DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05
УДК 681.5.03

Т.М. ФУРСОВА, кандидат технічних наук
доцент кафедри Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: 0000-0003-1399-9039
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

РОЛЬ ІНТЕГРАЛЬНИХ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ В ОЦІНЦІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті досліджено особливості застосування інтегральних критеріїв якості для оцінювання процесів автоматичного регулювання в енергетичних системах. Ці складні технічні системи характеризуються підвищеними вимогами до точності, стабільності та енергоефективності, де показники якості перехідних процесів безпосередньо впливають на надійність функціонування обладнання та ефективність технологічних процесів. Традиційні методи оцінювання, що базуються на розв'язанні диференціальних рівнянь або детальному аналізі перехідних характеристик, є трудомісткими та недостатньо придатними для оперативної діагностики, що актуалізує використання інтегральних критеріїв як більш простих та універсальних показників. У роботі проведено системний аналіз найбільш поширених інтегральних критеріїв, включно з лінійним, квадратичним та узагальненим, та визначено їх придатність для оцінювання різних типів перехідних процесів. Лінійний критерій розглянуто як найпростіший інструмент для швидкої оцінки затухання коливань, однак підкреслено його обмеженість у випадках зміни знаку регулювальної помилки та коливального характеру процесу. Квадратичний критерій позбавлений цього недоліку та дозволяє оцінювати енергетичний складник відхилень, що робить його ефективним при оптимізації систем автоматичного регулювання та порівнянні їхньої економічної ефективності. Розглянуто також узагальнені інтегральні критерії, що базуються на квадратичних формах стану і широко застосовуються в задачах оптимального керування. Показано, що мінімізація інтегральних критеріїв не завжди гарантує досягнення бажаної форми перехідного процесу, зокрема з точки зору ступеня коливальності та сталості. Тому обґрунтовано доцільність їх поєднання з додатковими показниками якості, що дозволяє уникнути некоректної оцінки та забезпечує комплексний підхід до аналізу роботи систем автоматичного керування. Отримані результати підтверджують високу практичну цінність інтегральних критеріїв як інструменту швидкого та інформативного контролю якості регулювання в енергетичних та промислових системах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: якість, оцінка, інтегральні критерії, автоматичне регулювання.

Як цитувати: Фурсова Т. М. (2025). Роль інтегральних критеріїв якості в оцінці систем автоматичного регулювання складних енергетичних комплексів. Машнобудування. 2025. Вип. 36 С. 50-58. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05

© Фурсова Т. М. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

Сучасні складні енергетичні системи висувають підвищені вимоги до ефективності та точності автоматичного регулювання, оскільки від якості керування значною мірою залежать енергоефективність, надійність та стабільність функціонування обладнання. Традиційні підходи до оцінювання якості процесів регулювання часто спираються на аналіз перехідних процесів або розв'язання диференціальних рівнянь, що ускладнює практичне застосування таких методів для оперативної діагностики та оптимізації режимів роботи систем. У цьому контексті інтегральні критерії якості регулювання становлять значний інтерес завдяки своїй простоті, універсальності й можливості обчислення без необхідності розв'язання вихідних диференціальних рівнянь.

Інтегральні критерії якості регулювання залишаються одним із най поширеніших інструментів аналізу та оптимізації систем автоматичного керування.

У роботі [1] запропоновано новий багатокритеріальний інтегральний показник, який враховує енерговитрати управляючої дії. Автори показують, що такий критерій дозволяє зменшити коливальність та поліпшити якість регулювання у системах зі слабким демпфуванням. Подібні висновки робляться в [2] та [3], які демонструють суттєву залежність якості перехідного процесу від вибору інтегрального критерію.

У галузі енергетичних систем автори [4] запропонували нову групу вагових інтегральних критеріїв, адаптованих до задач автоматичного регулювання частоти та навантаження. Їх результати доводять, що модифіковані індекси забезпечують суттєве зниження амплітуди коливань порівняно з класичними інтегральними критеріями.

