

Жученко О.А.

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

Савула А.А.

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

ВПЛИВ ТИПІВ РЕГУЛЯТОРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ З АКУСТИЧНОЮ ДІАГНОСТИКОЮ НА ВІДНОВЛЕННЯ РЕЖИМУ ПІСЛЯ АНОМАЛІЙ

У статті досліджується проблематика відновлення нормального функціонування технологічних об'єктів після виявлення аномалій засобами акустичної діагностики. Сучасні виробничі системи в енергетиці, хімічній промисловості та машинобудуванні характеризуються складністю технологічних процесів, високою вартістю обладнання та підвищеними вимогами до безперервності виробництва. За таких умов навіть короткочасні відхилення від номінальних режимів роботи можуть призвести до значних економічних втрат, погіршення якості продукції або виникнення аварійних ситуацій. Класичні системи автоматичного керування, що базуються на традиційних PID-регуляторах, часто виявляються недостатньо ефективними для швидкого та якісного відновлення заданих параметрів після виявлення дефектів методами звукової діагностики.

Метою дослідження є комплексний порівняльний аналіз ефективності різних типів регуляторів у системах автоматичного керування, інтегрованих з підсистемами акустичної дефектоскопії, та визначення оптимальних структур керування для забезпечення швидкого і стабільного відновлення технологічних режимів після детектування аномалій. Особлива увага приділяється дослідженню поведінки систем керування в перехідних режимах, що виникають після спрацювання діагностичних алгоритмів, коли система повинна не лише усунути наслідки виявленого дефекту, але й забезпечити плавне повернення до нормального функціонування без додаткових коливань та перерегулювань.

У роботі проведено детальний аналіз характеристик основних типів регуляторів: класичних PID-контролерів з різними методами налаштування параметрів, нечітких регуляторів на базі fuzzy-логіки, комбінованих структур керування типу PID-fuzzy, а також сучасних методів оптимального керування з використанням лінійно-квадратичного регулятора (LQR) та активного придушення збурень (ADRC). Для кожного типу регулятора досліджено особливості налаштування параметрів, динамічні характеристики, стійкість до збурень та здатність забезпечувати швидке відновлення заданих режимів роботи після виявлення дефектів акустичними методами діагностики.

Результати моделювання та експериментальних досліджень демонструють, що вибір типу регулятора суттєво впливає на якість перехідних процесів при відновленні режиму після аномалій. Встановлено, що класичні PID-регулятори забезпечують прийнятну якість керування лише за умови ретельного налаштування параметрів для конкретного об'єкта і можуть бути недостатньо ефективними при значних збуреннях. Нечіткі регулятори демонструють кращу адаптивність до змін параметрів об'єкта керування, проте потребують значних зусиль при розробці баз правил. Комбіновані PID-fuzzy структури поєднують переваги обох підходів, забезпечуючи високу якість керування в широкому діапазоні робочих умов. LQR-регулятори виявляють найкращі показники щодо швидкості відновлення режиму та придушення збурень, особливо в поєднанні з спостерігачами стану для оцінювання неконтрольованих збурень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні рекомендацій щодо вибору типу регулятора залежно від специфіки технологічного об'єкта, характеру можливих аномалій та вимог до якості відновлення режиму, що дозволяє підвищити надійність та ефективність систем автоматичного керування з інтегрованою акустичною діагностикою.

Ключові слова: система автоматичного керування, акустична діагностика, PID-регулятор, нечіткий регулятор, LQR-регулятор.

Постановка проблеми. Сучасні технологічні об'єкти в енергетиці, хімічній промисловості та машинобудуванні досить часто працюють в умовах невизначеності, повільного деградування параметрів і можливих раптових аномалій. Класичні системи автоматичного керування, розробляються під номінальну модель об'єкта, зазвичай забезпечують прийнятну якість у штатних режимах, однак виявляються чутливими до змін параметрів, появи дефектів або нестандартних режимів роботи. Це призводить до погіршення якості регулювання, збільшення енергоспоживання, зростання навантаження на виконавчі механізми та, у гіршому випадку, до аварійних ситуацій.

Окремим викликом є необхідність виявлення аномалій без додаткових датчиків, або з мінімальним втручанням у конструкцію обладнання. В цих умовах перспективним є використання акустичної діагностики як недорогого та інформативного джерела даних для моніторингу техніко-експлуатаційного стану об'єктів. Обробка звукових сигналів дозволяє фіксувати зміни у роботі агрегатів, появу нетипових вібрацій, тертя чи інших дефектів, які не завжди відображаються в стандартних технологічних змінних.

Відтак, постає задача побудови системи керування з акустичним детектором аномалій, яка, по-перше, за звуковими ознаками виявляє факт порушення нормального режиму, а по-друге, автоматично переналаштовує керування для відновлення цільових робочих параметрів.

На якість такого відновлення впливають щонайменше три взаємопов'язані чинники:

- вибір критерію якості, за яким формується задача оптимізації;
- вибір алгоритму оптимізації, що налаштовує параметри керування після аномалії;
- вибір структури регулятора, який взаємодіє з об'єктом.

