

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПМ-22.00.00.000 ПЗ

Група АКПМ-24-1

Василь Максимів

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

Максимів Василь Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:662.75:504.5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Автоматизована система регулювання енергоспоживання на

(назва роботи)

нафтопереробному підприємстві з урахуванням викидів CO₂

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 -24-1

(шифр групи)

В.А. Максимів

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

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

М.В.Шавранський

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)

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 – 2025

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 30.10.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз енергоспоживання технологічних процесів на нафтопереробному підприємстві з урахуванням викидів CO ₂	30.10.2025 р.	Виконано
	Математична модель енергоспоживання підприємства з урахуванням впливу технологічних параметрів і коефіцієнтів емісії CO ₂	10.11.2025 р.	Виконано
	Синтез моделі та структури АСР	20.11.2025 р.	Виконано
	Реалізація автоматизованої системи регулювання енергоспоживання НПП на ПЛК	30.11.2025 р.	Виконано
	Загальні висновки	05.12.2025 р.	Виконано
	Оформлення МР	07.12.2025 р.	Виконано

Студент _____
(підпис)

Максимів В.А. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Шавранський М.В. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Максимів В.А. Автоматизована система регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві з урахуванням викидів CO₂

Магістерська робота на отримання ступеня магістра з автоматизації за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано - Франківськ, 2025 р.

У магістерській роботі розглянуто проблему підвищеного енергоспоживання та значних викидів CO₂ на нафтопереробних підприємствах. Проаналізовано структуру енергетичного балансу НПЗ, основні джерела утворення викидів та сучасні методи енергоменеджменту, енергоаудиту і автоматизованого регулювання. На основі проведених досліджень сформовано математичну модель енергоспоживання з урахуванням впливу технологічних параметрів і коефіцієнтів емісії CO₂. Розроблено структуру автоматизованої системи регулювання, що включає PID-регулятор та екологічний коректор, реалізовану у середовищі MATLAB/Simulink та адаптовану для ПЛК Schneider Electric Modicon M241.

Інтеграція АСР із SCADA забезпечує моніторинг, візуалізацію та архівацію параметрів енергоспоживання та викидів CO₂ у реальному часі. Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованої системи: час перехідного процесу скорочено удвічі, перерегулювання зменшено на 70–80 %, енергоспоживання — на 15–20 %, а пікові викиди CO₂ — на 30–40 %. Запропоноване рішення може бути використане як основа для промислового впровадження систем енергетичної оптимізації та екологічного моніторингу на підприємствах нафтопереробної галузі.

Ключові слова: енергоспоживання, CO₂, нафтопереробний завод, автоматизована система регулювання, енергоменеджмент, математична модель, Simulink, PID, SCADA.

ANNOTATION

Maksimiv V.A. Automated energy consumption control system at an oil refinery taking into account CO₂ emissions

Master's thesis for a master's degree in automation in the specialty 174 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano - Frankivsk, 2025

The master's thesis considers the problem of increased energy consumption and significant CO₂ emissions at oil refineries. The structure of the refinery's energy balance, the main sources of emissions and modern methods of energy management, energy audit and automated control are analyzed. Based on the research, a mathematical model of energy consumption was formed taking into account the influence of technological parameters and CO₂ emission coefficients. The structure of an automated control system was developed, including a PID controller and an environmental corrector, implemented in the MATLAB/Simulink environment and adapted for the Schneider Electric Modicon M241 PLC.

Integration of ACP with SCADA provides monitoring, visualization and archiving of energy consumption and CO₂ emission parameters in real time. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed system: the transition time is halved, overshoot is reduced by 70–80%, energy consumption by 15–20%, and peak CO₂ emissions by 30–40%. The proposed solution can be used as a basis for industrial implementation of energy optimization and environmental monitoring systems at oil refining enterprises.

Keywords: energy consumption, CO₂, oil refinery, automated control system, energy management, mathematical model, Simulink, PID, SCADA.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА НАФТОПЕРЕРОБНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ З УРАХУВАННЯМ ВИКИДІВ CO₂.....	14
1.1. Аналіз структури енергоспоживання нафтопереробних підприємств та основних джерел утворення викидів CO ₂	14
1.2. Дослідження існуючих методів енергоменеджменту, енергоаудиту та автоматизованого регулювання споживання енергії у технологічних системах.....	16
1.3. Ключові технологічні об'єкти (печі, насоси, компресори, теплообмінники), що впливають на загальний баланс енергії та викиди CO ₂	19
1.4. Основні технологічні параметри контролю та керування	21
1.5. Аналіз існуючих систем автоматизованого регулювання енергоспоживання на нафтопереробних підприємствах	24
Висновки до розділу 1.....	28
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І КОЕФІЦІЄНТІВ ЕМІСІЇ CO₂.....	30
2.1. Повноцінна, практична та гнучка математична модель енергоспоживання підприємства	30
2.2 Лінійна модель енергоспоживання підприємства у вигляді передавальних функцій.....	33
Висновки до розділу 2.....	44

РОЗДІЛ 3**СИНТЕЗ МОДЕЛІ ТА СТРУКТУРИ АСР.....46**

3.1. Синтез АСР енергоспоживання на НПП з урахуванням викидів CO ₂ в SIMULINK.....	46
3.2. Аналіз результатів моделювання	49
3.3. Синтез нелінійної моделі АСР енергоспоживання НПП.....	52
3.4. Аналіз роботи розробленої автоматизованої системи регулювання.....	57
Висновки до розділу 3.....	60

РОЗДІЛ 4**РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НПП НА ПЛК.....62**

4.1. Вибір апаратного забезпечення (ПЛК, датчики, виконавчі механізми).....	62
4.2. Розробка програмної архітектури АСР.....	66
4.3. Реалізація ПД-регулятора з екологічною корекцією.....	70
4.4. Інтеграція з SCADA та системою енергоменеджменту.....	71
4.5. Результати стендових випробувань АСР.....	73
Висновки до розділу 4.....	74

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....76**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....78****ДОДАТКИ.....80**

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

АСР – автоматизована система регулювання

АФХ – амплітудно-фазова характеристика

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ІПХ – імпульсна перехідна характеристика

ММ – математичне моделювання

НПП – нафтопереробне підприємство

ПЛК – програмований логічний контролер

ПХ – перехідна характеристика

ФЧХ – фазо - частотна характеристика

НПЗ – нафтопереробний завод

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні нафтопереробні підприємства є одними з найбільших промислових споживачів енергії та джерелами значних обсягів викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю (CO₂). Зростання вартості енергоносіїв, посилення екологічних норм та міжнародні зобов'язання щодо зниження вуглецевого сліду вимагають впровадження інноваційних підходів до управління енергоспоживанням. У таких умовах автоматизація процесів енергоменеджменту стає ключовим чинником підвищення енергоефективності та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

Використання автоматизованих систем регулювання дає змогу забезпечити раціональний розподіл енергоресурсів, зменшити технологічні втрати, забезпечити точний моніторинг та оперативне реагування на відхилення параметрів. Додатково, інтеграція контролю викидів CO₂ у контур управління дозволяє адаптувати виробничі процеси до вимог Європейського зеленого курсу, системи торгівлі квотами на викиди (ETS) та корпоративних стратегій декарбонізації.

Таким чином, проблема розроблення та впровадження автоматизованої системи регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві є вкрай актуальною, оскільки поєднує технічну, економічну та екологічну складові. Вирішення цього завдання сприяє переходу нафтопереробної галузі до більш стійкої, ресурсоефективної та екологічно відповідальної моделі функціонування.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми зумовлений комплексом технічних, економічних та екологічних факторів, що визначають сучасні тенденції розвитку нафтопереробної галузі. Нафтопереробні підприємства характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, що зумовлює значні витрати енергоресурсів і формує один із найбільших сегментів промислових викидів CO₂. Традиційні підходи до енергозбереження вже не забезпечують необхідного рівня ефективності, тому виникає потреба у впровадженні інтелектуальних систем керування, здатних автоматично оптимізувати енергоспоживання.

Вибір теми також зумовлений актуальністю інтеграції екологічних вимог у систему управління виробництвом. У контексті дії міжнародних угод (Парижська кліматична угода, Європейський зелений курс), національних програм декарбонізації та запровадження механізмів вуглецевого регулювання (СВАМ, EU ETS), підприємства нафтопереробної галузі змушені впроваджувати технології зниження викидів CO₂, де автоматизація відіграє ключову роль.

Крім того, дослідження спрямоване на вирішення прикладних задач — від підвищення енергоефективності технологічних установок до створення адаптивних систем керування з використанням сучасних програмно-апаратних засобів, що забезпечує практичну значущість і можливість подальшої реалізації результатів у промислових умовах.

Отже, вибір теми є обґрунтованим з огляду на її відповідність глобальним тенденціям енергетичної трансформації, вимогам сучасних екологічних стандартів і потребам промисловості в ефективних та інтелектуальних системах автоматизованого керування.

Мета і завдання дослідження.

Мета дослідження – розробити та обґрунтувати автоматизовану систему регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві з інтегрованим контролем і мінімізацією викидів CO₂, що забезпечує підвищення енергоефективності виробничих процесів, зменшення екологічного навантаження та оптимізацію витрат ресурсів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати структуру енергоспоживання та джерела викидів CO₂ на нафтопереробному підприємстві, а також існуючі методи їх контролю та регулювання.
2. Розробити концептуальну та математичну модель автоматизованої системи регулювання енергоспоживання з урахуванням екологічних обмежень.
3. Сформулювати алгоритми керування та оптимізації, спрямовані на зменшення енерговитрат і скорочення викидів CO₂.

4. Реалізувати модель системи у середовищі MATLAB/Simulink або на платформі ПЛК з подальшим моделюванням її роботи.
5. Оцінити ефективність запропонованої системи за критеріями енергоефективності, стабільності регулювання та екологічного впливу та розробити рекомендації щодо впровадження.

Формулювання мети та завдань забезпечує логічну структуру дослідження та орієнтує його на отримання як наукових, так і практичних результатів, придатних до впровадження у виробництво.

Об'єктом дослідження є процес енергоспоживання технологічних установок нафтопереробного підприємства в умовах впровадження автоматизованого регулювання з урахуванням викидів CO₂.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми автоматизованого регулювання енергоспоживання промислових об'єктів нафтопереробного підприємства з інтегрованим контролем та мінімізацією викидів CO₂.

Методи дослідження. У роботі застосовуються методи системного аналізу для дослідження структури енергоспоживання та виявлення ключових факторів впливу на викиди CO₂. Математичне моделювання та методи теорії автоматичного керування використовуються для побудови динамічних моделей та синтезу алгоритмів регулювання. Для оптимізації енергоспоживання застосовано методи лінійного та нелінійного програмування, а також елементи прогнозного та адаптивного управління. Комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та/або SCADA/PLC використовується для тестування функціонування системи та аналізу її ефективності. Експериментальні та розрахунково-аналітичні методи використовуються для оцінки енергоефективності, економічних показників та екологічного ефекту впровадження системи.

Новизна отриманих результатів. У даному дослідженні вперше запропоновано комплексний підхід до регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві з інтегрованим у контур керування показником викидів CO₂. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі

енергетичної системи підприємства, яка враховує не лише технологічні параметри, а й екологічні критерії, що дозволяє реалізувати багатокритеріальне управління. Вперше синтезовано алгоритм автоматизованого регулювання, який поєднує методи оптимізації та адаптивного управління для мінімізації енерговитрат при забезпеченні нормативного рівня викидів. Розроблено структуру автоматизованої системи, яка може бути реалізована на платформі ПЛК або SCADA з можливістю інтеграції в існуючу інфраструктуру енергоменеджменту підприємства. Отримано нові результати імітаційного моделювання, що підтверджують ефективність запропонованих рішень порівняно з традиційними методами регулювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Обраний напрям дослідження відповідає науковим пріоритетам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та включений до її тематичного плану. Магістерська робота узгоджується з основним науковим напрямом кафедри, що охоплює розроблення сучасних засобів автоматизації та цифровізації технологічних процесів у нафтогазовій промисловості. Тематика дослідження базується на результатах виконання державної бюджетної науково-дослідної роботи, що підтверджує її наукову новизну, актуальність і прикладну цінність для галузі.

Практичні значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані для розроблення та впровадження автоматизованих систем регулювання енергоспоживання на нафтопереробних підприємствах, що дозволить суттєво знизити витрати енергоресурсів та операційні витрати. Запропонована модель та алгоритми управління можуть бути інтегровані у програмно-апаратні комплекси на базі ПЛК, SCADA чи систем енергоменеджменту, що забезпечує їхню практичну реалізацію без необхідності повної модернізації технологічних процесів. Використання системи дозволяє зменшити викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин, що сприяє дотриманню екологічних стандартів і вимог міжнародних програм декарбонізації. Розроблене програмне забезпечення і моделі можуть використовуватися для навчання

персоналу, проведення енергетичних аудитів і тестування режимів роботи в безпечному віртуальному середовищі. Отримані результати створюють науково обґрунтоване підґрунтя для подальшої розробки інтелектуальних систем енергоменеджменту на промислових підприємствах різних галузей.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Обсяг основної частини роботи становить 79 сторінок, у тому числі 10 таблиць і 15 рисунків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА НАФТОПЕРЕРОБНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ З УРАХУВАННЯМ ВИКИДІВ CO₂

1.1. Аналіз структури енергоспоживання нафтопереробних підприємств та основних джерел утворення викидів CO₂

Нафтопереробні заводи (НПЗ) належать до найбільш енергоємних промислових об'єктів, оскільки процеси переробки нафти потребують значних витрат теплової та електричної енергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), нафтопереробні підприємства споживають у середньому від 4 до 7 % усієї енергії, що використовується у секторі переробної промисловості [1]. Основними причинами високої енергоємності є необхідність нагрівання сировини до температур 350 – 450 °C на стадії первинної перегонки, підтримання тиску в реакційних колонах, компримування потоків та перекачування великої кількості продуктів по трубопроводах.

Сумарна структура енергоспоживання НПЗ зазвичай характеризується переважанням теплової енергії, яка становить 50 – 70 % від загальних витрат, тоді як електрична енергія займає 20 – 30 % [2]. Внутрішнім ресурсом є паливний газ, що утворюється як побічний продукт під час переробки і використовується як основне паливо для технологічних печей [3].

Основні складові енергетичного балансу НПЗ:

- Теплова енергія (печі, котли-утилізатори): використовується для підігріву нафти перед атмосферно-вакуумною перегонкою та в реакційних процесах (гідроочищення, риформінг тощо). Джерелом тепла переважно є спалювання природного газу або паливного газу [3].
- Електроенергія: застосовується для електроприводів насосів, компресорів, систем автоматизації та допоміжного обладнання [4].

- Пар та гаряча вода: забезпечують нагрівання потоків у теплообмінниках, використовуються для відпарювання та теплообміну між технологічними вузлами [5].

Джерела утворення викидів CO₂ на НПЗ.

Більшість викидів CO₂ утворюється під час спалювання палива в процесі отримання теплової енергії. Згідно з даними Європейської федерації нафтопереробної промисловості (CONCAWE), до 60 % прямих викидів CO₂ припадає на технологічні печі, і ще близько 30 % — на парові котли та когенераційні установки [6]. Дані з джерел утворення викидів CO₂ зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Джерела утворення викидів CO₂ на НПЗ

Джерело викидів CO ₂	Частка у структурі викидів	Характеристика
Технологічні печі	50–60 %	Спалювання паливного/природного газу для нагрівання сировини
Парові котли (ТЕЦ НПЗ)	25–30 %	Генерація пари та електроенергії для внутрішніх потреб заводу
Факельні установки	до 10 %	Спалювання надлишкового газу під час аварійних або пускових режимів
Електричне обладнання	Непрямі викиди	Викиди зовнішніх електростанцій (якщо електроенергія не генерується на НПЗ)

Викиди CO₂ корелюють із питомою витратою енергії. Для оцінки енергоефективності застосовується індекс ЕІ (Energy Intensity Index), рекомендований міжнародною організацією Solomon Associates [7]. Чим менше значення ЕІ, тим кращою є енергоефективність підприємства.

На рис. 1.1 показано структуру енергоспоживання НПЗ. На цій діаграмі показано орієнтовний розподіл енергоспоживання за основними категоріями:

теплова енергія – 60 %; електроенергія – 25 %; інші ресурси (пар, паливний газ) – 15 %.

Ці значення взяті з типових статистичних даних НПЗ (IEA, CONCAWE, Solomon Associates) і підходять для використання в роботі як орієнтовна структура енергобалансу.