У промислових технологічних процесах інтегральні критерії широко застосовуються у моніторингу продуктивності контурів керування. Науковці у [5] розглядають основні діагностичні метрики, що дозволяють визначати деградацію регулятора, зміну динаміки об'єкта чи зсуви параметрів.

У контексті сучасних структур керування значну увагу приділено застосуванню інтегральних критеріїв у налаштуванні фракційних регуляторів. Робота [6] показує, що класичні інтегральні критерії природно інтегруються у задачі оптимізації, забезпечуючи суттєве поліпшення точності та стійкості у складних системах з фракційною динамікою. Подальші модифікації інтегральних показників були запропоновані в [7] для нелінійних невизначених об'єктів.

Одним із комплексних досліджень останнього часу є робота [8], де запропоновано підхід до оцінювання ефективності PID-регулятора на основі експериментальних даних відгуку об'єкта та інтегральних показників. Результати підтверджують, що інтегральні критерії залишаються фундаментальним інструментом порівняння якості керування.

Оцінка якості систем автоматичного регулювання розглядається у вітчизняних роботах [9] і [10].

Аналіз літературних джерел демонструє, що інтегральні критерії залишаються ключовим елементом у теорії та практиці автоматичного керування, проте їх обмеження у коливальних системах зумовлюють потребу у комбінованих показниках, які враховують демпфування, стійкість та енергетичні параметри процесу.

Метою роботи є обґрунтування можливостей використання інтегральних критеріїв як найбільш простих способів оцінки якості для удосконалення процесів автоматичного управління. Для досягнення поставленої мети проведений аналізу інтегральних критеріїв якості регулювання та вивчення їх ефективності при застосуванні до складних технічних систем в енергетиці.

Методика

Дослідження сталості систем автоматичного регулювання дозволяє встановити області значень їх параметрів, що відповідають затухаючим процесам регулювання, але не визначає форми процесів у будь-якому іншому відношенні. Цього недостатньо для оцінки таких систем з точки зору їх практичної придатності. Перехідні процеси у промислових системах автоматичного регулювання повинні мати цілком визначений характер згідно вимогам технології. Обмеження, що накладаються, бувають різноманітні. Однак, можна встановити деякі загальні критерії для подібних оцінок якості, що відносяться до критеріїв якості процесів автоматичного регулювання.

1. Ступень сталості процесу η, що характеризує інтенсивність його затухання.

2. Ступень коливальності процесу m, що характеризує затухання його коливальних складових.

3. Динамічна похибка регулювання $y_{дин}$, що є максимальним відхиленням регульованої величини у перехідному процесі від заданого значення.

4. Статична похибка регулювання $y_{ст}$, що дорівнює відхиленню регульованої величини у новому положенні рівноваги від її значення у початковому стані рівноваги.

5. Тривалість процесу регулювання $T_{пр}$, що є часом, протягом якого відхилення регульованої величини від заданого значення і до нового збурення буде залишатися менше визначеної, наперед заданої величини.

На рис. 1. наведені графіки перехідних процесів із відповідними оцінками якості для системи автоматичного регулювання, що описується лінійним диференційним рівнянням другого порядку.

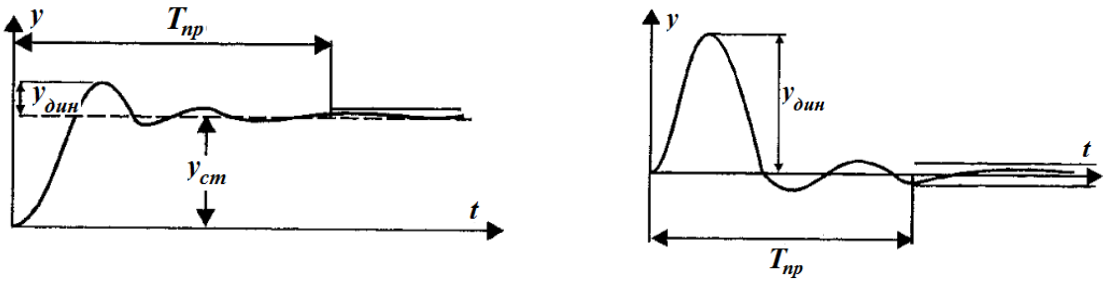

Рис. 1 – Графіки процесів автоматичного регулювання з оцінками їх якості
Fig. 1 – Graphs of automatic control processes with assessments of their quality