Отже, актуальною є задача комплексного аналізу впливу цих трьох складових на динаміку відновлення режиму після аномалії, виявленої за акустичними ознаками, та формування практичних рекомендацій для інженерів щодо вибору структури екстремальної системи керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі Ванг В., Нінг Я., Жанг Я., Ксу П., Лі Б. [1] запропоновано модифікацію лінійного ADRC – FOI-LADRC (Linear Active Disturbance Rejection Control with Fractional-Order Integral Action). Базовий LADRC побудований на лінійному розширеному спостерігачі стану (LESO), який оці-

нює сумарне «узагальнене збурення» і компенсує його в контурі керування. Автори додають до стандартної структури дробово-інтегральну ланку (fractional-order integral, FOI) і проєктують її через ідеальну передатну функцію замкненого контуру (Bode's Ideal Transfer Function) та поліноміальне розташування коренів. Об'єктом дослідження є нестабільна механічна система типу «візок–маятник». Порівнюються три варіанти: стандартний LADRC, LADRC з цілочисельним інтегратором (IOI-LADRC) і запропонований FOI-LADRC. Оцінюються здатність до відслідковування завдання, час відновлення після імпульсних/ступінчастих збурень, робастність до зміни параметрів та невизначеностей моделі. Результати чисельних експериментів і експериментів на стенді показують, що FOI-LADRC забезпечує кращий компроміс між швидкістю і робастністю:

- зберігається висока якість відслідковування (малі перехідні похибки);
- зменшується чутливість до зміни параметрів та зовнішніх збурень;
- перехідні процеси після відхилення мають менші перерегулювання і швидше загасання порівняно з класичним LADRC.

Кукуолджи Д., Кузмановіч С. та Леві Є. [2] пропонують систематичну методику побудови PID-подібного нечіткого регулятора і складеного (compound) FLC для електропривода з векторним керуванням асинхронним двигуном. Методика складається з двох етапів:

1. Проєктування PID-подібного FLC. Вхідними змінними є похибка і зміна похибки, при цьому аналіз поведінки в просторі «помилка–похідна помилки» (error state-space) використовується для систематичного вибору функцій належності та правил.

2. Формування складеного FLC. До першого FLC додається другий, структурно подібний, підключений паралельно. Параметри обох регуляторів оптимізуються з метою покращення відпрацювання малих ступінчастих впливів і підвищення стійкості до збурень.

Автори підкреслюють, що:

- при номінальних умовах оптимізований PID і оптимізований PID-подібний FLC дають близьку якість перехідних процесів (що важливо для «справедливого» порівняння);
- перевага compound FLC проявляється саме при зміні режимів і параметрів, де він демонструє кращу здатність до пригнічення збурень і стабілізації швидкості двигуна в широкому діапазоні умов.

Ця стаття показує, що перехід від класичного PID до PID-подібного складеного FLC дозволяє отримати більш зглажені та швидкі перехідні при зміні навантаження або параметрів привода, з меншими перерегулюваннями і кращим демпфуванням.

Гонзалес Л. [3] розглядають керування потоком повітря в електропневматичному прототипі медичного вентилятора. Порівнюються два регулятори: класичний PID і нечіткий регулятор (FLC), реалізовані на платформі ESP32, з експериментальними випробуваннями на тест-легені. Методика:

– проводяться реальні експерименти із тест-легенем із різною жорсткістю й опором дихальних шляхів;

– аналізуються часові показники (час наростання, час встановлення, перерегулювання, усталена похибка) та статистична узгодженість із промисловим еталонним вентилятором (Bland–Altman аналіз);

– додатково виконується частотний аналіз (критерій Джурі, діаграма Найквіста) для оцінки запасів стійкості та робастності.

Основні висновки:

– PID-регулятор забезпечує швидшу реакцію (час встановлення $\sim 0,32\text{--}0,43$ с), що важливо для миттєвого відновлення потоку після стрибка завдання. PLOS

– FLC демонструє кращу узгодженість та робастність: вузчі межі згоди та меншу стандартну похибку у Bland–Altman аналізі, кращу поведінку в режимах «високого попиту» (доставлення 900 мЛ об'єму), а крива Найквіста розташована далі від критичної точки $(-1, 0j)$, що свідчить про підвищену стійкість до збурень і невизначеностей.

У висновку ми отримуємо, що PID дає мінімальний час відновлення, але FLC краще забезпечує стабільність і точність при сильних відхиленнях та збуреннях (кашель, витік у контурі тощо). Тобто вибір типу регулятора прямо впливає на компроміс «максимально швидке відновлення vs. робастність і гладкість режиму».

Мангеша К., Джін Г. та Сон Я.[4] розглядають задачу керування температурою та вологістю в теплиці (MIMO-система з сильною нелінійністю та зв'язаними змінними). Запропоновано дві стратегії:

1. Нелінійний контур з лінеаризацією за зворотним зв'язком + LQR (feedback linearization + LQR): модель теплиці переводиться до еквівалентної лінійної форми, після чого синтезується пропорційно-інтегральний LQR-регулятор.