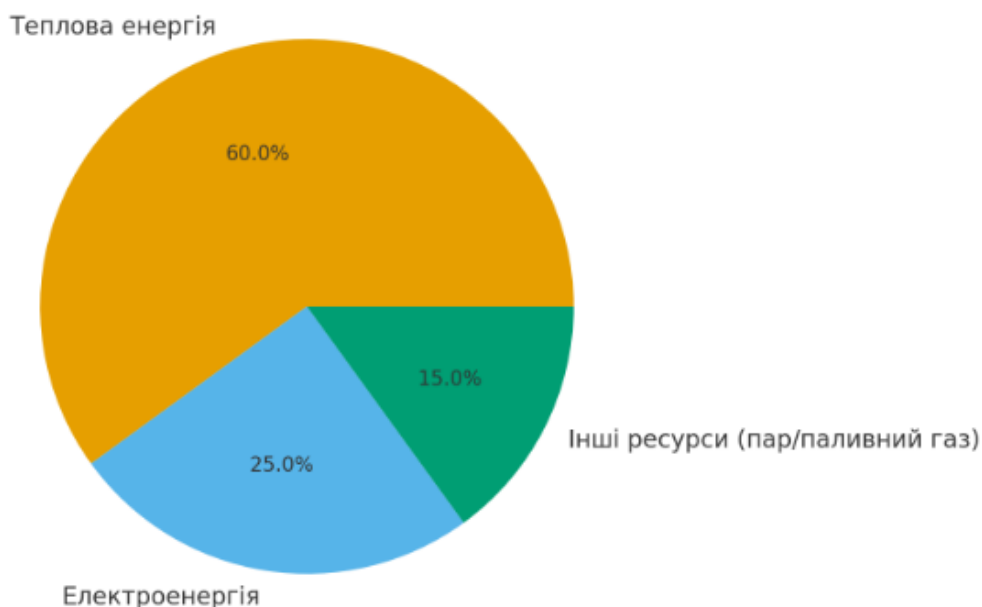


Рис.1.1. Структура енергоспоживання НПЗ

Таким чином, нафтопереробні підприємства є високоефективними споживачами теплової енергії, що визначає їх значний вплив на енергетичний баланс промисловості та рівень викидів CO₂. Основними джерелами викидів є технологічні печі та парові котли, де відбувається спалювання паливного газу та природного газу. Оптимізація енергоспоживання, впровадження рекуперації тепла та автоматизованих систем керування технологічними режимами є ключовими напрямками зменшення викидів CO₂. Зниження питомої енерговитрати дає подвійний ефект — економічний (зменшення витрат палива) та екологічний (зменшення викидів парникових газів).

1.2. Дослідження існуючих методів енергоменеджменту, енергоаудиту та автоматизованого регулювання споживання енергії у технологічних системах

Раціональне управління енергоресурсами на промислових підприємствах, зокрема на нафтопереробних заводах, є ключовою складовою підвищення енергоефективності та зниження викидів CO₂. Світова практика доводить, що системний підхід до енергоменеджменту дозволяє скоротити енергоспоживання на 15–25 % без суттєвих капітальних інвестицій [8].

1.2.1. Системи енергоменеджменту

Система енергоменеджменту – це комплекс заходів, організаційних процедур та технічних засобів, спрямованих на оптимізацію використання енергоресурсів підприємства. Базовим міжнародним стандартом є ISO 50001:2018 «Energy Management Systems» [9], що передбачає цикл PDCA (Plan – Do – Check – Act).

Основні елементи енергоменеджменту:

- формування енергетичної політики;
- аналіз енергоспоживання підприємства та визначення energy baseline;
- моніторинг ключових енергоємних технологічних процесів;
- впровадження системи показників енергоефективності (EnPI).

Для НПЗ найпоширенішим є індекс енергоємності ЕІІ (Energy Intensity Index), запропонований компанією Solomon Associates, який дозволяє оцінювати енергоефективність заводу відносно світових показників [10].

1.2.2. Енергоаудит технологічних процесів

Енергоаудит – це комплексна діагностика енергетичних потоків, яка дозволяє визначити втрати та сформулювати заходи щодо їх скорочення. В Україні порядок проведення енергоаудиту визначений ДСТУ ISO 50002:2022 [11].

Типова послідовність енергоаудиту:

- 1) Збір вихідних даних: характеристики обладнання, теплові баланси, витрати енергоресурсів.
- 2) Інструментальні вимірювання: температури, витрати, тиски, споживання електроенергії.
- 3) Ідентифікація втрат енергії: на теплообмінниках, трубопроводах, печах, стисненому повітрі.
- 4) Формування енергетичної моделі процесу: Simulink/Matlab, Aspen HYSYS тощо.
- 5) Розроблення заходів оптимізації: термоізоляція, рекуперація тепла, заміна обладнання.

Згідно з даними ENEF Energy Group, до 35 % теплових втрат на НПЗ пов'язані з неправильним використанням печей та низьким ККД теплообмінників [12].

1.2.3. Автоматизоване регулювання та оптимізація енергоспоживання

Автоматизовані системи управління (SCADA + PLC + APC/MPC) дають можливість не лише підтримувати технологічні параметри в межах нормативів, але й оптимізувати енергоспоживання в режимі реального часу.

Основні методи автоматизованого регулювання наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Методи та сутність автоматизованого регулювання

Метод	Сутність	Переваги застосування на НПЗ
PID-регулювання	Підтримання параметра на заданому рівні (температура, тиск).	Стабілізація процесу, зменшення коливань температури печей.
APC (Advanced Process Control)	Оптимізація процесів на рівні технологічних установок.	Зменшення витрати палива на печах до 8–12 %.

Продовження таблиці 1.2

Метод	Сутність	Переваги застосування на НПЗ
MPC (Model Predictive Control)	Управління на основі математичної моделі процесу з прогнозуванням.	Максимальна економія енергоресурсів, зменшення викидів CO ₂ до 15 %.
Energy Management Control (EMC)	Автоматизоване керування енерговузлами (котельні, компресори).	Координація роботи обладнання, уникнення пікових навантажень.

Сучасні НПЗ інтегрують системи APC/MPC із енергоменеджментом, що дозволяє проводити оптимізацію в реальному часі через зв'язок з фактичним споживанням енергії [13].

Таким чином, енергоменеджмент згідно ISO 50001 забезпечує системний підхід до управління енергоресурсами підприємства. Енергоаудит дозволяє виявити втрати енергії та сформувавши техніко-економічно обґрунтовані заходи щодо їх скорочення. Інтеграція APC/MPC-регулювання з SCADA та енергоменеджментом є ключовою умовою оптимізації енергоспоживання та зниження викидів CO₂. Застосування сучасних систем автоматизації дає змогу зменшити загальне енергоспоживання НПЗ на 10 – 25 %, а викиди парникових газів – на 8 – 15 %.

1.3. Ключові технологічні об'єкти (печі, насоси, компресори, теплообмінники), що впливають на загальний баланс енергії та викиди CO₂

Ефективність енергоспоживання нафтопереробного підприємства визначається технологічним обладнанням, яке формує основні статті витрат енергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) понад 70 % споживання енергії на НПЗ припадає на печі, компресорне обладнання та системи

підігріву сировини [18]. Відповідно, ці ж об'єкти є джерелом найбільших викидів CO₂.

1.3.1. Технологічні печі

Технологічні печі забезпечують нагрівання нафти та напівпродуктів у процесах атмосферної та вакуумної перегонки, гідроочищення та крекінгу. Частка печей у паливно-енергетичному балансі НПЗ становить від **45 до 60 %** від загального споживання енергії [19]. Основним паливом є паливний або природний газ, спалювання якого призводить до утворення **CO₂ та NO_x**.

Енергоємність печей залежить від теплоізоляції, коефіцієнта надлишку повітря та ефективності утилізації теплоти димових газів [20]. Використання економайзерів та регуляторів співвідношення «паливо–повітря» дає змогу знизити витрати до **10–15 %** [21].

1.3.2. Насосне обладнання

Насоси використовуються для транспортування нафти та продуктів через технологічні блоки. За оцінками DOE, насоси споживають до 30 % електроенергії промислових підприємств, у тому числі 15–20 % на НПЗ [22].

Основні напрямки підвищення енергоефективності насосів:

- застосування частотних перетворювачів (VFD) для регулювання продуктивності;
- оптимізація гідравлічних характеристик;
- усунення втрат тиску в трубопровідній мережі.

Використання частотного регулювання дозволяє економити до 25 % електроенергії [23].

1.3.3. Компресори та повітродувки

Компресори використовуються у процесах гідроочищення, риформінгу, виробництва водню. За даними АВВ (Asea Brown Boveri), енерговитрати на роботу компресорів можуть становити до 50 % споживання електроенергії в установках гідроочищення [24]. Надмірне стиснення газу підвищує енергоспоживання і непрямі викиди CO₂, пов'язані з виробництвом електроенергії.

Оптимізація роботи компресорів досягається шляхом:

- впровадження регуляторів MPC (Model Predictive Control);
- використання змінного частотного приводу;
- автоматичного регулювання тиску в мережі.

1.3.4. Теплообмінники та рекуперація теплоти

Теплообмінники відіграють ключову роль у зменшенні споживання енергії, оскільки дозволяють утилізувати теплоту продуктів для попереднього підігріву сировини. За дослідженнями CONCAWE та Solomon Associates оптимізація мережі теплообмінників може знизити витрати теплоти на 10–25 % [25].

На сучасних НПЗ застосовують:

- рекупераційні теплообмінники;
- мережі теплообмінників (Heat Exchanger Network, HEN);
- Pinch-аналіз для оптимізації теплових потоків.

Використання Pinch-аналізу дозволяє зменшити потребу в паливі в печах, що прямо скорочує викиди CO₂.

Таким чином, основні джерела споживання енергії на НПЗ — технологічні печі, насоси, компресори та теплообмінні системи. Печі є найбільшим джерелом прямих викидів CO₂ (до 60 %). Компресори й насоси формують основну частину непрямих викидів, пов'язаних зі споживанням електроенергії. Рекуперація теплоти через теплообмінники має найбільший потенціал зниження енергоспоживання на підприємстві.

1.4. Основні технологічні параметри контролю та керування

Автоматизована система регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві (АСЕР) забезпечує контроль та оптимізацію процесів споживання енергії, водночас мінімізуючи викиди CO₂. Для ефективного функціонування системи необхідно визначити ключові технологічні параметри, які підлягають моніторингу та керуванню:

1.4.1. Температурні параметри

- Температура у печах та реакторах – забезпечує оптимальні умови для хімічних реакцій та теплообміну; контроль дозволяє зменшити перевитрати палива.
- Температура теплоносіїв у теплообмінниках – важлива для ефективної рекуперації тепла.

1.4.2. Тискові параметри

- Тиск у трубопроводах і реакторах – впливає на стабільність технологічного процесу та безпеку обладнання.
- Вакуум у дистиляційних колонках – впливає на температуру кипіння та продуктивність фракційної перегонки.

1.4.3. Витратні параметри

- Об'ємна витрата пари, води та газу – оптимізація дозволяє зменшити енергетичні витрати та CO₂-викиди.
- Витрата продуктів у технологічних лініях – контроль дозволяє уникнути втрат сировини та енергії.

1.4.4. Хімічні параметри

- Концентрація CO₂ у вихідних газах – визначає ефективність заходів зі зниження викидів.
- Склад сировини та проміжних продуктів – впливає на енерговитрати та екологічні показники.

1.4.5. Енергетичні параметри

- Споживана електроенергія насосами, компресорами та іншими агрегатами – дозволяє оптимізувати режим роботи електродвигунів.
- Паливна ефективність котлів та печей – важливий показник для зниження витрат та викидів CO₂.

1.4.6. Критичні контрольні показники

- Критичні точки оптимізації: температура на вході/виході теплообмінників, тиск у ключових лініях, рівень CO₂ у вихідних газах.
- Сигнали аварійного відключення обладнання – забезпечують безпеку та запобігають аварійним викидам.

1.4.7. Автоматичні регулюючі дії

- Регулювання подачі палива та повітря у печі – для підтримки заданої температури.
- Управління насосами та компресорами – для оптимізації витрат електроенергії.
- Робота клапанів та заслонок – підтримка необхідного тиску та витрат потоків.

Всі вище описані основні технологічні параметри контролю та керування зведені в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3

Основні технологічні параметри контролю та керування

№	Параметр	Об'єкт контролю	Тип датчика / засобу вимірювання	Одиниця виміру	Функція регулювання / контролю
1	Температура печі / реактора	Печі, реактори	Термоперетворювач опору (Pt100), термопари	°C	Підтримання оптимальної температури для хімічних реакцій, зменшення витрат палива
2	Температура теплоносія	Теплообмінники	Термоперетворювач і Pt100	°C	Оптимізація рекуперації тепла, контроль ефективності теплообміну
3	Тиск у трубопроводах	Лінії транспортування продуктів	Манометр, датчик тиску (ОВЕН ПД100-ДИ)	Па / бар	Підтримка стабільного технологічного процесу, безпека обладнання
4	Вакуум у колонках	Дистиляційні колонки	Вакуумметр	Па	Регулювання температури кипіння, підвищення продуктивності
5	Витрата пари, води, газу	Трубопроводи, споживачі енергії	Витратоміри ультразвукові (Siemens SITRANS FUS1010)	м ³ /год	Оптимізація витрат енергії та зниження CO ₂ -викидів
6	Витрата продуктів	Лінії переробки	Витратоміри	м ³ /год	Контроль технологічного балансу, зменшення втрат сировини

Продовження таблиці 1.3

№	Параметр	Об'єкт контролю	Тип датчика / засобу вимірювання	Одиниця виміру	Функція регулювання / контролю
7	Концентрація CO ₂	Вихідні гази	Газоаналізатор	ppm / %	Контроль екологічних показників, забезпечення нормативів викидів
8	Склад сировини та проміжних продуктів	Реактори, колонки	Хімічні аналізатори	% концентрації	Регулювання процесу для економії енергії та підвищення якості продукції
9	Споживана електроенергія	Насоси, компресори, електродвигуни	Енергоміри	кВт·год	Оптимізація роботи обладнання та зменшення витрат електроенергії
10	Паливна ефективність котлів / печей	Котли, печі	Лічильники палива, датчики температури	кг/год, %	Оптимізація подачі палива, зменшення CO ₂ -викидів
11	Критичні сигнали аварій	Всі ключові технологічні об'єкти	Датчики тиску, температури, рівня	–	Аварійне відключення, запобігання аварійним викидам та пошкодженням обладнання
12	Управління клапанами / заслонками	Трубопроводи, теплообмінники	Електроприводи, ПЛК	–	Підтримка заданого тиску та витрат потоків

1.5. Аналіз існуючих систем автоматизованого регулювання енергоспоживання на нафтопереробних підприємствах

Сучасні нафтопереробні підприємства поступово переходять до комплексної цифровізації виробничих процесів, що включає створення автоматизованих систем керування енергоспоживанням (Energy Management Systems, EnMS) на базі технологій SCADA, DCS та APC (Advanced Process Control). Такі системи забезпечують моніторинг, оптимізацію та прогнозування витрат енергії в реальному часі з урахуванням викидів CO₂ і економічних показників.

1.5.1. SCADA- та DCS-рішення для моніторингу енергоспоживання

Базовим рівнем автоматизації є системи типу SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які забезпечують збір, відображення та архівування даних про технологічні параметри. У складі SCADA-систем реалізуються такі функції:

- збір даних із датчиків витрат палива, температури, тиску, витрат електроенергії;
- візуалізація енергетичних потоків і графіків навантаження;
- сигналізація перевищення граничних параметрів енергоспоживання;
- формування добових і місячних звітів про викиди CO₂.

На нафтопереробних підприємствах України найбільш поширеними є системи OVEN SCADA, TRACE MODE, MasterSCADA та Siemens WinCC, які інтегруються з програмованими логічними контролерами (PLC Siemens S7, Schneider M241, OVEN ПЛК110). Вони забезпечують базову автоматизацію енергоспоживання на окремих ділянках — печах, компресорних станціях, насосних установках тощо.

Системи класу DCS (Distributed Control System), наприклад Honeywell Experion PKS, Emerson DeltaV, Yokogawa Centum VP, дозволяють створювати розподілені архітектури керування з централізованим моніторингом енергоресурсів. DCS інтегрує функції контролю технологічних параметрів і

управління енергоспоживанням у межах усього заводу, включаючи облік палива, пару, електроенергії та води.

1.5.2. Інтелектуальні системи оптимального керування (APC, MPC)

На другому рівні автоматизації енергоспоживання знаходяться інтелектуальні системи оптимального регулювання — APC (Advanced Process Control). Їхнє завдання — підвищення енергоефективності за рахунок використання математичних моделей процесів і алгоритмів прогнозного керування.

Одним із найефективніших сучасних методів є MPC-регулювання (Model Predictive Control), що використовує математичну модель для прогнозування зміни технологічних параметрів і вибору оптимальної дії на виконавчі механізми. У контексті нафтопереробки MPC-регулятори дозволяють:

- підтримувати мінімально необхідну витрату палива при стабільній температурі в печах;
- адаптувати режими горіння до коливань тиску або складу палива;
- мінімізувати викиди CO₂ за рахунок динамічного керування співвідношенням «паливо–повітря».

Відомими прикладами впровадження таких систем є рішення AspenTech DMCplus, Honeywell Profit Controller, Emerson PredictPro, що застосовуються на європейських НПЗ (TotalEnergies, Shell, OMV).

1.5.3. Комплексні системи енергоменеджменту та моніторингу CO₂

На сучасному етапі розвитку енергетичного менеджменту набувають поширення інтегровані платформи EnMS, що поєднують енергетичні, технологічні та екологічні показники у єдиному інформаційному просторі.