Якщо регульований об`єкт заданий, то оптимальна в даних конкретних умовах якість процесу регулювання досягається вибором типу регулятора, раціональним розміщенням його чутливих органів на об`єкті та настройкою цього регулятора, що враховує динамічні особливості об`єкта та регулятора.

Основні складнощі, що виникають при вирішенні питання щодо вибору оптимального налагодження регулятора у складних промислових системах автоматиного регулювання, полягають в тому, що, як правило, підвищення ступеня сталості і ступеня коливальності процесів може бути досягнуть тільки за рахунок зниження швидкості регулювання, тобто за рахунок збільшення динамічної та статичної похибок процесу.

Оскільки затухання процесу є першорядним критерієм якості процесу регулювання, то під оптимальним налагодженням автоматичного регулятора мається на увазі налагодження, що забезпечує задані значення ступеня коливальності та ступеня сталості процесу за мінімально можливими значеннями інших критеріїв якості.

Операторне рівняння складної лінійної системи автоматичного регулювання з однією регульованою величиною, рис.2, може бути представлено у доволі загальному вигляді (у припущенні, що об`єкт і регулятор є детектуючими ланками):

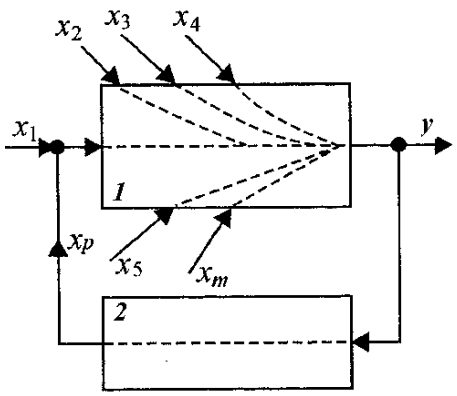

Рис. 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання:
1 – регульований об`єкт, 2 – автоматичний регулятор
Fig. 2 – Block diagram of the automatic control system:
1 – controlled object, 2 – automatic controller

$$y(p)=\frac{W(p)}{1-W(p)}x_1(p)+\frac{W_2(p)}{1-W(p)}x_2(p)+\frac{W_3(p)}{1-W(p)}x_3(p)+\ldots\frac{W_m(p)}{1-W(p)}x_m(p)+\frac{R(p)}{1-W(p)}, \qquad (1)$$

де *y(p)* – зображення відхилення регульованої величини;

$x_p(p)$ - зображення відхилення регулювального органу;

$x_1(p)$, $x_2(p)$, …, $x_m(p)$ - зображення збурюючих впливів (зовнішніх сигналів) на систему;

$W(p)=W_{об}(p)W_p(p)$ - передатна функція розімкненої системи по каналу для регулювальних впливів;

$W_{об}(p)=\frac{y(p)}{x_p(p)}$ - передатна функція регульованого об`єкту по каналу, що йде до точки відбору імпульсу регулятора від регулювального органу;

$W_p(p)=\frac{x_p(p)}{y(p)}$ - передатна функція регулятора по каналу, що йде від його чутливого елементу до регулювального органу;

$W_2(p)=\frac{y(p)}{x_2(p)}$, …, $W_m(p)=\frac{y(p)}{x_m(p)}$ - передатні функції розімкненої системи (джерело збурень може бути і в регуляторі) по каналам, що йдуть від точки відбору імпульсу для регулятора від джерел збурювальних впливів;

R(p) – член, що відображає вплив початкових умов; за нульовими початковими умовами *R(p) =0.*

Таким чином, форма процесу регулювання визначається динамічними характеристиками регульованого об`єкту і регулятора, формою збурюючих впливів, розташуванням їх осередків у системі автоматиного регулювання і початковими умовами.

