

Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, А. П. Ляшко, В. В. Макарець
Національний університет біоресурсів і природокористування України

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО НАЛАШТУВАННЯ ПІ-РЕГУЛЯТОРІВ

© Ромасевич Ю. О., Ловейкін В. С., Ляшко А. П., Макарець В. В., 2019

<https://doi.org/10.23939/istcipa2019.53.056>

Мета. Розроблення методу оптимального налаштування ПІ-регуляторів, яка дає змогу врахувати вимоги щодо обмежень у процесі регулювання та забезпечити мінімізацію небажаних показників якості автоматичного регулювання. **Методика.** Для розроблення методу у загальному вигляді записано задачу оптимального налаштування ПІ-регулятора. Надалі проаналізовано елементи, які вона містить. Це дало змогу замінити їх на вимогу мінімізації окремих критеріїв. Розроблено узагальнений критерій, який містить окремі критерії. Крім того, узагальнений критерій містить вагові коефіцієнти, які значно відрізняються між собою за величиною. Це дало змогу створити бажану топологію узагальненого (комплексного) критерію. **Результати.** У роботі на основі поставленої задачі оптимального налаштування ПІ-регулятора із обмеженнями розроблено метод, який забезпечує стійкість автоматичного регулювання, а також виконання обмежень та дає змогу мінімізувати комплексний критерій оптимізації. Реалізація методу пов'язана із МІСО-функцією, яка мінімізується у процесі розрахунків та ґрунтується на математичній моделі об'єкта регулювання. Метод не накладає жорстких вимог на математичні властивості задачі (наприклад, на неперервність оптимізаційних критеріїв). **Наукова новизна.** Вперше розроблено метод оптимального налаштування ПІ-регуляторів із врахуванням обмежень, який можна використати для об'єктів регулювання довільного порядку. Крім того, метод дає змогу мінімізувати декілька оптимізаційних критеріїв за умови, що важливість кожного з них можна оцінити деяким чисельним показником. Розроблений метод дає змогу врахувати умови стійкості під час регулювання. Крім того, він може бути узагальнений для ПІД-регуляторів та автоматичних регуляторів довільної структури (зокрема нелінійних). **Практична значущість.** Встановлено значне зменшення показника середньоінтегральної похибки для випадків застосування розробленого методу порівняно з іншими інженерними методами налаштування ПІ-регуляторів (порівняння проведено із тими методами, за якими отримують нульове перерегулювання протягом відпрацювання уставки). Наприклад, для об'єкта, який описується передаточною функцією $G(s)=1/(s+1)^2$, середньоінтегральна похибка зменшилась у 1,87–3,14 разу, для об'єкта, який має передаточну функцію $G(s)=1/(s+1)^3$, цей критерій зменшився у 1,32–2,10 разу. Метод можна застосовувати також для мінімізації інших небажаних показників інтегрального або позиційного типу.

Ключові слова: ПІ-регулятор, налаштування, оптимізація, критерій, якість, передаточна функція.

Вступ. ПІД-регулятор належить до найпоширенішого типу регуляторів. У близько 90–95 % типів [1] регуляторів, які сьогодні експлуатують у різних галузях народного господарства, використано ПІД-алгоритм. Причиною такої популярності є простота побудови регулятора та його функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість [2].

Перший метод налаштування ПІД-регулятора розробили Циглер і Нікольс у 1942 році [3]. Сьогодні існують тисячі методів налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора [4]. Роботи у цій сфері тривають, оскільки розробники ПІД-регуляторів прагнуть задовольнити зростаючі потреби щодо якості автоматизації технологічних процесів. Разом з тим, питання оптимального налаштування ПІД-регуляторів залишаються відкритими, оскільки складність технологічних процесів у багатьох випадках спричиняє складнощі (інколи неможливість) застосування того чи іншого інженерного методу налаштування ПІД-регулятора. Це зумовлює потребу у розробленні таких підходів, які б дали змогу без проблем налаштувати регулятори навіть за нелінійних або погано формалізованих математичних моделей об'єктів регулювання.

Аналіз літературних джерел. Для того, щоб оцінити основні тенденції, які пов'язані з інноваціями у сфері розроблення автоматичних регуляторів, проведемо кількісний аналіз отриманих патентів у цій сфері. Доступ до патентів отримано із використанням патентного відомства Федеративної Республіки Німеччина [5].

Запит виконували за класами патентів: G05B11/06 “Автоматичні регулятори. Електричні, в яких вихідний сигнал є неперервною функцією відхилення від заданої величини, тобто неперервні регулятори”, G05B11/36 “Автоматичні регулятори. Електричні. З одержуванням окремих характеристик, наприклад, пропорційною (лінійною), інтегральною, диференціальною”, G05B11/42 “Автоматичні регулятори. Електричні. З одержуванням пропорційної характеристики із залежністю від часу, наприклад П.І., П.І.Д.”, G05B13/00 “Самоналаштувальні системи керування, тобто системи, які автоматично вибирають оптимальний режим роботи для досягнення заданого критерію”.

Ретроспективність пошуку 10 років (усі дані наведено станом на 06.08.2019 р.).

Для оцінювання впливу окремих патентних розробок на загальносвітові тенденції наведемо графічні залежності (рис. 1, 2). Кількість патентів за класами G05B11/36 та G05B11/42, які належать до ПІД-регуляторів, показує, що дослідження у цій сфері ведуть переважно Японія та Китай. Вони належать як до способів налаштування ПІД-регуляторів, так і до прикладних задач їх застосування.

Зазначимо, що дані, які відповідають 2019 року, є неповними, і тому робити висновки стосовно тенденцій зміни кількості патентів, на наш погляд, не зовсім коректно. Можна лише констатувати, що кількість отриманих патентів за цей рік може лише зростати.