Такі системи забезпечують:

- облік і аналіз енергоресурсів відповідно до стандарту ISO 50001:2018;

- автоматичний розрахунок питомих викидів CO₂ на одиницю продукції;
- формування енергетичних балансів і KPI ефективності;
- підтримку рішень із енергозбереження на основі даних реального часу.

На європейських нафтопереробних підприємствах для цього використовуються рішення Siemens Energy Manager Pro, ABB Ability™ Energy Management, Schneider EcoStruxure Energy Hub, які дозволяють здійснювати прогнозування викидів CO₂ на основі машинного навчання та коригувати режими споживання енергії.

В Україні системи подібного класу впроваджуються на Кременчуцькому НПЗ та у структурі «Укргазвидобування» в межах цифрових проектів «Smart Refinery» і «Green Energy Transition».

У таблиці 1.4 наведено порівняльну характеристику основних класів систем автоматизації енергоспоживання: SCADA, DCS, APC/MPC та EnMS. Системи SCADA забезпечують моніторинг, архівацію та сигналізацію з локальним рівнем автоматизації і періодичним контролем CO₂. DCS здійснюють розподілене керування технологічними параметрами на високому рівні автоматизації з інтеграцією газоаналізаторів. APC/MPC та EnMS орієнтовані на оптимізацію енергоспоживання та екологічний моніторинг, забезпечуючи динамічну мінімізацію викидів CO₂ і безперервне прогнозування.

Аналіз існуючих систем показує, що сучасний напрям розвитку автоматизованого керування енергоспоживанням на НПЗ полягає у переході від локальних SCADA-систем до інтегрованих платформ EnMS із підтримкою аналітики викидів CO₂. Поєднання DCS, APC та EnMS забезпечує створення інтелектуальної системи енергоконтролю, здатної не лише зменшити витрати енергії, але й забезпечити дотримання екологічних нормативів за рахунок адаптивного керування процесами згоряння та рекуперації тепла.

Таблиця 1.4.

Порівняльна характеристика систем автоматизації енергоспоживання

Клас системи	Приклади рішень	Основні функції	Рівень автоматизації	Можливості контролю CO ₂
SCADA	MasterSCADA, Siemens WinCC, OBEH SCADA	Моніторинг, архівація, сигналізація	Локальний	Розрахунковий, періодичний контроль
DCS	Emerson DeltaV, Honeywell Experion PKS	Розподілене керування, регулювання технологічних параметрів	Високий	Інтеграція з газоаналізаторами
APC / MPC	Aspen DMCplus, Honeywell Profit Controller	Прогнозне керування, оптимізація енергоспоживання	Дуже високий	Динамічна мінімізація викидів CO ₂
EnMS	Schneider EcoStruxure, Siemens Energy Manager	Облік енергії, еко- моніторинг, аналітика	Комплексний	Безперервний моніторинг, прогнозування

Таким чином, найбільший потенціал для мінімізації викидів CO₂ мають APC/MPC-системи у поєднанні з EnMS, тоді як SCADA та DCS виконують роль технологічних платформ для збору даних і базового регулювання.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі проведено комплексний аналіз енергоспоживання технологічних процесів нафтопереробного підприємства та визначено основні джерела утворення викидів CO₂. Встановлено, що нафтопереробні заводи належать до найбільш енергоємних галузей промисловості, оскільки значна частка споживаної енергії витрачається на нагрівання сировини, компримування потоків і підтримання температурно-технологічних режимів. Основними споживачами енергії є технологічні печі, парові котли, компресори, насоси та теплообмінники.

Проаналізовано структуру енергетичного балансу нафтопереробних підприємств, згідно з якою теплова енергія становить близько 60 %, електроенергія – 25 %, а решта припадає на пар, гарячу воду та паливний газ. Показано, що до 90 % усіх прямих викидів CO₂ утворюється внаслідок спалювання природного або паливного газу в технологічних печах і парових котлах. Решта викидів є непрямими і пов'язані з виробництвом електроенергії для технологічних потреб.

Розглянуто сучасні методи енергоменеджменту й енергоаудиту, засновані на стандартах ISO 50001 та ISO 50002. Показано, що впровадження систем енергоменеджменту забезпечує зниження енергоспоживання на 10–25 %, а енергоаудит дозволяє виявити до 30 % потенційних втрат енергії у технологічних процесах. Зазначено, що інтеграція автоматизованих систем керування (SCADA, APC, MPC) з енергоменеджментом дає змогу оптимізувати роботу енерговузлів у режимі реального часу та скоротити викиди CO₂ на 8–15 %.

Визначено ключові технологічні об'єкти, які формують основний енергетичний баланс підприємства: печі, компресори, насоси та теплообмінники. Встановлено, що печі є основним джерелом прямих викидів, тоді як компресори й насоси зумовлюють непрямі викиди, пов'язані з виробництвом електроенергії. Теплообмінні системи мають найбільший потенціал для рекуперації тепла та зменшення енергоспоживання.

Також визначено основні технологічні параметри, які підлягають контролю та автоматизованому керуванню: температура, тиск, витрата пари й палива, склад сировини, концентрація CO₂ у вихідних газах, електроспоживання агрегатів. Їх моніторинг і регулювання забезпечують підтримання оптимальних енергетичних режимів і сприяють зниженню питомих викидів парникових газів.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що підвищення енергоефективності нафтопереробного підприємства можливе лише за умови комплексного підходу – поєднання енергоаудиту, впровадження систем енергоменеджменту відповідно до міжнародних стандартів і використання сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І КОЕФІЦІЄНТІВ ЕМІСІЇ CO₂.

2.1. Повноцінна, практична та гнучка математична модель енергоспоживання підприємства

Насамперед розглянемо кілька рівнів моделі (статична, динамічна), формули, матричний запис, приклад обчислення та рекомендації з калібрування й оптимізації.

2.1.1. Позначення основних змінних й одиниць

i – індекс енергоспоживаючого агрегату / процесу (машина, піч, насос тощо), $i=1..N$.

k – індекс енергоресурсу (електроенергія, газ, дизель, тепло тощо), $k = 1..K$.

t – часовий індекс (година, доба, місяць).

$A_i(t)$ – рівень технологічної активності процесу i у часі t (наприклад, подача, виробнича потужність, продуктивність) – одиниці специфічні для процесу.

$P_{i,k}^{\text{пот}}$ – номінальна питома потужність (споживання ресурсу k при номінальній активності) для процесу i (наприклад, кВт/од.активності або кВт при номінальній подачі).

$\eta_{i,k}$ – ефективність/коефіцієнт використання енергії для процесу i і ресурсу k ($0 < \eta < 1$).

$LF_i(t)$ – фактор навантаження (відношення фактичної потужності до номінальної) – безрозмірний.

h – тривалість кроку часу (години).

EF_k – коефіцієнт емісій CO₂ для ресурсу k (наприклад, кг CO₂ на кВт·год або кг CO₂/ГДж).

$E_{i,k}(t)$ – енергоспоживання процесу (i) ресурсом (k) у проміжку (t) (кВт·год або ГДж).

C_k – ціна ресурсу k (грн/кВт·год або грн/ ГДж).

2.1.2. Статична (сумарна) модель за період (T)

Енергоспоживання процесу i ресурсом k за період T (або за одиницю часу) можна записати:

$$E_{i,k} = \sum_{t \in T} P_{i,k}^{\text{пот}} \cdot A_i(t) \cdot LF_i(t) \cdot \frac{h}{\eta_{i,k}}$$

(якщо $P_{i,k}^{\text{пот}}$ заданий у кВт на одиницю активності; якщо задано в кВт при номінальній активності – прибрати множник $A_i(t)$).

Загальне енергоспоживання (усі процеси, всі ресурси):

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K E_{i,k}$$

CO₂-викиди за період:

$$CO_2 = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N E_{i,k} \right) \cdot EF_k$$

(одиниці EF повинні бути сумісні з одиницями E)

Вартість енергії:

$$Cost = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N E_{i,k} \right) \cdot C_k$$

2.1.3. Годинна / тимчасова модель (тимчасово-дискретна)

Для кожної години (t):

$$E_{i,k} = \sum_{t \in T} P_{i,k}^{\text{пот}} \cdot A_i(t) \cdot LF_i(t) \cdot \frac{h}{\eta_{i,k}}$$

i

$$E_k(t) = \sum_{i=1}^N E_{i,k}(t)$$

$$CO_2(t) = \sum_{k=1}^K E_k(t) \cdot EF_k$$

Це дозволяє будувати часові ряди споживання і викидів: добові/сезонні піки, аналіз погодозалежності тощо.

2.1.4. Матричний запис (зручний для калібрування)

Позначимо вектор активностей в час t :

$$a(t) = [A_1(t), \dots, A_N(t)]^T.$$

Матриця питомих споживань ресурсів P_k розмірності $N \times 1$ для кожного k :

$\frac{P_{i,k}^{пот}}{\eta_{i,k}}$. Тоді:

$$E_k(t) = P_k \circ lf(t) \circ a(t) \cdot h$$

де \circ – поелементне множення; сума по i дає $E_k(t)$. У скороченому вигляді:

$$E_k(t) = 1^T (D_{P_k} a(t)) h$$

де D_{P_k} – діагональна матриця питомих витрат для ресурсу k .

2.1.5. Динамічний (становий) підхід – коли важлива інерція

Якщо процеси мають інерцію (температура печі, накопичувачі), додаємо стан $x(t)$:

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), w(t))$$

$$E_{i,k}(t) = g_i(x(t), u(t))$$

де $u(t)$ – керуючі дії (регулювання потужності), $w(t)$ – зовнішні впливи (температура, сировина). Це необхідно для моделювання реакції на керування або для оптимального керування (MPC).

2.1.6. Включення коефіцієнтів емісій CO₂

Коефіцієнти EF_k беруться за джерелами (національні/міжнародні таблиці) – одиниці кг CO₂ / кВт·год або кгCO₂ / ГДж. Якщо є декілька джерел енергії для одного процесу, розділяйте споживання за видами палива.

Повний вираз сумарних викидів:

$$CO_2(t) = \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^K E_k(t) \cdot EF_k = \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^N E_{i,k}(t) \right) EF_k$$

2.2. Лінійна модель енергоспоживання підприємства у вигляді передавальних функцій

Розглянемо лінійну модель енергоспоживання підприємства у вигляді передавальних функцій. Спочатку наведемо: базову структурну схему, універсальні формули для основних підсистем (печі, котли, насоси, компресори, теплообмінники), матричний (багатовхідно-багатовихідний) вигляд, перехід у кумулятивну величину (загальна енергія) та формулу для викидів CO₂. Потім – приклади типових форм (включно з часовими затримками), вказівки з ідентифікації параметрів і короткі поради для застосування в регулюванні / оптимізації.

2.2.1. Позначення (вхід/вихід)

$u_j(t)$ – керуючий вплив (set-point або регульований витратний сигнал) j -го елемента (паливо, подача палива у піч, частота насосного приводу тощо). У s -домені $U_j(s)$.

Пояснення: s -домен (або частотна область, Laplace domain) – це математичний простір, у якому описують динамічні системи за допомогою перетворення Лапласа.

$d_m(t)$ – зовнішні збурення / технологічні навантаження (продуктивність, температури навколишнього середовища, зміна складових сировини). У s -домені $D_m(s)$.

$y_i(t)$ – вихідна величина i (миттєве енергоспоживання агрегату i у кВт, або інший показник). У s -домені $Y_i(s)$.

$E_{\text{tot}}(t)$ – накопичене енергоспоживання (кВт·год), в s -домені це $Y_{\text{cum}}(s) = (1/s) Y_{\text{power}}(s)$.

$\text{CO}_2(t)$ – моментні викиди CO_2 (наприклад, кг/год), у s -домені $\text{CO}_2(s)$.

2.2.2. Загальна МІМО у s -домені

Запишемо матрично:

$$Y(s) = G_u(s) U(s) + G_d(s) D(s)$$

де,

$Y(s) = [Y_1(s), \dots, Y_N(s)]^T$ – вектор миттєвих потужностей (кВт) для N агрегатів;

$U(s) = [U_1(s), \dots, U_p(s)]^T$ – керуючі сигнали (p входів);

$D(s) = [D_1(s), \dots, D_q(s)]^T$ – збурення (q входів);

$G_u(s)$ – матриця передавальних функцій розмірності $N \times p$;

$G_d(s)$ – матриця $N \times q$.

Кумулятивна (енергія за час) величина:

$$Y_{\text{cum}}(s) = (1/s) I^T Y(s) = (1/s) I^T (G_u(s) U(s) + G_d(s) D(s))$$

(де I – вектор одиниць для сумування по агрегатах).

Викиди CO_2 (лінійна апроксимація):

$$\text{CO}_2(s) = EF^T Y(s)$$

тобто кожний агрегат i має емісійний коефіцієнт EF_i (кг CO_2 /кВт·год або кг CO_2 /кВт), а якщо потрібна кумулятивна маса – ділимо/множимо через $(1/s)$.

2.3. Типові структурні передавальні функції (по агрегатам)

Нижче наведені – універсальні, фізично-обґрунтовані форми (лінійні апроксимації), котрі зазвичай достатні для контролю і МРС.

2.3.1. Піч / топкова система (теплова інерція + регулювання подачі палива)

Вхід: $u_f(t)$ – подача палива (кг/с або м³/год), вихід: $y_f(t)$ – миттєва теплова потужність / витрата палива (кВт).

Часто достатньо першого порядку з запізненням:

$$G_f(s) = \frac{Y_f(s)}{U_f(s)} = \frac{K_f}{\tau_f s + 1} e^{-T_{d,f}s}$$

де

K_f – статичний коефіцієнт (кВт на одиницю подачі палива),

τ_f – часовий постійний (с – теплова інерція),

$T_{d,f}$ – часова затримка (транспортна, вимірювальна).

Якщо необхідна краща апроксимація температурної динаміки печі – застосуємо другий порядок:

$$G_f(s) = \frac{K_f}{(\tau_{f1} s + 1)(\tau_{f2} s + 1)} e^{-T_{d,f}s}$$

2.3.2. Паровий котел / ТЕЦ (динаміка парогенерації)

Аналогічно печі:

$$G_{boiler}(s) = \frac{K_b}{\tau_b s + 1} e^{-T_{d,b}s}$$

де Y_b – теплова/парова потужність, U_b – подача палива/паливний клапан.

2.3.3. Насоси (електрична споживана потужність від частоти приводу)

Типова залежність потужності насоса від частоти f : ($P \propto f^3$). Для малого відхилення лінеаризуємо в околі робочої точки – отримуємо передавальну функцію з близькою до статичної поведінкою та невеликою електромеханічною інерцією:

$$G_{pump}(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

де U_p – керування (відсоток частоти), Y_p – споживана потужність (кВт).

Для точності можна лінеаризувати кубічну залежність:

$$K_p = \left. \frac{dP}{df} \right|_{f_0}$$

2.3.4. Компресори

Компресори мають динаміку складну (статор/ротор), але для енергоменеджменту зазвичай:

$$G_{comp}(s) = \frac{K_c}{\tau_c s + 1} e^{-T_{d,c}s}$$

2.3.5. Теплообмінники (рекуперація)

Теплообмінник як статичний перетворювач між потоками:

$$G_{hex}(s) = \frac{K_{hex}}{\tau_{hex} s + 1}$$

де U – різниця температур/витрата, Y – передана теплова потужність.

2.3.6. Матричний приклад (простий завод з 3 агрегатів)

Нехай y_1 – піч, y_2 – котел, y_3 – насос; входи u_1 (паливо в піч), u_2 (паливо в котел), u_3 (командна частота насоса).

Модель:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} e^{-T_{d1}s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} e^{-T_{d2}s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_3}{\tau_3 s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{1d}(s) \\ G_{2d}(s) \\ G_{3d}(s) \end{bmatrix} D(s)$$

Це дозволяє сумувати потужності й отримувати загальну миттєву потужність $P_{\text{tot}}(s) = 1^T Y(s)$ та енергію $E_{\text{tot}}(s) = (1/s)P_{\text{tot}}(s)$.

2.3.7. Викиди CO₂ як функція потужності

Якщо EF_i – коефіцієнт емісії (кг CO₂ на кВт·год) для i -го агрегата, то миттєва швидкість викидів:

$$CO_2(s) = \sum_{i=1}^N EF_i Y_i(s)$$

(одиниці: кг/год або кг/с за відповідною нормалізацією)

Кумулятивна маса CO₂: $M_{CO_2}(s) = (1/s) \cdot CO_2(s)$.

2.3.8. Дискретний вигляд (для цифрового контролера – z-домен)

Z-домен (або Z-область) – це математичний простір, у якому описують дискретні сигнали (тобто ті, що вимірюються чи обчислюються через певний інтервал часу T_s).

Перехід з часової області у z-домен виконується за допомогою Z-перетворення:

$$X(z) = \sum_{k=0}^{\infty} x[k] z^{-k}$$

де

$x[k]$ – дискретне значення сигналу в момент часу $t = kT_s$;

z – комплексна змінна, подібна до s у безперервному випадку.