Це ускладнює знаходження налаштувань системи автоматичного регулювання, що відповідають оптимальному процесу, особливо за допомогою «прямого» методу, тобто, шляхом безпосереднього інтегрування диференційних рівнянь системи. Дійсно, прямий метод для кожної комбінації вказаних факторів потребує виконання наступних операцій:

1) визначення коефіцієнтів диференційного рівняння;

2) розрахунок коренів p_1, p_2, …p_n характеристичного рівняння;

3) визначення початкових умов і постійних інтегрування;

4) побудова графіку перехідного процесу:

5) оцінка якості регулювання;

6) порівняння отриманих значень ступеня сталості *h*, ступеня коливальності *m*, динамічної $y_{дин}$ та статичної $y_{ст}$ похибок і тривалості процесу $T_{пр}$ з їх заданими значеннями.

Тому актуальними є методи, що дозволяють оцінити якість процесів регулювання з найменшими витратами часу та ресурсів на розрахунки.

Далі розглянемо методи розрахунку критеріїв якості, що характеризують затухання процесів регулювання, і найбільш прості способи оцінки регулювання за іншими критеріями якості.

Для наближеної оцінки якості процесів регулювання у багатьох випадках можуть бути використані різні інтегральні оцінки, або, як їх називають, інтегральні критерії якості. Головна перевага методів, де використовуються дані критерії, - відсутність необхідності рішення диференціальних рівнянь.

Простішим інтегральним критерієм є так званий лінійний критерій

$$I_1 = \int_0^\infty y(t)dt, \qquad (2)$$

який легко може бути знайдений безпосередньо з диференціального рівняння вільних коливань системи автоматичного регулювання

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + ..a_1 y' + a_0 y = 0. \qquad (3)$$

Дійсно, проінтегруємо в інтервалі від 0 до ∞ обидві частини рівняння (3):

$$a_n \int_0^\infty y^n dt + a_{n-1} \int_0^\infty y^{n-1} dt + ..a_1 \int_0^\infty y' dt = 0. \qquad (4)$$

або

$$a_n \left[y^{n-1}(\infty) - y^{n-1}(0) \right] + a_{n-1} \left[y^{n-2}(\infty) - y^{n-2}(0) \right] + ... + a_1 \left[y(\infty) - y(0) \right] + a_1 I_1 = 0, \qquad (5)$$

але оскільки у сталій системі

$$y^n(\infty) = y^{n-1}(\infty) = ... = y'(\infty) = 0,$$

то

$$I_1 = \frac{a_n y^{n-1}(0) + a_{n-1} y^{n-2}(0) + ..a_1 y'(0) + a_0 y(0)}{a_0}. \qquad (6)$$

Якщо $y'(0) = y''(0) = ...y^{n-1}(0) = 0$ і $y(0) \neq 0$, тоді потрібний лінійний критерій має особливо простий вигляд

$$I_1 = \frac{a_1 y(0)}{a_0}. \qquad (7)$$

Цей критерій можна легко визначити, якщо відома амплітудно-фазова характеристика системи $K(i\omega)$ у замкнутому стані. Дійсно, перетворення Лапласа для *y(t)* має вигляд:

$$y(p) = \int_0^\infty y(t) e^{-pt} dt = K(p) x(p), \qquad (8)$$

де x(p) – зображення збурюючої функції,

K(p) – передатна функція системи.

Отже, потрібний критерій можна представити у такій формі:

$$I_1 = \int_0^\infty y(t)dt = \lim_{p \to \infty} y(p) = K(0)x(0). \qquad (9)$$

Інтеграл, що розглядається, можна представити як алгебраїчну суму площин, які описуються кривою регулювальної величини навколо її значення, що встановлюється при закінченні перехідного процесу (рис. 3). Якщо процес регулювання характеризується неколивальним характером (рис. 3, а), то чим скоріше відбувається процес, тим менше значення інтегралу I_1. Однак, ця відповідність порушується у випадку, якщо перехідний процес у системі носить коливальний характер і *y(t)* змінює свій знак, рис. (3, б). Загальна величина інтегралу I_1.у цьому випадку не можу служити задовільним критерієм якості регулювання; наприклад, I_1.= 0 для процесів із постійними амплітудами.

