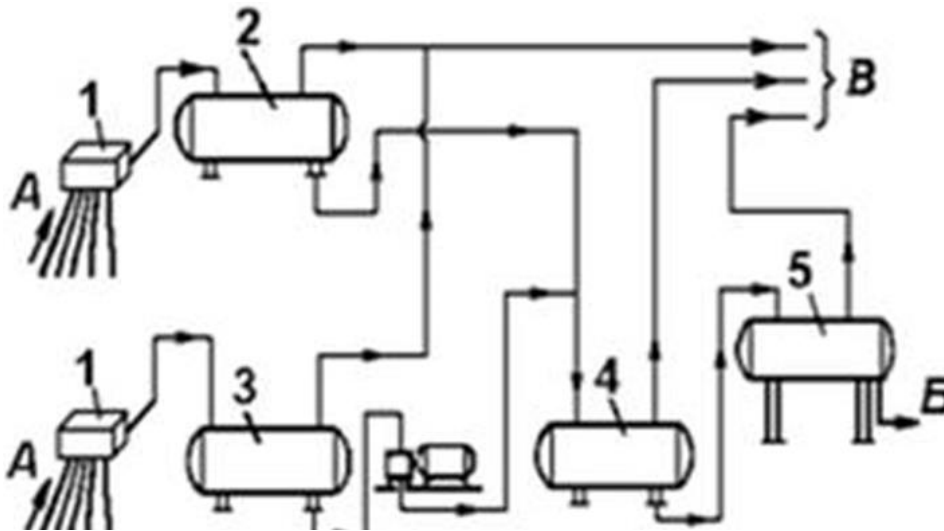


Рис. 1.1. Комплекс герметичного збирання і подачі нафти та попутних газів у напірному режимі.

Газонафтова суміш від свердловин надходить на групові пункти вимірювання, після чого спрямовується на установку сепарації високого тиску. Перший ступінь сепарації здійснюється при тиску до 0,7 МПа. За цих умов виділяється газ із відносно невисоким вмістом важких вуглеводнів. Подальші ступені сепарації (другий і третій) проводяться при пониженому тиску, близькому до атмосферного, що сприяє інтенсивнішому виділенню важких вуглеводневих компонентів. Саме у газах третього ступеня спостерігається найбільший вміст фракцій C_3-C_{5+} .

Гази другого і третього ступенів підлягають дожиманню на компресорних станціях для забезпечення транспортування на газопереробний завод (ГПЗ), де здійснюється їх подальше фракціонування та виділення цінних компонентів. Відсепарована нафта направляєється на установку підготовки до переробки або транспортується на нафтопереробний завод.

З метою зниження втрат легких вуглеводнів під час транспортування нафти на центральних пунктах збору впроваджується процес стабілізації. На

останньому ступені сепарації нафту піддають відпарюванню в колонних апаратах при атмосферному тиску та температурі 45–50 °С. У результаті з нафти видаляються легколеткі компоненти, які після охолодження та конденсації утворюють суміш зріджених газів і легкого бензину — широку фракцію легких вуглеводнів (ШФЛВ).

Технічні вимоги до ШФЛВ регламентують масову частку фракцій (C_1+C_2), C_3 , (C_4+C_5), (C_6 +вищі), а також вміст сірчистих сполук (тіолова сірка, сірководень), вільної води та лугів. Склад ШФЛВ визначається типом родовища та подальшим напрямком переробки.

На газоконденсатних родовищах разом із газом видобувається рідка фаза — газовий конденсат. Він формується внаслідок конденсації середньо- та висококиплячих вуглеводнів (пропан-бутан-пентанові фракції), що перебувають у розчиненому стані під пластовим тиском. При зниженні тиску відбувається часткова деетанізація — виділення низькокиплячих компонентів (переважно етану та пропану) в газову фазу.

В окремих випадках на 1 м³ видобутого газу припадає до 500 см³ конденсату. Конденсат транспортується на ГПЗ, де піддається стабілізації та фракціонуванню з метою отримання газового бензину і зріджених вуглеводневих газів.

Окрім вуглеводнів, природні та попутні гази містять пари води, азот, CO₂, інертні гази, сірководень та інші домішки. Їх наявність визначає необхідність очищення газу, осушування та видалення кислотних компонентів перед транспортуванням або переробкою.

Важливе місце в енергетичних та хімічних технологіях займають штучні гази, що утворюються під час термічних і нафтохімічних процесів.

Газопереробні заводи (ГПЗ), газороздільні (ГРУ), газопереробні установки (ГПУ) та газофракціонуючі установки (ГФУ) призначені для комплексної переробки газових і газорідних сумішей.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу сучасного стану підготовки попутних нафтових газів встановлено, що даний процес є складною багатопараметричною технологічною системою, ефективність функціонування якої визначається режимами сепарації, стабілізації, компримування та транспортування газової суміші. Визначальними чинниками є змінність компонентного складу сировини, коливання пластового тиску, вплив температурних режимів, а також наявність домішок (вологи, сірчистих сполук, інертних газів).

Проаналізовано існуючі технологічні схеми збору та переробки попутних нафтових газів, структуру газопереробних підприємств, особливості роботи сепараційних і компресорних установок. Встановлено, що традиційні підходи до керування процесами не забезпечують повною мірою оптимальності режимів роботи обладнання в умовах змінного складу сировини та несталих експлуатаційних параметрів. Це призводить до втрат цінних вуглеводневих компонентів, зниження енергоефективності та підвищення екологічних ризиків.

Виявлено, що підвищення ефективності підготовки попутних нафтових газів можливе за рахунок впровадження сучасних автоматизованих систем керування, які забезпечують безперервний моніторинг технологічних параметрів, адаптивне регулювання режимів роботи та інтеграцію з системами диспетчерського контролю.

На підставі проведеного аналізу сформульовано основні завдання дослідження, які полягають у розробленні математичної моделі процесу підготовки попутних нафтових газів, синтезі ефективної системи керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта, розробленні алгоритмів регулювання основних технологічних параметрів та проведенні імітаційного моделювання для оцінювання якості керування.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІДГОТОВКИ ПОПУТНИХ НАФТОВИХ ГАЗІВ

2.1. Аналіз технологічного процесу та визначення вхідних і вихідних параметрів

Сучасні технологічні процеси підготовки природного та попутного нафтового газу характеризуються підвищеною складністю, нелінійністю динамічних властивостей та багатопараметричністю. Змінність компонентного складу газової суміші, флуктуації тиску і температури, а також необхідність забезпечення нормативних показників якості підготовленого продукту зумовлюють потребу впровадження високонадійних систем автоматизованого керування. Такі системи повинні реалізовувати функції безперервного моніторингу технологічних параметрів, адаптивного регулювання режимів роботи обладнання, діагностики відхилень і протиаварійного захисту, мінімізуючи вплив людського фактора та забезпечуючи стабільність виробничого процесу.

Газові сепаратори є ключовими елементами технологічної інфраструктури нафто- і газовидобувних підприємств. Вони виконують функцію первинного розділення багатофазної суміші, що надходить із свердловин, забезпечуючи видалення механічних домішок, крапельної вологи та рідких вуглеводнів перед подальшим транспортуванням газу до магістральних трубопроводів. Газова сировина містить широкий спектр вуглеводневих компонентів (метан, етан, пропан, бутан та важчі фракції), що визначає її високу енергетичну й хімічну цінність. Водночас наявність домішок, нестабільність фазового складу та підвищена вологість ускладнюють безпосереднє використання суміші без попередньої підготовки.

Застосування сепараційного обладнання дозволяє не лише довести параметри газу до вимог чинних стандартів, але й запобігти втратам

вуглеводневої сировини, зменшуючи обсяги її спалювання на факельних установках. У контексті сучасних екологічних і економічних викликів особливої актуальності набуває оптимізація процесів збору, підготовки та транспортування нафти й газу, що забезпечує підвищення енергоефективності виробництва та зниження експлуатаційних витрат.

Принцип дії розподільчих сепараторів базується на поєднанні гравітаційних, інерційних та, за необхідності, коалесцентних механізмів розділення трифазної суміші «газ – нафта – вода (конденсат)». У процесі сепарації відбувається зниження швидкості потоку, осадження механічних частинок і краплинної фази у нижній частині апарата з подальшим їх контрольованим відведенням. Ефективність розділення визначається температурним режимом, тиском, фізико-хімічними властивостями середовища та стабільністю гідродинамічних умов у робочому об'ємі сепаратора.

У межах даного дослідження розглядається розроблення підсистеми автоматизованого керування технологічним процесом функціонування сепаратора типу СУ-200, призначеного для поділу та збагачення попутного нафтового газу. Як об'єкт регулювання обрано температурний режим нафти у сепараторі, що безпосередньо впливає на інтенсивність фазового розділення та якість підготовки газу. Технологічний контур має структуру: «електричний підігрівач → температура нафти у сепараторі».

Підсистема керування повинна забезпечувати стабілізацію температури нафти в діапазоні 35...65 °С залежно від поточних умов експлуатації. Регулюючий вплив реалізується шляхом зміни потужності електричного підігрівача в межах 0...90 кВт. Номінальне значення температури встановлюється відповідно до технологічної карти режимів роботи та може змінюватися залежно від дебіту свердловини, складу сировини та зовнішніх факторів.

