

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-48>

УДК 681.5:665.6

ЦАПАР Віталій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-8347-7941>

e-mail: cwst@ukr.net

БОНДАР Вадим

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0000-3320-4550>

e-mail: v.v.bondar@kpi.ua

РОЗРОБКА ГІБРИДНОГО М'ЯКОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ ГАСОВОЇ ФРАКЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ АТМОСФЕРНОЮ КОЛОНОЮ

У роботі розглядається розробка гібридного м'якого сенсора (soft sensor) температури спалаху гасової фракції для системи прогнозного управління (Model Predictive Control, MPC) атмосферною колоною установки атмосферно-вакуумної трубочатки. Основною проблемою оперативного контролю якості нафтопродуктів є дискретність та значна затримка лабораторних вимірювань (30–60 хвилин), що унеможливує їх використання в контурах автоматичного регулювання. Запропоновано гібридний підхід до побудови м'якого сенсора, в якому структура моделі формується на основі фізичних закономірностей процесу атмосферної дистиляції, а числові значення параметрів визначаються за експериментальними даними промислової експлуатації. Модель являє собою лінійну регресію з п'ятьма предикторами: температурою відбору гасу, відношенням витрат водяної пари до гасової фракції, густиною сировини та температурою верху колони. Ідентифікацію параметрів виконано методом регуляризованих найменших квадратів (ridge regression) за 724 спостереженнями. Розроблено механізм адаптивної корекції з експоненційним фільтром ($\alpha = 0,3$) для компенсації дрейфу характеристик. Досягнуто точність оцінювання $RMSE = 2,15^{\circ}C$ при $R^2 = 0,88$, що знаходиться в межах похибки лабораторного методу. Порівняльний аналіз підтвердив перевагу гібридної моделі над PLS та ANN. Імітаційне моделювання інтегрованої системи «м'який сенсор + MPC» продемонструвало покращення якості управління на 50% та гарантоване виконання критичного обмеження на температуру спалаху.

Ключові слова: м'який сенсор, температура спалаху, атмосферна дистиляція, прогнозує управління, гібридна модель, нафтопереробка.

TSAPAR Vitalii, BONDAR Vadym

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT OF A HYBRID SOFT SENSOR FOR KEROSENE FRACTION FLASH POINT IN A MODEL PREDICTIVE CONTROL SYSTEM OF AN ATMOSPHERIC COLUMN

This paper presents the development and experimental validation of a hybrid soft sensor for estimating the flash point of the kerosene fraction within a Model Predictive Control (MPC) system of an atmospheric distillation column. In industrial refining processes, one of the key problems of real-time quality control is the discreteness and significant delay of laboratory measurements, which typically range from 30 to 60 minutes. Such delays make laboratory data unsuitable for direct integration into automatic control loops, leading to suboptimal control decisions and reduced operational efficiency.

To address this limitation, a hybrid modeling approach is proposed. In this approach, the structure of the model is derived from the physical principles governing the atmospheric distillation process, ensuring interpretability and consistency with process dynamics, while the numerical values of the parameters are identified from historical industrial data. The resulting model is formulated as a linear regression with five predictors that reflect the main technological factors affecting the flash point of the kerosene fraction. These predictors include kerosene withdrawal temperature, the steam-to-kerosene flow ratio, feedstock density, column top temperature, and an additional operational parameter representing process variability.

Parameter identification was performed using ridge regression to mitigate multicollinearity and improve model stability. The training dataset consisted of 724 industrial observations collected from a real operating distillation unit. In addition, an adaptive correction mechanism based on an exponential filter with a smoothing coefficient $\alpha = 0.3$ was implemented to compensate for characteristic model drift caused by changes in feedstock composition and operating conditions.

The developed soft sensor demonstrated high predictive accuracy, achieving an RMSE of $2.15^{\circ}C$ and a coefficient of determination $R^2 = 0.88$, which lies within the typical error range of laboratory flash point measurements. A comparative analysis with alternative data-driven approaches, including Partial Least Squares (PLS) regression and Artificial Neural Networks (ANN), confirmed the superiority of the proposed hybrid model in terms of robustness, interpretability, and stability.

