



Прийнято 14.05.2026. Прорецензовано 28.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 62-506 + 004.942 + 661.721

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-183-194

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЛОНОЮ СИНТЕЗУ МЕТАНОЛУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЕТАЛОННОГО ВІДГУКУ

Авраменко А. А.

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»
03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-5803-4199>
e-mail: avramenko.alina.05@gmail.com

Коротинський А. П.

Доктор філософії
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»
03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6309-5970>
e-mail: ihfantkor@gmail.com

Складанний Д. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»
03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3624-5336>
e-mail: skl_den@ukr.net

Запорожець Ю. А.

Кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»
03056, Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5052-7036>
e-mail: zja-ihf@ill.kpi.ua

Анотація. Об'єктом дослідження в роботі адаптивна система керування колоною синтезу метилового спирту. Метою роботи є розроблення та дослідження системи керування колоною, досягнення якої дасть змогу забезпечити якість регулювання в умовах параметричної невизначеності, підвищити стабільність виробничого процесу та якість кінцевого продукту. Синтез адаптивної системи керування колоною синтезу виконано на основі моделі еталонного відгуку (MRAC). Математична модель об'єкта отримана методом ідентифікації «чорного ящика» в середовищі MATLAB System Identification Toolbox; отримана передатна функція першого

Запропоноване посилання: Авраменко, А. А., Коротинський, А. П., Складанний, Д. М. & Запорожець, Ю. А. (2026). Синтез адаптивної системи керування колоною синтезу метанола на основі моделі еталонного відгуку. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 183-194. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-133-194

* Відповідальний автор



порядку описує канал «витрата живильного газу – мольна частка метанолу». Адаптивний регулятор реалізований на базі ПІ-закону керування з оновленням параметрів за законом Ляпунова, що гарантує стійкість замкненої системи. З метою оцінювання якості роботи синтезованої системи керування проведено імітаційне моделювання трьох сценаріїв: номінальний режим, стрибова зміна коефіцієнта підсилення об'єкта (+60%) та ступінчасте вхідне збурення. Імітаційний експеримент проводився протягом 8000 с з кроком 2 с зі ступінчастою зміною сигналу завдання 1,0; 1,8; 1,3; 2,0. За результатами експерименту оцінювалася зміна виходу об'єкта, похибка адаптації, величина адаптації основних параметрів та відхилення від завдання. Показано, що в номінальному режимі за умов збурень MRAC знижує інтегральну абсолютну похибку IAE на 45% і 35% відповідно порівняно з класичним ПІ-регулятором з фіксованими параметрами. У випадку різкої зміни параметрів (стрибоподібна зміна коефіцієнта підсилення об'єкта на 60%) класичний ПІ показав незначно кращий результат (+14% IAE), що пояснюється кінцевим часом перебудови адаптаційного контуру. Отримані результати підтверджують доцільність застосування MRAC для керування технологічними процесами з параметричною невизначеністю.

Ключові слова: адаптивне керування, інтелектуальні системи керування, колона синтезу метанолу, функція Ляпунова, ПІ-регулятор, параметрична невизначеність.

Вступ

Колона синтезу метанолу є технологічним об'єктом керування зазвичай із присутньою параметричною невизначеністю. Через це коефіцієнти та часові сталі, які математично описують об'єкт керування змінюються внаслідок впливів, що складно або неможливо безпосередньо визначити, таких як: деградації каталізатора, коливань тиску у живильному газі та зміни складу сировини [1].

Оскільки такі зміни є характерними для широкого класу хімічних і нафтохімічних виробництв, це у свою чергу робить задачу керування об'єктами з параметричною невизначеністю актуальною науковою проблемою, результати вирішення якої за-требувані у промисловій практиці.

Практична значущість досліджень у цій галузі обумовлена тим, що якість керування безпосередньо визначає вихід та чистоту цільового продукту. Класичні регулятори, зокрема пропорційно-інтегральний (ПІ), налаштовуються за номінальною математичною моделлю і не в змозі повністю компенсувати варіації невизначеності під час роботи. Це призводить до зростання похибки керування, зниження ефективності процесу і, як наслідок, погіршення якості кінцевого продукту та збільшення витрат на переробку. Таким чином, розроблення методів керування, стійких до параметричної невизначеності, має пряму економічну цінність для хімічної промисловості.

З цією задачею успішно справляються адаптивні системи керування, коригуючи параметри регулятора безпосередньо під

час його поточної роботи. Одним із таких методів є системи керування типу MRAC (Model Reference Adaptive Control) головна задача яких адаптація таким чином щоб поведінка реального об'єкта наближалася до заздалегідь визначеної еталонної моделі.

Мета дослідження – розробити та дослідити MRAC-систему керування колоною синтезу метанолу. Досягнення цієї мети дасть змогу забезпечити прийнятну якість регулювання в умовах параметричної невизначеності, такої як зміна складу сировини, деградації каталізатора та дії зовнішніх збурень, а відтак підвищити стабільність виробничого процесу та якість кінцевого продукту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- синтезувати закон адаптації параметрів ПІ-регулятора на основі прямого методу функцій Ляпунова;
- розробити імітаційну модель MRAC-системи з урахуванням шуму вимірювання та вхідних збурень;
- провести порівняльне моделювання MRAC та класичного ПІ-регулятора за трьома сценаріями: номінальний режим, стрибова зміна параметра об'єкта, ступінчасте вхідне збурення;
- оцінити якість керування за інтегральними критеріями ISE, IAE, ITAE та зробити висновок про практичну доцільність запропонованого підходу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Класичну теоретичну базу методу MRAC закладено та розвинуто в роботах [2, 3], де систематизовано умови стійкості та збіжності адаптивних систем на основі прямого методу Ляпунова. Застосування адаптивного керування у хімічній промисловості розглядається в низці робіт. Автори роботи [4] реалізували адаптивну систему керування з еталонною моделлю для стабілізації швидкості обертання промислової пілотної мішалки. Основна проблема, яка вирішена у дослідженні – нелінійність процесу та зміна параметрів об'єкта під час роботи, що робить класичні регулятори менш ефективними. Дослідження демонструє переваги MRAC над традиційним ПІД-регулятором в умовах зовнішніх збурень та параметричної невизначеності об'єкта. Адаптивна система керування забезпечує менше перерегулювання та швидший час встановлення порівняно з неадаптивними методами. Подібне дослідження [5] присвячене системі адаптивного керування з еталонною моделлю для складного біотехнологічного процесу – ферментації молока в біореакторах періодичної дії. Основна його задача – точне керування значенням рН, що є критичним фактором для якості кінцевого продукту, наприклад, йогурту, в умовах нелінійності та нестационарності процесу. Автори використовують підхід, заснований на теорії стійкості Ляпунова, що гарантує мінімізацію похибки між виходом реального процесу та еталонної моделі та стійкість самої системи.