2. Практичний PID, параметри якого налаштовано методом генетичного алгоритму, з критеріями мінімізації інтегралу абсолютної похибки та відхилення керуючого сигналу (IAEU) і інтегралу квадрата похибки (ISEU).

За результатами моделювання на нелінійній моделі для умов літнього дня:

– обидві стратегії забезпечують прийнятне відслідковування завдання і базову стійкість до збурень;

– feedback linearization + LQR демонструє кращу компенсацію збурень: знижені пікові відхилення температури/вологості при зовнішніх збуреннях і швидше відновлення режиму до заданого клімату теплиці;

– PID-регулятор показує краще відслідковування завдання з мінімальним перерегулюванням при змінах уставки, але гірше гасить збурення, тобто «довше виходить з режиму відхилення».

Дослідження демонструє, що перехід від PID до більш складної нелінійної структури з LQR дозволяє отримати більш швидке системи, після зовнішніх збурень.

Таким чином ми бачимо, що різні регулятори можуть мати різний ефект при перерегулюванні системи в залежності від умов використання та системи в цілому.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є структурний аналіз екстремальної системи керування з акустичним детектором аномалій, зосереджений на порівнянні різних типів регуляторів у єдиному сценарії моделювання “аномалія–переналаштування–відновлення режиму” за фіксованим критерієм якості та алгоритму оптимізації.

Відповідно до поставленої мети у даній роботі вирішуються такі основні задачі:

1. Сформувані структурну схему досліджуваного об'єкта керування.

2. Обрати та математично описати кілька типових структур регуляторів.

3. Провести серію чисельних експериментів для порівняння роботи різних структур регуляторів.

4. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу.

Структура об'єкта керування та екстремальної системи. В рамках даної роботи екстремальна система керування розглядається як надбудова над класичним контуром автоматичного регулювання, доповненим акустичним каналом виявлення аномалій та екстремальним контуром переналаштування керуючої дії. Для цілей чисель-

ного моделювання ця архітектура спрощується до лінійної динамічної моделі першого порядку з можливістю стрибкоподібної зміни параметрів у момент аномалії.

На концептуальному рівні структурну схему можна подати у вигляді таких основних підсистем:

1. Технологічний об'єкт керування

– безпосередньо описується динамічною моделлю:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ay(t) + bu(t),$$

– у момент аномалії параметри об'єкта змінюються (наприклад, внаслідок дефекту, зміни навантаження чи деградації вузла).

– Аномалія моделюється як стрибкоподібна зміна параметрів (a, b) у момент часу $t = t_{\text{аном}}$. Для номінального режиму:

$a = a_{\text{normal}}, b = b_{\text{normal}}$, після аномалії:

$a = a_{\text{faulty}}, b = b_{\text{faulty}}$. Вибір параметрів (наприклад, $a_{\text{normal}} = 0,5$, $b_{\text{normal}} = 0,5$, $a_{\text{faulty}} = 0,2$, $b_{\text{faulty}} = 0,3$) відображає погіршення динамічних властивостей об'єкта (повільніша реакція, змінена чутливість до керуючого впливу) після появи дефекту.

2. Акустичний канал виявлення аномалій

– включає мікрофони, попередню обробку сигналів та модуль оцінки ймовірності аномалії $P_{\text{аном}}(t)$;

– за значенням $P_{\text{аном}}(t)$ відносно порогу формується логічний сигнал “аномалія виявлена”.

– модуль екстракції ознак (спектральні коефіцієнти, енергетичні показники, MFCC, статистики у часовій області);

– класифікатор, що оцінює ймовірність наявності аномалії

3. Екстремальний контур переналаштування керування

– активується лише після спрацювання акустичного детектора; реалізує процес оптимізації або адаптації параметрів керування (чи параметрів регулятора) за заданим критерієм якості; у цій роботі представлений набір регуляторів (класичний, адаптивний, LQR, MRAC, H_{∞}), між якими виконується порівняння.

– У чисельному моделюванні, екстремальний контур інтерпретується через вибір конкретної структури регулятора та реалізацію оновлення керуючого сигналу в часі.

– для простого адаптивного регулятора:

$$u_{k+1} = u_k + \eta(y^* - y_k),$$

– для MRAC – через MIT-правило:

$$\dot{\theta} = -\gamma er, u = \theta r,$$

– для LQR/ H_{∞} – через фіксоване матричне підсилення K , отримане за розв'язком відповідного алгебраїчного рівняння.

Структури регуляторів та їх математичний опис

У даному дослідженні порівнюються декілька типових структур регуляторів, які можуть бути інтегровані в екстремальну систему керування з акустичним детектором аномалій. Усі регулятори працюють із однаковою базовою безрозмірною моделлю об'єкта першого порядку:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -ay(t) + bu(t),$$

де $y(t)$ – вихід (регульована величина), $u(t)$ – керуючий сигнал, $a > 0$ та $b > 0$ – параметри об'єкта, що змінюються у момент аномалії $t = t_{\text{аном}}$.

