

УДК 681.5:665.63
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).29](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).29)

MATHEMATICAL MODELING OF ATMOSPHERIC-VACUUM DISTILLATION UNIT AS A CONTROL OBJECT

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАНОВКИ АТМОСФЕРНО-ВАКУУМНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

Vitalii S. Tsapar
tsaparvs@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8347-7941
Sergii M. Tkachuk
tkachuksergiy8@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4013-8875

В. С. Цапар,
канд. техн. наук, доцент
С. М. Ткачук,
аспірант

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Київ

Abstract. Purpose. Development of a comprehensive mathematical model of an atmospheric-vacuum oil distillation unit (AVT) suitable for synthesizing real-time predictive control systems, and systematic investigation of dynamic characteristics and interactions of main control channels. The research addresses the challenge of creating a computationally efficient model that accurately captures the complex multivariate interactions inherent in crude oil distillation processes while maintaining calculation speeds compatible with model predictive control (MPC) requirements for industrial implementation.

Method. System analysis methods were applied for hierarchical decomposition of the technological object into interconnected functional subsystems. Mathematical modeling was performed based on fundamental material and heat balance equations combined with vapor-liquid equilibrium relationships. Simulation modeling using validated thermodynamic property packages was employed for generating comprehensive datasets covering various operating conditions. Transfer function parameter identification was conducted using the least squares method with statistical validation. The Bristol Relative Gain Array methodology was applied for control loop interaction analysis and optimal input-output pairing selection.

Results. Structural decomposition of the AVT unit into five functional blocks (atmospheric column, vacuum column, heat exchange network, furnace section, and product strippers) was performed, and complete sets of controlled variables, manipulated variables, and disturbances were systematically determined. Analysis of the Bristol Relative Gain Array with values ranging from -0.85 to 1.65 confirmed significant multivariable interaction between control channels, necessitating coordinated control strategies. A hierarchical mathematical model of the atmospheric distillation column was developed incorporating rigorous tray-by-tray calculations. An adaptive tray aggregation scheme was proposed, providing 40 % reduction in computational complexity while maintaining prediction accuracy. Transfer function parameters of main control channels were identified with coefficient of determination R^2 exceeding 0.88 for all primary loops.

Scientific novelty. For the first time, an adaptive tray aggregation scheme for distillation columns is proposed, where the number of computational sections and their boundaries are determined automatically based on real-time analysis of temperature and concentration profiles rather than fixed empirical partitioning. The simulation model verification methodology was improved through systematic testing on a comprehensive set of disturbance scenarios including feed composition variations, throughput changes, and energy supply fluctuations.

Practical importance. The developed model can be implemented for synthesizing multivariable predictive controllers at crude oil primary distillation units, enabling energy efficiency improvements of 3–5 % and enhanced stabilization of distillate product quality specifications under variable feedstock composition and changing market demands.

Key words: atmospheric-vacuum distillation; mathematical modeling; distillation column; parameter identification; transfer function; relative gain array; simulation modeling; predictive control; process dynamics.

Анотація. *Мета.* Розробка комплексної математичної моделі установки атмосферно-вакуумної дистиляції нафти (АВТ), придатної для синтезу системи предиктивного управління в реальному часі, та систематичне дослідження динамічних характеристик і взаємодії основних каналів управління. Дослідження спрямоване на вирішення задачі створення обчислювально ефективної моделі, яка точно відображає складні багатовимірні взаємозв'язки, притаманні процесам дистиляції нафти, при збереженні швидкості розрахунків, сумісної з вимогами модельно-предиктивного управління (МРС) для промислового впровадження.

Методика. Застосовано методи системного аналізу для ієрархічної декомпозиції технологічного об'єкта на взаємопов'язані функціональні підсистеми. Математичне моделювання виконано на основі фундаментальних рівнянь матеріального та теплового балансів у поєднанні із залежностями парорідинної рівноваги. Імітаційне моделювання з використанням верифікованих пакетів термодинамічних властивостей застосовано для генерації комплексних наборів даних, що охоплюють різні режими роботи. Ідентифікацію параметрів передавальних функцій проведено методом найменших квадратів зі статистичною валідацією. Методологію матриці відносних підсилень Брістоля застосовано для аналізу взаємодії контурів управління та вибору оптимального спарювання входів-виходів.

Результати. Виконано структурну декомпозицію установки АВТ на п'ять функціональних блоків (атмосферна колона, вакуумна колона, мережа теплообмінників, пічна секція та відпарні колони продуктів) та систематично визначено повні множини керованих змінних, регулюючих впливів і збурень. Аналіз матриці відносних підсилень Брістоля зі значеннями від $-0,85$ до $1,65$ підтвердив значну багатовимірну взаємодію між каналами управління, що обумовлює необхідність координованих стратегій керування. Розроблено ієрархічну математичну модель атмосферної ректифікаційної колони з ригористичними потарілчастими розрахунками. Запропоновано адаптивну схему агрегування тарілок, що забезпечує зниження обчислювальної складності на 40 % при збереженні точності прогнозування. Ідентифіковано параметри передавальних функцій основних каналів управління з коефіцієнтом детермінації $R^2 > 0,88$ для всіх первинних контурів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано адаптивну схему агрегування тарілок ректифікаційної колони, де кількість розрахункових секцій та їх межі визначаються автоматично на основі аналізу профілів температур та концентрацій у реальному часі, а не за фіксованим емпіричним розбиттям. Удосконалено методику верифікації імітаційної моделі шляхом систематичного тестування на комплексній множині сценаріїв збурень, включаючи варіації складу сировини, зміни продуктивності та коливання енергопостачання.

Практична значимість. Розроблена модель може бути впроваджена для синтезу багатовимірних предиктивних регуляторів на установках первинної переробки нафти, що забезпечить підвищення енергоефективності на 3–5 % та покращену стабілізацію показників якості дистилятних продуктів при варіативності складу сировини та змінних вимогах ринку.