Дослідження [6] присвячене розв'язанню задачі прецизійного регулювання температури в реакторі ідеального змішування безперервної дії, основна проблема якого полягає в тому, що це сильно нелінійний об'єкт із високою чутливістю до змін параметрів, зокрема, швидкості подачі сировини або концентрації реагентів. Це робить класичне лінійне керування малоефективним. Акцент у дослідженні зроблено на використанні правила МІТ. Алгоритм постійно коригує параметри регулятора, щоб мінімізувати похибку відстеження між реальною температурою реактора та виходом

еталонної моделі. Продовження дослідження системи керування реактором ідеального змішування здійснено в роботі [7]. Це дослідження спрямоване на вдосконалення адаптивного керування реактором) шляхом поєднання фракційного числення та теорії стійкості Ляпунова. Основна ідея дослідження полягає у підвищенні гнучкості та стійкості системи керування в умовах високої нелінійності та параметричної невизначеності хімічного процесу. Система залишається стабільною навіть за різних змін параметрів у реакторі.

Однак у згаданих роботах або розглядається MRAC у поєднанні зі складними нелінійними законами керування, або аналіз стійкості проводиться у без урахування шуму вимірювання. Питання практичної реалізації MRAC на основі ПІ-структури з мінімальною параметризацією, моделі реального промислового об'єкта з адитивним шумом датчика, залишається недостатньо дослідженим.

Матеріали та методи досліджень

Об'єктом керування в даній роботі є одновимірний канал колони синтезу метанолу: вхід – витрата живильного газу F_{in} , вихід – мольна частка метанолу M у продукті. Збурення – тиск P у реакторному контурі. Об'єкт характеризується суттєвою інерційністю та нелінійністю, пов'язаною із залежністю швидкості реакції від стану каталізатора.

Еталонна математична модель об'єкта керування отримана методом ідентифікації «чорного ящика» [8] у MATLAB System Identification Toolbox за даними ступінчастого збурення входу, вихідний сигнал попередньо оброблено ковзним середнім для зменшення впливу шуму вимірювання [9]. Отримана в результаті модель представляється моделлю першого порядку $G_m(s) = K/(\tau_s + 1)$. Реальний об'єкт моделюється тією самою структурою, але зі статичним підсиленням 30...60% від номінального значення, що відображає типову невизначеність після зміни складу сировини. Крім того, у вихідний сигнал додаються вхідне збурення $d(t)$ і шум вимірювання $v(t) \sim N(0; 0,015^2)$



Рисунок 1 – Структурна схема адаптивної системи керування типу MRAC

У якості методів оцінювання ефективності роботи систем керування використано три інтегральних критерії: ISE (Integral Squared Error), IAE (Integral Absolute Error) та ITAE (Integral Time-weighted Absolute Error) [10]. Теоретичним підґрунтям синтезу закону адаптації слугує метод функцій V Ляпунова [11]: обираючи позитивно визначену функцію V від похибки адаптації та параметричних відхилень регулятора, і вимагаючи $\dot{V} \leq 0$, можна отримати закон оновлення параметрів, що гарантує асимптотичну стійкість замкненої системи. Введемо похибки параметрів:

$$\Delta K_p = K_p - K_p^*, \Delta K_i = K_i - K_i^*,$$

де K_p^*, K_i^* – оптимальні значення.

Обираємо функцію Ляпунова у вигляді:

$$V = \frac{e_m^2}{2} + \frac{K_p^2}{2\gamma_p} + \frac{K_i^2}{2\gamma_i}. \quad (1)$$

Диференціюючи (1) по часу та накладаючи умову $\dot{V} \leq 0$, отримуємо закон адаптації:

$$\frac{dK_p}{dt} = \gamma_p \cdot e_m(t) \cdot e(t),$$

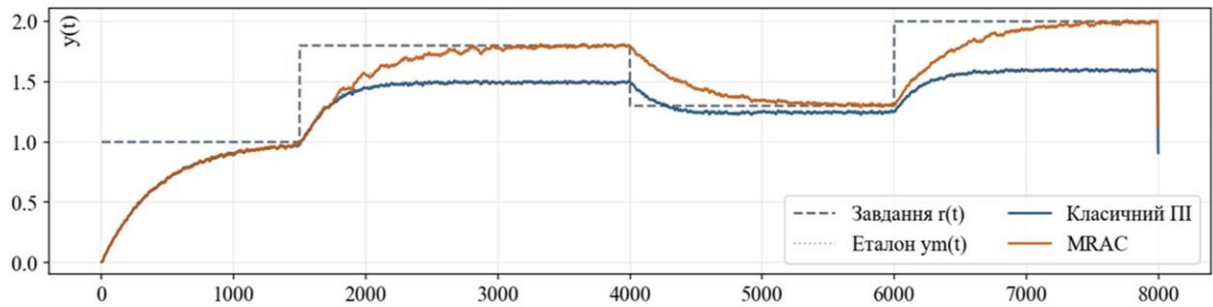
$$\frac{dK_i}{dt} = \gamma_i \cdot e_m(t) \cdot \int e(t) dt,$$

де $\gamma_p = 1 \cdot 10^{-3}$ і $\gamma_i = 5 \cdot 10^{-6}$ – коефіцієнти адаптації, підібрані виходячи з умови помітної збіжності за $3\tau \approx 1250$ с за відсутності збуджуючих коливань.