Класичний режим із фіксованим керуванням

Класичний режим із фіксованим керуванням використовується як еталон без адаптації. У цьому випадку керуючий сигнал не змінюється в часі:

$$u(t) = u_{\text{fixed}} = \text{const.}$$

Для номінальних параметрів об'єкта $(a_{\text{normal}}, b_{\text{normal}})$ рівноважний режим досягається, якщо:

$$0 = -a_{\text{normal}} y^* + b_{\text{normal}} u_{\text{eq}}, u_{\text{eq}} = \frac{a_{\text{normal}}}{b_{\text{normal}}} y^*.$$

У чисельних прикладах значення u_{fixed} обирається близьким до u_{eq} номінального режиму. Після виникнення аномалії параметри об'єкта змінюються на $(a_{\text{faulty}}, b_{\text{faulty}})$, але керування залишається фіксованим. Це приводить до нового усталеного режиму, який, як правило, відхиляється від цільового значення y^* . Такий режим дозволяє оцінити, наскільки сильно погіршується якість керування без будь-якої адаптації.

Простий адаптивний регулятор з градієнтним налаштуванням керування.

Простий адаптивний регулятор реалізує ітераційне коригування керуючого сигналу на основі поточної похибки:

$$e(t) = y^* - y(t).$$

У дискретному часі, для моментів t_k з кроком T , закон оновлення має вигляд

$$u_{k+1} = u_k + \eta e_k,$$

де $e_k = y^* - y_k$, $\eta > 0$ – коефіцієнт навчання (швидкість адаптації).

Таким чином, адаптивний регулятор намагається зменшити похибку шляхом “градієнтного”

підстроювання u_k , не використовуючи явної інформації про параметри об'єкта (a, b) . Це проста, але показова схема, яка імітує роботу елементарного екстремального контуру, де в ролі "параметра" виступає сам керуючий сигнал.

Оптимальний регулятор типу LQR

Оптимальний регулятор LQR (Linear Quadratic Regulator) проектується для номінальної моделі об'єкта з параметрами $(a_{\text{normal}}, b_{\text{normal}})$. Для аналізу відхилень від цільового значення вводиться змінна стану

$$x(t) = y(t) - y^*$$

Підставивши $y(t) = x(t) + y^*$ у модель об'єкта, отримаємо для номінальних параметрів:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_{\text{normal}} x(t) + b_{\text{normal}} (u(t) - u_{\text{eq}}),$$

де

$u_{\text{eq}} = \frac{a_{\text{normal}}}{b_{\text{normal}}} y^*$ рівноважне керування для номінального режиму.

Позначимо

$A = [-a_{\text{normal}}]$, $B = [b_{\text{normal}}]$, і розглянемо квадратичний критерій якості

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u_{\text{eq}}(t)^T R u_{\text{eq}}(t)) dt,$$

де $u_{\text{eq}}(t) = u(t) - u_{\text{eq}}$, $Q \geq 0$, $R > 0$ – вагові матриці.

Розв'язок алгебраїчного рівняння Ріккати

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

визначає матрицю P , а оптимальний закон керування має вигляд

$u_{\text{eq}}(t) = -Kx(t)$, $K = R^{-1} B^T P$. Враховуючи визначення u_{eq} , повний закон керування записується як

$$u(t) = u_{\text{eq}} - K(y(t) - y^*).$$

У чисельному моделюванні параметри Q та R задаються таким чином, щоб забезпечити компроміс між швидким пригніченням відхилень та обмеженням амплітуди керуючого сигналу. Після виникнення аномалії $(a, b) \rightarrow (a_{\text{faulty}}, b_{\text{faulty}})$ структура регулятора **не змінюється**, тобто LQR діє як регулятор, спроектований за номінальною моделлю, в умовах параметричної невизначеності.

Адаптивний регулятор на основі моделі-еталона (MRAC)

Адаптивний регулятор MRAC (Model Reference Adaptive Control) налаштовується таким чином, щоб вихід реального об'єкта $y(t)$ відслідковував вихід деякої референтної моделі $y_m(t)$. Для моделі-еталона обирається система першого порядку:

$$\frac{dy_m(t)}{dt} = -a_m y_m(t) + b_m r(t),$$

де $a_m > 0$, $b_m > 0$ – бажані динамічні параметри, а $r(t)$ – вхідний сигнал моделі-еталона (у даному дослідженні $r(t) = y^*$).

Закон керування для реального об'єкта задається у вигляді

$u(t) = \theta(t)r(t)$, де $\theta(t)$ – адаптивний параметр, який повинен налаштовуватися так, щоб $y(t)$ наближалось до $y_m(t)$.