Simulation of the integrated "soft sensor + MPC" control system showed that the use of the developed estimator improves control performance by approximately 50% and ensures reliable compliance with the critical flash point constraint during operation. These results demonstrate the practical applicability of the proposed approach for real-time quality monitoring and advanced process control in industrial distillation systems.

Key words: soft sensor, flash point, atmospheric distillation, model predictive control, hybrid model, oil refining.

Стаття надійшла до редакції / Received 26.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 19.01.2026

Опубліковано / Published 05.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Цапар Віталій, Бондар Вадим

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Нафтопереробна промисловість є стратегічно важливою галуззю економіки, що забезпечує виробництво моторних палив, мастильних матеріалів та сировини для нафтохімічного синтезу. Установки первинної переробки нафти, зокрема установки атмосферно-вакуумної трубчатки (АВТ), переробляють 100% сировини, що надходить на нафтопереробний завод (НПЗ), визначаючи ефективність усього виробництва [1].

Ключовим завданням управління процесом атмосферної дистиляції є забезпечення якості продуктів розділення відповідно до вимог нормативних документів. Зокрема, для газової фракції критичним показником є температура спалаху у закритому тиглі, яка характеризує вміст легких вуглеводнів та визначає пожежобезпечність палива при зберіганні й транспортуванні. Згідно з ГОСТ 10227 температура спалаху авіаційного гасу марки ТС-1 повинна становити не менше 28°C, а для палива підвищеної якості — не менше 38°C [2].

Основною проблемою оперативного контролю якості нафтопродуктів є дискретність та значна затримка лабораторних вимірювань. Визначення температури спалаху за стандартною методикою (ГОСТ 6356) потребує відбору проби, її транспортування до лабораторії та проведення аналізу, що загалом займає від 30 до 60 хвилин [3]. При цьому частота вимірювань зазвичай не перевищує 1–4 рази на зміну. Така затримка унеможливує використання показників якості безпосередньо в контурах автоматичного регулювання та призводить до запізненої реакції на відхилення технологічного режиму.

Перспективним підходом до вирішення цієї проблеми є застосування м'яких сенсорів (soft sensors, virtual sensors) — математичних моделей, що забезпечують оцінювання показників якості в реальному часі на основі безперервно вимірюваних технологічних параметрів [4]. М'які сенсори набули широкого поширення в нафтопереробній, хімічній та фармацевтичній промисловості, оскільки дозволяють суттєво підвищити оперативність контролю без встановлення дорогих поточних аналізаторів.

Особливої актуальності застосування м'яких сенсорів набуває при впровадженні систем прогнозуючого управління на основі моделі (Model Predictive Control, MPC). Системи MPC потребують безперервної інформації про керовані змінні для формування прогнозу та обчислення оптимальних керуючих впливів [5]. Інтеграція м'яких сенсорів із системою MPC дозволяє реалізувати управління за показниками якості продукції, що є неможливим при використанні лише лабораторного контролю.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Забезпечення якості продуктів атмосферної дистиляції є одним із ключових завдань управління установками первинної переробки нафти. Показники якості нафтопродуктів, такі як температура спалаху, фракційний склад, густина та вміст сірки, регламентуються національними та міжнародними стандартами і визначають можливість реалізації продукції [6]. Відхилення від нормативних вимог призводить до необхідності переробки некондиційної продукції або її уцінки, що спричиняє значні економічні втрати.

Традиційний підхід до контролю якості базується на періодичному лабораторному аналізі відібраних проб. Для визначення температури спалаху у закритому тиглі за методом Пенскі-Мартенса загальний час від відбору проби до отримання результату становить 30–60 хвилин, а частота аналізів зазвичай не перевищує 1–4 рази на зміну [7]. Альтернативою є застосування поточних аналізаторів, однак їх висока вартість (50–150 тис. USD), потреба в регулярному обслуговуванні та обмежена надійність обмежують широке впровадження [8].