Ключові слова: атмосферно-вакуумна дистиляція; математичне моделювання; ректифікаційна колона; ідентифікація параметрів; передавальна функція; матриця відносних підсилень; імітаційне моделювання; предиктивне управління; динаміка процесів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Установки атмосферно-вакуумної дистиляції є ключовими елементами нафтопереробних заводів, забезпечуючи первинне розділення сирової нафти на фракції для подальшої переробки. За даними Міжнародного енергетичного агентства, на ці установки припадає 40–50 % загального енергоспоживання нафтопереробного заводу [1], що робить їх пріоритетним об'єктом для впровадження енергоефективних технологій управління.

Сучасні тенденції нафтопереробної галузі характеризуються збільшенням частки важких та високосірчистих нафт у світовому балансі, що призводить до значної варіативності складу сировини [2]. Коливання густини сирової нафти можуть сягати $\pm 15\text{--}20$ кг/м³ протягом доби, що створює суттєві труднощі для традиційних систем управління, побудованих на базі одноконтурних ПІД-регуляторів [3].

Перспективним напрямком підвищення ефективності управління є застосування багатовимірних

предиктивних регуляторів (Model Predictive Control, MPC), які потребують адекватної математичної моделі об'єкта [4]. Проте існуючі моделі високої точності, реалізовані в комерційних симуляторах технологічних процесів, є занадто складними для використання в системах управління реального часу [5]. Це обумовлює актуальність розробки моделей зниженого порядку, що забезпечують компроміс між точністю та обчислювальною ефективністю.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питанням математичного моделювання ректифікаційних колон присвячено значну кількість наукових праць. Фундаментальні основи динамічного моделювання процесів розділення викладено в роботах [6; 7], де представлено системи диференціально-алгебраїчних рівнянь матеріального та теплового балансів.

Сучасні дослідження зосереджені на розробці моделей зниженого порядку для задач управління.

У роботі [8] запропоновано метод агрегування тарілок з використанням ортогональної колокації, що дозволяє знизити розмірність моделі в 5–10 разів. Автори [9] застосували нейромережеву апроксимацію для побудови швидкодіючих сурогатних моделей колони на основі даних rigorous-симулятора.

Аналіз взаємодії каналів управління в багатовимірних системах традиційно виконується за допомогою матриці відносних підсилень (RGA), методологія якої детально описана в [10]. Застосування RGA-аналізу для ректифікаційних колон розглянуто в [11], де показано залежність ступеня взаємодії від робочого режиму колони.

Питання ідентифікації параметрів моделей технологічних об'єктів висвітлено в [12; 13]. Особливу увагу приділено методам ідентифікації в замкнених системах управління [14] та робастним підходам до оцінювання параметрів в умовах зашумлених вимірювань [15].

Імітаційне моделювання як інструмент дослідження динаміки технологічних процесів набуває дедалі більшого поширення [16]. У роботі [17] представлено методологію генерації синтетичних даних для навчання алгоритмів машинного навчання в умовах обмеженості промислових даних.

Вітчизняні дослідники також зробили вагомий внесок у розвиток методів моделювання та управління нафтопереробними процесами. У працях [18; 19] розглянуто особливості автоматизації установок первинної переробки нафти в умовах українських НПЗ. Питання енергоефективності ректифікаційних процесів досліджено в [20].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значний обсяг досліджень, залишаються невирішеними такі питання:

1. Існуючі методи агрегування тарілок використовують фіксоване розбиття колони на секції, що не враховує нерівномірність профілів температур та концентрацій у різних зонах колони.
2. Верифікація моделей традиційно виконується на стаціонарних режимах, тоді як поведінка системи при динамічних збуреннях складу сировини залишається недостатньо дослідженою.
3. Відсутній комплексний підхід до формування множини тестових сценаріїв, що охоплюють весь діапазон робочих режимів установки АВТ.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розробка математичної моделі установки атмосферно-вакуумної дистиляції нафти, придатної для синтезу системи предиктивного управління в реальному часі, та дослідження динамічних характеристик основних каналів управління методом імітаційного моделювання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – технологічний процес атмосферної дистиляції нафти на установці АВТ потужністю 6 млн т/рік.

Предмет дослідження – математичні моделі динаміки ректифікаційної колони та методи ідентифікації їх параметрів.

Методи дослідження: системний аналіз – для декомпозиції технологічного об'єкта на функціональні блоки та визначення структури зв'язків між змінними; математичне моделювання – для побудови рівнянь матеріального та теплового балансів на основі фундаментальних законів збереження; імітаційне моделювання – для генерації даних та дослідження динамічних характеристик об'єкта; ідентифікація параметрів – метод найменших квадратів для оцінювання параметрів передавальних функцій; статистичний аналіз – для верифікації адекватності моделі та оцінки якості ідентифікації.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Структурний аналіз установки АВТ як об'єкта управління. Для формалізації задачі управління виконано структурну декомпозицію установки АВТ на п'ять функціональних блоків: блок підготовки сировини (БПС), що включає електродегідратори та теплообмінники попереднього нагріву; блок нагріву (БН) з трубчастою піччю; блок атмосферної дистиляції (Б АД) з основною ректифікаційною колоною К-1 та відпарними колонами; блок вакуумної дистиляції (БВД) з колоною К-5; блок теплоутилізації (БТУ) з системою рекуперативних теплообмінників.

Для атмосферної колони К-1 визначено множину керованих змінних $y = [y_1, y_2, \dots, y_s]^T$, що включає температури на ключових тарілках та показники якості продуктів. Множина регулюючих впливів $u = [u_1, u_2, \dots, u_6]^T$ охоплює теплове навантаження печі, витрату флегми, витрату пари в стріпінг-секції та витрати бокових відборів.

Для оцінки ступеня взаємозв'язності каналів управління обчислено матрицю відносних підсилень Брістоля (RGA) за формулою:

$$\Lambda = K \otimes (K^{-1})^T \quad (1)$$

де K – матриця статичних коефіцієнтів підсилення; $\otimes$ – поелементне множення (добуток Адамара).