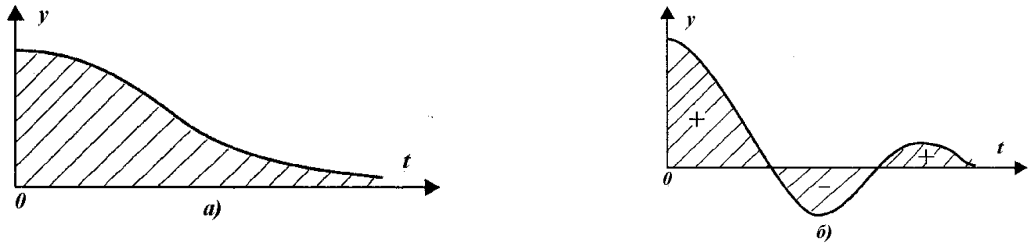

Рис. 3 – Перехідні процеси:
а – неколивальної форми, б – коливальної форми
Fig. 3 – Transient processes:
a – non-oscillatory form, b – oscillatory form

У деяких випадках оцінку якості проводять за допомогою квадратичного інтегрального критерію

$$I_2 = \int_0^\infty [y(t)]^2 dt . \qquad (10)$$

Цей критерій не має недоліків лінійного критерію та може бути просто розрахований, наприклад, за формулою Релея:

$$I_2 = \int_0^\infty [y(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty |K(i\omega)|^2 |x(i\omega)|^2 d\omega , \quad (11)$$

де $x(i\omega)$ - спектр Фур'є збурюючої дії;

$K(i\omega)$ - амплітудно-фазова характеристика системи.

Результати

Як і у випадку лінійного критерія, якість процесу тим краще, чим менший квадратичний інтегральний критерій.

Квадратичний інтегральний критерій необхідний при оптимізації систем автоматичного регулювання параметрів, а також при кількісній оцінці їх економічної ефективності. Наприклад, максимальна довговічність роботи металу пароперегрівачів при регулюванні температури та тиску пари досягається у разі застосування інтегрального квадратичного критерію I_2. Використання інтегральних критеріїв потребує обачності. Так, якщо виходити з мінімального значення інтегралу I_2, процеси А і Б на рис. 4 еквівалентні, а з двух процесів, зображених на рис. 5 кращим буде коливальний процес; з технологічної точки зору процеси А і Б різні, тому фахівець віддасть перевагу неколивальній формі, крива 2.

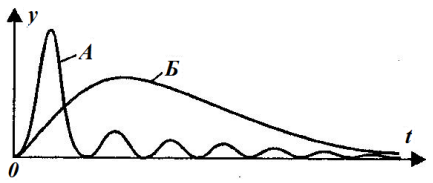

Рис. 4 – Два перехідні процеси, для яких інтегральна оцінка I_2 має одне й те ж значення

Fig. 4 – Two transient processes for which the integral estimate I2 has the same value

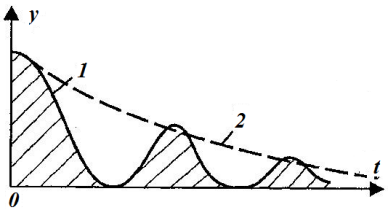

Рис. 5 – До оцінки перехідних процесів за допомогою інтегральних критеріїв якості

Fig. 5 – Toward the assessment of transient processes using integral quality criteria

Оскільки при оцінці якості технологічних процесів мінімум інтегральних критеріїв відповідає процесам зі зниженим значенням ступеня коливальності m (тобто процесам із поганим затуханням коливальних складових), то недоліки інтегральних критеріїв якості можуть бути у значній мірі компенсовані, якщо вони застосовуються не ізольовано, а разом з оцінками якості регулювання за ступенем коливальності m. За таким поєднанням критеріїв якості немає необхідності у розрахунках ступеня стійкості, оскільки достатньо велике її значення гарантується мінімумом використання інтегральної оцінки.