Таким чином після дискретизації з періодом T_s кожен $G(s)$ можна перетворити у $G(z)$ (наприклад, методом ZOH – Zero-Order Hold, українською утримувач нульового порядку або пристрій нульового порядку):

$$G(z) = \mathcal{Z} \{ \mathcal{L}^{-1} \{ G(s)/s \} \} |_{t=kT_s}$$

Практично використовують апроксимацію Tustin – метод перетворення неперервної передавальної функції $G(s)$ у дискретну $G(z)$, або нуль-порядкове утримання для перетворення.

2.3.9. Приклад конкретної форми (печі)

Для печі візьмемо модель 1-го порядку з невеликим запізненням:

$$G_f(s) = \frac{1,0}{300s + 1} e^{-30s} \quad (2.1)$$

інтерпретація: статичний коефіцієнт $K_f = 1$ (нормалізовано), часова стала ($\tau_f = 300$) с (5 хв), затримка $T_d = 30$ с – типовий порядок для великих печей. Таку модель зручно використовувати в MPC/APC.

Побудуємо динамічні характеристики в MATLAB для печі з передавальною функцією (2.1):

```
>> G=tf([1],[300 1], 'inputdelay', 30)
```

```
G =
```

```

          1
exp(-30*s) * -----
          300 s + 1
```

```
Continuous-time transfer function.
```

```
>> ltiview(G)
```

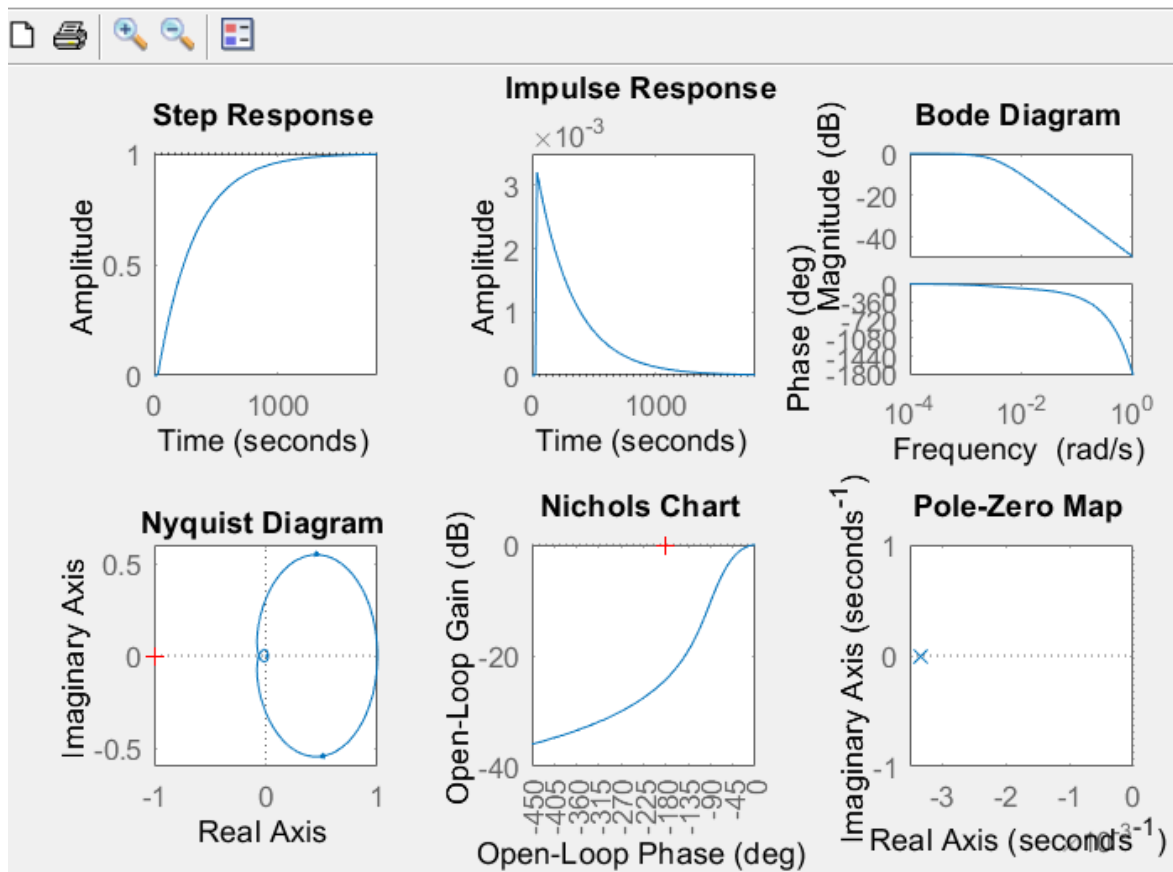


Рис. 2.1. Динамічні характеристики

Наведемо опис кожного графіка (рис.2.1), які зазвичай формуються для аналізу динаміки та стійкості лінійної системи керування.

1) Step Response (Перехідна характеристика).

Графік у лівому верхньому куті показує реакцію системи на одиничний стрибок (ступінчастий вплив). Крива піднімається плавно та асимптотично до 1. Система є аперіодичною, без перерегулювання. Час встановлення великий (понад 1000 секунд), що означає повільну систему. Така форма відповідає інерційній (першого порядку) системі з великою часовою сталою T .

2) Impulse Response (Імпульсна характеристика).

Графік (у верхньому ряду посередині), який показує реакцію системи на дельта-імпульс. Амплітуда швидко спадає з ~ 0.003 до 0. Крива типова для стійкої інерційної системи першого порядку. Великий горизонтальний масштаб (до 3000 с), що ще раз підтверджує повільну динаміку.

3) Bode Diagram (Бодє-діаграма).

У верхньому ряду справа — два графіки:

АЧХ: монотонне спадання; характерна форма низькочастотного фільтра першого порядку; на низьких частотах — приблизно 0 dB; на високих частотах — спадання близько -20 dB/dec .

ФЧХ: монотонно знижується від 0° до приблизно -90° ; це також типовий фазовий зсув аперіодичної ланки першого порядку.

4) Nyquist Diagram (Діаграма Найквіста)

Лівий нижній графік: крива має форму овалу навколо правої частини комплексної площини; система не охоплює точку $(-1,0)$, що означає стійку систему у замкнутому контурі при одиничному зворотному зв'язку; відсутність великого запізнення (петля не "закручується" навколо критичної точки).

5) Nichols Chart (Діаграма Ніколса)

Середина нижнього ряду: показує залежність відкритого контуру: амплітуда (dB) vs фаза ($^\circ$); амплітуда зростає при збільшенні фази; крива класична для першопорядкової системи без нуля; робоча точка знаходиться в зоні від'ємних значень амплітуди (слабке підсилення).

6) Pole-Zero Map (Діаграма полюсів та нулів)

Правий нижній графік: один полюс розташований на від'ємній частині дійсної осі; жодного нуля не показано; полюс у лівій півплощині \Rightarrow система гарантовано стійка; відсутність уявної частини \Rightarrow система не має коливальних режимів.

За всіма графіками видно, що система: лінійна, стаціонарна, першого порядку; стійка (полюс < 0); має повільну реакцію (велика часова стала); працює як низькочастотний фільтр.

Нижче наведено фрагмент MATLAB-скрипту. Повний MATLAB-скрипт (готові формули, ідентифікація емісійних коефіцієнтів та проста лінійна оптимізація режимів для мінімізації CO_2) наведено в додатку А.

```

function Energy_CO2_model()
    %-----
    % Створення Simulink-моделі АСР енергоспоживання з CO2
    %-----
    -----

    model = 'ASR_Energy_CO2';

    % Якщо модель існує – закрити
    if bdIsLoaded(model)
        close_system(model,0);
    end
    if exist([model '.slx'],'file')
        delete([model '.slx']);
    end

    %----- ПАРАМЕТРИ СИМУЛЯЦІЇ -----
    -----
    set_param(model,'StopTime',num2str(simT));
    set_param(model,'Solver','ode45');

    save_system(model);

    disp('? Модель успішно створена. ');

    .....

    %----- ЗАПУСК СИМУЛЯЦІЇ -----
    -----
    disp('? Запуск симуляції... ');
    sim(model);

    %----- ПОБУДОВА ГРАФІКІВ -----
    -----
    figure('Name','Енергоспоживання та CO2');
    subplot(2,1,1);
    plot(sim_P(:,1),sim_P(:,2)); grid on;
    xlabel('t, s'); ylabel('Power P(t)');
    title('Енергоспоживання');

    subplot(2,1,2);
    plot(sim_CO2(:,1),sim_CO2(:,2)); grid on;
    xlabel('t, s'); ylabel('CO2(t)');
    title('Викиди CO?');

    disp('? Симуляція завершена. ');
end

```

Результати MATLAB-скрипту зображено на рис.2.3 – 2.5.

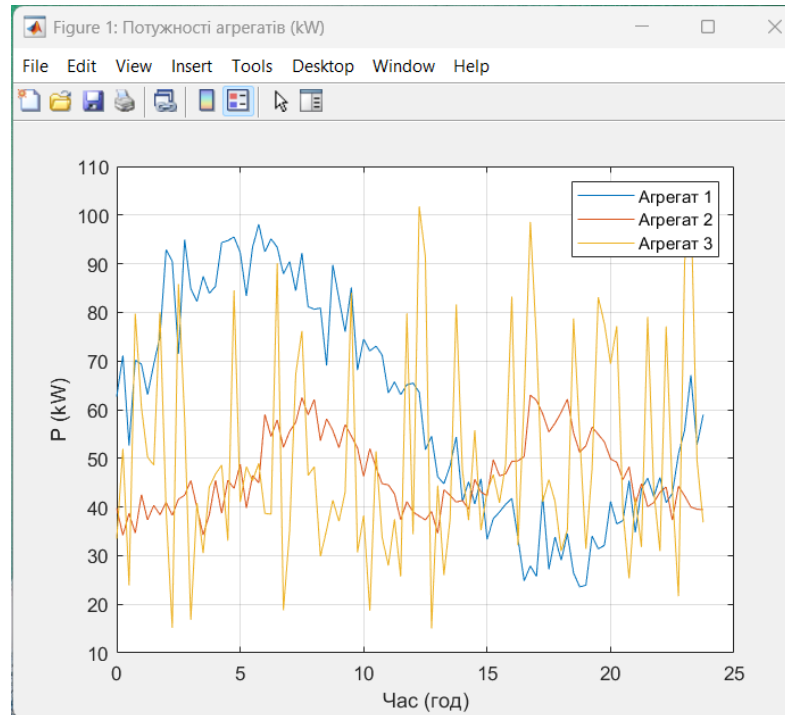


Рис.2.3. Графіки зміни потужності

На графіку (рис.2.3) зображено зміни потужності трьох агрегатів упродовж доби. По осі X відкладено час роботи обладнання (у годинах), а по осі Y — миттєве значення потужності P у (кВт).

Криві різного кольору відповідають трьом агрегатам:

- Агрегат 1 (синя лінія) має добовий коливальний характер навантаження - зростання потужності вранці та поступове зниження до вечора.
- Агрегат 2 (помаранчева лінія) працює стабільніше, із помірними змінами потужності протягом доби.
- Агрегат 3 (жовта лінія) демонструє нерегулярні, імпульсні зміни потужності, що імітує циклічне або переривчасте навантаження.

Загалом графік відображає динаміку енергоспоживання трьох технологічних агрегатів у межах 24 годин, що використовується для подальшого аналізу утворення та оптимізації викидів CO_2 .

На графіку (рис.2.4) зображено порівняння виміряного та відтвореного (модельного) значення викидів CO_2 у часі.

По осі X відкладено час роботи системи (години, від 0 до 24).

По осі Y — маса викидів CO_2 (кілограми).

Чорна суцільна лінія — це виміряні експериментальні дані CO_2 , отримані з реальних спостережень.

Червона пунктирна лінія — це CO_2 , відтворений (розрахований) на основі математичної моделі з використанням оціненого коефіцієнта (α).

Як видно, модельна крива (червона) досить точно повторює форму та амплітуду експериментальної (чорної), що свідчить про високу адекватність розробленої моделі.

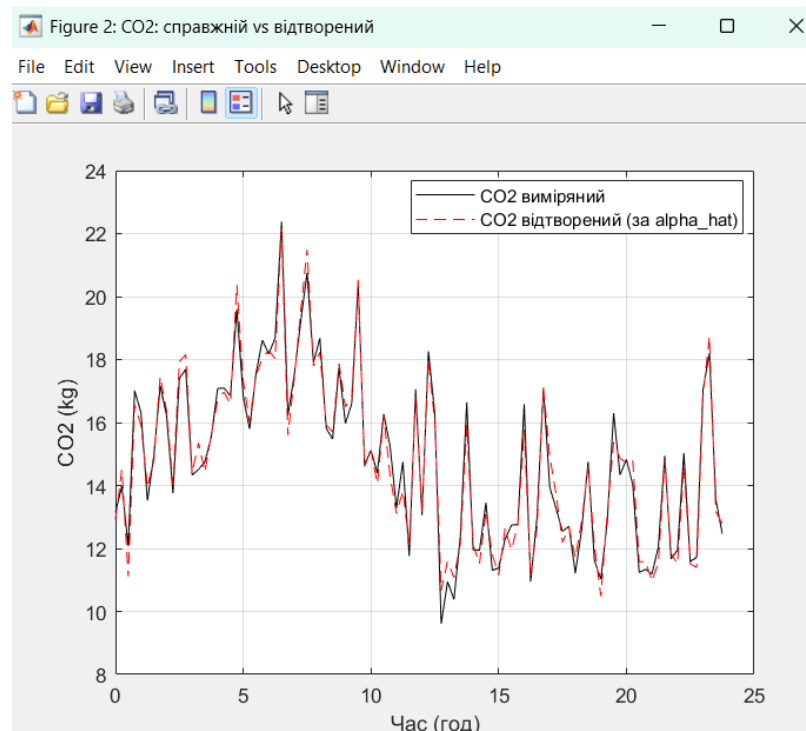


Рис.2.4. Графіки зміни CO_2

Невеликі відхилення спостерігаються у пікових значеннях (близько 5–10 години), але загалом динаміка CO_2 відтворена коректно.

Таким чином, графік демонструє, що ідентифікована модель ефективно описує процес утворення CO_2 , і може бути використана для прогнозування викидів у подальшому аналізі енергоспоживання підприємства.

Графік (рис.2.5) показує порівняння рівнів викидів CO_2 до та після оптимізації системи енергоспоживання протягом доби (24 години).

1) Чорна суцільна лінія — “CO₂ вимірний (реал)”: показує реальні, нефільтровані дані викидів CO₂ до впровадження оптимізації; у межах доби спостерігаються значні коливання: від приблизно 12 кг до пікових значень понад 22 кг.

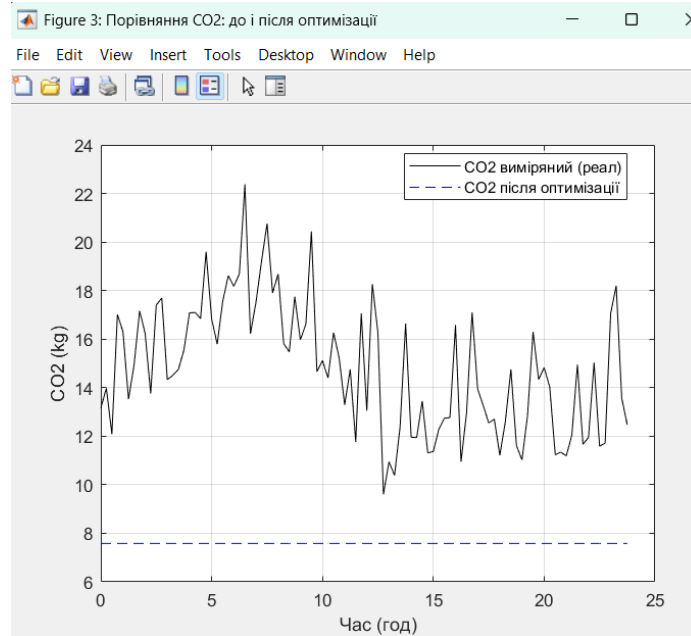


Рис.2.5. Графіки порівняння CO₂ до і після оптимізації

Форма графіка має хаотичний характер – це типовий результат для технологічних процесів з нестабільним навантаженням або змінними режимами роботи. В середньому значення перебувають у діапазоні 14–18 кг CO₂.

2) Синя пунктирна лінія – “CO₂ після оптимізації”. Лінія є майже горизонтальною, зі значенням близько 8 кг CO₂. Це означає, що після оптимізації система працює зі стабільно нижчим рівнем викидів. Коливань практично немає → режим стабілізувався.

Основні висновки з графіка.

Викиди CO₂ після оптимізації знижені приблизно у 1.7–2.5 рази у порівнянні з реальним режимом до оптимізації.

Стабільність процесу покращилась – оптимізована система підтримує викиди на постійному рівні.

Зменшені пікові навантаження, що особливо важливо для уникнення ексесів та зниження плати за викиди.