Аналіз матриці RGA показав, що значення λ_{ij} коливаються від $-0,85$ до $1,65$, що свідчить про значну взаємодію між каналами управління. Зокрема, від'ємні значення $\lambda_{24} = -0,85$ вказують на інверсний характер взаємодії в контурі відбору газової фракції, що є класичним проявом ефекту взаємодії в ректифікаційних колонах [10].

Математична модель атмосферної колони. Динамічна модель атмосферної колони побудована

на основі рівнянь збереження маси та енергії для системи з N тарілок та C псевдокомпонентів. Рівняння матеріального балансу для i -ої тарілки має вигляд:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} + V_{i-1} - L_i - V_i + F_i - S_i, \quad (2)$$

де M_i – затримка рідини на i -й тарілці, кмоль; L_i , V_i – потоки рідини та пари, кмоль/год; F_i – потік живлення; S_i – боковий відбір.

Покомпонентний баланс для j -го компонента:

$$M_i \frac{dx_{i,j}}{dt} = L_{i+1}(x_{i+1,j} - x_{i,j}) + V_{i-1}(y_{i-1,j} - x_{i,j}) - V_i(y_{i,j} - x_{i,j}) + F_i(z_{F,j} - x_{i,j}), \quad (3)$$

де $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ – мольні частки j -го компонента в рідкій та паровій фазах; $z_{F,j}$ – склад живлення.

Умови фазової рівноваги описуються законом Рауля-Дальтона:

$$y_{i,j} = K_{i,j} \cdot x_{i,j}, \quad (4)$$

де $K_{i,j} = P_j^{sat}(T_i)/P_i$ – константа фазової рівноваги; P_j^{sat} – тиск насиченої пари j -го компонента.

На рис. 1 представлено профіль температур по висоті атмосферної колони К-1 у стаціонарному режимі. Температура змінюється від 355 °С у кубі колони до 115 °С на верхній тарілці, при цьому найбільш різкі градієнти спостерігаються в зонах тарілки живлення (тарілка 20) та бокових відборів дизельної (тарілка 12) і газової (тарілка 28) фракцій. Характерний S-подібний профіль обумовлений зміною концентрації ключових компонентів по висоті колони та наявністю бокових відборів, що порушують монотонність температурного градієнта.

Нерівномірність температурного профілю є ключовим фактором, що обумовлює необхідність адаптивного підходу до агрегування тарілок при побудові моделі зниженого порядку.

Адаптивна схема агрегування тарілок. Для зниження обчислювальної складності моделі запропоновано адаптивну схему агрегування тарілок, що враховує нерівномірність профілів температур та концентрацій. На відміну від традиційного підходу з рівномірним розбиттям, запропонована схема концентрує більше секцій у зонах різких градієнтів – біля тарілок живлення та бокових відборів.

Критерій оптимального розбиття формулюється як задача мінімізації похибки апроксимації температурного профілю:

$$\min \sum_{k=1}^{N_{agg}} \int_0^{t_f} (T_{agg,k}(t) - T_{full,k}(t))^2 dt \quad (5)$$

за умов:

$$\sum_{k=1}^{N_{agg}} n_k = N_{total}; \quad N_{agg} \leq N_{max}$$

де $T_{agg,k}$ – температура k -ї агрегованої секції; $T_{full,k}$ – температура за повною моделлю; n_k – кількість тарілок у секції; N_{agg} – кількість секцій.

На рис. 2 наведено порівняння трьох підходів до моделювання колони: повна модель (45 тарілок), рівномірне агрегування (12 секцій) та запропоноване адаптивне агрегування (7 секцій). Як видно з рисунка, рівномірне розбиття не враховує особливості технологічних зон колони: секції однакового розміру розподілені рівномірно, незалежно від наявності критичних градієнтів. Натомість адаптивна схема виділяє

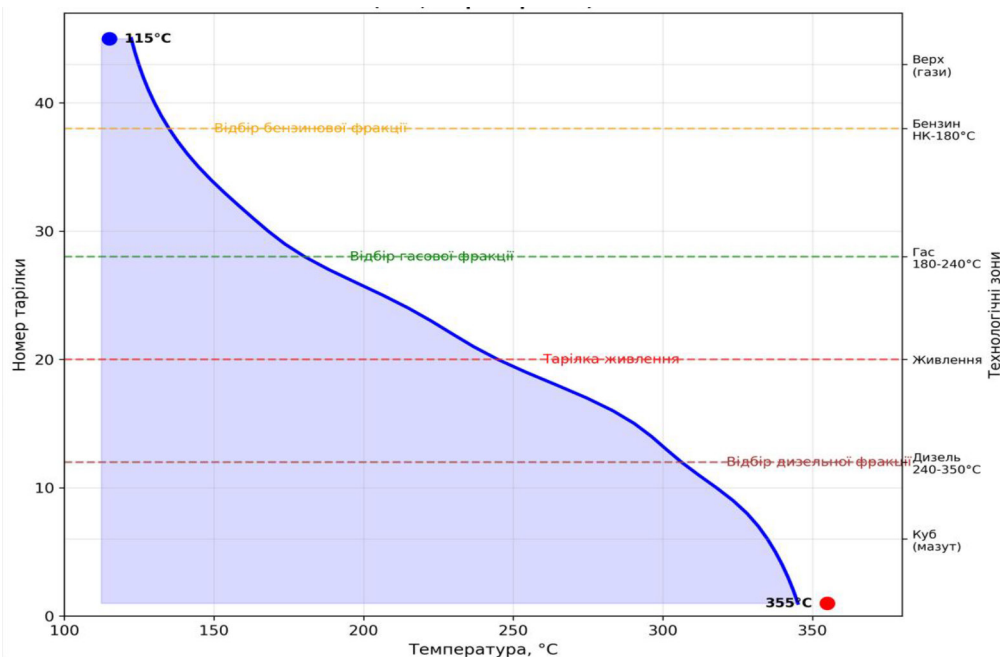


Рис. 1. Профіль температур по висоті атмосферної колони К-1 у стаціонарному режимі