Найпростішим узагальненим інтегральним критерієм є

$$I_v = \int_0^\infty V(t)dt , \qquad (12)$$

де V(t) – квадратична форма від змінних, що характеризують стан системи, звичайно від вихідної величини $x_{вих}$ системи автоматичного регулювання та її похідних за часом.

$$I_v = \int_0^\infty \left\{ [x_{вих}]^2 + T_0^2 \left[\frac{dx_{вих}}{dt} \right]^2 \right\} dt . \quad (13)$$

Цей критерій має і самостійне значення, оскільки він часто застосовується замість квадратичного критерію.

Висновки

Інтегральні критерії дають змогу кількісно охарактеризувати поведінку системи у перехідних режимах, враховуючи не лише величину відхилення регульованої змінної, а й форму, тривалість та коливальний характер перехідного процесу. Лінійний критерій забезпечує швидку наближену оцінку, але є чутливим до зміни знаку помилки і може втрачати інформативність у коливальних системах. Квадратичний критерій позбавлений цього недоліку, оскільки враховує енергетичну складову відхилень та дозволяє застосовувати спектральні методи аналізу. Узагальнені критерії, що базуються на квадратичних формах стану, відіграють важливу роль у сучасних оптимізаційних методах, включно з варіаційними підходами та задачами оптимального керування.

Разом із тим мінімізація інтегральних критеріїв не завжди гарантує зниження коливальності або підвищення ступеня стійкості системи, що зумовлює необхідність їх поєднання з додатковими показниками, зокрема зі ступенем коливальності. Використання такого комплексного підходу дозволяє компенсувати недоліки окремих критеріїв і забезпечує більш повну та коректну оцінку якості регулювання у реальних технічних процесах.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувалась етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

Sahib, M. A. A new multi-objective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms / Sahib M. A., Ahmed B. S. // Journal of Advanced Research. – 2015. – № 115. – pp. 1–4. DOI : https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004

2. Özdemir M. T. Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control / M. T. Özdemir, D. Öztürk // Energies. – 2017. – № 10(12), article 2134. DOI : https://doi.org/10.3390/en10122134

3. Veronesi M. Deterministic Performance Assessment and Retuning of Industrial Controllers Based on Routine Operating Data: Applications / Veronesi M., Antonio Visioli A. // Processes. – 2015. – № 3(1). – Pp. 113-137. DOI : https://doi.org/10.3390/pr3010113

4. Pathak N. New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system / Pathak N., Bhatti T., Verma, A. // Sustainable Energy Grids and Networks. – 2016. DOI : https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.11.003

5. Seborg D. Process dynamics and control. Fourth edition / Seborg D., Edgar T., Mellichamp D. // Hoboken N. J., John Wiley, Sons Inc., 2016. – Available at: https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org_.pdf (Last accessed September 22, 2025)

6. Das S. A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices / Das S., Pan I. Gupta A. // Engineering applications of Artificial Intelligence. – 2012. DOI:10.1016/j.engappai.2011.10.004

7. Zhao Ch. Control of Nonlinear Uncertain Systems by Extended PID / Zhao Ch., Guo L. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2020. DOI : https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3030876

8. Sheng Yu. Proportional–Integral–Derivative Controller Performance Assessment and Retuning Based on General Process Response Data / Sheng Yu, Li X. // ACS Omega. – 2021. – № 6(15). – Pp. 10207–10223. DOI : https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00523

9. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с. – Режим доступу : https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Dyachenko/0030987.pdf (дата звернення 22.09.2025)

10. Теорія автоматичного управління [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спец. 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / уклад. : О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с. – Режим доступу : https://document.kdu.edu.ua/info_zab/141_1502.pdf (дата звернення 22.09.2025)