М'які сенсори являють собою математичні моделі, що забезпечують оцінювання показників якості на основі безперервно вимірюваних технологічних параметрів — температур, тисків, витрат [9]. За принципом побудови м'які сенсори поділяються на перші-принципні (first-principles), емпіричні (data-driven) та гібридні (grey-box) [10]. Гібридний підхід поєднує переваги обох методів: структура моделі формується на основі фізичних закономірностей, а числові значення параметрів визначаються за експериментальними даними.

Для задачі оцінювання температури спалаху газової фракції гібридний підхід є найбільш обґрунтованим, оскільки існує відома фізична залежність між температурою спалаху та фракційним складом продукту, зокрема температурою початку кипіння [11]. Суттєвим обмеженням м'яких сенсорів є схильність до дрейфу характеристик, для компенсації якого необхідно передбачити механізм адаптивної корекції за результатами лабораторних аналізів [12]. При використанні м'якого сенсора в системі MPC його похибка безпосередньо впливає на якість продукції, тому точність повинна бути співмірною з похибкою лабораторного методу [13].

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ ОЗНАЧЕНА СТАТТЯ

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі м'яких сенсорів для нафтопереробної промисловості, питання розробки гібридних моделей для оцінювання температури спалаху газової фракції з інтеграцією в систему прогнозуючого управління залишається недостатньо розкритим. Більшість існуючих робіт зосереджені або на чисто емпіричних підходах (PLS, ANN, SVM), які мають обмежену здатність до

екстраполяції, або на складних перших-принципних моделях, непридатних для практичного впровадження через трудомісткість розробки. Крім того, недостатньо дослідженим є питання адаптивної корекції м'яких сенсорів та їх впливу на якість управління в складі систем MPC.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної роботи є розробка гібридного м'якого сенсора температури спалаху газової фракції для системи прогноуючого управління атмосферою колоною установки АВТ. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: обґрунтувати структуру м'якого сенсора на основі фізичних закономірностей процесу; виконати ідентифікацію параметрів за експериментальними даними; розробити механізм адаптивної корекції для компенсації дрейфу характеристик; дослідити точність сенсора та його вплив на якість управління в складі системи MPC.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес атмосферної дистиляції нафти на установці атмосферно-вакуумної трубчаткі АВТ-6 потужністю 6 млн тонн на рік. Основним апаратом є атмосферна ректифікаційна колона діаметром 5,6 м та висотою 55 м, обладнана 45 клапанними тарілками. Робочий тиск у колоні становить 0,12–0,18 МПа, температура низу — 350–360°C, температура верху — 105–120°C.

З колони відводяться: бензинова фракція (до 180°C) — з верху; газова фракція (140–240°C) — боковий погін з тарілки 32; дизельна фракція (180–360°C) — боковий погін з тарілки 18; мазут (понад 360°C) — з низу. Газова фракція після відбору направляється у відпарну колону (стрипінг-секцію), де за допомогою водяної пари відганяються легкі вуглеводні для підвищення температури спалаху. Схему відбору та облагородження газової фракції наведено на рис. 1.