Розглядається функція помилки

$e(t) = y(t) - y_m(t)$, і квадратичний критерій

$J = \frac{1}{2} e(t)^2$. Класичне МІТ-правило передбачає оновлення параметра $\theta(t)$ за градієнтним законом:

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial \theta},$$

де $\gamma > 0$ – коефіцієнт адаптації. У найпростішій евристичній постановці для лінійного об'єкта припускають $\frac{\partial e}{\partial \theta} \sim r(t)$, що дає

$\dot{\theta}(t) = -\gamma e(t)r(t)$. З урахуванням того, що в даній

роботі $r(t) = y^* = \text{const}$, адаптаційне рівняння набуває вигляду

$\dot{\theta}(t) = -\gamma e(t)y^*$. У дискретній реалізації для

моментів часу t_k це рівняння інтегрується чисельно, а на кожному кроці обчислюється керування

$$u_k = \theta_k y^*.$$

Після виникнення аномалії параметри об'єкта змінюються, однак MRAC завдяки адаптації $\theta(t)$ намагається компенсувати цю зміну і зберегти відслідковування моделі-еталона, заданої параметрами a_m, b_m .

Робастний регулятор H_{∞}

Робастний регулятор H_{∞} орієнтований на мінімізацію найгіршого випадку впливу збурень на вихід системи. У спрощеній постановці розглядається лінійна система зі станом $x(t) = y(t) - y^*$ та двома входами:

– керування $u_{\text{eq}}(t) = u(t) - u_{\text{eq}}$;

– збурення $w(t)$, що діє через канал B_1 .

Номінальна динаміка у відхиленнях має вигляд:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_2 u_{\text{eq}}(t) + B_1 w(t),$$

де

$A = [-a_{\text{normal}}]$, $B_2 = [b_{\text{normal}}]$, $B_1 = [1]$. Постановка H_{∞} передбачає знаходження матриці підсилення K , яка забезпечує закон

$$u_{\text{eq}}(t) = -Kx(t),$$

такий, що замкнена система є стійкою і передавальна функція від $w(t)$ до вихідних змінних (стану або контрольованого виходу) має норму \mathcal{H}_{∞} , що не перевищує заданого рівня $\gamma > 0$.

У стандартній формі задача приводиться до розв'язання модифікованого алгебраїчного рівняння Ріккати:

$$A^T P + PA + Q - PB_2 R^{-1} B_2^T P + \frac{1}{\gamma^2} P B_1 B_1^T P = 0,$$

де $Q \geq 0$, $R > 0$ – вагові матриці. За знайденою матрицею P матриця підсилення визначається як

$$K = R^{-1} B_2^T P.$$

Повний закон керування у вихідних змінних записується:

$$u(t) = u_{eq} - K(y(t) - y^*).$$

У даній роботі регулятор H_∞ синтезується для номінальної моделі, а далі оцінюється його поведінка при зміні параметрів об'єкта (a, b) після аномалії. Таким чином аналізується, наскільки робастний підхід дозволяє зберегти прийнятну якість керування за параметричної невизначеності, у порівнянні з LQR та адаптивними структурами.

Результати моделювання екстремальної системи керування

На рисунках 1–3 наведено результати чисельного моделювання роботи п'яти варіантів регуляторів у загальному сценарії “номінальний режим – аномалія в момент часу $t=100$ с – відновлення режиму”.

Вертикальна пунктирна лінія на всіх графіках відповідає моменту аномалії (зміні параметрів об'єкта), горизонтальна пунктирна – цільовому значенню виходу $y^*=1$ або порогу стабілізації похибки.

На рисунку 1 показано перехідні процеси виходу для всіх п'яти регуляторів.

До аномалії ($t < 100$ с):

– **Classic ($u = \text{const}$)** забезпечує монотонний аперіодичний перехідний процес до y^* без перерегулювання. Час виходу на усталений рівень є помірним, характерним для системи першого порядку.

– **Adaptive** демонструє помітно повільнішу збіжність: через початково занижене керування u вихід наближається до y^* плавно, але значно довше, ніж у випадку Classic та оптимальних регуляторів.

– **LQR та H_∞** забезпечують найшвидше досягнення околу y^* , причому перерегулювання практично відсутнє або дуже мале.

– **MRAC** на початку демонструє осциляційний характер перехідного процесу з помітним перерегулюванням, однак амплітуда коливань швидко зменшується, і вихід також наближається до y^* .

Після аномалії ($t \geq 100$ с):

– У режимі **Classic** вихід монотонно відхиляється вгору й фіксується на новому рівні, істотно вищому за цільовий. Це демонструє неспроможність фіксованого керування компенсувати зміну параметрів об'єкта.

– **Adaptive** генерує помірне перерегулювання одразу після аномалії, але завдяки адаптації керуючого сигналу система поступово повертається в околу y^* . Остаточна похибка є малою.

– **LQR та H_∞** після зміни параметрів об'єкта виводять систему на новий усталений режим із невеликим, але сталим відхиленням виходу від цільового значення. Це типова поведінка регуляторів, спроектованих за номінальною моделлю без додаткової адаптації.

– **MRAC** після аномалії знову формує коливальний перехідний процес, проте амплітуда коливань зменшується, і вихід повертається в околу y^* з практично нульовою сталою похибкою.