Стаття надійшла для редакції 14.08.2025 Стаття рекомендована до друку 22.09.2025

[1]**T.M. FURSOVA,** Candidate of Technical Sciences
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology, and Energy-Efficient Technologies
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: 0000-0003-1399-9039
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

THE ROLE OF INTEGRAL QUALITY CRITERIA IN THE ASSESSMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX ENERGY FACILITIES

The article examines the specific features of applying integral quality criteria to evaluate automatic control processes in energy systems. These complex technical systems are characterized by increased requirements for accuracy, stability, and energy efficiency, where the quality indicators of transient processes directly affect the reliability of equipment operation and the efficiency of technological processes. Traditional assessment methods based on solving differential equations or conducting a detailed analysis of transient characteristics are labor-intensive and insufficiently suitable for rapid diagnostics, which highlights the relevance of using integral criteria as simpler and more universal indicators. The study provides a systematic analysis of the most widespread integral criteria, including linear, quadratic, and generalized ones, and determines their applicability for evaluating different types of transient processes. The linear criterion is considered the simplest tool for rapid estimation of oscillation damping; however, its limitations in cases involving sign-changing control error and oscillatory dynamics are emphasized. The quadratic criterion eliminates this drawback and allows one to assess the energy component of deviations, making it effective for optimizing automatic control systems and comparing their economic efficiency. Generalized integral criteria based on quadratic forms of the state, which are widely used in optimal control tasks, are also examined. It is demonstrated that minimizing integral criteria does not always guarantee the achievement of the desired transient response, particularly regarding the degree of oscillation and steady-state behavior. Therefore, the study substantiates the feasibility of combining them with additional quality indicators, which prevents incorrect assessments and ensures a comprehensive approach to the analysis of automatic control system performance. The obtained results confirm the high practical value of integral criteria as a tool for fast and informative monitoring of control quality in energy and industrial systems.

Keywords: quality, assessment, integral criteria, automatic control.

In cites: Fursova T.M. (2025). The role of integral quality criteria in the assessment of automatic control systems for complex energy facilities. Engineering, (36), 50-58. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication

References

1. Sahib, MA & Ahmed, BS 2015, ‘A new multi-objective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms’, *Journal of Advanced Research*, no 115, Pp. 1-4. DOI : https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004

2. Özdemir, MT & Öztürk, D 2017, ‘Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control’, *Energies*, no 10(12), article 2134. DOI : https://doi.org/10.3390/en10122134

3. Veronesi, M & Antonio Visioli, A 2015, ‘Deterministic Performance Assessment and Retuning of Industrial Controllers Based on Routine Operating Data: Applications’, *Processes*, no 3(1), Pp. 113-137. DOI : https://doi.org/10.3390/pr3010113

4. Pathak, N, Bhatti, T & Verma, A 2016, ‘New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system’, *Sustainable Energy Grids and Networks*. DOI : https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.11.003

5. Seborg, D, Edgar, T & Mellichamp, D 2016, ‘Process dynamics and control’, in Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., viewed <https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org_.pdf>

6. Das, S, Pan, I & Gupta, A 2012, 'A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices', *Engineering applications of Artificial Intelligence*. DOI: 10.1016/j.engappai.2011.10.004

7. Zhao, Ch & Guo, L 2020, 'Control of Nonlinear Uncertain Systems by Extended PID', *IEEE Transactions on Automatic Control*. DOI : https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3030876

8. Sheng, YuLiX 2021, 'Proportional–Integral–Derivative Controller Performance Assessment and Retuning Based on General Process Response Data', *ACS Omega*, no 6(15), 10207–10223. DOI : https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00523

9. Popovych, MH & Kovalchuk, OV 2007, *Teoriia avtomatychnoho keruvannia* [Automatic control theory], Lybid. Kyiv.

10. Shtifzon, OY, Novikov, PV & Bun, VP 2020, *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia* [Automatic control theory], Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Kyiv.

The article was received by the editors 08/14/2025 The article is recommended for printing 09/22/2025