Особливістю задачі керування є відсутність наперед визначеної залежності між потужністю нагрівача та досягнутим температурним режимом, що обумовлено нелінійністю теплових процесів, тепловими втратами,

інерційністю об'єкта та варіативністю теплофізичних властивостей середовища. У зв'язку з цим система автоматичного керування повинна реалізовувати замкнений контур регулювання з використанням алгоритмів ПД-типу або їх модифікацій, забезпечуючи необхідну точність, стійкість та швидкодію.

Таким чином, створення ефективної підсистеми автоматизованого керування сепаратором СУ-200 є необхідною умовою підвищення якості підготовки попутного нафтового газу, забезпечення енергоефективності процесу та дотримання вимог промислової безпеки.

Попередній аналіз технологічного процесу дає підстави стверджувати наявність прямого функціонального зв'язку між потужністю електричного підігрівача та температурою нафти у сепараторі СУ-200: збільшення потужності спричиняє підвищення температури нафти, тоді як її зменшення призводить до зниження температурного показника. Внаслідок цього, у рамках математичного та експериментального моделювання об'єкта керування — сепаратора СУ-200 — керуючим впливом визначається потужність електропідігрівача, а керованою змінною є температура нафти у робочому об'ємі сепаратора.

Візуалізація процесу автоматизованого керування реалізується через персональний комп'ютер, оснащений SCADA-системою ZENON. Дане програмне забезпечення забезпечує не лише функції моніторингу та дистанційного керування технологічним контуром, але й створює умови для проведення експериментальних досліджень об'єкта управління, включаючи інтеграцію спеціалізованого дослідницького програмного забезпечення для збору та аналізу даних.

На підставі зазначених функціональних вимог розроблено структурну схему інформаційних потоків дослідницької підсистеми, яка представлена на рисунку 2.1. Згідно з цією схемою, дослідницька система формує керуючий вплив у вигляді зміни потужності електричного підігрівача нафти. Регулювання цього параметра дозволяє підтримувати температуру нафти у сепараторі в

заданому діапазоні потужності від 0 до 90 кВт (що відповідає 0...100 % від номінальної потужності).

Номінальне значення температури нафти, що повинно підтримуватись у сепараторі, встановлюється відповідно до технологічних параметрів процесу та варіюється у межах 35...65 °С. Така організація керування дозволяє забезпечити стабільний тепловий режим роботи сепаратора, підвищити ефективність процесу розділення та збагачення попутного нафтового газу, а також мінімізувати вплив зовнішніх і внутрішніх збурень на функціонування системи.

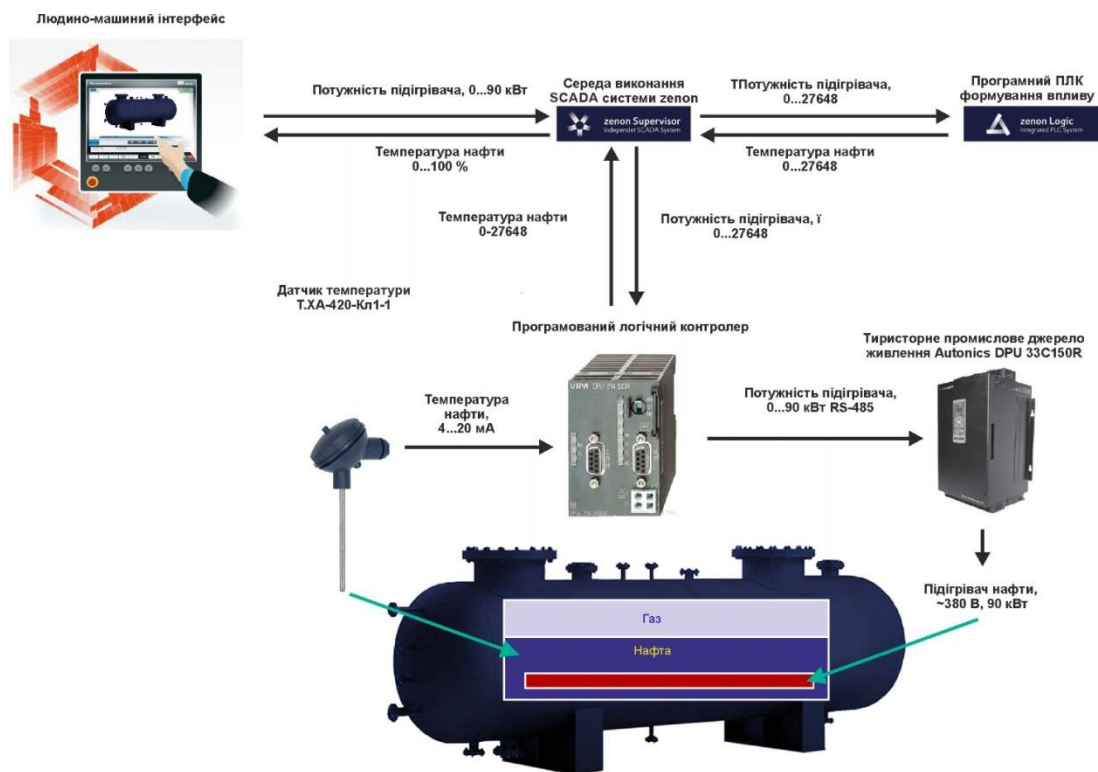


Рис. 2.1. Структурно-функціональна схема обміну інформаційними сигналами в дослідницькій системі

Програмований логічний контролер (ПЛК) виконує функції автоматизованого керування активним експериментом з метою отримання експериментальних даних, необхідних для побудови математичної моделі технологічного процесу функціонування сепаратора поділу та збагачення попутного нафтового газу типу СУ-200. В якості контрольованого каналу обрано технологічний контур «потужність підігрівача нафти → температура

нафти у сепараторі», що дозволяє досліджувати залежність температурного режиму від регульованого теплового впливу.

Інформаційний обмін між ПЛК та персональним комп'ютером, на якому функціонує SCADA-система ZENON, здійснюється через промисловий інтерфейс RS-485. Такий інтерфейс забезпечує надійну та безперервну передачу даних у режимі реального часу, що дозволяє виконувати моніторинг процесу та корекцію керуючих впливів з високою точністю.

Дослідницька підсистема дозволяє формувати різноманітні керуючі впливи та подавати їх на об'єкт керування — сепаратор СУ-200, при цьому не обмежуючи тип та параметри вхідних сигналів. Це створює сприятливі умови для проведення активного експерименту та ідентифікації динамічних характеристик об'єкта. Основними завданнями дослідження є:

- побудова динамічної характеристики об'єкта керування;
- отримання вихідних даних для побудови статичної характеристики;
- визначення відгуку системи на П-подібний (ступінчастий) керуючий вплив;
- отримання верифікаційних даних для перевірки адекватності побудованої математичної моделі.

У результаті реалізації експериментального плану було проведено комплексне дослідження об'єкта керування. Під час експерименту отримано: динамічну характеристику системи, вихідні дані для побудови статичної характеристики, відгук об'єкта на П-подібний керуючий вплив, а також верифікаційні дані для подальшого аналізу та моделювання [4,5,6].

2.2. Дослідження динамічної системи керування з врахуванням статичної характеристик

На рисунку 2.2 наведено результати усунення статичної складової для динамічної, статичної, П-подібної та верифікаційної характеристик об'єкта керування, що дозволяє оцінити точність моделювання та визначити

адекватність побудованої системи математичного опису технологічного процесу.