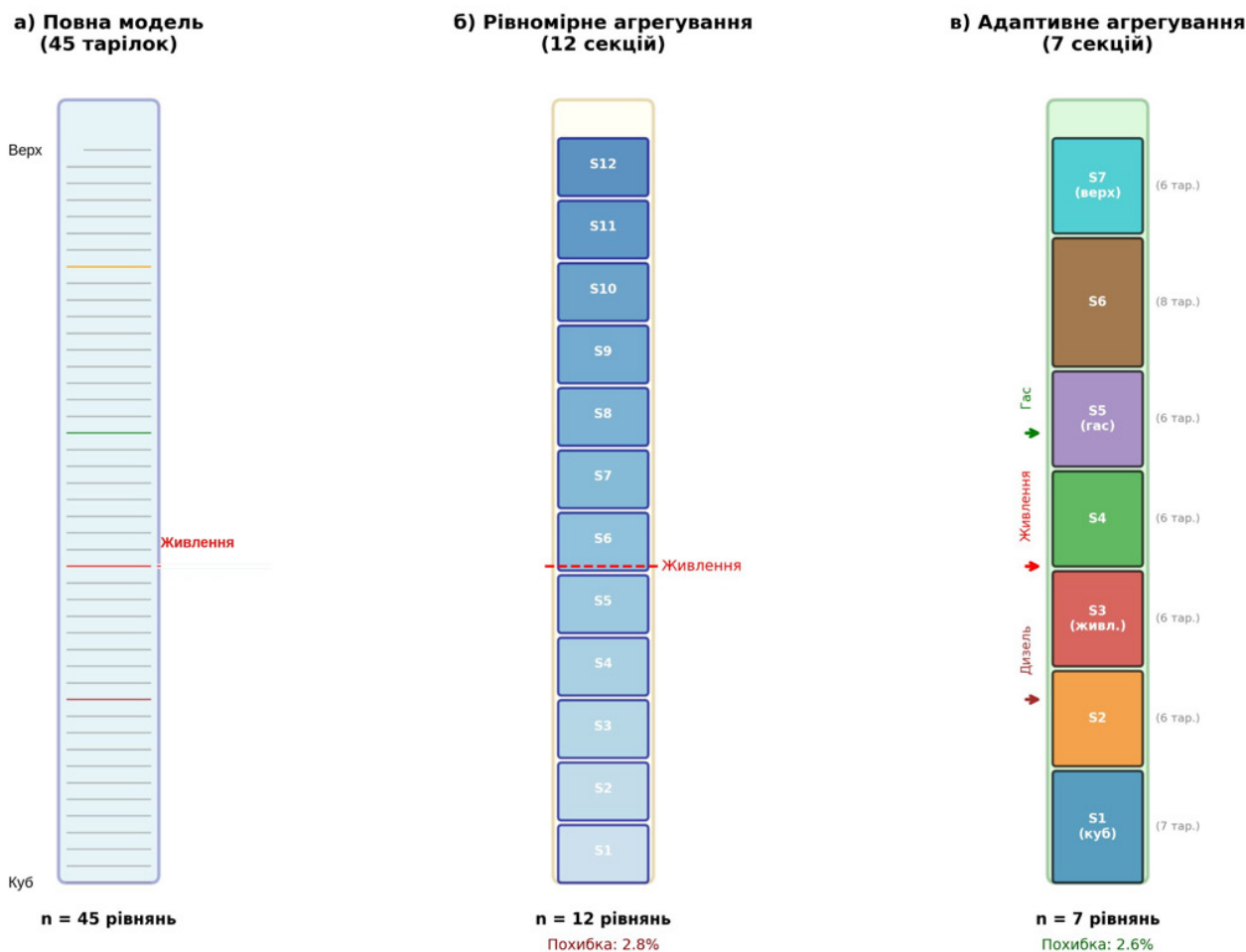


Рис. 2. Порівняння схем агрегування тарілок ректифікаційної колони: а) повна модель (45 тарілок); б) рівномірне агрегування (12 секцій); в) адаптивне агрегування (7 секцій)

окремі секції для зон живлення, відбору гасу та інших технологічних вузлів, що забезпечує кращу апроксимацію динаміки саме в цих критичних точках.

Результати порівняння показали, що адаптивне агрегування з 7 секціями забезпечує похибку апроксимації 2,6 %, що є еквівалентним рівномірному агрегуванню з 12 секціями (похибка 2,8 %). Таким чином, запропонований підхід дозволяє знизити обчислювальне навантаження на 40 % при збереженні точності моделювання.

Імітаційне моделювання та ідентифікація параметрів. Для дослідження динамічних характеристик об'єкта та генерації даних для ідентифікації розроблено імітаційну модель, що базується на чисельному інтегруванні системи диференціально-алгебраїчних рівнянь методом BDF (Backward Differentiation Formulas).

Сформовано чотири сценарії збурень складу сировини, що відтворюють типові ситуації промислової експлуатації (рис. 3): S1 – стабільний режим з шумом вимірювань ($\sigma_p = 2$ кг/м³); S2 – ступінчаста зміна сировини (перехід з легкої на важку нафту); S3 – повільний дрейф густини ($\Delta\rho = 25$ кг/м³ за 24 години);

S4 – періодичні коливання (амплітуда 12 кг/м³, період 6 годин).

Як видно з рис. 3, сформовані сценарії охоплюють основні типи збурень, що виникають при промисловій експлуатації: від стохастичних коливань в межах ± 5 кг/м³ (сценарій S1) до різких стрибків на 25 кг/м³ при зміні сорту нафти (сценарій S2). Сценарій S3 моделює поступове виснаження резервуара з легкою нафтою та перехід на важку сировину, тоді як сценарій S4 відтворює неоднорідність змішування в сировинних резервуарах.