У цілому MRAC та Adaptive є єдиними варіантами, які відновлюють майже нульову сталу

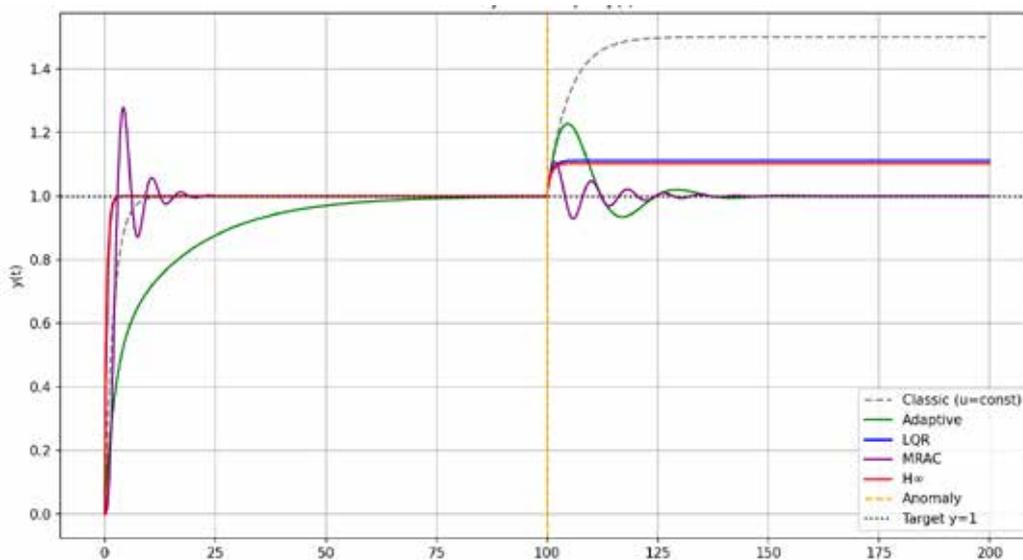


Рис. 1. Перехідні процеси виходу на усталений рівень для всіх п'яти регуляторів

похибку після аномалії, тоді як LQR та H_∞ забезпечують швидке, але зсунутих щодо цілі усталених режимів, а Classic взагалі “втрачає” ціль.

Рисунок 2 ілюструє поведінку керуючих сигналів.

На початку перехідного процесу:

– H_∞ формує найбільш інтенсивний стартовий вплив, після чого сигнал швидко спадає до околу рівноважного значення.

– MRAC також генерує суттєві коливання керуючого сигналу з чергуванням піків і провалів, що зумовлює відповідні коливання виходу.

– LQR працює більш “м’яко”: початкове значення u лише трохи перевищує номінальний рівень, а далі сигнал швидко стабілізується.

– Adaptive стартує з заниженого u і поволі збільшує його до потрібного значення; керуючий сигнал плавний, без різких кидків, але це досягається ціною повільнішої реакції.

– Classic “тримає” сталий рівень $u = \text{const}$ на всьому проміжку, що підкреслює відсутність будь-якої реакції на зміну стану.

Після аномалії:

– Classic не змінює керування, тому крива $u(t)$ лишається горизонтальною; зміни відбуваються лише у виході.

– Adaptive робить серію плавних корекцій керуючого сигналу, знижуючи u до нового рівноважного значення, яке забезпечує відновлення виходу до u^* . Коливання $u(t)$ невеликі, а швидкість сходження до нового рівня – помірна.

– LQR та H_∞ після аномалії здійснюють короткочасні коливання керуючого сигналу навколо нового рівня, але доволі швидко стабілізуються.

При цьому остаточне значення u відрізняється від номінального, однак цього виявляється недостатньо для повної компенсації зміни параметрів об’єкта.

– MRAC демонструє найбільш “живу” реакцію: після аномалії з’являється серія згасаючих коливань $u(t)$, які відображають процес переналаштування адаптивного параметра $\theta(t)$. У результаті керування сходиться до значення, що забезпечує відновлення виходу до u^* .

Рисунок 3 узагальнює якість регулювання через модуль похибки $\#e(t)\#$. Горизонтальна пунктирна лінія показує поріг стабілізації (наприклад, $\#e\# \leq 0,02$).

До аномалії:

– LQR та H_∞ забезпечують найшвидше зменшення похибки: $\#e(t)\#$ дуже швидко падає нижче порогу стабілізації й надалі залишається на низькому рівні.

– MRAC спочатку створює відносно великі коливання похибки, але амплітуда швидко зменшується, і після короткого перехідного процесу $\#e(t)\#$ також опиняється нижче порогу.

– Classic демонструє стандартний експоненційний спад $\#e(t)\#$, що є повільнішим, ніж у LQR/ H_∞ , але без коливань.

– Adaptive збігається до нуля найповільніше: $\#e(t)\#$ монотонно спадає, але перетин порогу стабілізації відбувається значно пізніше, ніж у інших регуляторів.

Після аномалії:

– У режимі Classic похибка різко зростає та асимптотично наближається до досить великого значення, так і не входячи в область стабілізації.