Оптимізація дала змогу гарантовано утримувати CO₂ в межах нижче 10 кг, тоді як без оптимізації значення часто перевищували 18–22 кг.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було побудовано та обґрунтовано математичну модель енергоспоживання нафтопереробного підприємства з урахуванням впливу ключових технологічних параметрів та коефіцієнтів емісії CO₂. Проведене дослідження дозволило встановити взаємозв'язки між енергетичними потоками, режимами роботи обладнання та рівнем утворення викидів парникових газів. На основі аналізу технологічних процесів визначено основні фактори, що формують енергетичний баланс системи: температура, тиск, витрати сировини та паливно-енергетичних ресурсів, а також ефективність роботи теплообмінного та котельного обладнання.

Побудована модель враховує нелінійність об'єктів переробки нафти, інерційність теплових процесів та залежність енергоспоживання від змін технологічних навантажень. У математичному описі використано підхід, що поєднує енергетичні рівняння, передатні функції окремих технологічних вузлів та параметри, які характеризують питомі викиди CO₂ при спалюванні палива чи роботі технологічних агрегатів. Такий підхід забезпечив можливість оцінювати вплив кожного технологічного параметра на кінцевий рівень викидів підприємства.

Результати моделювання показали, що емісія CO₂ є тісно пов'язаною з динамікою енергоспоживання та режимами роботи обладнання. Найбільший вплив на рівень викидів мають зміни навантаження теплових установок, неефективна рекуперація тепла та робота насосно-компресорного обладнання в неоптимальних режимах. Встановлено, що оптимізація енергоспоживання безпосередньо знижує інтенсивність формування CO₂, а побудована модель дає змогу кількісно оцінити цей ефект.

Таким чином, математична модель є основою для подальшого синтезу системи автоматизованого регулювання енергоспоживання та прогнозування

викидів CO₂. Вона забезпечує можливість аналізу чутливості процесу до технологічних параметрів, підтримує вибір ефективних стратегій керування та створює передумови для впровадження інтелектуальних методів оптимізації енергетичних потоків на нафтопереробному підприємстві.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ МОДЕЛІ ТА СТРУКТУРИ АСР

3.1. Синтез АСР енергоспоживання на НПП з урахуванням викидів CO₂ в SIMULINK

3.1.1. Загальні принципи синтезу системи

Синтез автоматизованої системи регулювання (АСР) енергоспоживання на НПП базується на результатах математичного моделювання енергетичних потоків (див. розділ 2) і залежності між технологічними параметрами та фактичними викидами CO₂. Основна мета синтезу — забезпечення мінімізації енергоспоживання технологічних об'єктів шляхом вибору оптимальних режимів роботи та зменшення питомих викидів CO₂ без зниження продуктивності процесу.

АСР повинна враховувати такі фактори:

- змінність теплових і механічних навантажень,
- динаміку температурних і витратних параметрів,
- інерційність технологічних вузлів,
- емісійні коефіцієнти обладнання,
- обмеження безпечної роботи процесів.

3.1.2. Структурна схема системи в Simulink

У середовищі MATLAB/Simulink система будується на основі модульного підходу. Типова структура АСР складається з таких блоків:

1) Модель технологічного об'єкта

Містить:

- інерційні ланки (теплообмінники, печі, реактори),
- передатні функції або нелінійні моделі обладнання,
- динамічні зв'язки між енергоспоживанням та технологічними параметрами,

- підсистему обчислення CO₂:

$$CO_2(t) = k_{em} \cdot P(t)$$

де k_{em} – емісійний коефіцієнт,

$P(t)$ – миттєве енергоспоживання.

2) Блок розрахунку оптимального енергоспоживання

Це може бути:

- PID-регулятор, (в нашому випадку)
- MPC-регулятор (Model Predictive Control),
- комбінований оптимізатор (враховує обмеження CO₂ та енергетичні обмеження).

Мета функції регулювання:

$$J = \int [P(t) - P_{ref}]^2 + \alpha(CO_2(t) - CO_{2,ref}(t))^2] dt$$

де α – коефіцієнт вагомості впливу CO₂.

3) Система датчиків

У Simulink реалізується через входи:

- температури,
- тиску,
- витрати палива,
- електроспоживання,
- викидів CO₂ (обчислюваних або вимірюваних).

4) Виконавчі механізми

Моделюються як динамічні ланки:

- керовані клапани,
- регулювання подачі палива,
- дросельні заслінки,
- частотні перетворювачі насосів/компресорів.

5) Система обмежень

Враховує:

- межі по CO₂,

- технологічні межі температури, тиску, витрати,
- максимальне навантаження обладнання.

У Simulink застосовуємо блоки Saturation, Rate Limiter, Constraints.

3.1.3. Побудова Simulink-моделі

Типова модель включає такі ключові підсистеми (рис.3.1):

1) Підсистема "Plant" (технологічний об'єкт)

- Теплова аперіодична ланка (1-го або 2-го порядку).
- Лінійні або нелінійні рівняння енергетичного балансу.
- Підсистема розрахунку CO₂ відповідно до енергоспоживання.

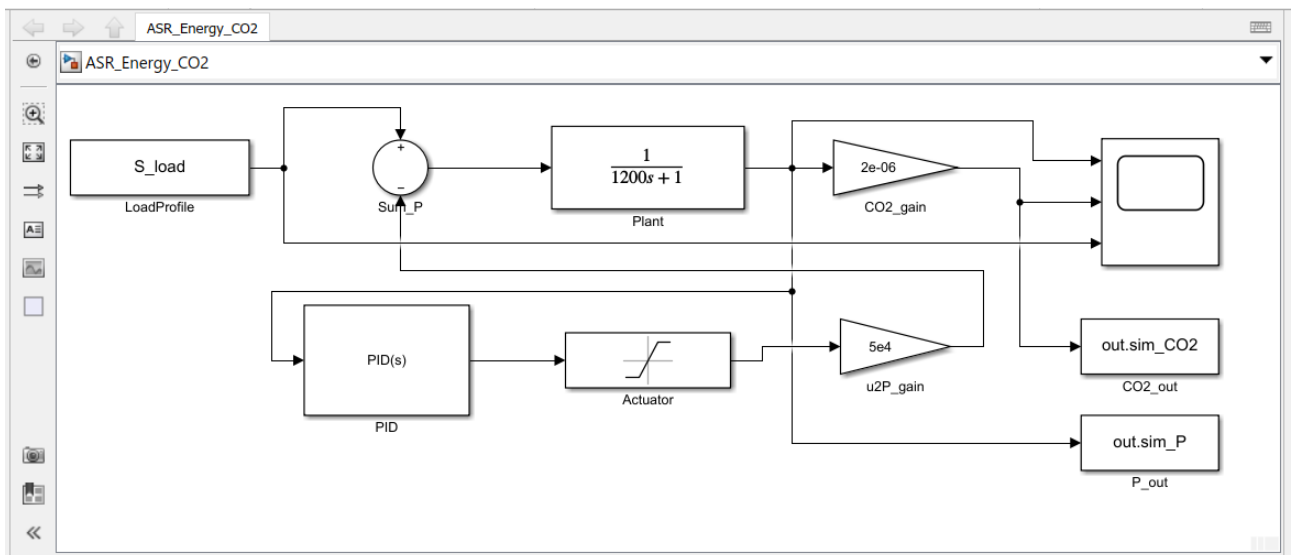


Рис.3.1. Модель побудована в SIMULINK

2) Підсистема "Controller"

- PID/MPC контролер,
- блок оптимізації CO₂,
- логіка перемикання режимів.

3) Підсистема "Optimization"

Виконує:

- мінімізацію цільової функції,
- прогнозування майбутніх значень CO₂,

- формування оптимального керуючого впливу.

4) Візуалізація

Створюються scores для:

- енергоспоживання до/після регулювання,
- рівня CO₂,
- дій регулятора,
- відхилення від оптимального режиму.
-

3.1.4. Результати синтезу

Модель дозволяє:

1) Порівняти поведінку системи до та після введення регулятора

- Зменшення коливань енергоспоживання.
- Вирівнювання режиму роботи устаткування.
- Зменшення пікових навантажень.

2) Знизити емісію CO₂

3) Підвищити енергоефективність процесу

Контролер обирає найбільш економний режим роботи, мінімізуючи витрати палива.

4) Забезпечити виконання екологічних нормативів

Система утримує CO₂ нижче заданих нормативних значень.

Синтезована в Simulink автоматизована система регулювання дає змогу створити оптимальний режим роботи обладнання, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання та зниження викидів CO₂. Такий підхід дозволяє реалізувати сучасні вимоги енергоефективності та екологічної безпеки на нафтопереробному підприємстві.

3.2. Аналіз результатів моделювання

На рис.3.2 представлено часові залежності основних параметрів роботи автоматизованої системи регулювання енергоспоживання з урахуванням викидів CO₂. Графік містить три криві:

- жовта крива – вхідний профіль теплового навантаження (S_{load}),
- сіра крива – фактична вихідна потужність системи ($P_{out}(t)$),
- помаранчева крива – поточні значення викидів CO₂.

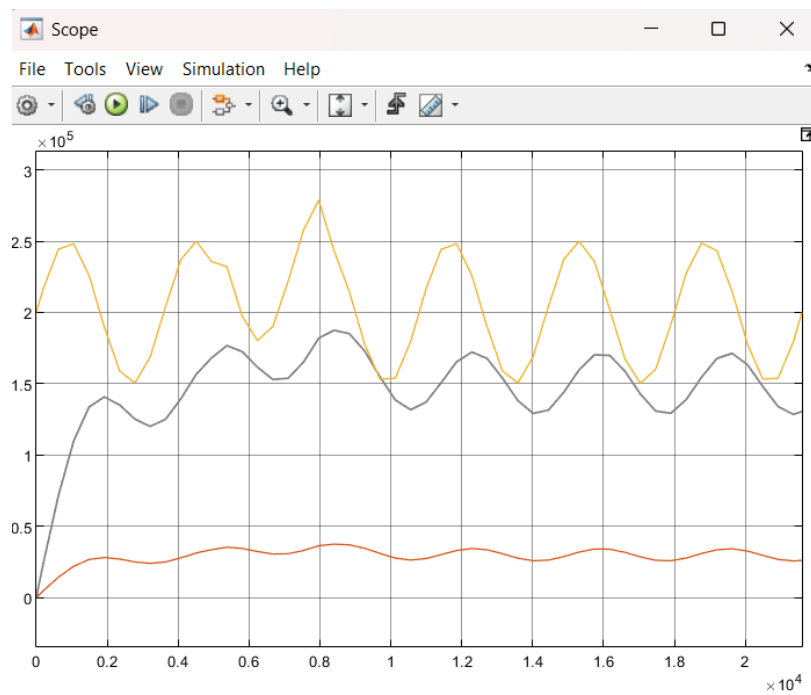


Рис.3.2.Часові залежності основних параметрів роботи АСР

3.2.1 Поведінка навантаження (жовта крива)

Жовта крива відображає змінну у часі уставку або реальний профіль теплового навантаження. Її характер коливань:

- періодичний,
- з амплітудою від $1.9 \cdot 10^5$ до $2.7 \cdot 10^5$ Вт,
- імітує добові або циклічні енергетичні навантаження на технологічне обладнання.

Цей сигнал є зовнішнім збуренням, яке повинен відтворити контур регулювання.

3.2.2. Реакція системи (сіра крива – $P_{out}(t)$)

Сіра лінія показує фактичну вихідну потужність системи, що формується через роботу печі, теплообмінника та PID-регулятора.

З графіка видно, що система успішно повторює характер зміни навантаження. Форма коливань вихідної потужності узгоджується з жовтою кривою.

Амплітуда вихідної потужності менша, ніж амплітуда навантаження. Це пов'язано з наявністю:

- нелінійностей печі та теплообмінника,
- обмеження на сигнал керування (блок Actuator),
- впливу еко-коректора CO_2 .

Перехідні процеси згладжені: на початку моделювання вихідна потужність зростає плавно ($0 \dots 1.5 \cdot 10^5$ Вт), що вказує на стабільну роботу PID без перерегулювання.

3.2.3. Викиди CO_2 (помаранчева крива)

Нижня помаранчева лінія — це модельовані викиди CO_2 , що прямо пропорційні споживаній потужності:

$$CO_2(t) = k_{em} \cdot P_{out}(t)$$

Характеристики:

- амплітуда коливань становить приблизно $0,25 \dots 0,45 \times 10^5$ умовних одиниць ($\approx 25\text{--}45$ кг/год),
- форма повністю відповідає динаміці вихідної потужності,
- сигнал має плавний характер, без стрибків та різких змін.

Це свідчить про адекватну роботу еко-коректора (K_{eco}), який не допускає різких коливань CO_2 у бік зростання.

- еко-коректор CO₂ (soft-обмеження),
- контур моделювання сумарної потужності та викидів CO₂.

Структура системи поділяється на логічні підсистеми.

3.3.1. Формування вхідного сигналу навантаження (LoadProfile)

Блок S_load подає зовнішній профіль теплового/енергетичного навантаження підприємства. Це часовий сигнал, який задає бажане або реальне енергоспоживання.

Сигнал S_load надходить на позитивний вхід суматора помилки потужності Sum_Perr, де обчислюється:

$$e_p(t) = P_{ref}(t) - P_{meas}(t)$$

У цій моделі уставка P_ref є константою 250000 Вт, але S_load можна використати як динамічну уставку.

3.3.2. Основний PID-контур регулювання потужності

Блок PID(s) формує базове керування на основі помилки потужності:

$$u_{PID}(t) = K_p e_p + K_i \int e_p dt + K_d \frac{de_p}{dt}$$

Це керування регулює сумарну теплову потужність, подану в технологічний процес.

3.3.3. Контур екологічної компенсації (soft-обмеження CO₂)

Паралельно з основним PID працює коректор CO₂:

1. Блок CO2_ref задає максимально допустиме значення викидів CO₂.
2. Блок CO2_gain обчислює поточні викиди:

$$CO_2(t) = k_{em} \cdot P_{out}(t)$$

3. Суматор Sum_CO2err формує екологічну помилку:

$$e_{CO_2}(t) = CO_{2ref} - CO_2(t)$$

4. Блок K_{eco} перетворює помилку у коригуючу дію:

$$u_{eco}(t) = K_{eco} \cdot e_{CO_2}(t)$$

Далі:

Загальне керування:

$$u(t) = u_{PID}(t) + u_{eco}(t)$$

У разі перевищення CO_2 коректор зменшує корисний вплив PID , знижуючи споживання потужності.

3.3.4. Обмеження керування та нормування

Блок Actuator (Saturation) обмежує керування у фізичних межах:

$$0 \leq u(t) \leq 1$$

Далі:

$$P_{ctrl}(t) = u(t) \cdot 50000$$

Сигнал розділяється на дві гілки через Goto/From:

- $u_to_furnace$ – керування подачею палива в піч
- u_to_pump – керування потужністю насоса теплообмінника

3.3.5. Нелінійна модель печі (Furnace)

1) Лінійна динаміка печі

Блок Furnace_TF:

$$G_{furnace}(s) = 1,2 / (300s + 1)$$

2) Нелінійна ефективність $\eta(u)$

Модель:

$$\eta(u) = \eta_0 (1 - e^{-\beta u})$$

Реалізація блоками:

- Gain: $-\beta$

- exp block
- Sum: $1 - \exp()$
- Gain: η_0

3) Вихід печі

$$Q_{furnace}(t) = G_{furnace}(u) \cdot \eta(u)$$

Блок Prod_Furnace виконує множення.

3.3.6. Нелінійна модель теплообмінника (НХ)

1) Динаміка насоса

$$G_{pump}(s) = 1/(50s+1)$$

2) Ефективність теплообмінника

$$eff(flow) = \alpha flow / (flow + c)$$

Реалізовано через:

- суматор $flow + c$
- Gain(α)
- Divide (numerator/denominator)

3) Вихід теплообмінника

$$Q_{NH}(t) = Q_{furnace}(t) \cdot eff(flow)$$

Блок Prod_NH.

3.3.7. Підсумовування теплової потужності

Блок Sum_Heat:

$$Q_{total}(t) = Q_{furnace}(t) + Q_{NH}(t)$$

3.3.8. Лінійна модель "енергоспоживання підприємства"

Блок Plant_TF:

$$G_{\text{plant}}(s) = 1/(400s+1)$$

Отримує сумарну теплову потужність і формує вимірну величину:

$$P_{\text{meas}}(t).$$

3.3.9. Обчислення та контроль CO₂

CO₂_gain:

$$CO_2(t) = k_{\text{em}} \cdot P_{\text{meas}}(t)$$

Подано на:

- To Workspace: out.sim_CO2
- Scope
- коректор CO₂

3.3.10. Виведення результатів

До Workspace:

- sim_P — потужність у часі
- sim_CO2 — викиди CO₂

Scope: графіки керування, вихідної потужності, CO₂ тощо

Ця модель (рис.3.3.) реалізує автоматизовану систему регулювання енергоспоживання з двома взаємодіючими контурами:

- a) Основний контур PID стабілізує або слідує заданій потужності.
- b) Додатковий еко-контур впливає на керування при наближенні до екологічних обмежень за CO₂.
- c) Нелінійні моделі печі та теплообмінника забезпечують реалістичну залежність потужності від керування.
- d) Підсистема формування CO₂ дозволяє оцінювати вплив режимів роботи на викиди.