Ідентифікацію параметрів передавальних функцій виконано за допомогою авторегресійної моделі з зовнішнім входом (ARX):

$$y_k + a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} = b_1 u_{k-d-1} + b_2 u_{k-d-2} + e_k, \quad (6)$$

де a_1, a_2, b_1, b_2 – параметри моделі; d – дискретне запізнення; e_k – похибка моделювання.

Оцінка параметрів методом найменших квадратів:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y, \quad (7)$$

де Φ – матриця регресорів; y – вектор вимірювань виходу; $\hat{\theta}$ – вектор оцінок параметрів.

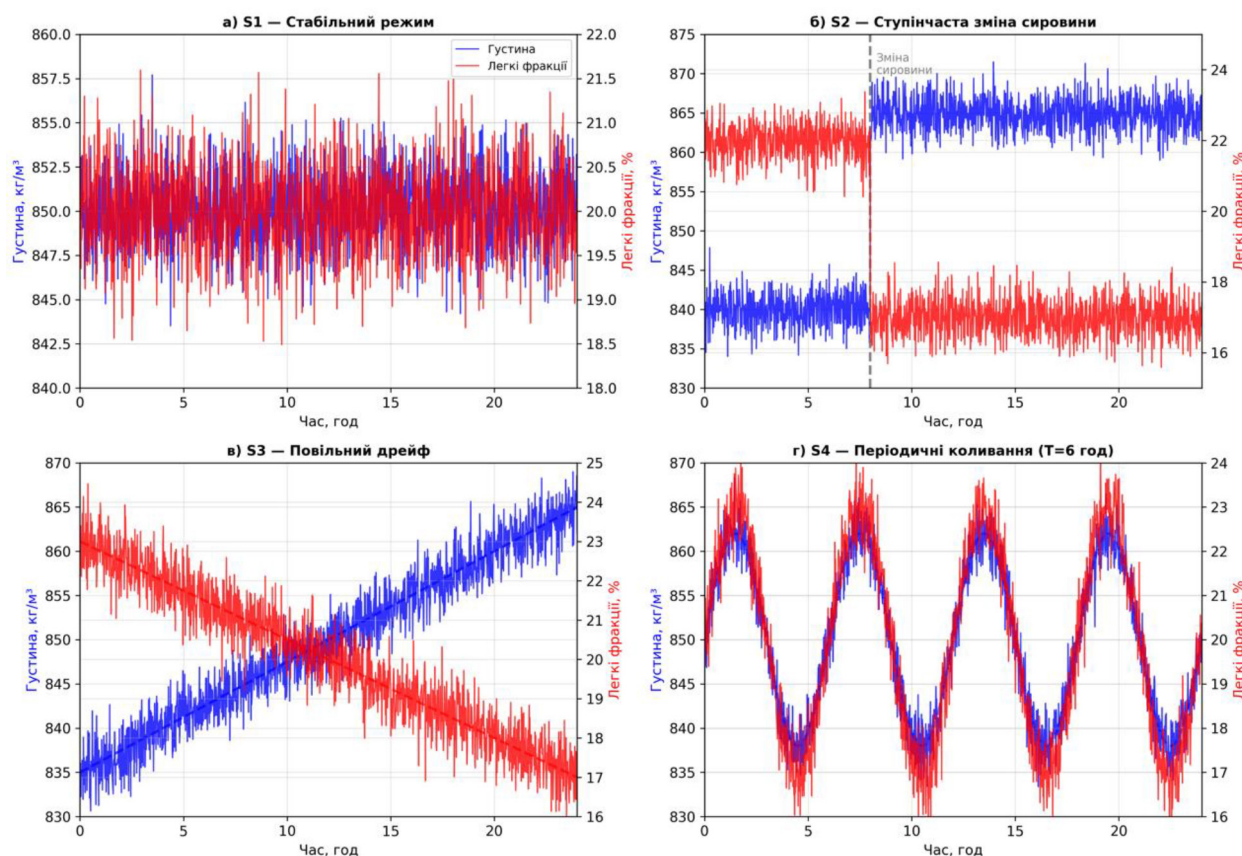


Рис. 3. Сценарії збурень складу сировини для імітаційного моделювання: а) S1 – стабільний режим; б) S2 – ступінчаста зміна; в) S3 – повільний дрейф; г) S4 – періодичні коливання

Отримані дискретні параметри перетворено до неперервної передавальної функції виду:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad (8)$$

де K – статичний коефіцієнт підсилення; τ_1 , τ_2 – постійні часу, хв; θ – транспортне запізнення, хв; s – оператор Лапласа.

Результати ідентифікації. Результати ідентифікації параметрів передавальних функцій основних каналів управління наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри передавальних функцій каналів управління

Канал	K	τ_1 , хв	τ_2 , хв	θ , хв	R^2
Fflux → Ttop	-0,082 °C/(м³/год)	4,3	1,7	1,5	0,93
Qfurnace → Tbot	0,64 °C/МВт	8,8	3,1	2,6	0,91
Fsteam → Tflash	4,2 °C/(т/год)	13,2	5,5	7,2	0,88
Fker → Tdraw	0,15 °C/(м³/год)	5,9	2,3	2,1	0,90

Отримані значення коефіцієнта детермінації $R^2 > 0,88$ для всіх каналів підтверджують адекватність ідентифікованих моделей.

На рис. 4 представлено перехідні характеристики ідентифікованих каналів управління. Аналіз графіків

дозволяє виділити характерні особливості динаміки кожного каналу. Канал «витрата флегми → температура верху» (рис. 4, а) характеризується найшвидшою динамікою (сумарна постійна часу 6 хв) та від'ємним коефіцієнтом підсилення, що відповідає фізиці процесу. Найбільш інерційним є канал «витрата пари → температура спалаху» (рис. 4, в) із сумарною постійною часу близько 19 хв та транспортним запізненням 7,2 хв.