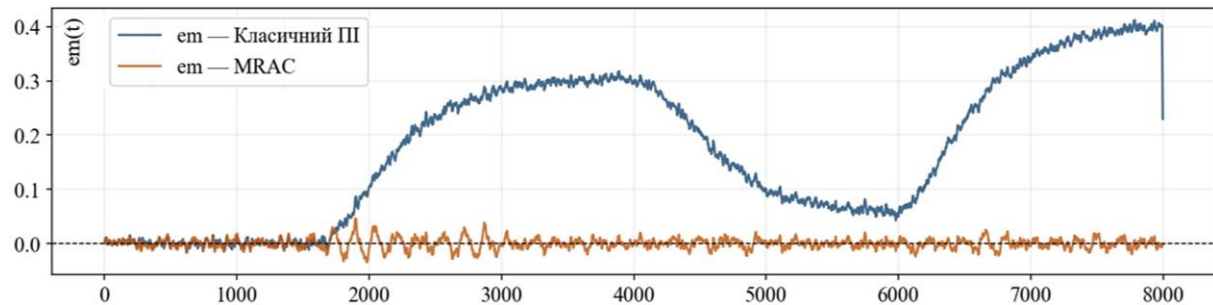
Структурну схему адаптивної системи керування типу MRAC наведено на рис. 1. Система містить функціональні блоки, з'єднані двома контурами: основним контуром регулювання та зовнішнім контуром адаптації. Блок еталонної моделі $G_m(s)$ па-

ралельно з основним контуром отримує той самий задавальний сигнал $r(t)$ і формує бажану траєкторію виходу $y_m(t)$ – ідеальний відгук, якому має наслідувати реальний об'єкт. Блок об'єкту керування $G_p(s)$ описує реальну динамічну систему з параметричною невизначеністю, яка отримує керуючий сигнал $u(t)$ з виходу регулятора і формує виміряний вихід $y(t)$. На вхід об'єкту керування також подається вхідне збурення $d(t)$ – зовнішній вплив, наприклад стрибок тиску у живильному газі. До виміряного виходу додається шум датчика $v(t) \sim N(0; \sigma^2)$. Таким чином, регулятор і закон адаптації працюють зі спотвореним сигналом $y(t) = G_p(s) \cdot u + d + v$, що відповідає реальним умовам промислового вимірювання.

Блок адаптивного ПІ-регулятора описує основний регулятор замкненого контуру. Він отримує від суматора похибку відстеження $e(t) = r(t) - y(t)$ і формує сигнал керування $u(t) = K_p(t) \cdot e(t) + K_i(t) \cdot \int e(t) dt$. На відміну від класичного ПІ, параметри $K_p(t)$ і $K_i(t)$ не фіксовані, а безперервно оновлюються блоком закону адаптації. Блок закону адаптації отримує на вхід вихідне значення еталонної моделі $y_m(t)$ та виміряний вихід реального об'єкта $y(t)$ і обчислює похибку адаптації: $e_m(t) = y_m(t) - y(t)$. Ця похибка відображає ступінь невідповідності між поточною поведінкою об'єкта та бажаною динамікою. На її основі блок формує поправки до $K_p(t)$ і $K_i(t)$, що повертаються до регулятора.



**Рисунок 2 – Результати імітаційного моделювання номінального режиму.
Зміна виходу об'єкта**



**Рисунок 3 – Результати імітаційного моделювання номінального режиму.
Зміна похибки адаптації**

Умови моделювання та сценарії

Моделювання проводилось протягом $T = 8000$ с з кроком $dt = 2$ с. Сигнал завдання $r(t)$ містить чотири ступінчасті зміни: $r = 1,0; 1,8; 1,3; 2,0$. Під час імітаційного моделювання роботи запропонованої системи керування досліджено три сценарії:

1. Номінальний режим роботи об'єкта керування, з складовою $K = 0,5$ з врахуванням шуму вимірювання $v(t) \sim N(0; 0,015^2)$.

2. Імітується параметрична невизначеність об'єкта керування, що реалізується стрибком коефіцієнта підсилення об'єкта K на 60% після 2000 с.

3. Імітується ступінчасте входне збурення $d = +0,4$ на інтервалі часу [2000; 3500] с.

Початкові значення параметрів регулятора обрані по еталонній моделі $G_m(s)$: $K_p = 2,0$; $K_i = 0,00476$. Такі ж значення використовуються для класичного ПІ-регулятора, що забезпечує однакові стартові умови для порівняння ефективності роботи запропонованої системи.

Результати роботи в номінальному режимі

В номінальному режимі MRAC адаптується до шумів вимірювання протягом перших 1500...2000 с, після чого якість керування перевищує класичний ПІ регулятор. В результаті адаптації параметр K_i зростає з 0,0048 до 0,0079, що компенсує різницю між еталонною моделлю та реальним об'єктом. Результати моделювання MRAC для номінального сценарію наведено на рисунку 2.