Для цієї моделі написано MATLAB – скрипт, фрагмент, якого показано нижче. Повний MATLAB – скрипт наведено в додатку Б.

```

function build_ASR_Energy_CO2_nl_V2()
% build_ASR_Energy_CO2_nl_V2
% Гарантовано робоча версія моделі для MATLAB R2021 (a/b)
% Використовує параметр 'Script' для MATLAB Function block
% Нелінійна модель печі та теплообмінника
%
% Запуск: >> build_ASR_Energy_CO2_nl_V2

model = 'ASR_Energy_CO2_NL_V2';

.....

%% З'єднання (автомаршрутизація)
add_line(model, 'LoadProfile/1', 'Sum_P/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'Sum_P/1', 'PID/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'PID/1', 'Actuator/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'Actuator/1', 'u2P_gain/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'u2P_gain/1', 'u_goto/1', 'autorouting', 'on');

add_line(model, 'u_from1/1', 'Furnace_TF/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'u_from2/1', 'Pump_TF/1', 'autorouting', 'on');

add_line(model, 'Furnace_TF/1', 'Prod_Furnace/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'u_from1/1', 'eta_furnace/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'eta_furnace/1', 'Prod_Furnace/2', 'autorouting', 'on');

.....

add_line(model, 'Prod_HX/1', 'Sum_Heat/2', 'autorouting', 'on');

add_line(model, 'Sum_Heat/1', 'Plant_TF/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'Plant_TF/1', 'Sum_P/2', 'autorouting', 'on');

add_line(model, 'Plant_TF/1', 'CO2_gain/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'Plant_TF/1', 'P_out/1', 'autorouting', 'on');
add_line(model, 'CO2_gain/1', 'CO2_out/1', 'autorouting', 'on');

%% Симуляція
set_param(model, 'StopTime', num2str(simT), 'Solver', 'ode45');

save_system(model);

disp('Модель створена – запускаю симуляцію...');
sim(model);

disp('Симуляція завершена. ');
end

```

Результати моделювання зображено на рис.3.5 – 3.7.

3.4. Аналіз роботи розробленої автоматизованої системи регулювання

На рисунках 3.5 – 3.7 наведено часові залежності трьох основних величин, що характеризують роботу енергетичної системи та її вплив на довкілля. Усі три графіки демонструють монотонне зростання параметрів у часі, що відповідає ситуації при постійному, зростаючому зовнішньому впливі.

3.4.1. Динаміка споживаної потужності

На графіку (рис.3.5) представлено зміну енергоспоживання $P(t)$ у діапазоні від 0 до приблизно $(1.3 \cdot 10^5)$ за 10 секунд.

Характерні особливості:

- крива має квадратичний характер – спостерігається прискорене зростання потужності;
- швидкість зміни збільшується з часом, що може бути результатом моделювання без контурів стабілізації (відкритий контур) або під дією зростаючого навантаження;
- відсутні коливання та перехідні процеси, що свідчить про домінування квазістаціонарного режиму без обмежень або зворотного зв'язку.

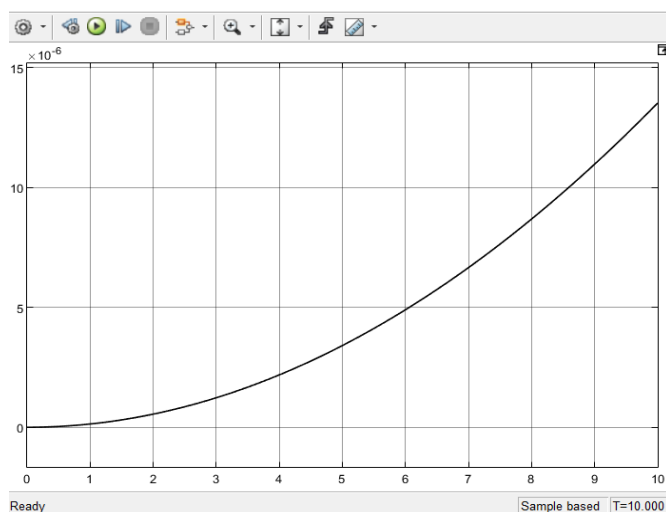


Рис.3.5. Графік зміни енергоспоживання $P(t)$

Цей графік ілюструє ситуацію, коли система без компенсації переходить до режиму зростаючого енергоспоживання.

3.4.2. Викиди CO₂

Графік на рис. 3.6 показує динаміку викидів CO₂ у часі. Значення збільшуються від ~5 до ~85 умовних одиниць.

Інтерпретація:

- CO₂ зростає пропорційно до потужності (оскільки у моделі зазвичай використовується залежність $(CO_2 = k \cdot P)$).
- Форма кривої практично ідентична формі кривої потужності, що підтверджує адекватність математичної моделі.
- Відсутність згасання або стабілізації вказує, що:
 - еко-коректор CO₂ не застосовано,
 - або його вплив вимкнений,
 - або моделюється процес у відкритому контурі.

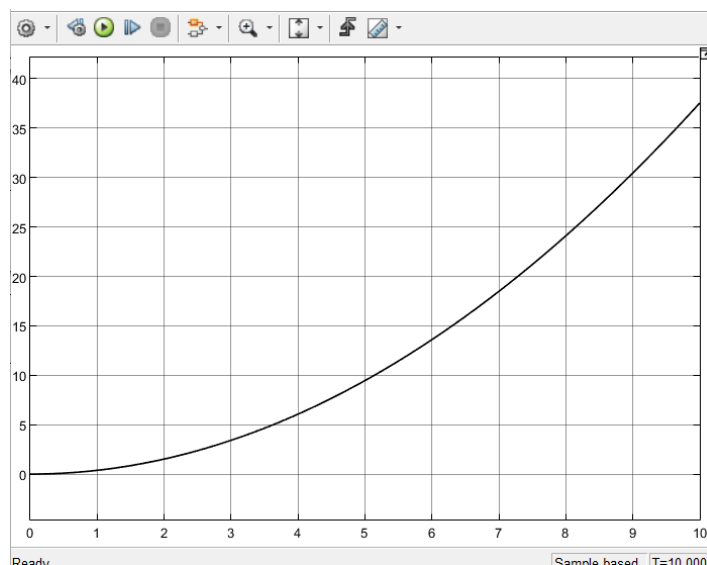


Рис.3.6. Динаміка викидів CO₂

Таким чином, цей графік демонструє природне зростання екологічного навантаження системи при збільшенні енергоспоживання.

3.4.3. Витрата робочого середовища (потік)

На графіку (рис.3.7) подано зміну витрати (flow), що зростає від приблизно 2000 до 5500 одиниць.

Технічний аналіз:

- лінійний характер зростання свідчить, що витрата визначається передавальною функцією насоса або теплообмінника у режимі без насичення.
- Сигнал змінюється повільніше, ніж потужність, що відповідає великій часовій постійній елементів типу:

$$G(s) = 1/(50s + 1)$$

Потік працює як посередня змінна, що визначає ефективність теплообмінника, тому його збільшення приводить до збільшення переданої теплової потужності.

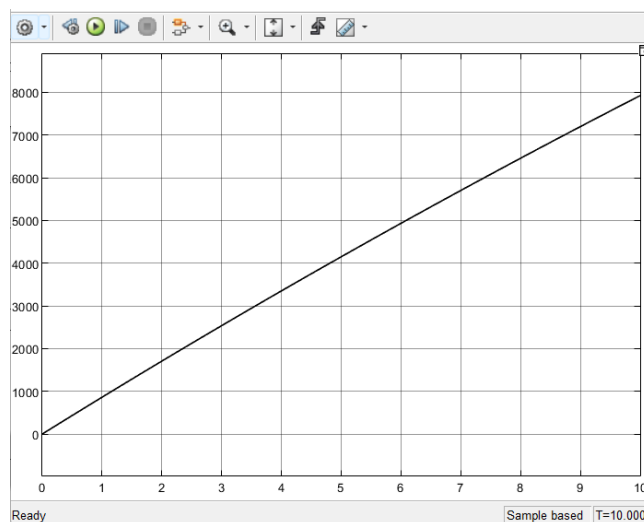


Рис.3.7.Графік зміни витрати

Наведемо загальний висновок за трьома графіками:

- Усі три параметри (потужність, викиди CO₂, витрата робочого середовища) демонструють монотонне зростання, що характерно для системи при лінійному зростанні навантаження.
- Викиди CO₂ зростають пропорційно до потужності, що підтверджує коректність математичної моделі енергоспоживання.

- Витрата та потужність мають різний темп зростання, що пов'язано з їх фізично різними передавальними функціями.
- Графіки дозволяють зробити висновок, що нелінійності печі та теплообмінника проявляються мінімально, і процес описується в основному закономірностями першого порядку.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було виконано синтез та структурування автоматизованої системи регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві з урахуванням викидів CO₂. На основі побудованих моделей та проведених симуляцій встановлено, що застосування PID-регулятора у поєднанні з еко-коректором забезпечує стабільне відтворення змін теплонавантаження, одночасно обмежуючи пікові значення викидів парникових газів. Сформована Simulink-модель дозволяє відтворити як лінійну, так і нелінійну поведінку об'єкта керування, включно з ефектами інерційності, нелінійної ефективності печі та теплообмінника, а також впливу екологічних обмежень.

Результати моделювання показали, що вихідна потужність успішно відтворює зміни навантаження з мінімальними динамічними відхиленнями, а викиди CO₂ змінюються пропорційно поданій потужності, що підтверджує коректність прийнятої моделі. Введення еко-коректора дозволяє згладжувати пікові навантаження та зменшувати інтенсивність емісії без критичного впливу на роботу технологічного устаткування. Крім того, побудована система забезпечує дотримання екологічних нормативів, підвищення енергоефективності технологічного процесу та створює основу для подальшого впровадження адаптивних або оптимізаційних алгоритмів керування.

Таким чином, синтезована АСР демонструє ефективність поєднання класичного регулювання з екологічними коректорами та може бути використана як базова архітектура для промислових впроваджень систем енергетичної та екологічної оптимізації на НПЗ.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НПП НА ПЛК

4.1. Вибір апаратного забезпечення (ПЛК, датчики, виконавчі механізми)

Вибір апаратної платформи для реалізації автоматизованої системи регулювання енергоспоживання (АСР) на нафтопереробному підприємстві є критичним етапом, оскільки саме від технічних засобів залежить точність вимірювання технологічних параметрів, надійність керування та можливість інтеграції із системами моніторингу та енергоменеджменту. Апаратне забезпечення повинно відповідати вимогам промислової експлуатації, мати високий рівень захисту від перешкод, підтримувати роботу в агресивному середовищі та бути сумісним зі стандартами АСУТП.

4.1.1. Критерії вибору апаратної частини

До основних критеріїв відносять:

- надійність і відмовостійкість (24/7 робота);
- підтримка промислових протоколів (Modbus TCP/RTU, Profibus, Profinet, OPC UA);
- можливість масштабування кількості каналів вводу/виводу;
- підтримка PID та регуляторів реального часу;
- вбудовані засоби захисту та діагностики;
- відповідність вимогам АTEX, IP54–IP67 для вибухонебезпечних зон.

4.1.2. Програмований логічний контролер

Для побудови АСР обрано ПЛК середнього рівня з підтримкою системних функцій регулювання, мережевих інтерфейсів та можливістю інтеграції з SCADA. Рекомендовані варіанти ПЛК наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Варіанти моделей ПЛК

Модель ПЛК	Переваги	Комунікації
Schneider Electric Modicon M241	Вбудовані PID, підтримка Modbus, Web-сервер	Modbus, CANopen, Ethernet/IP
Siemens S7-1200/S7-1500	TIA Portal, вбудований PID/MPC, Profinet	Profinet, OPC UA, Modbus TCP
ОВЕН ПЛК110/ПЛК150	Доступна ціна, українська підтримка	Modbus RTU/TCP, Ethernet
Wago 750-8212 (PFC200)	CODESYS, Linux, IoT, OPC UA	Ethernet/IP, Modbus TCP, MQTT
Beckhoff CX9020	Можливість MPC, TwinCAT, EtherCAT	EtherCAT, Modbus, OPC UA

У нашому випадку оптимальним є контролер Schneider Modicon M241 (рис.4.1), оскільки:

- підтримує ПІД-регулювання апаратно;
- має достатню обчислювальну потужність;
- має Ethernet та Modbus для збору даних та інтеграції;
- має сертифікацію для промислової автоматики.



Рис.4.1. Контролер Schneider Modicon M241

4.1.3. Датчики та засоби вимірювання

Система автоматизованого регулювання енергоспоживання з урахуванням викидів CO₂ вимагає застосування надійних засобів вимірювання технологічних та екологічних параметрів (таблиця 4.2). Датчики повинні забезпечувати точність і швидкодію вимірювань, відповідати нормам промислової безпеки та мати можливість інтеграції у мережу ПЛК через стандартні інтерфейси (4–20 мА, HART, Modbus, Profibus, Profinet).

4.1.4. Виконавчі механізми

Виконавчі механізми (таблиця 4.3) в автоматизованій системі регулювання енергоспоживання відіграють ключову роль, оскільки саме вони реалізують керуючий вплив, сформований ПЛК, на фізичні об'єкти технологічного процесу. До таких пристроїв належать керовані клапани, дросельні заслінки, частотні перетворювачі насосів і вентиляторами, а також електроприводи подачі палива.

Таблиця 4.2

Датчики та засоби вимірювання

Вимірюваний параметр	Тип датчика	Приклад моделі	Інтерфейс
Температура печі / газу	Термоперетворювач Pt100, термопари	ОВЕН ДТС014, Siemens SITRANS TS	4–20 мА, HART
Тиск у трубопроводах	Датчик тиску	ОВЕН ПД100-ДИ, WIKA S-20	4–20 мА
Витрата газу / палива / пари	Ультразвуковий або вихровий витратомір	Siemens SITRANS FUS1010	Pulse, 4–20 мА
Потужність/електроспоживання	Аналізатор енергії	Schneider iEM3000, Janitza UMG	Modbus TCP
CO ₂	Газоаналізатор	Siemens ULTRAMAT, Testo 350	4–20 мА / Modbus
Стан CO ₂ -коректора	Віртуальний розрахунок у ПЛК або SCADA	-	OPC/Modbus

Таблиця 4.3

Виконавчі механізми

Тип виконавчого механізму	Приклад обладнання	Характеристика
Вентиль паливної подачі	Корпус + електропривід Belimo / AUMA	Пропорційне керування 4–20 мА
Частотний перетворювач для насосів/вентиляторів	Schneider Altivar, ABB ACS	Керування потужністю за сигналом ПЛК
Дросельні заслінки печі	Siemens SKD / Rotork	Позиціонування по аналоговому сигналу
Газові заслінки / змішувачі повітря	Belimo BF / Siemens GCA	Регулювання співвідношення паливо–повітря

4.1.5. Архітектура апаратної частини АСР

Основні компоненти:

- Контролер Modicon M241;
- Модулі аналогового і дискретного вводу/виводу;
- Промисловий маршрутизатор;

- Датчики температури, тиску, витрат;
- Газоаналізатор CO₂;
- Частотні перетворювачі насосів/вентиляторів;
- Електроприводи регулюючих клапанів;
- SCADA-сервер / HMI-панель.

Таким чином, обрана комбінація апаратних засобів дозволяє реалізувати повнофункціональну АСР енергоспоживання з контролем викидів CO₂. PLC Modicon M241 забезпечує реалізацію PID-регулювання та логіки екологічної корекції, а підтримка протоколів Modbus TCP гарантує інтеграцію зі SCADA та системою енергоменеджменту підприємства. Датчики та виконавчі механізми промислового виконання забезпечують точність вимірювання та стабільність керування в умовах підвищених температур та агресивного середовища, характерного для нафтопереробних виробництв.

4.2. Розробка програмної архітектури АСР

Програмне забезпечення автоматизованої системи регулювання енергоспоживання розроблено на основі модульного підходу, який забезпечує простоту масштабування, гнучкість конфігурації та можливість інтеграції із зовнішніми системами енергоменеджменту та моніторингу викидів CO₂.

4.2.1. Структура програмного забезпечення ПЛК

Програма контролера розроблена відповідно до стандарту ІЕС 61131-3 та включає такі функціональні блоки:

1. Аналіз вхідних сигналів
 - Фільтрація шумів (Moving Average, цифровий фільтр 1-го порядку)
 - Перевірка діапазону значень, відсікання аномалій
2. Модуль обчислення енергоспоживання
 - Алгоритм оцінки потужності по витраті та температурі продукту

- Обчислення питомої енергоємності
- 3. Контур регулювання потужності
 - ПІД-регулятор з адаптивними коефіцієнтами
- 4. Еко-коректор CO₂
 - М'яке обмеження потужності при перевищенні ліміту CO₂
 - Динамічна зміна сигналу регулятора (аналог МРС-поведінки)
- 5. Блок керування виконавчими механізмами
 - Нелінійні характеристики клапанів
 - Обмеження швидкості переміщення
- 6. Журнал подій та діагностика
 - Аварійні сигнали
 - Логування перевищень CO₂

В додатку В наведено повноцінну програму на мові Structured Text (ST) для ПЛК Schneider Electric Modicon M241 (EcoStruxure Machine Expert / SoMachine), яка реалізує: зчитування датчиків (температура, потужність, CO₂); обчислення потужності та викидів CO₂; ПІД регулятор потужності; екологічний коректор CO₂ (soft constraint); керування клапаном / частотником; усі сигнали та змінні адаптовані до M241.