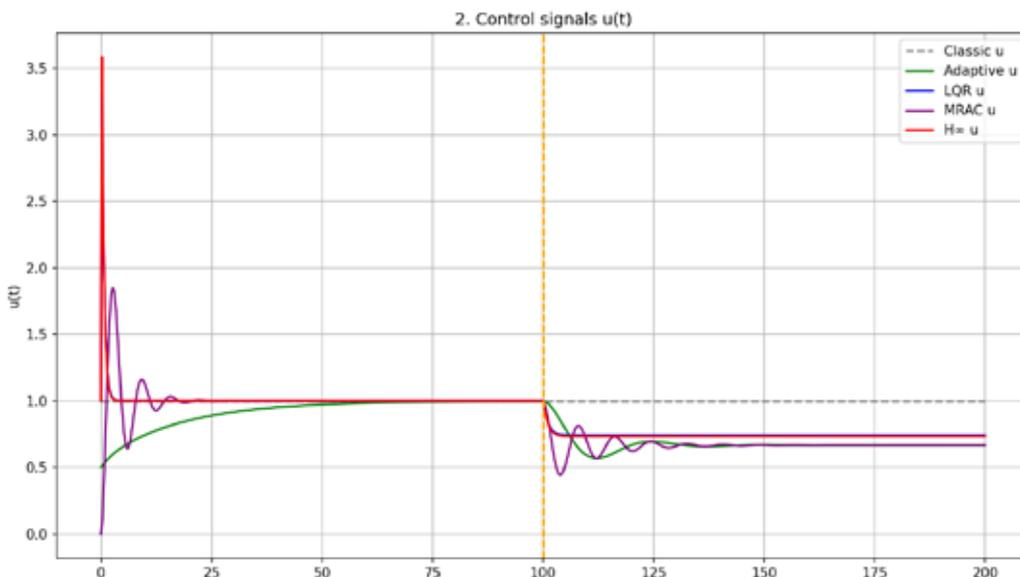


Рис. 2. Графік зміни керуючих сигналів

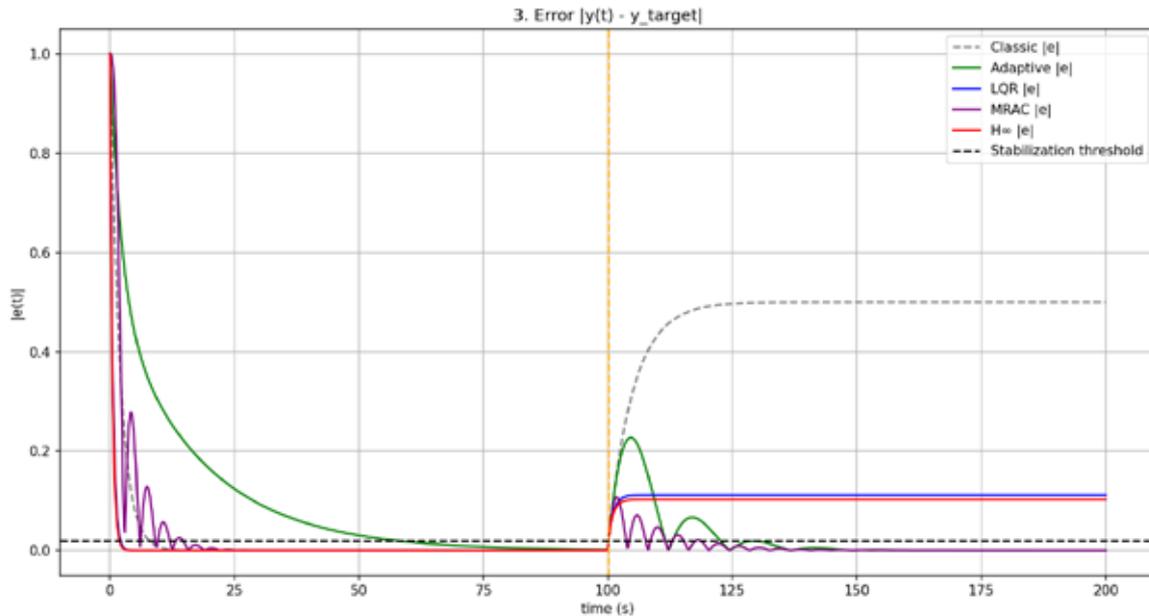


Рис. 3. Графік зміни похибки

– **LQR та H_∞** формують стрибок $e(t)$ до нового рівня, після чого похибка залишається практично сталою. Це відповідає малому, але сталому систематичному відхиленню виходу від цілі.

– **Adaptive** генерує помірний максимум похибки одразу після аномалії, однак далі $e(t)$ монотонно спадає і з часом знову входить у зону стабілізації, забезпечуючи малу сталу похибку.

– **MRAC** після аномалії створює осциляційний профіль $e(t)$ із поступовим згасанням коливальних; при цьому середній рівень похибки наближається до нуля, і система досить швидко повертається в околу порогу стабілізації.