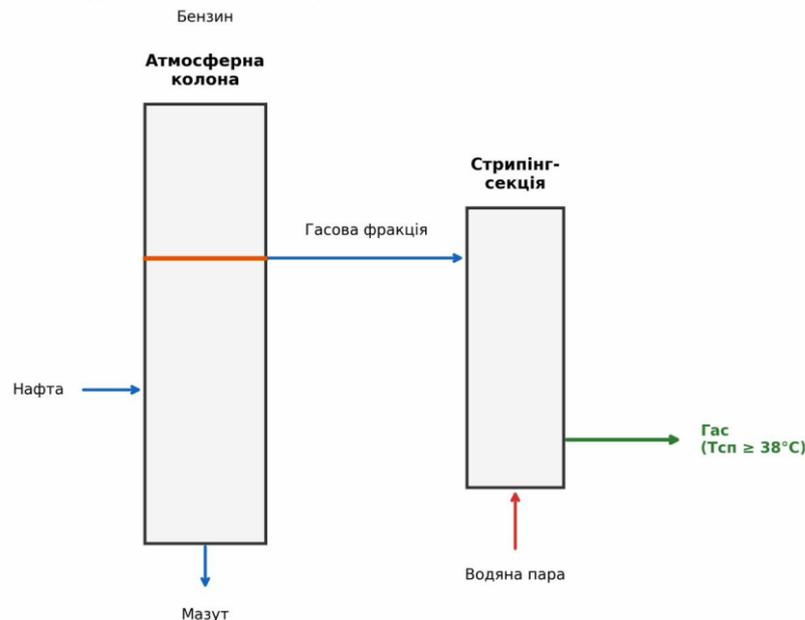


Рис. 1. Схема відбору газової фракції з атмосферної колони

Температура спалаху є ключовим показником якості газової фракції. Згідно з ГОСТ 10227 для палива підвищеної якості вона повинна становити не менше 38°C. Температура спалаху залежить від параметрів технологічного режиму колони та стрипінг-секції, зокрема від температури точки відбору гасу, витрати водяної пари, витрати відбору гасу, температури верху колони та густини сировини [14].

Розробка структури м'якого сенсора. Температура спалаху вуглеводневих фракцій визначається вмістом легких компонентів. Існує емпірична залежність між температурою спалаху $T_{сп}$ та температурою початку кипіння фракції $T_{пк}$ [14]:

$$T_{сп} = a \cdot T_{пк} + b \quad (1)$$

де a, b - емпіричні коефіцієнти; $T_{сп}$ - температура спалаху; $T_{пк}$ - температура початку кипіння фракції.

На основі аналізу фізичних закономірностей запропоновано структуру гібридного м'якого сенсора у вигляді лінійної регресійної моделі:

$$\hat{T}_{сп} = c_0 + c_1 \cdot T_{відб} + c_2 \cdot \frac{F_{пари}}{F_{гасу}} + c_3 \cdot \rho_{сир} + c_4 \cdot T_{верху}, \quad (2)$$

де $\hat{T}_{сп}$ - оцінка температури спалаху, °C; $T_{відб}$ - температура в точці відбору гасу, °C; $F_{пари}/F_{гасу}$ - відношення витрат водяної пари до газової фракції; $\rho_{сир}$ - густина нафтової сировини, кг/м³; $T_{верху}$ - температура верху колони, °C; c_0-c_4 - коефіцієнти моделі.

Структуру сенсора наведено на рис. 2.

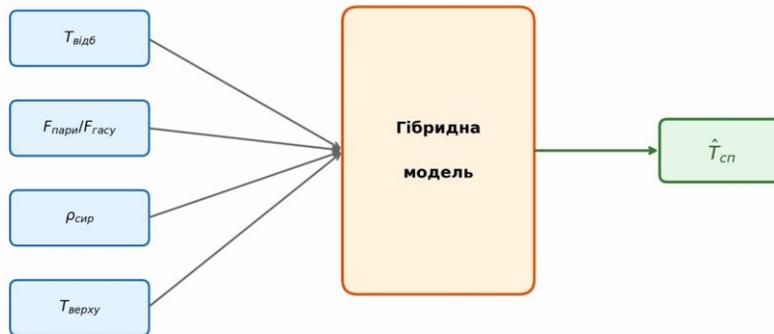


Рис. 2. Структура гібридного м'якого сенсора температури спалаху

Ідентифікація параметрів. Ідентифікацію виконано за архівними даними промислової експлуатації АВТ-6. Період збору даних — 6 місяців, загальний обсяг вибірки — 724 пари «лабораторний аналіз — технологічні параметри». Після попередньої обробки (видалення аномальних спостережень за правилом трьох сигм) обсяг склав 687 спостережень. Вибірку поділено хронологічно: навчальна (70%, 481 спостереження) та тестова (30%, 206 спостережень).