Верифікація моделі. Верифікацію імітаційної моделі виконано на тестовому наборі даних, що не використовувалася для ідентифікації. Результати верифікації для різних сценаріїв збурень наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати верифікації моделі

Сценарій	Змінна	RMSE, °C	R^2	FIT, %
S1 (стабільний)	Ttop	0,42	0,94	81
	Tbot	0,68	0,92	78
S2 (зміна сировини)	Ttop	0,58	0,91	76
	Tflash	1,42	0,85	68
S3 (дрейф)	Ttop	0,51	0,92	78
S4 (коливання)	Tflash	1,35	0,86	70

На рис. 5 наведено результати верифікації моделі у вигляді порівняння часових рядів імітаційної

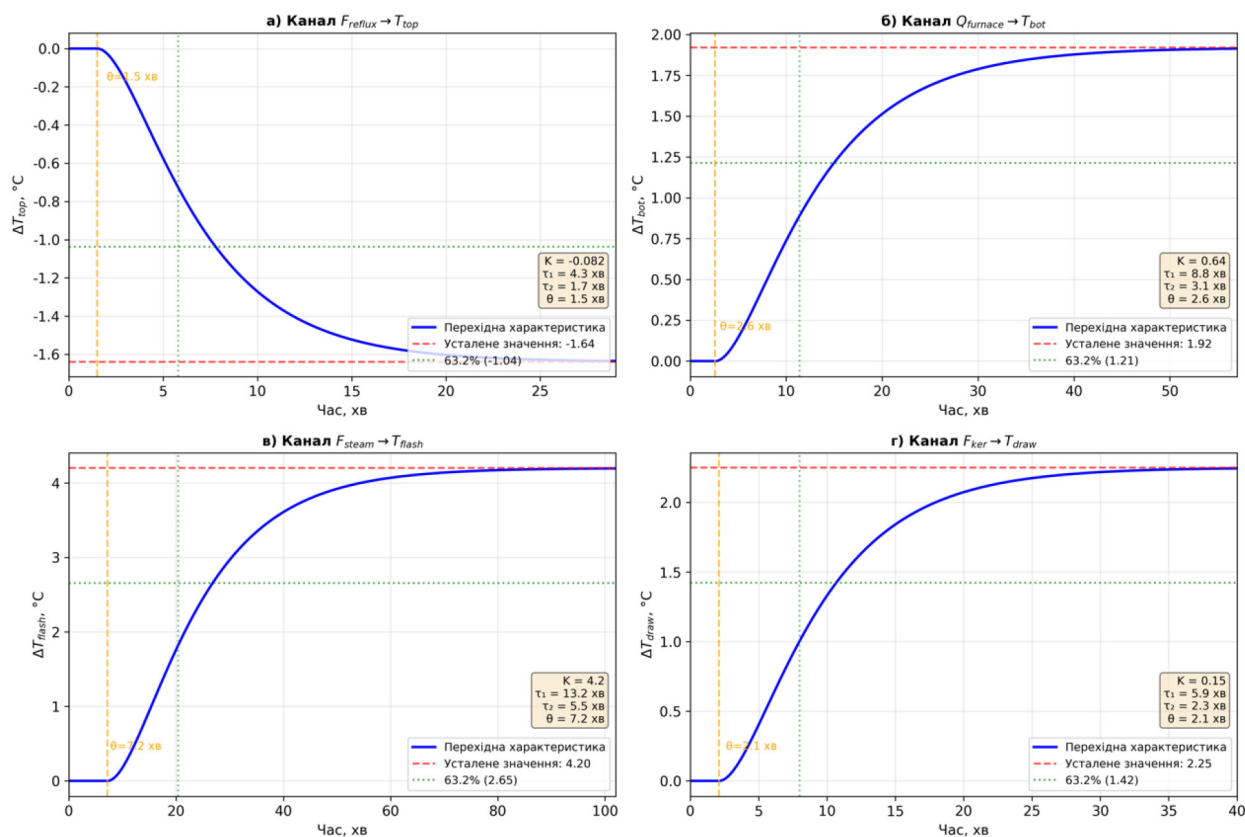


Рис. 4. Перехідні характеристики основних каналів управління: а) витрата флегми → температура верху; б) теплове навантаження печі → температура низу; в) витрата пари → температура спалаху; г) витрата гасу → температура відбору

та ідентифікованої моделей. Для температури верху колони (рис. 5, а) модель адекватно відтворює як усталений рівень, так і динаміку перехідного процесу при ступінчастому збуренні. Найбільша розбіжність між моделлю та імітацією спостерігається для температури спалаху (рис. 5, в), що обумовлено нелінійною залежністю цього показника від концентрації легких компонентів. Кореляційний графік (рис. 5, г) підтверджує загальну адекватність моделі.

Аналіз залишків моделі за автокореляційною функцією підтвердив їх відповідність білому шуму: для 95 % лагів значення автокореляції знаходяться в межах довірчого інтервалу $\pm 1,96/\sqrt{N}$, що свідчить про відсутність систематичних похибок моделювання.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати узгоджуються з даними інших дослідників щодо динамічних характеристик ректифікаційних колон [6; 8]. Постійні часу основних каналів управління (4–13 хвилин) та транспортні запізнення (1,5–7,2 хвилини) є типовими для атмосферних колон промислового масштабу.

Значення матриці RGA підтверджують висновки [10; 11] про неможливість ефективного децентралізованого управління ректифікаційними колонами з боковими відборами. Від'ємні значення λ_{ij} у контурі

відбору газової фракції пояснюються протилежним впливом цього відбору на температурний профіль при різних стратегіях управління іншими контурами.

Запропонована адаптивна схема агрегування тарілок забезпечує суттєве зниження обчислювальної складності порівняно з підходами [8; 9], зберігаючи при цьому точність моделювання в зонах критичних градієнтів. Як показано на рис. 2, концентрація секцій біля тарілок живлення та бокових відборів є ключовим фактором підвищення ефективності агрегування.

Найбільша похибка моделювання спостерігається для температури спалаху при різких змінах складу сировини (сценарій S2, рис. 3, б), що обумовлено складною нелінійною залежністю цього показника від концентрації легких компонентів. Це підтверджує необхідність розробки спеціалізованих м'яких сенсорів для показників якості.