На рисунку 2 наведено графік зміни виходу об'єкта керування $y(t)$. Обидва регулятори стартують за однакових початкових умов та мають схожі перехідні процеси проте класичний ПІ стабілізується на помітно нижчому за завдання рівні, тоді як MRAC поступово наближається до завдання і після 3000 с досягає його. На рисунку 3 наведено графік зміни похибки адаптації. Для класичного ПІ регулятора вона не спадає до нуля, зростає після кожної зміни завдання і утримується на рівні 0,2...0,4, що є наслідком невідповідності еталонної моделі стану об'єкта керування. MRAC після короткого перехідного періоду повертає похибку практично до нуля вже за 500...700 с.

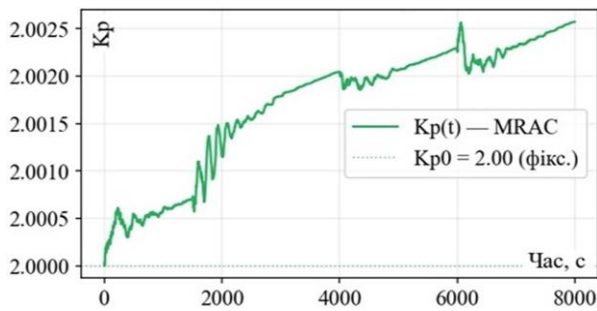


Рисунок 4 – Результати імітаційного моделювання номінального режиму. Зміна K_p

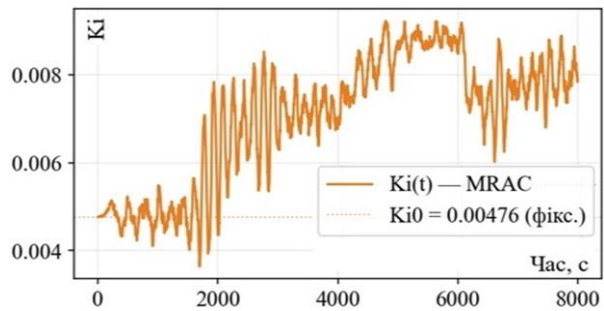


Рисунок 5 – Результати імітаційного моделювання номінального режиму. Зміна K_i

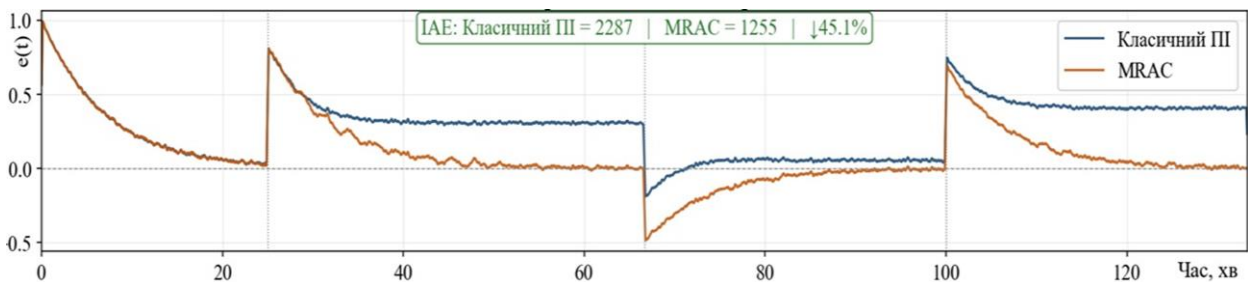


Рисунок 6 – Результати імітаційного моделювання номінального режиму. Відхилення виходу об'єкта керування від завдання

На рисунках 4 і 5 к наведено графіки зміни параметрів адаптивного ПІ регулятора.

Складова K_p монотонно зростає з початкового значення 2,000 до 2,003 протягом перших 2000 с, після чого продовжує дуже повільно зростати. Складова K_i демонструє найбільш виражену динаміку, вона зростає з початкового 0,00476 до 0,0079 за перші 1500...2000 с і далі коливається навколо стаціонарного значення 0,008.

На рисунку 6 наведено графік зміни похибки, як відхилення поточного виходу об'єкта керування від завдання. Після кожного стрибка відхилення обидва регулятори мають однакові початкові сплески похибки, однак класичний ПІ зберігає залишкову похибку 0,3...0,4 у стаціонарних ділянках. MRAC після адаптації у першій ділянці ($t < 1500$ с) утримує наближену до нуля похибку на всіх наступних ділянках, що підтверджує повну компенсацію систематичної похибки такого типу.

Результати роботи системи при ступінчастому збуренні

Рисунки 7–11 демонструють результати моделювання сценарію зі ступінчастим входним збуренням. Збурення $d = +0,4$ на інтервалі часу [2000; 3500] с. викликає відхилення виходу об'єкта від завдання. Класичний ПІ усуває це відхилення повільніше завдяки фіксованим налаштуванням, тоді як MRAC реагує на збільшення похибки збільшенням K_i , пришвидшуючи усунення збурення.

На рисунку 7 наведено графік зміни виходу об'єкта керування. Після початку збурення обидва регулятори демонструють помітний підйом $y(t)$ вище завдання, MRAC піднімається до 2,1, класичний ПІ до 1,95. Однак всередині зони збурення MRAC утримує $y(t)$ значно ближче до завдання $r(t)$, тоді як класичний ПІ стабілізується на рівні 1,75...1,8, тобто дещо нижче за завдання навіть під час збурення. Після зникнення збурення (3500 с) MRAC швидко повертається до завдання керування $r(t)$, тоді як класичний ПІ до кінця симуляції не досягає потрібного рівня. На рисунку 8 наведено графік зміни похибка адаптації.