Для оцінювання коефіцієнтів застосовано метод регуляризованих найменших квадратів (ridge regression) з критерієм:

$$J(c) = \sum_i (T_{сп,i} - \hat{T}_{сп,i})^2 + \lambda \sum_j c_j^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\lambda = 0,1$ - параметр регуляризації, визначений методом 5-fold cross-validation; $T_{сп,i}$ - виміряне значення температури спалаху для і-го спостереження; $\hat{T}_{сп,i}$ - оцінка м'яким сенсором для і-го спостереження; c_j - j-й коефіцієнт моделі.

Результати ідентифікації наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Ідентифіковані коефіцієнти м'якого сенсора

Коефіцієнт	Предиктор	Значення	p-значення
c_0	Вільний член	-52,8	<0,001
c_1	$T_{відб}$	0,485	<0,001
c_2	$F_{пари}/F_{гасу}$	18,4	<0,001
c_3	$\rho_{сир}$	0,028	0,002
c_4	$T_{верху}$	-0,156	<0,001

Усі коефіцієнти є статистично значущими на рівні $\alpha = 0,01$. Найбільший вплив на температуру спалаху має температура відбору гасу ($c_1 = 0,485$): підвищення температури відбору на 1°C призводить до зростання температури спалаху приблизно на 0,5°C. Коефіцієнт детермінації моделі на навчальній вибірці $R^2 = 0,89$.

Механізм адаптивної корекції. Точність м'якого сенсора в процесі тривалої експлуатації може знижуватися внаслідок зміни складу сировини, забруднення теплообмінних поверхонь та тарілок колони, старіння давачів. Замість повної переідентифікації параметрів застосовано підхід корекції вільного члена за поточною похибкою оцінювання. При надходженні результату лабораторного аналізу обчислюється похибка, яка згладжується експоненціальним фільтром з коефіцієнтом $\alpha = 0,3$. Рекомендована періодичність корекції — не більше 4 годин. Схему м'якого сенсора з адаптивною корекцією наведено на рис. 3.

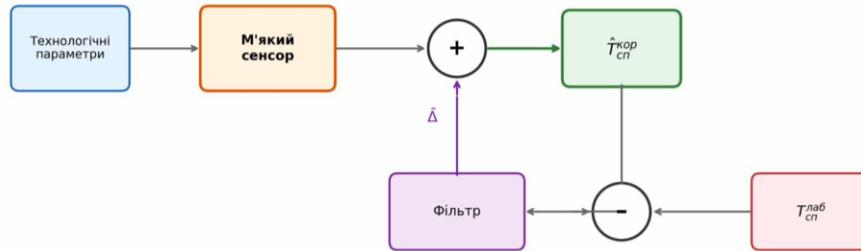


Рис. 3. Схема м'якого сенсора з адаптивною корекцією

Валідація та аналіз результатів. Валідацію виконано на тестовій вибірці (206 спостережень). Результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2.

Показники точності гібридного м'якого сенсора

Показник	Навчальна	Тестова
RMSE, °C	1,98	2,15
MAE, °C	1,54	1,72
R ²	0,89	0,88
Частка похибок < 3°C, %	87	85

Середньоквадратична похибка RMSE = 2,15°C знаходиться в межах похибки лабораторного методу (±2–4°C). Порівняння з альтернативними методами (табл. 3) показує перевагу гібридної моделі.

Таблиця 3.

Порівняння точності різних типів м'яких сенсорів

Тип сенсора	Параметрів	RMSE, °C	R ²
PLS	8	2,31	0,85
ANN	71	2,48	0,83
Гібридна	5	2,15	0,88

Порівняння оцінок м'яких сенсорів з лабораторними даними наведено на рис. 4, гістограму розподілу похибок — на рис. 5.