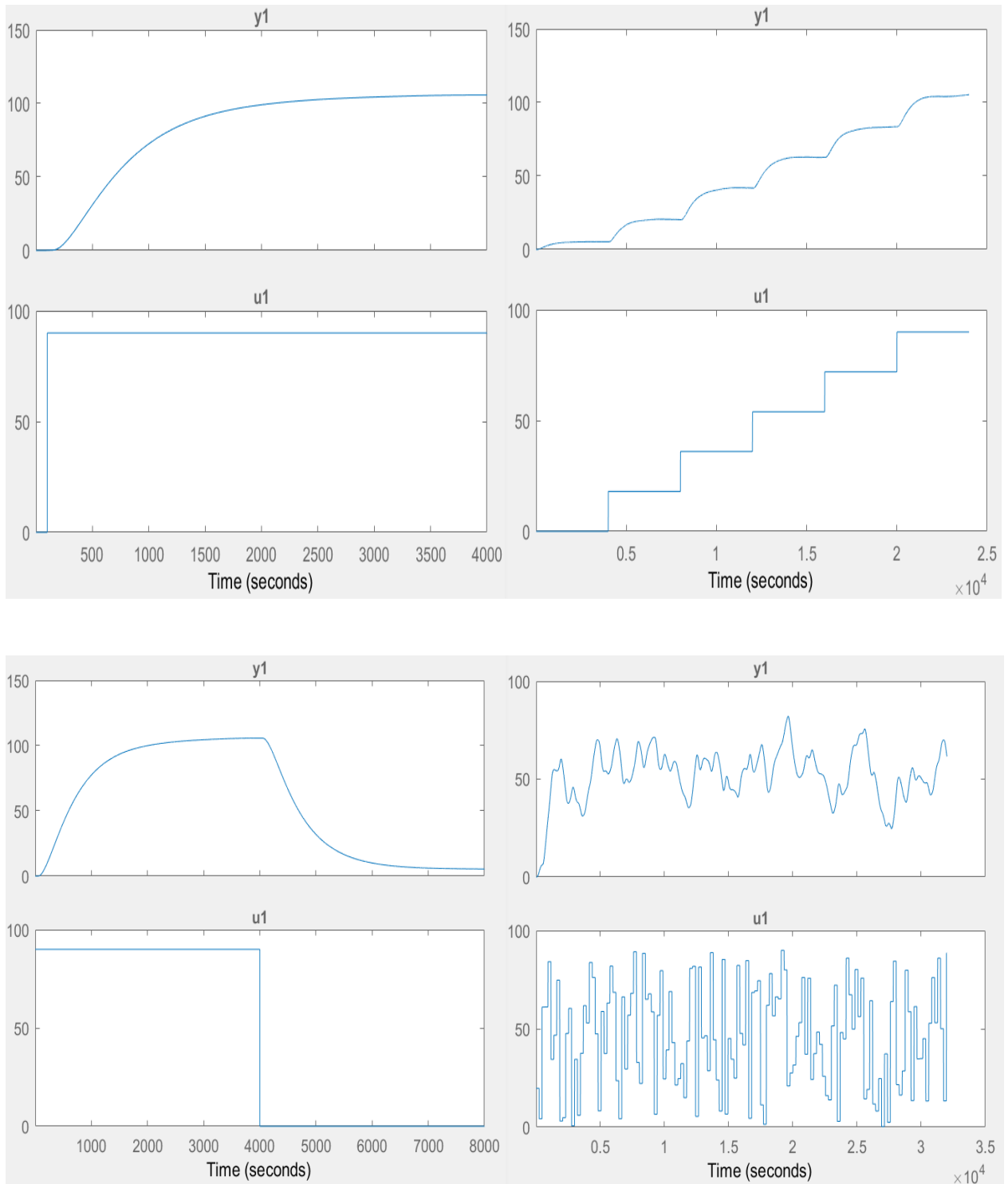


Рис. 2.2. Динамічна, статична, П-подібна та верифікаційна характеристики з усуненими статичними складовими

Згідно з отриманою статичною характеристикою та розрахованими коефіцієнтами посилення, об'єкт керування — сепаратор поділу і збагачення попутного нафтового газу типу СУ-200 — демонструє лінійну поведінку у всьому досліджуваному діапазоні керуючих впливів. Це дозволяє застосовувати для його опису лінійні моделі динаміки [7,8]. Лінійність підтверджується тим, що відхилення коефіцієнта посилення в межах робочого діапазону не перевищує допустиму технічну похибку 10%, що забезпечує високу точність моделювання та прогнозування поведінки системи.

Для подальшого аналізу була побудована характеристика об'єкта при П-подібному (ступінчастому) керуючому впливі (рис. 3). Як свідчать результати, збільшення потужності електропідігрівача з 0 кВт (0 %) до 90 кВт (100 %) призводить до підвищення температури нафти в сепараторі з 0 °С до 105 °С. Відповідно, зменшення потужності з 90 кВт (100 %) до 0 кВт (0 %) спричиняє симетричне зниження температури з 105 °С до 0 °С. Така поведінка свідчить про відсутність інтегруючих властивостей у системи, тобто об'єкт є самовирівнювальним, що суттєво спрощує побудову регуляторів та алгоритмів автоматичного керування.

Для оцінки симетричності та лінійності реакції об'єкта керування отриману П-подібну характеристику було розподілено на окремі ділянки, що дозволяє більш детально аналізувати локальні зміни температури відносно змін керуючого впливу. Такий підхід забезпечує високоточне визначення параметрів регуляторів і сприяє розробці ефективних алгоритмів автоматизованого керування технологічним процесом, оптимізуючи стабілізацію температурного режиму та економію енерговитрат.

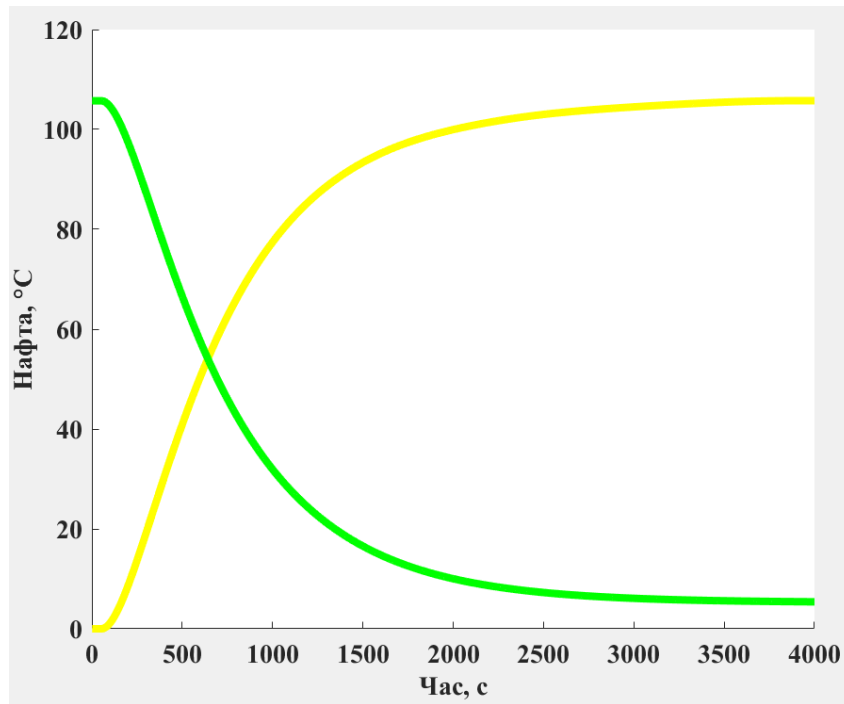


Рис. 2.3. Характеристики симетричності характеристики, отримані при П-подібному керуючому впливі

За результатами аналізу симетричності П-подібної характеристики встановлено, що середнє квадратичне відхилення не перевищує допустиму технічну похибку, яка становить 10 %. Це свідчить про те, що часи перехідного процесу для ділянок підйому та спаду керуючого впливу мають однакові значення середнього квадратичного відхилення, що підтверджує симетричність об'єкта керування. Отже, об'єкт може бути адекватно описаний єдиною лінійною моделлю, що спрощує процес математичного моделювання та проектування систем автоматичного регулювання.

За результатами структурної ідентифікації визначено, що об'єкт керування характеризується лінійністю та симетричністю, має два дійсних від'ємних домінуючих корені та включає ланку чистого запізнення. З огляду на ці властивості, об'єкт може бути представлений як аперіодична ланка другого порядку або більш високого порядку з запізненням. Такий підхід дозволяє з високою точністю відтворювати динаміку процесу та забезпечує основу для розробки ефективних алгоритмів автоматизованого керування, зокрема для

регулювання температури нафти у сепараторі СУ-200 та оптимізації режимів роботи підсистеми підігріву.

$$W(s) = \frac{k * e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1) * (T_2 s + 1)} \quad (2.1)$$

де $W(s)$ – передавальна функція моделі об'єкта керування;

k – коефіцієнт підсилення;

τ – оператор диференціювання;

T_1, T_2 – постійні часу, с.

τ – час запізнення, с;

Параметрична ідентифікація об'єкта керування була здійснена із застосуванням програмного забезпечення System Identification Toolbox, що входить до складу математичного пакета MATLAB та активується командою `ident`. Для проведення ідентифікації було імпортовано попередньо оброблені експериментальні дані, очищені від статичної складової та позначені як «Dynamic» (рис.2.4). Ці дані динамічної характеристики використовувалися для розрахунку параметрів математичної моделі об'єкта керування.

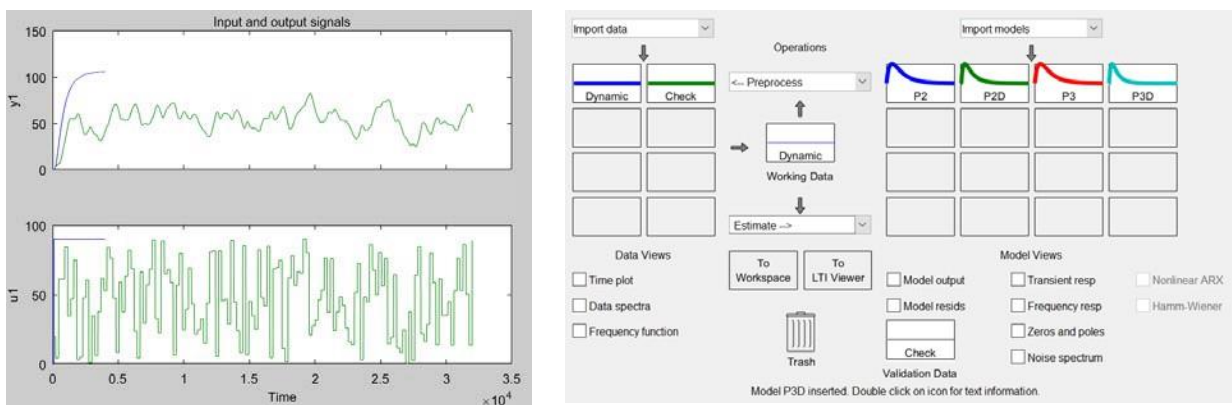


Рис 2.4. Конфігурація System Identification Toolbox

Перевірочні дані, позначені як «Check», застосовувалися для оцінки адекватності отриманої моделі та її відповідності реальному об'єкту керування, що дозволяє проводити верифікацію моделі на етапі розробки системи

автоматизованого управління. Для визначення параметрів моделі об'єкта використовувався метод «ProcessModels», який забезпечує апроксимацію динамічної поведінки об'єкта через передавальні функції або лінійні моделі відповідного порядку. Налаштування параметрів ідентифікації та результати попередньої апроксимації представлені на рис. 2.5, що демонструє коректне відтворення динамічних властивостей об'єкта керування та готовність моделі до подальшого використання у симуляційному та проєктувальному процесі.