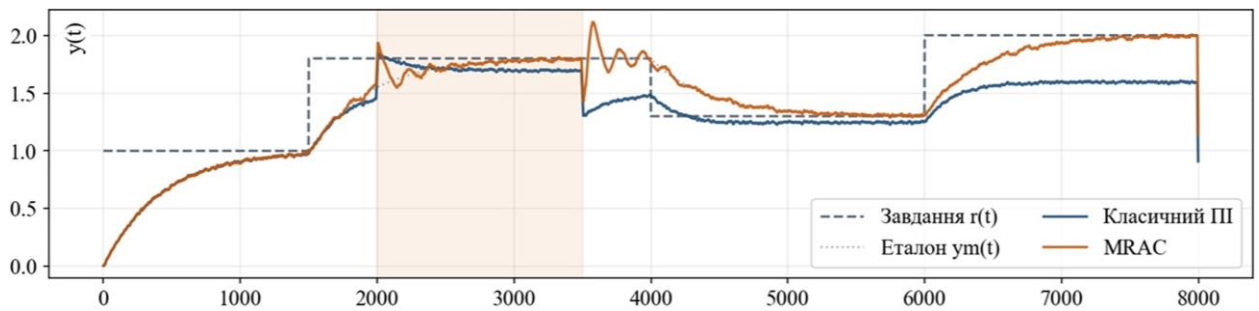


Рисунок 7 – Результати імітаційного моделювання при ступінчастому збуренні. Зміна виходу об'єкта

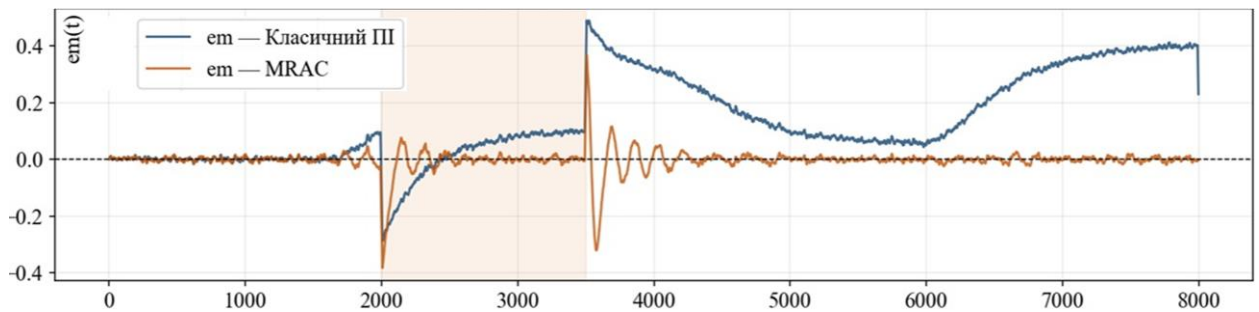


Рисунок 8 – Результати імітаційного моделювання при ступінчастому збуренні. Зміна похибки адаптації

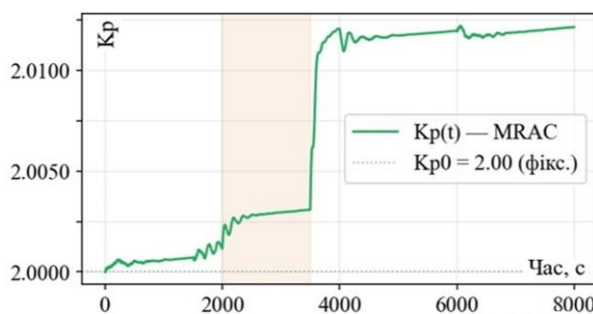


Рисунок 9 – Результати імітаційного моделювання при ступінчастому збуренні. Зміна K_p

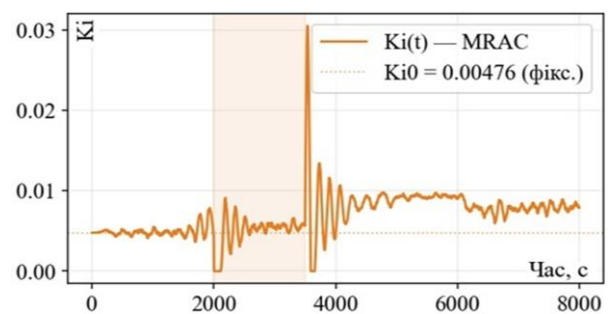


Рисунок 10 – Результати імітаційного моделювання при ступінчастому збуренні. Зміна K_i

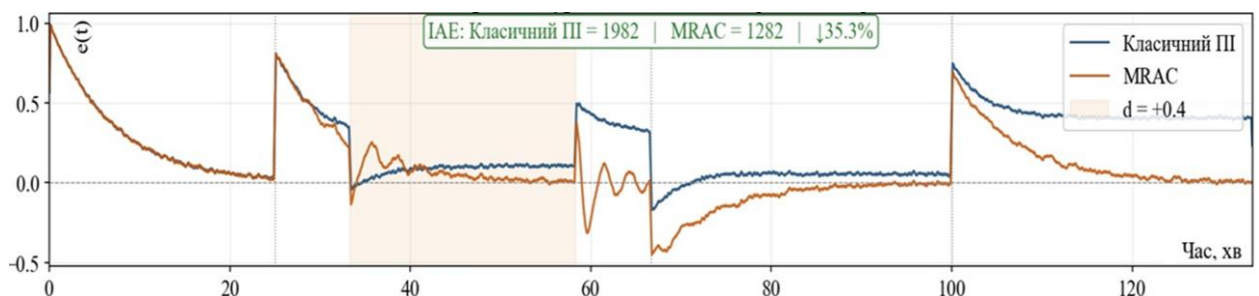
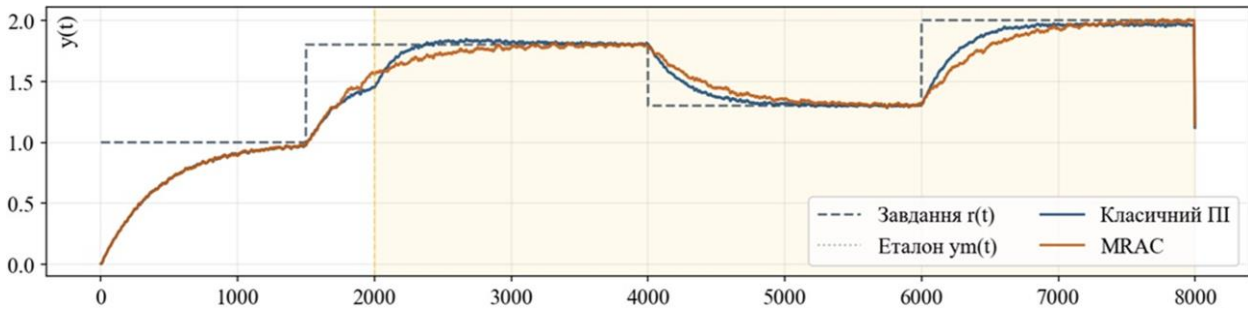