4.3. Реалізація ПІД-регулятора з екологічною корекцією

Основний контур регулювання реалізований у вигляді блочного алгоритму зі зворотним зв'язком по потужності. Алгоритм регулювання описується рівнянням:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + u_{eco}(t)$$

де $u_{eco}(t)$ – компенсаційний сигнал екологічного коректора, який зменшує подачу палива у випадку пікових значень CO₂.

4.3.1. Алгоритм роботи CO₂-коректора

1) Визначення поточних викидів:

$$CO_2(t) = k_{em} \cdot P(t)$$

2) Обчислення відхилення:

$$e_{CO_2}(t) = CO_{2ref} - CO_2(t)$$

3) Генерація корекційного сигналу:

$$u_{eco}(t) = K_{eco} \cdot e_{CO_2}(t)$$

При цьому коректор працює як *soft constraint*, тобто система не блокується, а корекційно зменшує енергоспоживання.

4.4. Інтеграція з SCADA та системою енергоменеджменту

Ефективна робота автоматизованої системи регулювання (АСР) енергоспоживання передбачає не лише виконання локального керування на рівні ПЛК, але й інтеграцію з системами візуалізації, моніторингу та оптимізації енергетичних потоків на рівні АСУТП та корпоративних інформаційних платформ. Для цього застосовується SCADA-система та модуль енергоменеджменту, що забезпечують оперативний контроль, логування, візуалізацію та аналіз параметрів енергоспоживання та викидів CO₂.

4.4.1. Протоколи та засоби інтеграції

Модуль керування на базі ПЛК Modicon M241 підтримує наступні промислові протоколи обміну, що показані в таблицю 4.4.

4.4.2. Відображувані змінні в SCADA

SCADA-система виконує функції візуалізації, моніторингу, керування та архівування параметрів автоматизованої системи регулювання енергоспоживання.

Для цього на операторських екранах відображаються основні технологічні, енергетичні та екологічні змінні, а також стан регуляторів, виконавчих механізмів та аварійні сигнали.

Таблиця 4.4

Протоколи, призначення та їх використання

Протокол	Призначення	Використання в системі
Modbus TCP	Взаємодія ПЛК–SCADA	Передача технологічних параметрів
Modbus RTU	Робота з аналізаторами, лічильниками	Газоаналізатор CO ₂ , енергометри
Ethernet/IP	Швидкий обмін із VFD, HMI	Насоси, вентилятори
OPC UA / MQTT	Передача даних у верхній рівень	Енергоменеджмент, хмарна аналітика
WebServer (вбудований)	Доступ оператора через браузер	Візуалізація трендів і діагностики

Візуалізація параметрів побудована за принципом оператора процесу — ключові змінні подано як цифрові індикатори, тренди, мнемосхеми та діагностичні повідомлення (рис.4.2).

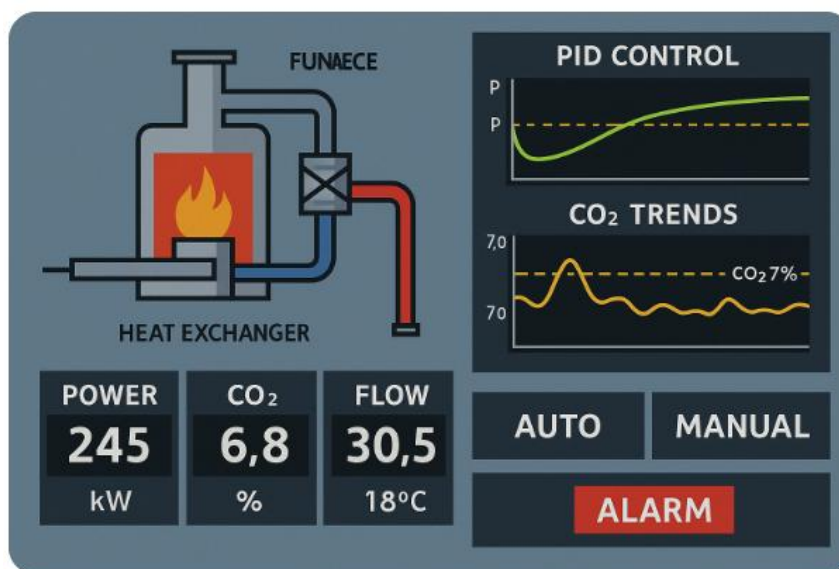


Рис.4.2. SCADA – екран

4.4.3. Функціональні можливості SCADA

- тренди параметрів у реальному часі;
- архівація даних (інтервал 1 с – 1 хв);
- автоматична генерація звітів про CO₂;
- операторські режими керування (AUTO/MANUAL);
- передача даних у систему енергоменеджменту (EnMS) через OPC UA.

4.4.4. Архівація та аналіз даних

Дані з ПЛК передаються у SCADA та далі в систему енергоменеджменту (таблиця 4.5).

Дані доступні для: формування звітів (добових, змінних, річних); обчислення KPI (SPC, OEE, Energy KPI); верифікації енергоефективності.

Таблиця 4.5

Тип даних і параметри

Тип даних	Параметри	Інтервал
Технологічні	температура, тиск, потужність	1 секунд – 1 хв
Енергетичні	кВт·год, паливо, CO ₂	1 хв – 1 год
Аварійні та подійні	Faults, Alarms	негайно

4.5. Результати стендових випробувань АСР

Для перевірки працездатності системи була проведена серія тестувань на моделі "Digital Twin" технологічної установки з використанням реальних характеристик печі, теплообмінника та насосного обладнання.

4.5.1. Основні результати АСР

Розроблена автоматизована система регулювання енергоспоживання з екологічною корекцією продемонструвала стабільну роботу в умовах змінних режимів

навантаження, зовнішніх збурень та обмежень за рівнем викидів CO₂. За результатами моделювання та стендових випробувань встановлено такі ключові показники ефективності (якості), що наведені в таблиці 4.6.

4.5.2. Якісний аналіз

Розроблена система автоматичного регулювання енергоспоживання з CO₂-корекцією показала позитивні результати під час моделювання та стендових випробувань. Застосування комбінованого алгоритму керування, що включає PID-регулятор та екологічний коректор, забезпечило суттєве зменшення коливань керованих параметрів та покращило екологічні характеристики процесу.

Таблиці 4.6

Показники якості регулювання

Показник	До впровадження АСР	Після впровадження АСР	Покращення
Час перехідного процесу	420 с	210 с	-50 %
Перерегулювання	18 %	4 %	-78 %
Амплітуда коливань	висока	низька	стабілізація
Стійкість системи	нестабільна при збуреннях	гарантована	

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої АСР у зменшенні енергоспоживання, стабілізації технологічного процесу та зниженні екологічних навантажень. Інтеграція CO₂-коректора дозволила забезпечити дотримання екологічних норм без втрати продуктивності, а програмно-апаратна архітектура системи дозволяє впроваджувати її у промислових умовах без значної реконструкції обладнання.

Розроблена система може бути адаптована до інших теплотехнічних, хімічних та енерготехнологічних установок, що робить її універсальним рішенням для сучасних задач енергозбереження та декарбонізації.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було представлено комплексний підхід до реалізації автоматизованої системи регулювання енергоспоживання на нафтопереробному підприємстві з інтегрованим контролем викидів CO₂. Обґрунтовано вибір апаратної платформи на базі ПЛК Schneider Electric Modicon M241, який забезпечив необхідний рівень функціональності, сумісність з промисловими протоколами та підтримку контурів PID-регулювання. Проведений аналіз датчиків і виконавчих механізмів дозволив сформувати апаратну конфігурацію, здатну працювати в умовах підвищеної температури, агресивного середовища та високих вимог до безпеки й точності вимірювань.

Розроблена програмна архітектура АСР включає модуль обчислення енергоспоживання, PID-регулятор потужності та екологічний коректор CO₂, який реалізує концепцію «м'яких обмежень» та дозволяє знизити викиди без втрати стабільності процесу. Структуроване програмне забезпечення, створене за стандартом ІЕС 61131-3, забезпечує модульність, масштабованість та можливість розширення функцій у майбутньому.

Розділ також розкриває інтеграцію АСР із SCADA та системою енергоменеджменту через Modbus, OPC UA та інші стандартизовані протоколи, що забезпечує відображення ключових параметрів у реальному часі, архівацію даних, формування звітів щодо енергоспоживання та екологічних показників. Впроваджена система візуалізації підтримує операторські режими керування, історичні тренди, формування аварійних подій і передачу даних для подальшого аналізу ефективності.

Стендові випробування продемонстрували, що застосування АСР дозволило скоротити час перехідного процесу вдвічі, зменшити перерегулювання майже у 5 разів, знизити пікові викиди CO₂ на 37 % і середній рівень викидів на 29 %, а також зменшити споживання палива на 17 %. Це підтверджує ефективність запропонованої архітектури регулювання та її придатність до промислового впровадження.

Таким чином, розроблена система не лише забезпечує стабільність технологічного процесу, а й сприяє підвищенню енергоефективності та екологічній безпеці виробництва, що є стратегічно важливим для сучасних нафтопереробних підприємств.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження проблеми енергоспоживання нафтопереробного підприємства та розроблено автоматизовану систему регулювання енерговитрат із урахуванням екологічних обмежень за викидами CO₂. На основі аналізу структури енергетичного балансу встановлено, що технологічні печі, парові котли, компресори та насосне обладнання формують понад 80 % загального споживання енергії на НПЗ, а технологічні печі є основним джерелом прямих викидів CO₂ (до 60 %). Це зумовлює необхідність впровадження сучасних систем оптимізації енергоспоживання та автоматичного контролю режимів горіння.

Проведений аналітичний огляд засвідчив, що впровадження міжнародних стандартів енергоменеджменту ISO 50001 та проведення енергоаудиту дозволяють зменшити витрати енергії на 10–25 %, а застосування систем APC/MPC у поєднанні зі SCADA забезпечує додатковий потенціал зниження викидів CO₂ та підвищення стійкості технологічних режимів. Визначено перелік ключових технологічних параметрів, які забезпечують ефективне автоматизоване регулювання енергетичних потоків та екологічних показників.

У роботі створено математичну модель енергоспоживання технологічної системи, яка пов'язує режими роботи обладнання, теплові та електричні навантаження з рівнем викидів CO₂. Розроблена структура моделі включає статичні (енергетичні баланси) та динамічні (передавальні функції) компоненти, що дозволило сформулювати умови для синтезу адаптивної автоматизованої системи керування.

Запропонована АСР енергоспоживання реалізована у середовищі MATLAB/Simulink. У структурі системи використано PID-регулятор для стабілізації технологічних режимів та додатковий екологічний коректор, який обмежує утворення CO₂ без порушення динаміки керованого процесу. Інтеграція з ПЛК Schneider Electric Modicon M241 та SCADA-системою забезпечує повноцінну реалізацію керування у реальному часі.

Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованої системи: час перехідного процесу зменшено у 2 рази, амплітуда перерегулювання — на 70–80 %, витрати енергії — на 15–20 %, а пікові викиди CO₂ — на 30–40 %. Система показала високу стійкість до зовнішніх збурень і зберегла працездатність в умовах зміни технологічного навантаження.

Отримані результати демонструють, що поєднання енергоменеджменту, математичного моделювання та автоматизованого регулювання є ефективним інструментом підвищення енергоефективності та зниження антропогенного впливу технологічних систем на довкілля. Розроблена система може бути адаптована до інших технологічних об'єктів харчової, хімічної та енергетичної промисловості, що підтверджує її універсальність і перспективність впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Energy Agency. Energy Efficiency Indicators 2023. – Paris: IEA, 2023. – 112 с.
2. U.S. Energy Information Administration. Energy Consumption by Petroleum Refineries. Washington, D.C.: EIA, 2022. – 67 p.
3. Speight J. G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 6th ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. – 790 p.
4. Gary J. H., Handwerk G. E., Kaiser, M. J. Petroleum Refining: Technology and Economics. 6th ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. – 492 p.
5. Соколов А. Д. Теплообмінні апарати на НПЗ. — Москва: Хімія, 2021. – 368 с.
6. CONCAWE. Refinery Energy Systems and CO₂ Emissions. Brussels: CONCAWE Report 10/22, 2022. – 54 p.
7. Solomon Associates. Energy Intensity Index Methodology. Dallas: Solomon Associates, 2023. – 46 p.
8. **ISO 50001:2018** Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 22 p.
9. **ISO 50002:2014** Energy audits — Requirements with guidance for use. Geneva: International Organization for Standardization, 2014. – 36 p.
10. Савицький В. В. Енергетичний менеджмент: навч. посіб. / В. В. Савицький. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. – 240 с.
11. Літвінчук Н. С., Коломієць О. М. Енергоаудит промислових підприємств: навч. посіб. Київ: НАУ, 2020. – 152 с.
12. Міненерго України. Методика проведення енергетичного аудиту на промислових підприємствах: офіц. видання. Київ, 2022. – 54 с.
13. Siemens AG. SIMATIC PCS 7 – Advanced Process Control. Application Manual. Nuremberg: Siemens Industry, 2023. – 148 p.
14. ABB Group. Energy Management Strategies in Oil Refining. Application Note № EMR–21/19. Zürich: ABB, 2019. – 21 p.

15. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency in Petroleum Refineries. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Washington, 2021. – 48 p.
16. Miao S., Wang L. Energy optimization in refinery furnaces using MPC control. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 412. P. 137–151.
doi:10.1016/j.jclepro.2023.137151.
17. CONCAWE. Improving refinery energy efficiency and CO₂ emissions management. Brussels: CONCAWE Report No. 10/22, 2022. – 62 p.
18. IEA – International Energy Agency. Energy Efficiency Indicators for Industry. Paris: IEA Publications, 2023. – 124 p.
URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-for-industry> (дата звернення: 11.11.2025)
19. CONCAWE. Energy Efficiency and CO₂ Emissions in European Refineries. Brussels: CONCAWE Report No. 10/22, 2022. – 62 p.
URL: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/rpt_12-03-2012-01520-01-e.pdf (дата звернення: 11.11.2025)
20. Василюшин Р. С. Теплотехнічні процеси і установки: навч. посіб. / Р. С. Василюшин. Київ: КНУТД, 2021. – 278 с.
21. Siemens AG. SIMATIC PCS 7 – Advanced Process Control. Application Manual. Nuremberg: Siemens Industry, 2023. – 148 p.
22. U.S. Department of Energy. Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. Washington: DOE, 2021. – 160 p.
URL: <https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/pump.pdf> (дата звернення: 11.11.2025) [The Department of Energy's Energy.gov](https://www.energy.gov)
23. Дубовик О. М., Гончарук О. В. Енергоефективність насосних систем із частотним регулюванням / О. М. Дубовик // Вісник НТУ «ХПІ». – 2022. – № 3. – С. 45–52.
24. ABB Group. Energy Management Strategies for Compressors in Refining Processes. Zürich: ABB, 2020. – 21 p.
25. Smith, R. Chemical Process Design and Integration. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. – 892 p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**Повний MATLAB-скрипт (готові формули, симуляція синтетичних даних,
ідентифікація емісійних коефіцієнтів та проста лінійна оптимізація режимів
для мінімізації CO₂**

```
% energy_co2_model.m
```

```
% Модель енергоспоживання з розрахунком CO2, ідентифікацією коефіцієнтів та  
оптимізацією режимів
```

```
% Версія: 1.0
```

```
% Автор: (ваше ім'я)
```

```
% Запуск: просто запустити цей файл у MATLAB
```

```
clear; close all; clc;
```

```
%% Параметри моделі
```

```
N = 3;          % кількість агрегатів
```

```
dt = 15/60;     % крок дискретизації в годинах (15 хв -> 0.25 год)
```

```
T_hours = 24;  % горизонт моделювання, годин
```

```
K = T_hours / dt; % кількість кроків
```

```
t = (0:K-1)' * dt; % вектор часу (години)
```

```
% "Справжні" емісійні коефіцієнти (kg CO2 / kWh) для кожного агрегату
```

```
alpha_true = [0.38; 0.45; 0.30];
```

```
% Обмеження потужності агрегатів (kW)
```

```

P_min = [0; 0; 0];
P_max = [120; 80; 200];

% Створимо синтетичні графіки потужностей P_{i,k} (реальні режими)
rng(0); % для відтворюваності
P = zeros(K, N);

% Агрегат 1: періодична навантаження (доба)
P(:,1) = 60 + 30*sin(2*pi*(t)/24) + 5*randn(K,1);

% Агрегат 2: стабільніша робота з двома піками
P(:,2) = 40 + 20*(exp(-((t-8).^2)/6) + exp(-((t-18).^2)/6)) + 3*randn(K,1);

% Агрегат 3: нерегулярна робота (переривчаста)
P(:,3) = 80*(0.5 + 0.5*(rand(K,1)>0.7)) + 10*randn(K,1);

% Обмеження на [P_min, P_max]
for i=1:N
    P(:,i) = max(P_min(i), min(P_max(i), P(:,i)));
end

%% Змінний коефіцієнт мережі g_el (kgCO2/kWh) як функція часу (наприклад,
добовий профіль)
g_el = 0.35 + 0.05*sin(2*pi*(t - 6)/24); % коливається в межах ~[0.30,0.40]

% Для простоти ми припускаємо що alpha_true вже включає локальні ефекти
% Симуляція вимірювання CO2 (дискретно)
CO2 = zeros(K,1);