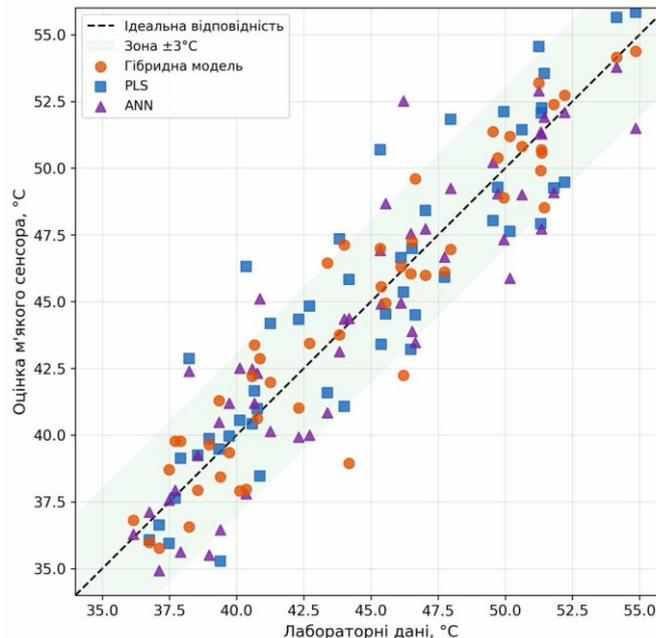


Рис. 4. Порівняння оцінок м'яких сенсорів з лабораторними даними

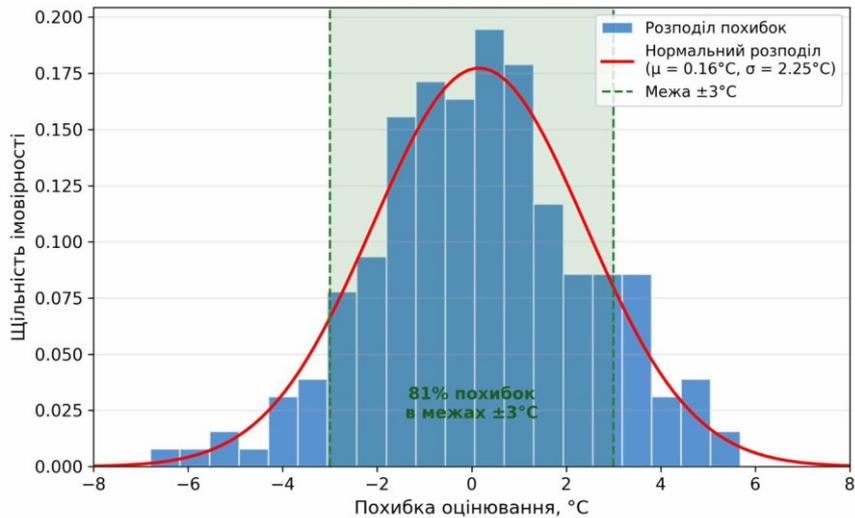


Рис. 5. Гістограма розподілу похибок м'якого сенсора

Інтеграція з системою прогнозуючого управління. Розроблений м'який сенсор призначений для використання в контурі прогнозуючого управління атмосферною колоною. Структуру інтегрованої системи наведено на рис. 6.

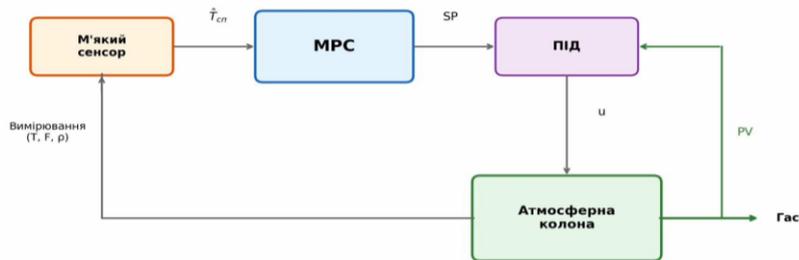


Рис. 6. Структура інтегрованої системи управління з м'яким сенсором

Для оцінки ефективності виконано порівняльне моделювання з базовою системою на основі ПІД-регуляторів. Результати (табл. 4) показують покращення якості управління на 50%.