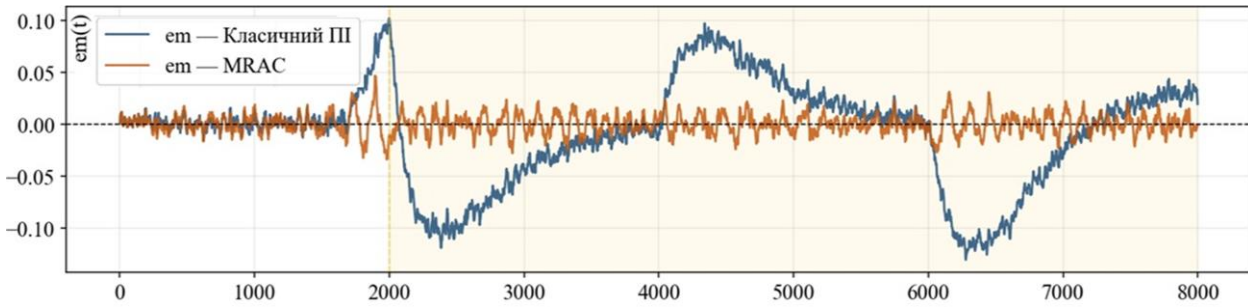
Рисунок 11 – Результати імітаційного моделювання при ступінчастому збуренні. Відхилення виходу об'єкта керування від задання

На початку збурення похибка адаптації $e_m(t)$ MRAC різко падає до $-0,35$, після цього MRAC швидко повертає $e_m(t)$ до нуля і утримує її в межах $\pm 0,05$ до кінця моделювання. Класичний ПІ після 3500 с на-

громаджує зростаючу похибку, що досягає 0,4 наприкінці, що є відображенням того, що фіксований регулятор не в змозі компенсувати залишкові ефекти збурення.



**Рисунок 12 – Результати імітаційного моделювання при зміні параметра об'єкта.
Зміна виходу об'єкта**



**Рисунок 13 – Результати імітаційного моделювання при зміні K об'єкта.
Зміна похибки адаптації**

На рисунках 9 і 10 наведено процес адаптації параметрів регулятора. K_p повільно зростає з 2,000 до 2,003 до початку збурення, після чого стрибкоподібно збільшується до 2,012 у зоні $d = +0,4$ і стабілізується на цьому рівні. K_i під час збурення демонструє яскравий сплеск до 0,030, майже у 6 разів вище за початкове значення, а потім швидко спадає і стабілізується навколо 0,009. Цей короткочасний сплеск є механізмом швидкої компенсації вхідного збурення через інтегральну складову; після його зникнення K_i повертається до стаціонарного рівня.

На рисунку 11 наведено графік зміни похибки, як відхилення від завдання. Під час збурення MRAC демонструє активну адаптивну реакцію $e(t)$ швидко коливається і повертається до нуля, тоді як класичний ПІ утримує стабільну, але значну похибку. Після 3500 с MRAC повністю гасить похибку відхилення, а класичний ПІ продовжує нагромаджувати похибку до кінця симуляції, досягаючи значення ІАЕ для класичного ПІ 1982 проти 1282 для MRAC.

Результати імітаційного моделювання зміни параметра об'єкта

Результати імітаційного моделювання при стрибковій зміні параметра K об'єкта керування у 1,6 раз після 2000 с. наведено на рисунках з 12 по 16. MRAC у цьому сценарії дещо поступається класичному ПІ регулятору відповідно до ІАЕ, що на 14% більше. Однак, це є очікуваним, оскільки при різкому стрибку параметра адаптаційний контур потребує часу для перебудови, а ПІ-інтегратор реагує негайно.

До моменту зміни параметра (2000 с) обидва регулятори поведуться практично ідентично (рис. 12). Після стрибка K_p обидва регулятори продовжують прямувати до завдання без помітного погіршення. Однак, графік зміни виходу об'єкта при класичному ПІ регуляторі точніший на деяких ділянках, що і визначає його перевагу відповідно до ІАЕ на 14%. MRAC, у свою чергу, демонструє дещо більші відхилення в перехідних процесах після 2000 с, поки адаптаційний контур не налаштується на новий K . На рисунку 13 наведено графік зміни похибки адаптації. Після стрибка K (2000 с) похибка адаптації класичного ПІ зростає до $\pm 0,10$ після кожної зміни завдання і спа-