За потреби, цей підхід дозволяє інтегрувати отриману модель у SCADA-системи та підсистеми автоматизованого керування, що забезпечує високоточне регулювання температури нафти у сепараторі СУ-200 та оптимізацію режимів роботи технологічного обладнання.

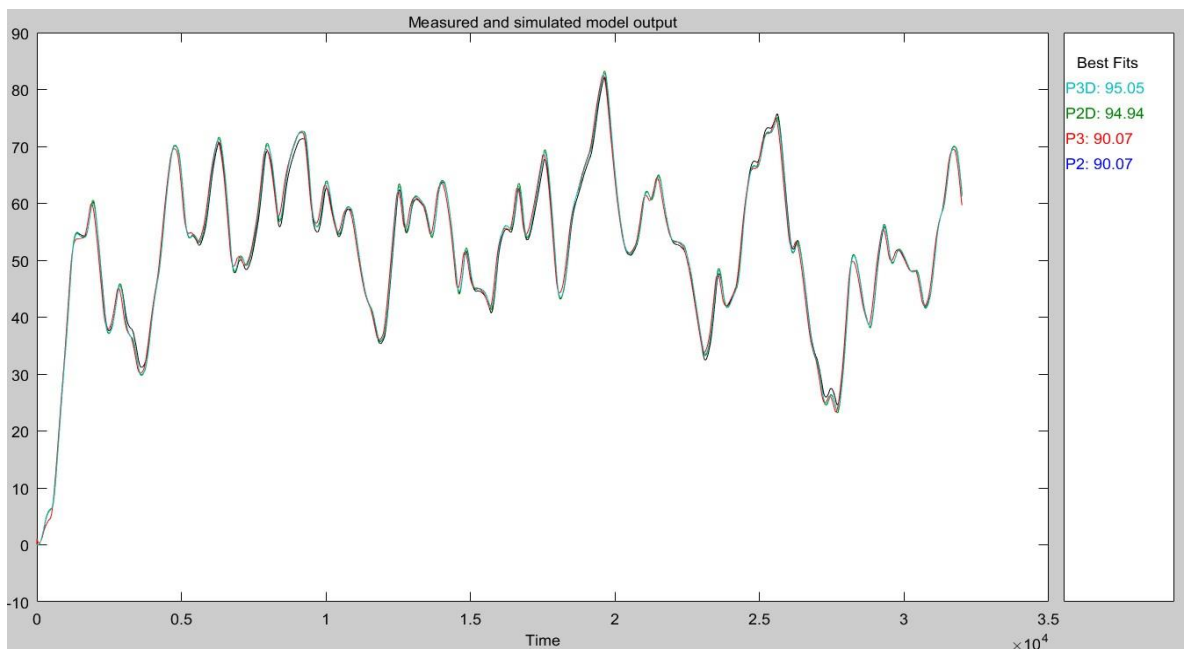


Рис 2.5. Оцінка результатів розрахунків

За результатами проведеної параметричної ідентифікації була побудована модель P2D (передавальна функція другого порядку з запізненням), яка у вигляді передавальної функції має вигляд:

$$W(s) = \frac{1,1737 * e^{-58,272}}{(598,2s+1)*(136,8s+1)} \quad (2.2)$$

Ця модель демонструє 94,94 % відповідності об'єкту керування на основі перевірочних даних, що свідчить про її високу адекватність для опису динаміки технологічного процесу сепаратора СУ-200.

Для порівняння було оцінено розбіжності між моделями різного порядку та з урахуванням запізнення:

- P2 — модель другого порядку без запізнення;
- P2D — модель другого порядку з запізненням;
- P3 — модель третього порядку без запізнення;
- P3D — модель третього порядку з запізненням.

Аналіз динамічної характеристики за нормалізованими середньоквадратичними похибками (НСКП) показав, що найкращими є моделі P2D (99,31 %) та P3D (99,29 %), які практично не відрізняються за точністю відтворення динаміки об'єкта. При цьому помилка остаточного передбачення (ПОП) для моделей P3D та P2D виявилася майже однаковою ($0,05348/0,05104 \approx 1$), що свідчить про рівнозначність їх прогнозних характеристик.

Основним критерієм остаточного вибору моделі є відповідність перевірочним даним за показником НСКП. Для моделей P2D (94,94 %) та P3D (95,05 %) значення цього показника майже однакові, що дозволяє віддати перевагу більш простій моделі.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу доцільно обрати модель P2D, оскільки вона забезпечує достатню відповідність перевірочним даним (вище граничного неприпустимого значення 80 %) та дозволяє спростити подальший процес моделювання й синтезу системи автоматизованого керування, зберігаючи високий рівень точності опису динаміки об'єкта.

2.3. Імітаційне моделювання процесу підготовки попутних газів

Для завершення дослідження необхідно визначити основні характеристики моделі об'єкта керування P2D (рис. 2.6) за допомогою інструменту «ToLTI Viewer» у середовищі MATLAB. З аналізу динамічної

характеристики об'єкта видно, що час перехідного процесу складає приблизно 800 с (розрахунок: $4000/5 = 800$ с), а затримка — близько 62 с. Для моделі другого порядку відповідні параметри визначаються як час установлення 735 с (сума постійних часу $598,2$ с + $136,8$ с) та затримка 58,272 с, що додатково підтверджує, що обрана модель P2D є аперіодичною ланкою другого порядку із запізненням, що найкраще описує динаміку об'єкта керування.

Для подальшої перевірки адекватності моделі використано передавальну функцію (2) у графічному середовищі Simulink пакета MATLAB. У процесі моделювання була розроблена відповідна імітаційна схема для отримання вихідних даних, необхідних для порівняння з експериментальними даними об'єкта (рис. 2.6). Параметри моделювання були задані таким чином, щоб тривалість експерименту відповідала 32 000 с, що дорівнює кількості перевіірочних точок даних.

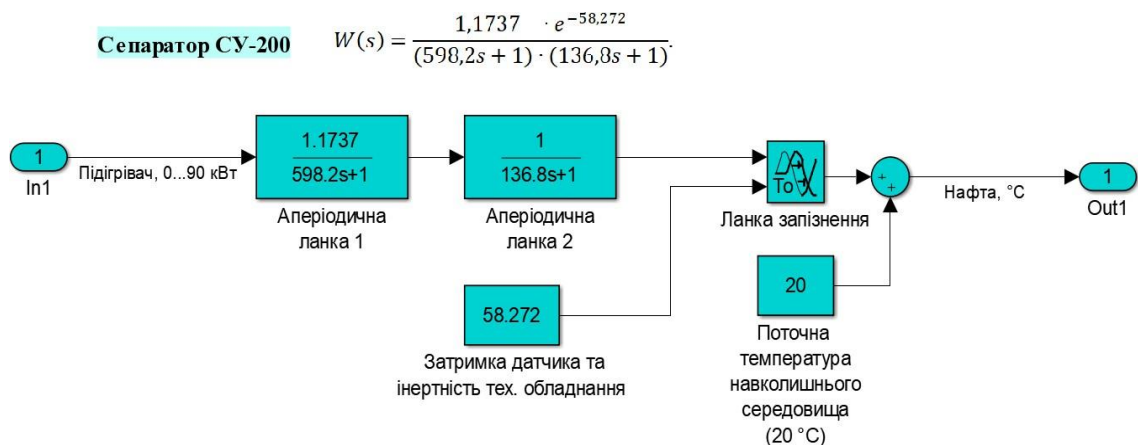


Рис.2.6. Модель об'єкта керування P2D (сепаратор)

Для забезпечення точності моделювання до схеми були додані блоки для запису вихідних даних: Object — дані експериментального об'єкта, Model — результати моделювання. Крок запису склав 1 с, що відповідає частоті отримання первинних даних.

На виході моделі передбачено застосування статичного коригуючого зсуву (значення 20 °C), який враховує температуру навколишнього середовища та коригує вихідну характеристику моделі відповідно до реальних

експериментальних даних. Це дозволяє підвищити точність порівняння між моделюваною та реальною динамікою об'єкта керування.

Таким чином, отримана модель P2D забезпечує адекватне відтворення динамічних та статичних характеристик об'єкта, що дозволяє використовувати її для подальшого синтезу системи автоматизованого керування та оптимізації режимів функціонування сепаратора СУ-200.