Висновки. За результатами чисельного моделювання можна сформулювати такі основні висновки:

1. **Класичний режим з фіксованим керуванням** не забезпечує відновлення режиму після аномалії:

2. **Оптимальний (LQR) та робастний (H_∞) регулятори**, спроектовані за номінальною моделлю, демонструють високі показники якості в номінальному режимі та мале перерегулювання,

однак після зміни параметрів об'єкта формують **сталу систематичну похибку** і не входять у задану зону допуску.

3. **Простий адаптивний регулятор з градієнтним налаштуванням** у забезпечує реальне відновлення режиму: похибка після аномалії зменшується до допустимого рівня. Разом з тим, швидкодія є помірною, а перехідний процес – найбільш “м’яким” серед усіх варіантів.

4. **MRAC з моделлю-еталоном** показав **найкращий компроміс між точністю та швидкістю**: мінімальні помилки, найменший час встановлення та практично нульова стала похибка. Недоліком є підвищене, але прийнятне перерегулювання і дещо більша енергія керування порівняно з простим адаптивним регулятором.

5. З точки зору структурного синтезу екстремальної системи керування з акустичним детектором аномалій, саме **адаптивні регулятори (передусім MRAC)** є найбільш придатними кандидатами на роль “ядра” системи відновлення режиму, тоді як LQR та H_∞ доцільно розглядати як базу для гібридних схем із зовнішньою адаптацією.

Список літератури:

1. Wang W., Ning Y., Zhang Y., Xu P., Li B. Linear active disturbance rejection control with linear quadratic regulator for Stewart platform in active wave compensation system. *Applied Ocean Research*. 2025. Vol. 156. Article 104469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104469>

2. Kukulj D. D., Kuzmanović S. B., Levi E. Design of a PID-like compound fuzzy logic controller. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001. Vol. 14, No. 6. P. 785–803. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(02\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(02)00014-3)

3. González L., Griffith I., Lescher A., Molino J., Rojas A., Quijano D. Evaluation of flow control using PID versus fuzzy logic in an electropneumatic circuit for pulmonary ventilation applications. *PLoS One*. 2025. Vol. 20, No. 9. Article e0317809. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317809>

4. Mengesha K. A., Jin G.-G., Son Y.-D. Comparison of the feedback linearization plus LQR controller and the PID controller for greenhouse indoor climate. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 74–82. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251801.8766>

Zhuchenko O.A., Savula A.A. THE INFLUENCE OF REGULATOR TYPES CONTROL SYSTEM WITH ACOUSTIC DIAGNOSTICS ON MODE RECOVERY AFTER ANOMALIES

The article investigates the problems of restoring normal functioning of technological objects after anomaly detection by means of acoustic diagnostics. Modern production systems in energy, chemical industry, and mechanical engineering are characterized by complexity of technological processes, high equipment costs, and increased requirements for production continuity. Under such conditions, even short-term deviations from nominal operating modes can lead to significant economic losses, deterioration of product quality, or emergency situations. Classical automatic control systems based on traditional PID controllers often prove insufficiently effective for rapid and high-quality restoration of specified parameters after defect detection by acoustic diagnostic methods.

The aim of the study is a comprehensive comparative analysis of the effectiveness of different types of controllers in automatic control systems integrated with acoustic defectoscopy subsystems, and determination of optimal control structures for ensuring fast and stable restoration of technological modes after anomaly detection. Particular attention is paid to studying the behavior of control systems in transient modes that occur after diagnostic algorithms are triggered, when the system must not only eliminate the consequences of the detected defect but also ensure smooth return to normal functioning without additional oscillations and overshoots.

The work presents a detailed analysis of the characteristics of main controller types: classical PID controllers with various parameter tuning methods, fuzzy logic-based controllers, combined PID-fuzzy control structures, as well as modern optimal control methods using linear quadratic regulator (LQR) and active disturbance rejection control (ADRC). For each controller type, the features of parameter tuning, dynamic characteristics, disturbance rejection capability, and ability to ensure rapid restoration of specified operating modes after defect detection by acoustic diagnostic methods are investigated.

The simulation and experimental research results demonstrate that the choice of controller type significantly affects the quality of transient processes during mode restoration after anomalies. It is established that classical PID controllers provide acceptable control quality only under condition of careful parameter tuning for a specific object and may be insufficiently effective under significant disturbances. Fuzzy controllers demonstrate better adaptability to changes in control object parameters but require considerable effort in developing rule bases. Combined PID-fuzzy structures combine the advantages of both approaches, ensuring high control quality over a wide range of operating conditions. LQR controllers show the best performance in terms of mode restoration speed and disturbance rejection, especially in combination with state observers for estimating uncontrolled disturbances.

The practical significance of the obtained results lies in forming recommendations for controller type selection depending on the specifics of the technological object, the nature of possible anomalies, and requirements for mode restoration quality, which allows improving reliability and efficiency of automatic control systems with integrated acoustic diagnostics.

Key words: automatic control system, acoustic diagnostics, PID controller, fuzzy controller, LQR controller.

Дата надходження статті: 25.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025