Таблиця 4.

Порівняння якості управління: MPC та ПІД

Показник	ПІД	MPC	Покращення
Середнє відхилення T_{sp} , °C	3,2	1,6	50%
Частка часу з $T_{sp} < 38^{\circ}\text{C}$, %	3,1	0	100%
Час встановлення, хв	72	35	51%

Динаміку температури спалаху при збуренні для обох систем наведено на рис. 7. Інтегрована система гарантує виконання критичного обмеження ($\geq 38^{\circ}\text{C}$), тоді як базова система допускає його порушення.

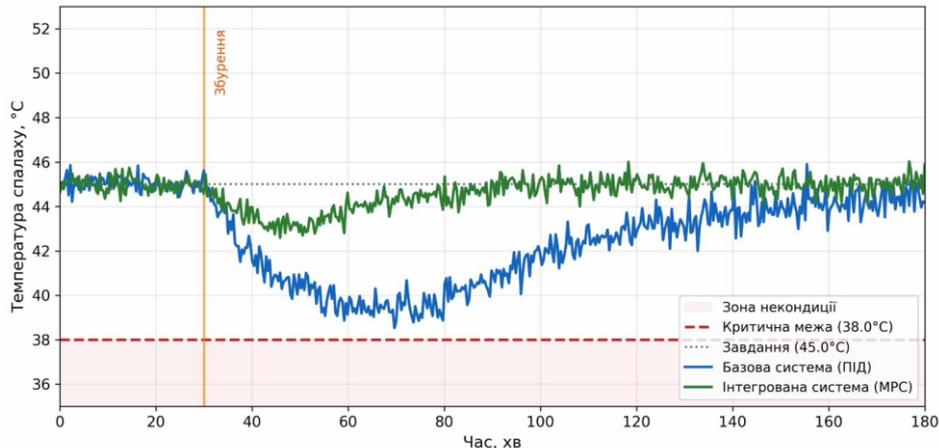


Рис. 7. Порівняння динаміки температури спалаху: ПІД та MPC

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМКУ

У роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки гібридного м'якого сенсора температури спалаху газової фракції для системи прогнозуючого управління атмосферою колоною. Обґрунтовано доцільність застосування м'яких сенсорів як альтернативи лабораторному контролю та поточним аналізаторам для оперативного оцінювання показників якості нафтопродуктів.

Розроблено структуру гібридного м'якого сенсора на основі фізичних закономірностей процесу з п'ятьма предикторами: температурою відбору газу, відношенням витрат пари до газу, густиною сировини та температурою верху колони. Виконано ідентифікацію параметрів за 724 спостереженнями промислової експлуатації. Усі коефіцієнти статистично значущі на рівні $\alpha = 0,01$.

Розроблено механізм адаптивної корекції за лабораторними даними з експоненційним фільтром ($\alpha = 0,3$) для компенсації дрейфу характеристик. Досягнуто точність оцінювання $RMSE = 2,15^\circ C$ при $R^2 = 0,88$, що знаходиться в межах похибки лабораторного методу ($\pm 2-4^\circ C$). 85% оцінок мають похибку менше $3^\circ C$. Порівняльний аналіз показав перевагу гібридної моделі над PLS ($RMSE 2,31^\circ C$) та ANN ($RMSE 2,48^\circ C$) при найменшій кількості параметрів.

Імітаційне моделювання інтегрованої системи «м'який сенсор + MPC» підтвердило покращення якості управління на 50% та гарантоване виконання критичного обмеження на температуру спалаху. Практичне значення результатів полягає в можливості підвищення ефективності управління процесом атмосферної дистиляції без суттєвих капітальних витрат.

Напрямами подальших досліджень є розробка м'яких сенсорів для інших показників якості нафтопродуктів (фракційний склад, вміст сірки), дослідження робастності системи управління до похибок сенсора, а також впровадження розробленої системи на діючій промисловій установці.