На рис. 2.7 наведено імітаційну модель отримання даних для перевірки адекватності моделі P2D. До виходу моделі додано статичний зсув характеристики на 20 °C (температура навколишнього середовища), що дозволяє коригувати вихідну характеристику відповідно до реальних експериментальних даних об'єкта керування. Така корекція є необхідною, оскільки під час параметричної ідентифікації в System Identification Toolbox ці дані були попередньо видалені для формування чистої динамічної складової.

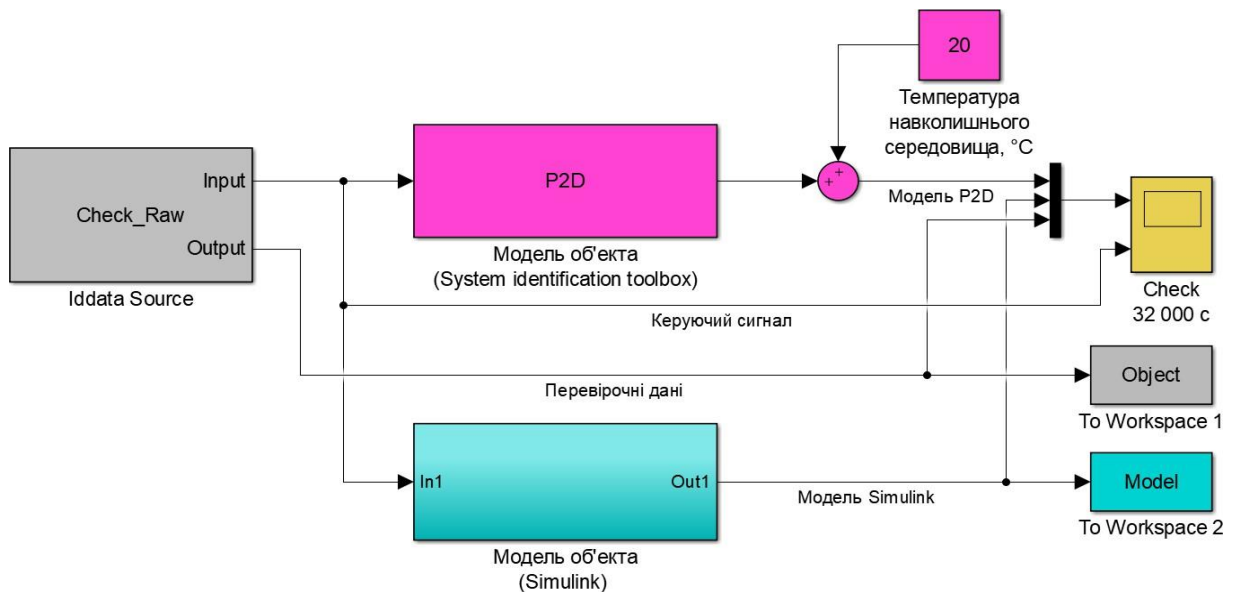


Рис. 2.7. Модель збору даних для оцінки адекватності

Порівняння моделі здійснюється з оригінальними перевірочними даними, на яких не виконувалися операції, що могли б спотворити їх достовірність. Критерії оцінки адекватності моделі передбачають:

- загальну відповідність результатів моделювання перевірочним даним не менше 80 %,
- коефіцієнт кореляції між моделлю та експериментальними даними $> 0,8$,
- довірчий інтервал не менше 0,9. У певних випадках ці критерії можуть коригуватися відповідно до специфіки об'єкта керування.

За допомогою скрипта `GetAdequacy.m` встановлено, що між перевірочними даними та результатами моделювання існує високий рівень кореляції, оскільки коефіцієнт кореляції перевищує 0,999, що повністю відповідає встановленим критеріям. Додатково, статистичний критерій Фішера перевищує критичне значення, що підтверджує адекватність моделі P2D до динаміки об'єкта керування.

На основі комплексного аналізу технологічного процесу, структури об'єкта керування, характеристик, отриманих під час експериментальних досліджень, а також результатів структурної та параметричної ідентифікації і перевірки на адекватність можна зробити висновок, що розроблена модель є адекватною та достовірною для опису процесу керування сепаратором СУ-200. Модель може бути використана для подальшого синтезу системи автоматизованого керування та оптимізації технологічних режимів функціонування об'єкта.

Остаточна модель об'єкта керування у середовищі Simulink зображена на рис. 2.8. Схему моделювання динамічної характеристики подано на рис. 2.6, а результати моделювання динамічної характеристики об'єкта керування наведено на рис. 2.9. Отримані результати демонструють високу відповідність моделі експериментальним даним та підтверджують її придатність для подальших досліджень.



Рис. 2.8. Модель сепаратора СУ-200

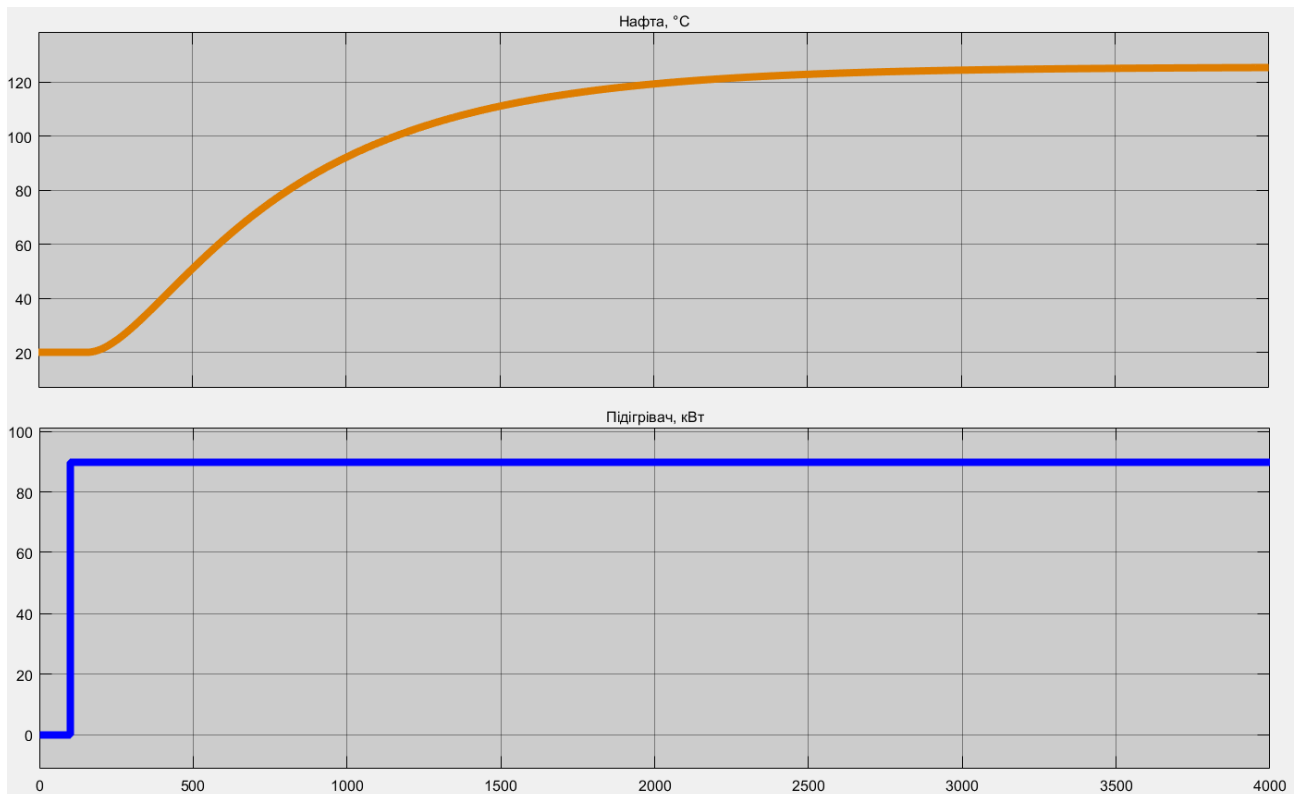


Рис. 2.9. Результати моделювання динамічної характеристики об'єкта керування сепаратора СУ-200

Висновки до розділу 2

У даному розділі здійснено синтез системи керування процесом підготовки попутних нафтових газів з урахуванням особливостей технологічної схеми, змінності компонентного складу сировини та динамічних характеристик основного обладнання. Визначено структуру системи керування, обґрунтовано вибір регульованих та керуючих параметрів, а також сформовано функціональні зв'язки між окремими підсистемами регулювання.

На основі розробленої математичної моделі об'єкта керування виконано аналіз його статичних і динамічних властивостей, що дозволило обрати раціональні закони регулювання для підтримання стабільних технологічних режимів. Синтезовано контури автоматичного регулювання тиску, температури, рівня та витрати з урахуванням вимог до якості перехідних процесів і забезпечення стійкості системи.

Запропоновано структурно-функціональну схему автоматизованої системи керування, яка передбачає інтеграцію локальних регуляторів із підсистемою диспетчерського контролю та збору даних, що забезпечує оперативний моніторинг параметрів і можливість адаптації до змін експлуатаційних умов.