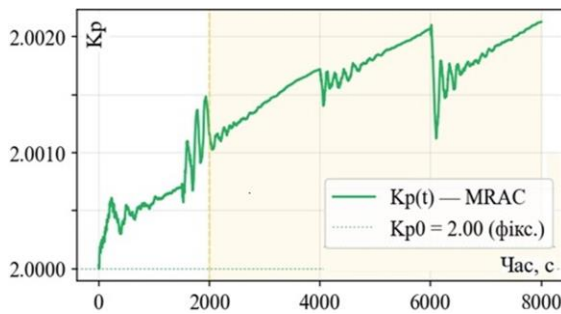


Рисунок 14 – Результати імітаційного моделювання при зміні K об'єкта. Зміна K_p

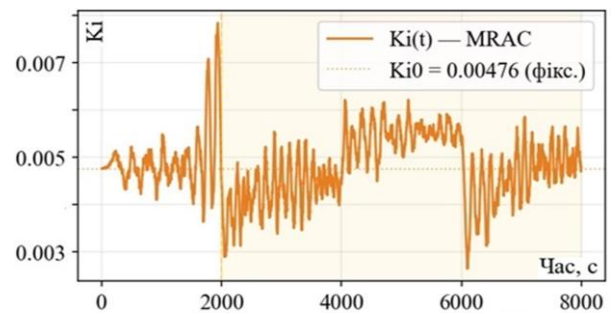


Рисунок 15 – Результати імітаційного моделювання при зміні K об'єкта. Зміна K_i

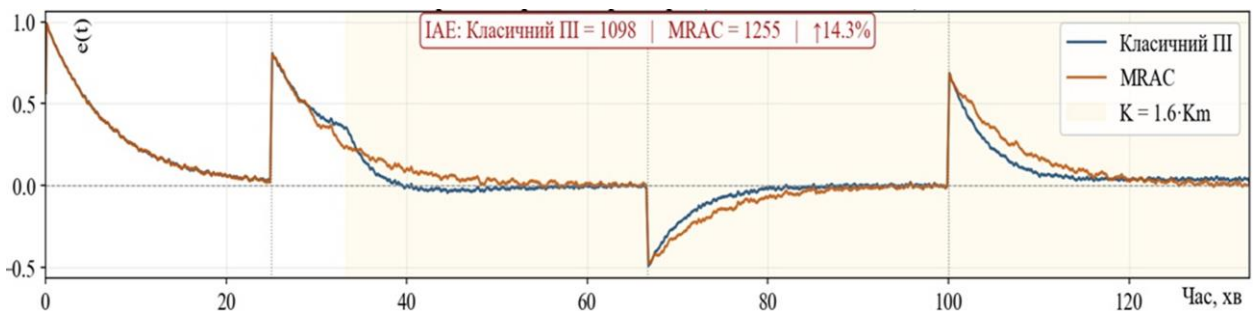


Рисунок 16 – Результати імітаційного моделювання при зміні K об'єкта. Відхилення виходу об'єкта керування від завдання

дає між ними. Це свідчить про те, що фіксований ПІ регулятор справляється з підвищеним K завдяки інтегратору. Похибка MRAC залишається в межах $\pm 0,02$ протягом усього сценарію, демонструючи стійку роботу адаптивного контуру навіть на зміненому об'єкті.

На рисунках 14 і 15 наведено адаптацію параметрів регулятора.

K_p зростає повільно і практично лінійно від 2,000 до 2,002 протягом усього горизонту, без помітного перепаду у момент зміни параметра. Це вказує на те, що адаптаційний контур реагує на зміну K поступово, а не імпульсно — що відповідає теоретичній поведінці градієнтного закону адаптації. K_i коливається навколо початкового значення 0,00476 у межах [0,003; 0,008] без чіткого тренду зростання, на відміну від номінального сценарію. Це означає, що при зміні K основна адаптація відбувається через K_p , а інтегральна складова лишається близькою до початкового значення.

На рисунку 16 наведено графік зміни похибки, як відхилення від завдання. Обидва регулятори мають дуже схожий про-

філь зміни похибки при зміні завдання і однакову стаціонарну точність. Після $t = 2000$ с класичний ПІ незначно краще тримається біля нуля у стаціонарних ділянках, тоді як MRAC має трохи більші, але зникаючі відхилення. Це кількісно відображається у перевазі класичного ПІ: IAE 1098 проти 1255 у MRAC.

Порівняльний аналіз якості регулювання

Для ефективної оцінки якості роботи запропонованої системи керування, для всіх варіантів імітаційного моделювання було розраховано інтегральні критерії якості, результати наведено в табл. 1 і 2. Результати показують, що MRAC значно виграє у сценаріях 1 та 2, де адаптація компенсує систематичне зміщення параметрів та постійне збурення.

У сценарії 3, при різкому стрибку підсилення, класичний ПІ незначно кращий (+14% по IAE), що пояснюється миттєвою реакцією інтегратора на відхилення, тоді як механізм адаптації потребує кількох сотень секунд для перебудови параметрів.

Таблиця 1 – Показники якості регулювання. ПІ-регулятор

Сценарій / Метод	ISE	IAE	ITAE
Номінальний	957,8	2287,0	9 157 428
Збурення d (+0,4)	849,7	1982,2	8 370 111
Зміна K (+60%)	464,2	1097,7	2 813 961

Таблиця 2 – Показники якості регулювання. MRAC

Сценарій / Метод	ISE	IAE	ITAE
Номінальний	508,8	1254,7	3 608 471
Збурення d (+0,4)	512,0	1281,8	3 729 124
Зміна K (+60%)	507,8	1254,8	3 611 015

Висновки

1. У дослідженні синтезовано адаптивну систему керування MRAC для колони синтезу метанолу. У номінальному режимі MRAC критерій ефективності роботи запропонованої системи IAE на 45% нижчий порівняно з класичним ПІ регулятором, завдяки підлаштуванню K_i , що компенсує систематичну похибку між ідентифікованою моделлю та реальним об'єктом.

2. За умов ступінчатого входного збурення MRAC на 35% ефективніший за IAE відповідно до аналога, що використовувався, завдяки швидкій перебудові K_i .

3. За умов різкого стрибку параметрів класичний ПІ незначно виграє (+14% IAE); проте при повільному дрейфі параметрів MRAC матиме суттєву перевагу.