ВИСНОВКИ

Виконано структурну декомпозицію установки АВТ на п'ять функціональних блоків та визначено структуру зв'язків між керованими змінними, регулюючими впливами та збуреннями. Аналіз матриці відносних підсилень Брістоля (λ_{ij} від -0,85 до 1,65) обґрунтував необхідність застосування багатовимірного предиктивного регулятора.

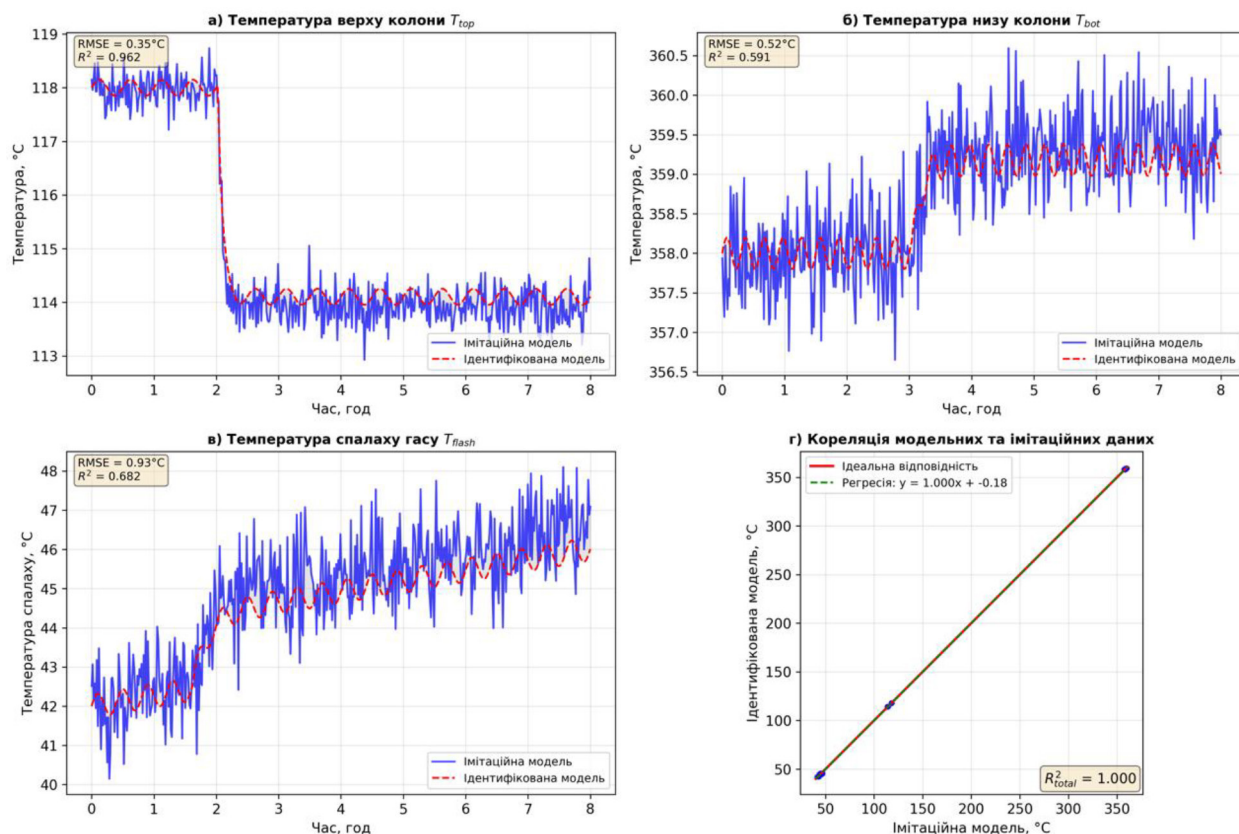


Рис. 5. Верифікація моделі: а) температура верху колони; б) температура низу колони; в) температура спалаху газу; г) кореляція модельних та імітаційних даних

Розроблено ієрархічну математичну модель атмосферної ректифікаційної колони на основі рівнянь матеріального та теплового балансів. Запропоновано адаптивну схему агрегування тарілок, що забезпечує зниження обчислювальної складності на 40 % при збереженні точності моделювання.

Ідентифіковано параметри передавальних функцій основних каналів управління методом найменших квадратів. Отримані значення коефіцієнта детермінації R^2

$> 0,88$ підтверджують адекватність моделей для синтезу системи предиктивного управління.

Верифікація моделі на чотирьох сценаріях збурень підтвердила її робастність в умовах, наближених до промислової експлуатації.

Напрямок подальших досліджень є розробка гібридних моделей прогнозування якості продуктів на основі поєднання фізичних закономірностей та методів машинного навчання.

REFERENCES

- [1] IEA. (2025). *Energy Efficiency 2025*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025>. Licence: CC BY 4.0
- [2] Seidy-Esfahlan, M., Tabatabaei-Nezhad, S., & Khodapanah, E. (2024). Comprehensive review of enhanced oil recovery strategies for heavy oil and bitumen reservoirs in various countries: Global perspectives, challenges, and solutions. *Heliyon*, 10(18), e37826. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37826>
- [3] Fayruzov, D., Bel'kov, Yu., Kneller, D., & Torgashov, A. (2017). Advanced process control system for a crude distillation unit: A case study. *Automation and Remote Control*, 78(2), 357–367. <https://doi.org/10.1134/S0005117917020138>
- [4] Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733–764. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)
- [5] Shang, C., Yang, F., & Gao, X. (2014). Data-driven soft sensor development based on deep learning technique. *Journal of Process Control*, 24(3), 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.012>
- [6] Luyben, W. L. (2011). *Principles and Case Studies of Simultaneous Design*. Wiley.
- [7] Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design* (2nd ed.). Wiley.
- [8] Al-awad, N., & Muter, A. (2021). Optimal control of model reduction binary distillation column. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 13(1), 59–68. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2021.01.05>
- [9] Ye, L., Zhang, N., Li, G., Gu, D., Lu, J., & Lou, Y. (2023). Intelligent optimization design of distillation columns using surrogate models based on GA-BP. *Processes*, 11(8), 2386. <https://doi.org/10.3390/pr11082386>