Результати моделювання підтвердили працездатність і ефективність синтезованої системи керування, що проявляється у зменшенні відхилень технологічних параметрів, підвищенні енергоефективності та зниженні втрат цінних вуглеводневих компонентів.

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ АПАРАТНОЇ СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІДГОТОВКИ ПОПУТНИХ ГАЗІВ

3.1. Проектування структурної схеми підсистеми автоматизованого керування

У межах кваліфікаційної роботи в якості об'єкта керування обрано технологічне обладнання – сепаратор поділу та збагачення супутнього нафтового газу типу СУ-200. Цей сепаратор є ключовим елементом технологічного ланцюга підготовки попутних газів, забезпечуючи ефективне розділення газової та рідкої фаз нафтогазової суміші. Вибір саме цього типу обладнання обумовлений його широким застосуванням на сучасних газопереробних та нафтовидобувних підприємствах, стабільними технологічними характеристиками, високою продуктивністю та здатністю підтримувати оптимальні параметри процесу при різних режимах експлуатації.

Сепаратор СУ-200 дозволяє забезпечити контроль та регулювання основних технологічних параметрів – тиску, температури, рівня та витрати, що є критично важливим для ефективного використання вуглеводневої сировини, зниження втрат цінних компонентів і підвищення енергетичної ефективності всього газопідготовчого комплексу. Врахування цих характеристик об'єкта керування створює надійну основу для синтезу автоматизованої системи регулювання, що забезпечує стабільну роботу технологічного процесу та підвищує безпеку експлуатації.

Слід відзначити, що для забезпечення економічної та стабільної роботи сепаратора поділу і збагачення супутнього нафтового газу типу СУ-200 необхідно реалізувати можливість регулювання потужності всіх виконавчих пристроїв, що дозволяє підтримувати «лінійний» режим роботи насосів та підігрівача нафти. Такий підхід забезпечує оптимальну експлуатацію

обладнання при змінних технологічних умовах і сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу.

Управління роботою технологічного обладнання – сепаратора СУ-200 – здійснюється програмованим логічним контролером (ПЛК), який координує роботу всіх виконавчих пристроїв та обробляє інформацію від датчиків (рис. 2.1). Підсистема керування повинна підтримувати задані параметри технологічного процесу: температуру нафти в сепараторі в межах 35...65°C та тиск газу від 0,6 до 2,5 МПа.

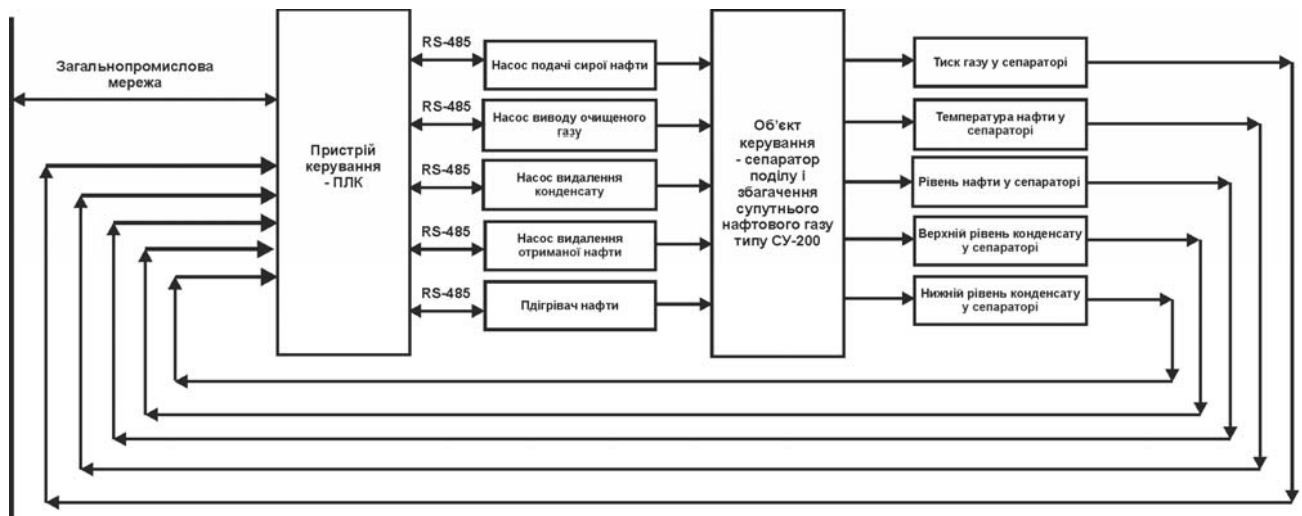


Рис. 3.1. Структурна схема підсистеми керування

Датчики тиску газу, температури та рівня нафти, а також верхнього і нижнього рівня конденсату в сепараторі забезпечують ПЛК необхідною інформацією для підтримки заданих технологічних параметрів. Це дозволяє організувати роботу обладнання відповідно до технологічних вимог і забезпечити економічно ефективну експлуатацію

Підсистема керування підтримує температуру нафти та тиск газу в межах технологічних нормативів, входячи до складу комплексного обладнання сепарації і збагачення супутнього нафтового газу. Роботою сепаратора керує автоматичний регулюючий пристрій, який формує вихідні сигнали для керування виконавчими пристроями з можливістю лінійного регулювання:

- насос подачі сирової нафти;
- насос видалення очищеного газу;
- насос видалення конденсату;
- насос видалення отриманої нафти;
- підігрівач нафти.

Завдяки цьому забезпечується синхронна та безпечна робота всіх елементів технологічного процесу, стабілізація основних параметрів та підвищення надійності і ефективності системи керування.

3.2. Створення структурної моделі обміну інформацією в системі

Підсистема керування технологічним обладнанням відповідає сучасним вимогам до автоматизованих систем управління промисловими процесами. Вона включає комплекс елементів: пристрої збору інформації (датчики температури, тиску), еталони контрольованих параметрів (температура та тиск), систему автоматичного моніторингу стану обладнання, програмне забезпечення керування, а також виконавчі пристрої (електродвигуни вентиляторів та електропідігрівач нафти).

Програмне забезпечення керування забезпечує формування керуючих впливів, необхідних для підтримки заданого тиску газу та температурного режиму нафти в технологічному апараті – сепараторі СУ-200. Система передбачає протиаварійний захист, а також блок переходу до ручного режиму керування у разі відмови автоматичних регуляторів, що підвищує надійність і безпеку експлуатації.

Для ефективної організації інформаційних потоків між усіма компонентами системи розроблено структурну схему, яка відображає взаємодію датчиків, контролерів, виконавчих пристроїв та програмного забезпечення. Ця схема забезпечує зрозуміле відображення каналів передачі даних, логіки керування та потоків інформації всередині підсистеми.

На рисунку 2.2 наведено структурну схему інформаційних потоків

підсистеми керування технологічним обладнанням.



Рис. 3.2. Структурна схема інформаційних потоків підсистеми керування технологічним обладнанням

Структурна схема дозволяє чітко визначити джерела даних, канали обробки та передачі інформації до виконавчих пристроїв, а також забезпечує підставу для подальшої розробки алгоритмів автоматичного регулювання та оптимізації роботи сепаратора СУ-200.

3.3. Підбір та технічний аналіз датчиків технологічних параметрів

Датчик тиску серії MBS 3000

Датчик тиску серії MBS 3000 (виробник – компанія *Vogel Deutschland / Gems Sensors & Controls*) належить до промислових вимірювальних перетворювачів тиску, що забезпечують точне і надійне вимірювання в широкому діапазоні робочих тисків. Ця серія датчиків призначена для використання в складних технологічних процесах, де необхідне безперервне контролювання тиску робочих середовищ, зокрема газів і рідин.



Рис. 3.4. Датчик температури Т.ХА-420-Кл1-1

Датчик Т.ХА-420-Кл1-1 призначений для безперервного контролю температури технологічних середовищ у реальному часі. Він забезпечує:

- високу точність та повторюваність показників;
- оперативну передачу даних до системи керування;
- можливість використання у контурах автоматичного регулювання температурного режиму;
- участь у захисних алгоритмах протиаварійних систем (обмеження перевищення допустимих значень температури).

Частотний перетворювач Altivar Process ATV930D22N4

Частотний перетворювач Altivar Process ATV930D22N4 — це високопродуктивний промисловий перетворювач частоти виробництва компанії Schneider Electric, призначений для керування асинхронними та синхронними двигунами змінного струму у складних технологічних процесах. Використовується для плавного регулювання швидкості обертання електродвигунів у насосних, вентиляційних, компресорних й інших приводах, де необхідне зниження енергоспоживання, підвищення динамічних показників і забезпечення точності керування.

Частотний перетворювач Altivar Process ATV930D22N4 забезпечує:

- плавний пуск двигуна з обмеженням пускового струму;
- регулювання швидкості в широкому діапазоні для оптимізації технологічних режимів;

- підвищення енергоефективності за рахунок адаптації приводу до поточних навантажень;
- реалізацію функцій логічного та адаптивного керування без необхідності зовнішнього контролера для певних застосувань;
- зворотній зв'язок з системою керування через цифрові та аналогові входи/виходи.