References

1. Griffiths, Steve & Sovacool, Benjamin & Kim, Jinsoo & Bazilian, Morgan & Uratani, Joao. (2022). Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. *Energy Research & Social Science*. 89. 102542. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102542>
2. Sklabinskyi V.I. (2011). *Technological Fundamentals of Oil and Gas Processing: Study Guide*. V.I. Sklabinskyi, O.O. Liaposhenko, A.Ye. Artiukhov. Sumy: Sumy State University. 186 p.: ill.
3. Shaporev V.P., Pliatsuk L.D., Moiseiev V.F., Pitak I.V., Manoilo Ye.V., Vasyliiev M.I., Kuznietsov P.V. (2013). *Special Equipment and Processes of Organic Chemistry: Textbook*. Kharkiv. 272 p.
4. Ferreira, Jimena & Pedemonte, Martin & Torres, Ana. (2022). Development of a Machine Learning-based Soft Sensor for an Oil Refinery's Distillation Column. *Computers & Chemical Engineering*. 161. 107756. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107756>
5. Niño-Adan, Iratxe & Landa-Torres, Itziar & Manjarres, Diana & Portillo, Eva. (2020). Soft-sensor design for vacuum distillation bottom product penetration classification. *Applied Soft Computing*. 102. 107072. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107072>
6. Mendia, Izaskun & Gil-López, Sergio & Landa-Torres, Itziar & Orbe, Lucia & Maqueda, Erik. (2022). Machine learning based adaptive soft sensor for flash point inference in a refinery realtime process. *Results in Engineering*. 13. 100362. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100362>
7. Kwon, Hyukwon & Oh, Kwang & Choi, Yeongryeol & Chung, Yongchul & Kim, Junghwan. (2021). Development and application of machine learning-based prediction model for distillation column. *International Journal of Intelligent Systems*. 36. <https://doi.org/10.1002/int.22368>
8. Acosta-Pavas, Juan & Robles Rodriguez, Carlos & Griol, David & Daboussi, Fayza & Aceves-Lara, Cesar & Corrales, David. (2024). Soft sensors based on interpretable learners for industrial-scale fed-batch fermentation: Learning from simulations. *Computers & Chemical Engineering*. 187. 108736. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108736>
9. Sheng, Weiwei & Qian, Jinchuan & Song, Zhihuan & Zhang, Xinmin. (2024). A review of just-in-time learning-based soft sensor in industrial process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 102. 1884-1898. <https://doi.org/10.1002/cjce.25169>
10. Jiang, Yuchen & Yin, Shen & Dong, Jingwei & Kaynak, Okyay. (2020). A Review on Soft Sensors for Monitoring, Control and Optimization of Industrial Processes. *IEEE Sensors Journal*. 1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033153>
11. Bedda, Kahina. (2024). Prediction of Flash Points of Petroleum Middle Distillates Using an Artificial Neural Network Model. *Petroleum Chemistry*. 64. <https://doi.org/10.1134/S0965544124040066>
12. Sun, Xiaoyu & Krakauer, Nathaniel & Politowicz, Alexander & Chen, Wei-Ting & Li, Qiying & Li, Zuoyi & Shao, Xianjia & Sunaryo, Alfred & Shen, Mingren & Wang, James & Morgan, Dane. (2020). Assessing Graph-based Deep Learning Models for Predicting Flash Point. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.11315>
13. Curreri, Francesco & Patané, Luca & Xibilia, M.G.. (2021). Soft Sensor Transferability: A Survey. *Applied Sciences*. 11. 7710. <https://doi.org/10.3390/app11167710>
14. Xiang, Qiuyan & Zi, Lingling & Cong, Xin & Wang, Yan. (2023). Concept Drift Adaptation Methods under the Deep Learning Framework: A Literature Review. *Applied Sciences*. 13. 6515. <https://doi.org/10.3390/app13116515>