4. Результати підтверджують доцільність застосування MRAC для керування хімічними процесами з параметричною невизначеністю і повільною зміною умов роботи.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Wagialla K. M., Elnashaie S. S. E. H. Fluidized-bed reactor for methanol synthesis. A theoretical investigation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1991. Vol. 10. P. 2298–2308. URL: <https://doi.org/10.1021/ie00058a009>
2. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive control. 2nd ed. Addison-Wesley, 1995. 574 p.
3. Ioannou P. A., Sun J. Robust adaptive control. Prentice Hall, 1996. 825 p.
4. Singh A. B., Jothi A. A. S., Jananisri S. Model reference adaptive control (MRAC) implementation for an industrial pilot stirrer process. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. 2017. P. 2072–2076. URL: <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392081>
5. Ritonja J., Goršek A., Pečar D. Model reference adaptive control for milk fermentation in batch bioreactors. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (24). Art. 9118. URL: <https://doi.org/10.3390/app10249118>
6. Abougarair A. J., Shashoa N. A. A. Model reference adaptive control for temperature regulation of continuous stirred tank reactor. *IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*. 2021. P. 276–281. URL: <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768396>

7. Mukherjee D., Raja J. L., Kundu P., Ghosh A. Design of optimal fractional order Lyapunov based model reference adaptive control scheme for CSTR. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, Iss. 1. P. 436–441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.072>
8. Ljung L. System identification: theory for the user. 2nd ed. Prentice Hall, 1999. 609 p.
9. System Identification Toolbox. User's guide. The MathWorks, Inc., 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/ident/>
10. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process dynamics and control. 4th ed. Wiley, 2016. 514 p.
11. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Stable adaptive systems. Prentice Hall, 1989. 494 p.

References

1. Wagialla, K. M., & Elnashaie, S. S. E. H. (1991). Fluidized-bed reactor for methanol synthesis. A theoretical investigation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 30(10), 2298–2308. <https://doi.org/10.1021/ie00058a009>
2. Åström, K. J., & Wittenmark, B. (1995). *Adaptive control* (2nd ed.). Addison-Wesley.
3. Ioannou, P. A., & Sun, J. (1996). *Robust adaptive control*. Prentice Hall.
4. Singh, A. B., Jothi, A. A. S., & Jananisri, S. (2017). Model reference adaptive control (MRAC) implementation for an industrial pilot stirrer process. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 2072–2076. <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392081>
5. Ritonja, J., Goršek, A., & Pečar, D. (2020). Model reference adaptive control for milk fermentation in batch bioreactors. *Applied Sciences*, 10(24), Article 9118. <https://doi.org/10.3390/app10249118>
6. Abougarair, A. J., & Shashoa, N. A. A. (2021). Model reference adaptive control for temperature regulation of continuous stirred tank reactor. *2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*, 276–281. <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768396>
7. Mukherjee, D., Raja, J. L., Kundu, P., & Ghosh, A. (2022). Design of optimal fractional order Lyapunov based model reference adaptive control scheme for CSTR. *IFAC-PapersOnLine*, 55(1), 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.072>
8. Ljung, L. (1999). *System identification: Theory for the user* (2nd ed.). Prentice Hall.
9. The MathWorks, Inc. (2024). *System identification toolbox. User's guide*. <https://www.mathworks.com/help/ident/>
10. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2016). *Process dynamics and control* (4th ed.). Wiley.
11. Narendra, K. S., & Annaswamy, A. M. (1989). *Stable adaptive systems*. Prentice Hall.

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR A METHANOL SYNTHESIS PLANT SYNTHESIS BASED ON A REFERENCE RESPONSE MODEL

Avramenko A. A.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-5803-4199>
e-mail: avramenko.alina.05@gmail.com

Korotynskiy A. P.

Ph.D
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6309-5970>
e-mail: ihfantkor@gmail.com

Skladannyi D. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3624-5336>
e-mail: skl_den@ukr.net

Zaporozhets Ju. A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
03056, 37, Prospect Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5052-7036>
e-mail: zja-ihf@ill.kpi.ua

Abstract. The object of this research is an adaptive control system for a methyl alcohol synthesis column. The purpose of the work is to develop and investigate a column control system, the implementation of which ensure control quality under parametric uncertainty conditions, improve the production process stability and the final product quality. The adaptive control system synthesis for the column is carried out based on the model reference action control (MRAC) method. The mathematical model of the system is obtained using the 'black box' identification method in the MATLAB System Identification Toolbox; the resulting first-order transfer function describes the 'feed gas flow rate – methanol mole fraction' channel. The adaptive controller is implemented based on a proportional-integral control rule with parameter updating according to the Lyapunov criterion, which guarantees the stability of the closed-loop system. To evaluate the synthesized control system performance, simulation modelling is carried out for three scenarios: steady-state operation, a step change in the object's gain (+60%) and a step input disturbance. The simulation experiment is conducted over 8,000 seconds with a step size of 2 seconds, using step changes in the reference signal of 1.0, 1.8, 1.3 and 2.0. The experimental results are used to evaluate the change in the system's output, the adaptation error, the degree of adaptation of the main parameters, and the deviation from the reference. It was shown that in steady-state operation under disturbance conditions, MRAC reduces the integral absolute error (IAE) by 45% and 35%, respectively, compared to a classical PI controller with fixed parameters. In the case of a sudden change in parameters (a step-like change in the object's gain of 60%), the classical PI controller showed a slightly better result (+14% IAE), which is explained by the settling time of the adaptive loop. The results obtained confirm the feasibility of using MRAC for controlling technological processes with parametric uncertainty.

Keywords: adaptive control, intelligent control systems, methanol synthesis column, Lyapunov function, PI controller, parametric uncertainty.