Рис 3.5. Частотний перетворювач Altivar Process ATV930D22N4

Програмований логічний контролер VIPA 214-2BS33

Програмований логічний контролер (ПЛК) VIPA 214-2BS33 — це модульний промисловий контролер серії VIPA S7-200, який забезпечує надійну автоматизацію технологічних процесів у системах керування. Контролер розроблений для роботи в комплексі з датчиками, виконавчими пристроями та промисловими мережами обміну даними і використовується для реалізації алгоритмів автоматичного регулювання, логічних взаємозв'язків, послідовностей та діагностики обладнання.



Рис. 3.6. Програмований логічний контролер (ПЛК) VIPA 214-2BS33

Контролер VIPA 214-2BS33 призначений для реалізації широкого спектра задач автоматизації і забезпечує:

- Виконання програм керування: підтримка логічних, послідовних, арифметичних та часових операцій у програмі користувача;
- Обробка сигналів вводу-виводу: робота з цифровими та аналоговими входами/виходами для обміну інформацією з датчиками тиску, температури, рівня та іншими перетворювачами;
- Висока швидкість обробки циклів: достатня продуктивність для забезпечення реального часу обробки сигналів у системах автоматичного регулювання;
- Комунікації: підтримка промислових протоколів обміну даними, що дозволяє інтегрувати контролер із системами диспетчеризації, SCADA та іншими контролерами;
- Захист і діагностика: вбудовані функції перевірки стану пристроїв, виявлення відмов та аварійних ситуацій, що сприяє підвищенню надійності роботи системи;
- Програмування: використання стандартних мов програмування за IEC 61131-3 (наприклад, LAD, STL, FBD або SCL) через програмне середовище VIPA Step7 або сумісні з S7-200 інструменти.

Модуль аналогового вводу VIPA 231-1BD40

Модуль аналогового вводу VIPA 231-1BD40 — це вузол розширення для програмованих логічних контролерів (ПЛК) серії VIPA S7-200, призначений для прийому та обробки аналогових сигналів від польових вимірювальних приладів. Він забезпечує перетворення фізичних величин, знятих з датчиків (наприклад, температури, тиску, рівня, витрати), у цифровий код, придатний для подальшого аналізу та обробки ПЛК.



Рис. 3.7. Модуль аналогового вводу VIPA 231-1BD40

Модуль аналогового вводу VIPA 231-1BD40 виступає важливою ланкою між польовими датчиками та центральним контролером:

- дані з модуля передаються до ПЛК через шину даних зі стандартною частотою циклу обробки,
- дозволяють програмно реалізовувати алгоритми регулювання, моніторингу та діагностики,
- забезпечують можливість впровадження захисних та протиаварійних механізмів на основі аналізу реальних значень технологічних параметрів.

Блок живлення Carlo Gavazzi SPD24301

Блок живлення Carlo Gavazzi SPD24301 — це стабільний та високонадійний електричний пристрій, призначений для перетворення змінної напруги мережі у стабільне постійне джерело живлення з номінальною напругою 24 В DC. Він застосовується в промислових автоматизованих системах для забезпечення живлення контролерів, датчиків, виконавчих пристроїв та модулів вводу-виводу.

Блок живлення Carlo Gavazzi SPD24301 забезпечує:

- Стабільне харчування: безперервне та стабільне живлення всіх елементів автоматизованої системи керування, включаючи ПЛК, датчики, виконавчі модулі та периферійне обладнання.

- **Захист електроніки:** завдяки вбудованим захисним механізмам виключається ризик пошкодження контролерів і модулів при короткочасних перенапруженнях та коливаннях мережі.
- **Енергоефективність:** пристрій має високий коефіцієнт корисної дії ($\approx 80\text{--}90\%$), що сприяє мінімізації втрат електроенергії та зниженню теплових навантажень у щиті керування.
- **Широка сумісність:** блок живлення сумісний з більшістю пристроїв автоматизації, що працюють на 24 В DC (ПЛК, датчики, реле, виконавчі механізми).



Рис. 3.8. Блок живлення Carlo Gavazzi SPD24301

3.4. Створення функціональної схеми системи керування технологічним процесом

Відповідно до сформульованих вимог до підсистеми керування технологічним обладнанням — сепаратором поділу та збагачення супутнього нафтового газу типу СУ-200 — розроблено функціональну схему автоматизації, наведену на рисунку 3.9. Зазначена схема відображає структурно-функціональні зв'язки між первинними вимірювальними перетворювачами, програмованим логічним контролером, виконавчими механізмами та системою верхнього рівня керування.

У якості центрального пристрою керування (UY11) застосовано програмований логічний контролер VIPA 214-2BS33, який забезпечує реалізацію алгоритмів автоматичного регулювання, логічного керування та

протиаварійного захисту. Контролер інтегровано до складу АСУ ТП та підключено до системи автоматизації вищого рівня (UY12), що виконує функції диспетчеризації, архівації даних та операторського моніторингу. Обмін даними між рівнями реалізовано через промисловий інтерфейс RS-485, що забезпечує надійну передачу інформації в умовах електромагнітних завод.

Для контролю тиску газу в сепараторі використано датчики серії MBS 3000, які формують уніфікований струмовий сигнал 4–20 мА. Зазначений тип сигналу забезпечує високу заводостійкість та можливість передавання вимірювальної інформації на значні відстані без суттєвих втрат точності.

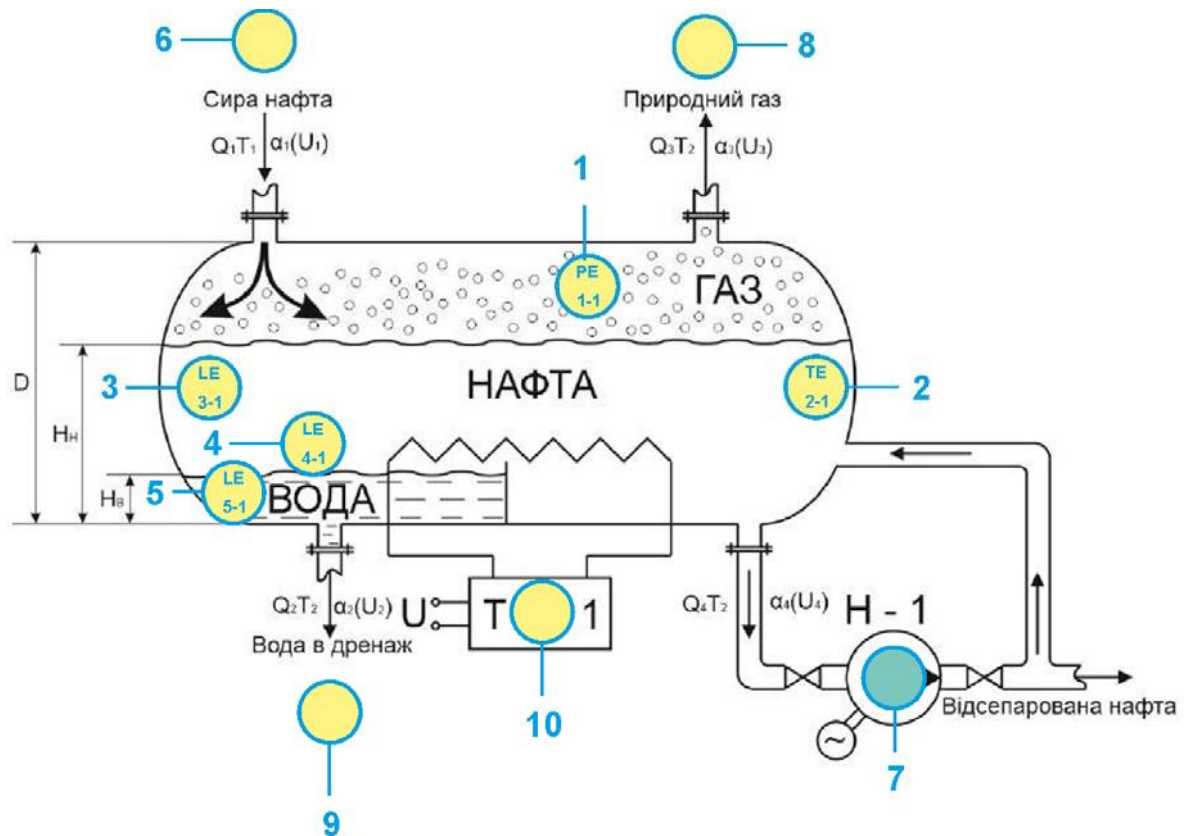


Рис. 3.9. Проектування функціональної схеми автоматизації технологічного процесу

Контроль температури нафти у сепараторі здійснюється за допомогою термометрорівнів типу Т.ХА-420-Кл1-1 з вихідним сигналом 4–20 мА, що дозволяє реалізувати замкнений контур автоматичного регулювання температурного режиму.

Вимірювання рівня нафти у робочому об'ємі сепаратора забезпечується рівнеміром FineTek EG-5000 з аналоговим виходом 4–20 мА.

Контроль граничних (верхнього та нижнього) рівнів конденсату реалізовано із застосуванням хвильовідбивних радарних рівнемірів VEGAFLEX 67, що характеризуються високою точністю та стабільністю показів у складних середовищах (змінна густина, наявність піни, коливання температури).