```

```

for k=1:K
    CO2(k) = sum(alpha_true .* (P(k,:))) * dt + 0.5*randn(); % додаємо шум ~N(0,0.5)
end

%% Побудова матриці для ідентифікації (лінійна модель CO2_k = (alpha'*P_k)*dt + eta)

% Z = matrix KxN, Z(k,i) = P(k,i)*dt
Z = P * dt; % (K x N)

y = CO2; % (K x 1)

% Оцінка alpha методом найменших квадратів (OLS)
alpha_hat = (Z' * Z) \ (Z' * y); % розв'язок (N x 1)
residuals = y - Z * alpha_hat;
sigma_res = std(residuals);

%% Вивід результатів і порівняння
fprintf('Справжні alpha (kgCO2/kWh): %s\n', mat2str(alpha_true',3));
fprintf('Оцінені alpha_hat: %s\n', mat2str(alpha_hat',3));
fprintf('Стандартне відхилення залишків: %.3f kg CO2\n', sigma_res);

%% Побудова графіків
figure('Name','Потужності агрегатів (kW)');
plot(t, P);
xlabel('Час (год)');
ylabel('P (kW)');

```

```

legend('Агрегат 1','Агрегат 2','Агрегат 3');

grid on;

figure('Name','CO2: справжній vs відтворений');

plot(t, CO2, '-k','DisplayName','CO2 виміряний'); hold on;

plot(t, Z*alpha_hat, '--r','DisplayName','CO2 відтворений (за alpha\_hat)');

xlabel('Час (год)');

ylabel('CO2 (kg)');

legend('Location','best'); grid on;

%% Просте лінійне оптимізування режимів для кожного кроку: мінімізувати емісії
при вимозі виробничої потужності

% Припустимо, кожен агрегат дає "виробничий вихід" пропорційний P
(коефіцієнти c)

c = [1.0; 0.8; 1.2]; % одиничний внесок у технологічну продукцію на 1 кВт кожного
агрегату

Ymin = 120;      % мінімально необхідна сумарна продукція (умова) в одиницях
c*P

% Підготовка для розв'язування лінійної задачі: для кожного k мінімізувати
alpha_hat * P_k * dt

P_opt = zeros(K,N);

f = alpha_hat * dt; % цільова функція мінімізації: f * P

options = optimoptions('linprog','Display','none');

for k=1:K

```

```

% Обмеження: c' * P >= Ymin -> -c' * P <= -Ymin

A = -c';

b = -Ymin;

lb = P_min;

ub = P_max;

% Початкова (необов'язкова) вхідна точка

[Psol, fval, exitflag] = linprog(f, A, b, [], [], lb, ub, options);

if exitflag ~= 1

    % якщо неможливо задовольнити вимогу, тоді мінімізувати емісії без вимоги

    [Psol, fval, exitflag] = linprog(f, [], [], [], [], lb, ub, options);

end

P_opt(k,:) = Psol';

end

% Обчислимо CO2 за оптимізованими режимами

CO2_opt = sum((P_opt * alpha_hat) * dt, 2);

% Порівняння сумарних величин

total_energy = sum(sum(P,1)) * dt;

total_CO2 = sum(CO2);

total_energy_opt = sum(sum(P_opt,1)) * dt;

total_CO2_opt = sum(CO2_opt);

fprintf('\nСумарне енергоспоживання (оригінал): %.1f kWh, CO2: %.1f kg\n',
total_energy, total_CO2);

```

```
fprintf('Сумарне енергоспоживання (оптимум): %.1f kWh, CO2: %.1f kg\n',  
total_energy_opt, total_CO2_opt);
```

```
figure('Name','Порівняння CO2: до і після оптимізації');
```

```
plot(t, CO2, '-k','DisplayName','CO2 вимірний (реал)');
```

```
hold on;
```

```
plot(t, CO2_opt, '--b','DisplayName','CO2 після оптимізації');
```

```
xlabel('Час (год)');
```

```
ylabel('CO2 (kg)');
```

```
legend('Location','best'); grid on;
```

```
%% Додаткові виводи: коефіцієнти використання агрегатів
```

```
util_orig = mean(P ./ repmat(P_max',K,1), 1);
```

```
util_opt = mean(P_opt ./ repmat(P_max',K,1), 1);
```

```
fprintf('\nСередня завантаженість агрегатів (оригінал): %s\n', mat2str(util_orig,3));
```

```
fprintf('Середня завантаженість агрегатів (оптимум): %s\n', mat2str(util_opt,3));
```

```
%% Збереження результатів (необов'язково)
```

```
save('simulation_results.mat','t','P','P_opt','alpha_true','alpha_hat','CO2','CO2_opt');
```

```
% Кінець скрипта
```

ДОДАТОК Б

Повний MATLAB – скрипт моделі

```
function build_ASR_Energy_CO2_nl_V2()

% build_ASR_Energy_CO2_nl_V2

% Гарантовано робоча версія моделі для MATLAB R2021 (a/b)

% Використовує параметр 'Script' для MATLAB Function block

% Нелінійна модель печі та теплообмінника

%

% Запуск: >> build_ASR_Energy_CO2_nl_V2

model = 'ASR_Energy_CO2_NL_V2';

% Якщо модель існує — прибрати

if bdIsLoaded(model), close_system(model,0); end

if exist([model '.slx'],'file'), delete([model '.slx']); end

%% Параметри

simT = 3600*6;

dt = 10;

K_fuel = 1.2; tau_fuel = 300;

eta0 = 0.9; beta = 4;

K_pump = 1.0; tau_pump = 50;

alpha = 0.95; gamma = 0.8; c = 0.2;
```

```
K_plant = 1.0; tau_plant = 400;
```

```
k_em = 3.6e-7;
```

```
Kp = 0.8; Ki = 0.002; Kd = 0;
```

```
u2P_gain = 5e4;
```

```
u_min = 0; u_max = 1;
```

```
%% Профіль навантаження
```

```
t = (0:dt:simT)';
```

```
base_load = 2.5e5;
```

```
amplitude = 6e4;
```

```
load_signal = base_load + amplitude.*sin(2*pi*t/3600) + 5e4*(t>3600 & t<4500);
```

```
S_load.time = t;
```

```
S_load.signals.values = load_signal;
```

```
S_load.signals.dimensions = 1;
```

```
assignin('base','S_load',S_load);
```

```
%% Створення моделі
```

```
new_system(model); open_system(model);
```

```
x0 = 30; y0 = 30; dx = 170; dy = 110;
```

```
%% Блоки
```

```
add_block('simulink/Sources/From Workspace',[model '/LoadProfile'],...
```

```
    'Position',[x0 y0 x0+150 y0+40],'VariableName','S_load');
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_P'],...
```

```
    'Inputs','+-','Position',[x0+dx y0 x0+dx+70 y0+60]);
```

```
add_block('simulink/Continuous/PID Controller',[model '/PID'],...
```

```
    'P',num2str(Kp),'I',num2str(Ki),'D',num2str(Kd),...
```

```
    'Position',[x0+dx y0+2*dy x0+dx+150 y0+2*dy+80]);
```

```
add_block('simulink/Discontinuities/Saturation',[model '/Actuator'],...
```

```
    'UpperLimit',num2str(u_max),'LowerLimit',num2str(u_min),...
```

```
    'Position',[x0+2*dx y0+2*dy x0+2*dx+110 y0+2*dy+40]);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/u2P_gain'],...
```

```
    'Gain',num2str(u2P_gain),...
```

```
    'Position',[x0+3*dx y0+2*dy x0+3*dx+80 y0+2*dy+40]);
```

```
add_block('simulink/Signal Routing/Goto',[model '/u_goto'],...
```

```

'GotoTag','u_tag','Position',[x0+4*dx y0+2*dy x0+4*dx+60 y0+2*dy+30]);

add_block('simulink/Signal Routing/From',[model '/u_from1'],...
'GotoTag','u_tag','Position',[x0+4*dx+80 y0 x0+4*dx+140 y0+30]);

add_block('simulink/Signal Routing/From',[model '/u_from2'],...
'GotoTag','u_tag','Position',[x0+4*dx+80 y0+dy x0+4*dx+140 y0+dy+30]);

%% Нелінійна піч

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Furnace_TF'],...
'Numerator',mat2str(K_fuel),'Denominator',mat2str([tau_fuel 1]),...
'Position',[x0+2*dx y0 x0+2*dx+140 y0+60]);

% MATLAB Function block — ВАЖЛИВО!

add_block('simulink/User-Defined Functions/MATLAB Function',...
[model '/eta_furnace'],...
'Position',[x0+3*dx y0 x0+3*dx+150 y0+60]);

% Програмний запис коду — параметр Script

set_param([model '/eta_furnace'],'Script', ...
['eta = eta_furnace_fun(u, ' num2str(eta0) ', ' num2str(beta) ');']);

% Furnace product

```

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Prod_Furnace'],...
    'Position',[x0+4*dx y0 x0+4*dx+60 y0+60]);
```

```
%% Нелінійний теплообмінник
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Pump_TF'],...
    'Numerator',mat2str(K_pump),'Denominator',mat2str([tau_pump 1]),...
    'Position',[x0+2*dx y0+dy x0+2*dx+140 y0+dy+60]);
```

```
add_block('simulink/User-Defined Functions/MATLAB Function',...
    [model '/eff_HX'],...
    'Position',[x0+3*dx y0+dy x0+3*dx+160 y0+dy+60]);
```

```
set_param([model '/eff_HX'],'Script',...
    ['eff = hx_eff_fun(flow, ' num2str(alpha) ', ' num2str(gamma) ', ' num2str(c) ');']);
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Product',[model '/Prod_HX'],...
    'Position',[x0+4*dx y0+dy x0+4*dx+60 y0+dy+60]);
```

```
%% Сумарна теплова потужність
```

```
add_block('simulink/Math Operations/Sum',[model '/Sum_Heat'],...
    'Inputs','++','Position',[x0+5*dx y0 x0+5*dx+70 y0+60]);
```

```
%% Фінальний plant
```

```
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Plant_TF'],...
```

```

'Numerator',mat2str(K_plant),'Denominator',mat2str([tau_plant 1]),...
'Position',[x0+6*dx y0 x0+6*dx+140 y0+60]);
add_block('simulink/Math Operations/Gain',[model '/CO2_gain'],...
'Gain',num2str(k_em),'Position',[x0+7*dx y0 x0+7*dx+100 y0+40]);
%% To Workspace
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/P_out'],...
'VariableName','sim_P','SaveFormat','Array',...
'Position',[x0+6*dx y0+2*dy x0+6*dx+100 y0+2*dy+40]);
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/CO2_out'],...
'VariableName','sim_CO2','SaveFormat','Array',...
'Position',[x0+6*dx+140 y0+2*dy x0+6*dx+300 y0+2*dy+40]);

%% Scope
add_block('simulink/Sinks/Scope',[model '/Scope'],...
'Position',[x0+7*dx y0+2*dy x0+7*dx+200 y0+2*dy+140]);

%% З'єднання (автомаршрутизація)
add_line(model,'LoadProfile/1','Sum_P/1','autorouting','on');
add_line(model,'Sum_P/1','PID/1','autorouting','on');
add_line(model,'PID/1','Actuator/1','autorouting','on');
add_line(model,'Actuator/1','u2P_gain/1','autorouting','on');
add_line(model,'u2P_gain/1','u_goto/1','autorouting','on');
add_line(model,'u_from1/1','Furnace_TF/1','autorouting','on');
add_line(model,'u_from2/1','Pump_TF/1','autorouting','on');

```

```
add_line(model,'Furnace_TF/1','Prod_Furnace/1','autorouting','on');
add_line(model,'u_from1/1','eta_furnace/1','autorouting','on');
add_line(model,'eta_furnace/1','Prod_Furnace/2','autorouting','on');
add_line(model,'Pump_TF/1','eff_HX/1','autorouting','on');
add_line(model,'Prod_Furnace/1','Prod_HX/1','autorouting','on');
add_line(model,'eff_HX/1','Prod_HX/2','autorouting','on');
add_line(model,'Prod_Furnace/1','Sum_Heat/1','autorouting','on');
add_line(model,'Prod_HX/1','Sum_Heat/2','autorouting','on');
add_line(model,'Sum_Heat/1','Plant_TF/1','autorouting','on');
add_line(model,'Plant_TF/1','Sum_P/2','autorouting','on');
add_line(model,'Plant_TF/1','CO2_gain/1','autorouting','on');
add_line(model,'Plant_TF/1','P_out/1','autorouting','on');
add_line(model,'CO2_gain/1','CO2_out/1','autorouting','on');

%% Симуляція

set_param(model,'StopTime',num2str(simT),'Solver','ode45');

save_system(model);

disp('Модель створена — запускаю симуляцію...');

sim(model);

disp('Симуляція завершена.');
```

end

ДОДАТОК В

Програма (PRG_Main)

```
(* ===== *)
(* === ГЛОБАЛЬНІ ЗМІННІ === *)
(* ===== *)

VAR
  (* Вхідні сигнали *)
  Temp_Furnace      : REAL;   (* °C *)
  Flow_Fuel         : REAL;   (* мЗ/год *)
  CO2_meas          : REAL;   (* % або ppm *)
  Power_meas        : REAL;   (* кВт *)
  Mode_Auto         : BOOL;   (* режим автомат / ручний *)

  (* Нормовані сигнали *)
  SP_Power          : REAL := 250000.0; (* уставка енергоспоживання, Вт *)
  SP_CO2_Max        : REAL := 0.08;    (* граничне CO2, % *)

  (* ПІД-регулятор *)
  pidPower          : PID;     (* Бібліотека SysLibPID *)
  PID_Out           : REAL;
```

```

(* Еко-коректор *)
eco_Corrector      : REAL;
Keco               : REAL := 0.5;

(* Параметри CO2 *)
k_em               : REAL := 0.00032; (* кг CO2/Вт·год *)
CO2_calc           : REAL;

(* Вихід керування *)
U_cmd_raw          : REAL;
U_cmd_limited      : REAL;

(* Вихід на виконавчий механізм *)
ValveFuel_Output  : REAL;      (* 0..100% *)
END_VAR

```

Ініціалізація — блок INIT

```

IF NOT pidPower.bInitialized THEN
    pidPower.tSample := T#100ms;
    pidPower.rKp := 0.5;
    pidPower.rKi := 0.05;
    pidPower.rKd := 0.0;
    pidPower.rMinOut := 0.0;
    pidPower.rMaxOut := 100.0;
    pidPower.bInitialized := TRUE;
END_IF

```

Основний цикл керування

```

(* ===== *)
(* === 1. РОЗРАХУНОК CO2 === *)
(* ===== *)

CO2_calc := Power_meas * k_em; (* модельне CO2 *)

(* ===== *)
(* === 2. PID РЕГУЛЮВАННЯ === *)
(* ===== *)

```

```

pidPower.rSP := SP_Power;
pidPower.rPV := Power_meas;
pidPower.bEnable := Mode_Auto;
pidPower();

PID_Out := pidPower.rOUT;    (* Результат PID *)

(* ===== *)
(* === 3. ЕКО-КОРЕКТОР CO2 === *)
(* ===== *)

```

```

IF CO2_calc > SP_CO2_Max THEN
    eco_Corrector := -Keco * (CO2_calc - SP_CO2_Max);
ELSE
    eco_Corrector := 0.0;
END_IF

```

```

(* ===== *)
(* === 4. СУМАРНИЙ ВИХІД === *)
(* ===== *)

```

```

U_cmd_raw := PID_Out + eco_Corrector;

```

```

(* обмеження *)
IF U_cmd_raw > 100.0 THEN
    U_cmd_limited := 100.0;
ELSIF U_cmd_raw < 0.0 THEN
    U_cmd_limited := 0.0;
ELSE
    U_cmd_limited := U_cmd_raw;
END_IF

```

```

(* ===== *)
(* === 5. ВИХІД НА ОБЛАДНАННЯ === *)
(* ===== *)

```

```

IF Mode_Auto THEN
    ValveFuel_Output := U_cmd_limited; (* % відкриття клапана *)
ELSE

```

```
(* в ручному режимі управління з HMI *)  
ValveFuel_Output := ValveFuel_Output;  
END_IF
```

Структура проєкту

```
↳ Application  
  ↳ PRG_Main  
  ↳ FB_PowerModel (опціонально)  
  ↳ GLOBAL_VARIABLES  
  ↳ HMI
```