- [10] Naik, R., Ashok Kumar, D. V., & Anjaneyulu, K. (2012). Controller for multivariable processes based on interaction approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(8), 973–980.
- [11] Ogunnaike, B. A., & Ray, W. H. (1994). *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press.
- [12] Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [13] Ito, Y., Fujimoto, K., Yoshimura, T., & Tadokoro, Y. (2018). A unified approach of controller design and system identification for optimal control of single-input nonlinear systems. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 11(6), 446–455. <https://doi.org/10.9746/jcmsi.11.446>
- [14] Landau, I. (2001). Identification in closed loop: A powerful design tool (better design models, simpler controllers). *Control Engineering Practice*, 9(1), 51–65. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00082-4)
- [15] Kanakeri, V., & Mitra, A. (2024). Outlier-robust linear system identification under heavy-tailed noise. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.00421>
- [16] Cameron, I. T., & Gani, R. (2011). *Product and Process Modelling: A Case Study Approach*. Elsevier.
- [17] Alnumay, Y., Alrasheed, A., Trigui, H., Halawani, A., Alshiekh, M., & Patel, S. (2022). Synthetic data generation for machine learning applications in the energy industry. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/211821-MS>
- [18] Ladiieva, L. R., & Bereza, O. M. (2021). Matematychna model protsesu vakuumnoi membranoi dystyliatsii u vyrobnytstvi bioetanolu [Mathematical model of vacuum membrane distillation process in bioethanol production]. *Naukoviemi tekhnologii – Science-Based Technologies*, 1(49), 77–82. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.49.15293> [in Ukrainian].
- [19] Kubakh, S. O., & Tsapar, V. S. (2024). Analiz isnuichykh system keruvannia tekhnolohichnym rezhyom protsesu naftopererobky [Analysis of existing control systems for technological regime of oil refining process]. *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho". Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia – Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation*, (3), 57–73. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2024.312421> [in Ukrainian].
- [20] Hutovskiy, D. V., & Zhuchenko, O. A. (2024). Matematychni modeliuvannia teploobminu dlia efektyvnykh avtomatyzovanykh system keruvannia [Mathematical modeling of heat transfer for effective automated control systems]. *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho". Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia – Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation*, (2), 18–24. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307353> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] IEA. (2025). *Energy Efficiency 2025*. IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025>. Licence: CC BY 4.0.
- [2] Seidy-Esfahlan, M., Tabatabaei-Nezhad, S., & Khodapanah, E. (2024). Comprehensive review of enhanced oil recovery strategies for heavy oil and bitumen reservoirs in various countries: Global perspectives, challenges, and solutions. *Heliyon*, 10(18), e37826. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37826>
- [3] Fayruzov, D., Bel'kov, Yu., Kneller, D., & Torgashov, A. (2017). Advanced process control system for a crude distillation unit: A case study. *Automation and Remote Control*, 78(2), 357–367. <https://doi.org/10.1134/S0005117917020138>
- [4] Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733–764. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)
- [5] Shang, C., Yang, F., & Gao, X. (2014). Data-driven soft sensor development based on deep learning technique. *Journal of Process Control*, 24(3), 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.012>
- [6] Luyben, W. L. (2011). *Principles and Case Studies of Simultaneous Design*. Wiley.
- [7] Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design* (2nd ed.). Wiley.
- [8] Al-awad, N., & Muter, A. (2021). Optimal control of model reduction binary distillation column. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 13(1), 59–68. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2021.01.05>
- [9] Ye, L., Zhang, N., Li, G., Gu, D., Lu, J., & Lou, Y. (2023). Intelligent optimization design of distillation columns using surrogate models based on GA-BP. *Processes*, 11(8), 2386. <https://doi.org/10.3390/pr11082386>
- [10] Naik, R., Ashok Kumar, D. V., & Anjaneyulu, K. (2012). Controller for multivariable processes based on interaction approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(8), 973–980.
- [11] Ogunnaike, B. A., & Ray, W. H. (1994). *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press.
- [12] Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the User* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [13] Ito, Y., Fujimoto, K., Yoshimura, T., & Tadokoro, Y. (2018). A unified approach of controller design and system identification for optimal control of single-input nonlinear systems. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 11(6), 446–455. <https://doi.org/10.9746/jcmsi.11.446>
- [14] Landau, I. (2001). Identification in closed loop: A powerful design tool (better design models, simpler controllers). *Control Engineering Practice*, 9(1), 51–65. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00082-4)
- [15] Kanakeri, V., & Mitra, A. (2024). Outlier-robust linear system identification under heavy-tailed noise. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.00421>
- [16] Cameron, I. T., & Gani, R. (2011). *Product and Process Modelling: A Case Study Approach*. Elsevier.
- [17] Alnumay, Y., Alrasheed, A., Trigui, H., Halawani, A., Alshiekh, M., & Patel, S. (2022). Synthetic data generation for machine learning applications in the energy industry. *Society of Petroleum Engineers*. <https://doi.org/10.2118/211821-MS>

- [18] Ладієва, Л. Р., & Береза, О. М. (2021). Математична модель процесу вакуумної мембранної дистиляції у виробництві біоетанолу. *Наукоємні технології*, 1(49), 77–82. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.49.15293>
- [19] Кубах, С. О., & Цапар, В. С. (2024). Аналіз існуючих систем керування технологічним режимом процесу нафтопереробки. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (3), 57–73. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2024.312421>
- [20] Гутовський, Д. В., & Жученко, О. А. (2024). Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (2), 18–24. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307353>

© Цапар В. С., Ткачук С. М.

Дата надходження статті до редакції: 14.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 08.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0