Первинні сигнали від датчиків надходять до входів ПЛК, де виконуються операції масштабування, фільтрації та програмної обробки. На основі отриманих значень контролер формує керуючі впливи для підтримання заданих параметрів технологічного процесу — тиску газу, температури та рівнів робочих середовищ у сепараторі СУ-200. Алгоритми керування передбачають реалізацію ПД-регулювання, міжконтурні блокування та функції аварійного відключення у разі виходу параметрів за допустимі межі.

Для регулювання продуктивності насосів подачі та відведення нафти застосовано трифазні частотні перетворювачі Altivar Process ATV930D22N4, які забезпечують плавний пуск, стабілізацію швидкості обертання електродвигунів і зниження енергоспоживання.

Висновки до розділу 3

У межах розділу виконано інженерне обґрунтування та практичну реалізацію апаратної структури автоматизованої системи керування процесом підготовки попутних газів. Визначено склад і конфігурацію технічних засобів, необхідних для забезпечення безперервного контролю та регулювання основних технологічних параметрів, з урахуванням вимог надійності, вибухобезпеки та безперервності виробничого циклу.

Обґрунтовано вибір первинних вимірювальних перетворювачів тиску, температури, рівня та витрати, виконавчих механізмів, програмованих логічних контролерів, а також засобів комунікації та передачі даних. Сформовано структурну схему взаємодії польового рівня з контролерним і диспетчерським

рівнями, що забезпечує інтеграцію обладнання в єдиний інформаційно-керуючий простір.

Розроблено принципові електричні схеми підключення засобів автоматизації, визначено вимоги до електроживлення, заземлення, резервування та захисту від зовнішніх впливів. Передбачено можливість масштабування та модернізації системи без порушення її функціональної цілісності.

Запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення точності вимірювань, оперативності обробки сигналів і стабільності підтримання заданих технологічних режимів. Реалізована апаратна структура відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації та створює основу для надійної, енергоефективної й безпечної експлуатації системи підготовки попутних газів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування технологічних установок підготовки попутних нафтових газів шляхом розроблення та обґрунтування сучасної автоматизованої системи керування. Актуальність теми зумовлена необхідністю раціонального використання вуглеводневих ресурсів, зниження втрат цінних компонентів, підвищення енергоефективності виробництва та забезпечення екологічної безпеки на об'єктах нафтогазової галузі.

У процесі виконання роботи здійснено комплексний аналіз сучасного стану технологій збору, транспортування та підготовки попутних нафтових газів. Встановлено, що нестабільність складу сировини, коливання тиску і температури, а також вплив зовнішніх факторів істотно ускладнюють підтримання оптимальних режимів роботи обладнання. Визначено, що традиційні підходи до керування не забезпечують достатнього рівня адаптивності та енергоефективності, що обґрунтовує необхідність удосконалення систем автоматизації.

На основі системного підходу сформульовано цілі та завдання дослідження, розроблено математичну модель об'єкта керування з урахуванням його статичних і динамічних характеристик. Проведено аналіз взаємозв'язків між основними технологічними параметрами процесу (тиском, температурою, рівнем, витратою), що дозволило визначити раціональні канали керування та структуру системи регулювання.

У результаті синтезу системи керування обґрунтовано вибір законів регулювання, розроблено контури автоматичного керування та структурно-функціональну схему автоматизованої системи. Запропоновано алгоритмічне забезпечення, яке дозволяє підтримувати стабільність технологічного процесу за умов змінних режимів роботи та забезпечує мінімізацію відхилень регульованих параметрів.

Виконано інженерну реалізацію апаратної структури системи керування,

визначено склад і конфігурацію технічних засобів автоматизації, обґрунтовано вибір вимірювальних перетворювачів, виконавчих механізмів і програмованих логічних контролерів. Забезпечено інтеграцію польового, контролерного та диспетчерського рівнів у єдину інформаційно-керуючу систему з можливістю подальшої модернізації та масштабування.

Поставлені у роботі завдання повністю виконані, а отримані результати мають наукову новизну та практичну цінність і можуть бути використані при проектуванні, модернізації та експлуатації систем підготовки попутних нафтових газів на підприємствах нафтогазової галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борин В.С., Андрусак О.Р. Використання інформаційних технологій для імітаційного моделювання контуру регулювання параметру технологічного апарату // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 13 жовтня 2022 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. – С. 203–204.
2. Бойко О.О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з проектування систем автоматизації для студентів напряму підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / О.О. Бойко. – Дніпро: Державний ВНЗ «НГУ», 2017. – 109 с. – Режим доступу: <https://goo.gl/Ev6J4Z>
3. Бойко О.О., Проценко С.М. Методичні вказівки до лабораторних робіт з програмування систем реального часу для студентів напрямків підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Комп'ютерна інженерія» / О.О. Бойко, С.М. Проценко. – Дніпро: Державний ВНЗ «НГУ», 2017. – 168 с. – Режим доступу: <https://goo.gl/rBf8Zm>
4. Бойко О.О. Методичні вказівки до лабораторних робіт з теорії автоматичного управління для студентів напряму підготовки «Комп'ютерна інженерія» / укл. О.О. Бойко. – Дніпро: Державний ВНЗ «НГУ», 2017. – 107 с. – Режим доступу: <https://goo.gl/nUMtFE>
5. Процеси та обладнання газо-роздільних установок (ПОГРУ) – Режим доступу: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:a431440315da9066760766d0c931a08acfc9ca64/latest/5702/index.html#p2
6. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій та газовій промисловості [Текст]: Частина II / М.І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 226 с.
7. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.
8. Поварчук Д.Д. Модель роботи трифазного сепаратора в умовах Луквинського нафтогазового родовища. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2021. – 52 с.
9. e-Protection (частотні перетворювачі Altivar 930) – Режим доступу: <https://e-protection.com.ua/product-category/elektrooborudovanie/preobrazovateli->

[chastoty/preobrazovateli-chastoty-schneider-electric/altivar-930-preobrazovatel-chastoty/](https://www.tequipment.net/Autonics/DPU34A-040N/Power-Quality-Analyzer/)

10. Autonics DPU Series – Digital Thyristor Power Controllers – Режим доступу: <https://www.tequipment.net/Autonics/DPU34A-040N/Power-Quality-Analyzer/>

11. Електронний ресурс: ДТСНН5 – термоспротивлення комутаційної апаратури – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p1363387438-dtshh5-termosoprotivleniya-kommutatsionnoj.html>

12. Борин В.С., Іванець Є.В. Автоматизація технологічного процесу підготовки природних і попутних нафтових газів // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів, 10 жовтня 2024 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. – С. 321–322. – Режим доступу: - https://drive.google.com/file/d/1XrD-obOLO_MBz3DuotBYS4S7fKqycmFS/view

13. Борин В.С., Фешанич Л.І., Скрип'юк Р.Б. Синтез та моделювання системи автоматичного керування процесом видобування газу // Věda a perspektivy: multidisciplinární mezinárodní vědecký magazín. – Česká republika, 2024. – № 5(36). – С. 367–378. – ISSN 2695-1584 (Print), ISSN 2695-1592. – DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-5\(36\)](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-5(36))

14. Борин В.С., Фешанич Л.І., Скрип'юк Р.Б. Моделювання та синтез процесу видобування газу з використанням другої похідної // Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». – 2024. – № 6(34). – С. 729–744. – DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34))

15. Boryn V.S., Feshanych L.I., Los V.O. Синтез системи керування з LQR-регулятором засобами MATLAB // Abstracts of I International Scientific and Practical Conference. – Bilbao, Spain, 2024. – P. 422–428. – URL: <https://eu-conf.com/ua/events/current-methods-of-improving-outdated-technologies-and-methods/>

16. Boryn V.S., Feshanych L.I., Maliborskyi I.V. Mathematical modeling of the gas pipeline as the element of the gas collection system in the extraction of natural gas // Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 48th International Scientific and Practical Conference. – Constanta, Romania, September 7, 2024. – P. 187–191. – DOI: <https://doi.org/10.52058/48>

17. Boryn V.S., Feshanych L.I., Maliborskyi I.V. Mathematical model of pipeline dynamics in natural gas extraction // Materials of the 49th International Scientific and Practical Conference. – Alicante, Spain, October 7, 2024. – P. 69–72. – DOI: <https://doi.org/10.52058/49>

18. Aidan O`Dwyer Handbook PI and PID Controller Tuning Rules.–2nd Edition.–Ireland: Imperial College Press. P.545.
19. Song, Yang (2018) Intelligent PID controller based on fuzzy logic control and neural network technology for indoor environment quality improvement. PhD thesis, University of Nottingham. Режим доступу: http://eprints.nottingham.ac.uk/14300/1/Yang_PhD_Thesis.pdf
20. Лагойда А.І., Шавранський М.В., Когутяк М.І., Борин В.С., Чигур І.І. «Магістерська робота»: Методичні вказівки. – Івано-Франківськ: Факел, 2024. С. 30.
21. Борин В.С., Козак Ю.В.. Автоматизація технологічного процесу низькотемпературної сепарації газу // XII The international scientific and practical conference “AREAS OF SCIENTIFIC THOUGHT -2016/2017”, Sheffield, 2016,-С.69-73.