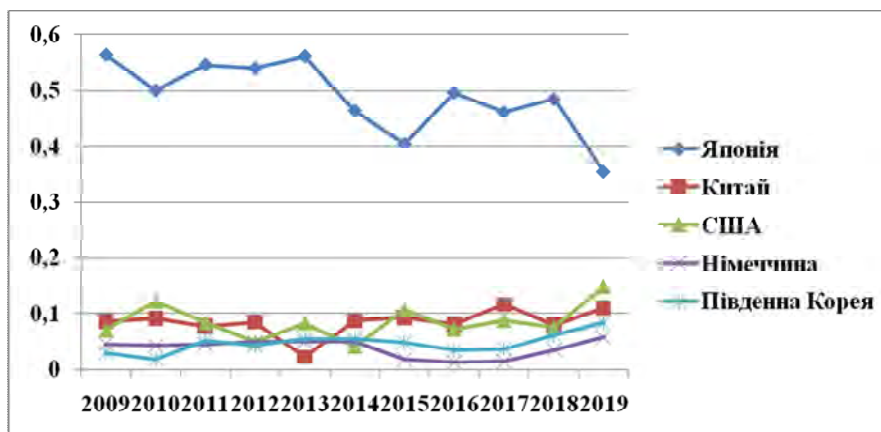


Рис. 1. Графіки відносної кількості патентів різних країн відносно загальносвітової кількості (за класом патентів G05B11/36)

Fig. 1. Dependence of relative value of patents of different countries with relation to world-wide amount (on a class of patents G05B11/36)

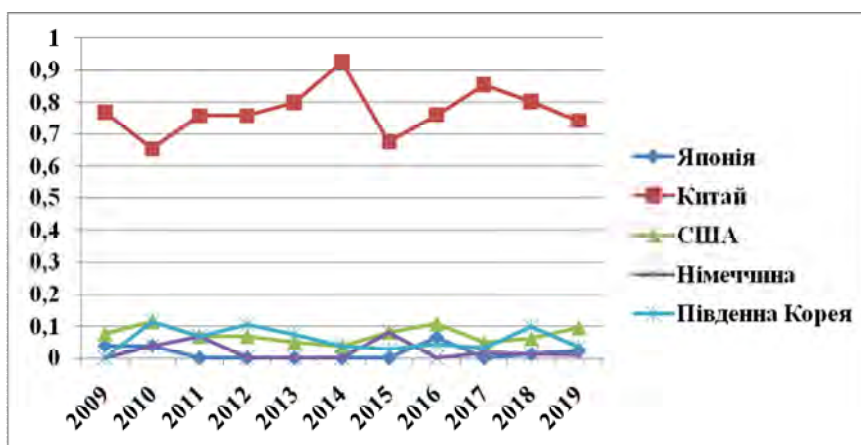


Рис. 2. Графіки відносної кількості патентів різних країн відносно загальносвітової кількості (за класом патентів G05B11/42)

Fig. 2. Dependence of relative value of patents of different countries with relation to world-wide amount (on a class of patents G05B11/42)

Для встановлення динаміки зміни кількості отриманих патентів побудовано графіки, які наведено на рис. 3.

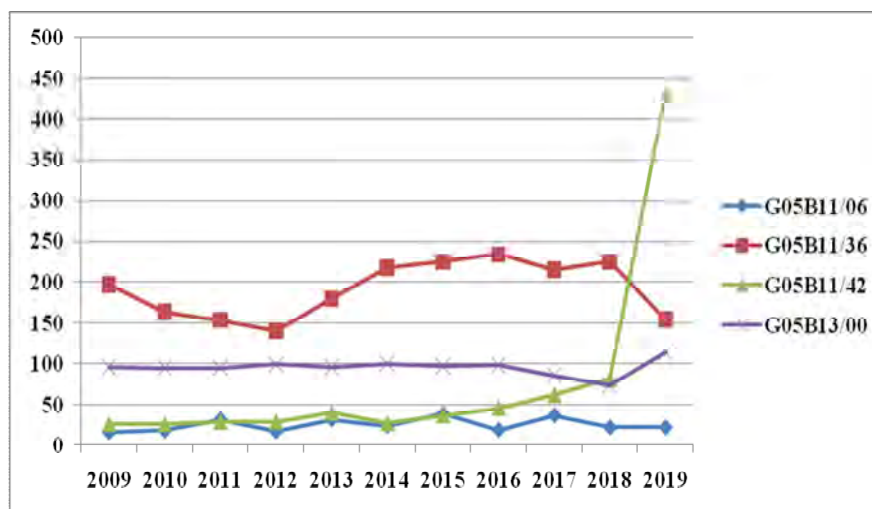


Рис. 3. Загальносвітові тенденції кількості отриманих патентів (за класами G05B11/06, G05B11/36, G05B11/42, G05B13/00)

Fig. 3. World-wide tendencies in amount of the released patents (on classes G05B11/06, G05B11/36, G05B11/42, G05B13/00)

Кількість отриманих патентів за класом G05B11/06 за роками є стабільною і коливається в межах 16–39 патентів у рік. Аналогічна ситуація існує за класом патентів G05B11/36. Тут спостерігається більша кількість отриманих патентів: у межах 141–234 патентів на рік. Це показує більшу зацікавленість науково-технічної спільноти у розробленнях цього класу.

Із рис. 2 видно, що починаючи із 2015 року існує тенденція щодо збільшення кількості патентів за класом G05B11/42, яка від 2018 року демонструє надзвичайно швидке їх зростання. Ця тенденція пояснюється значною кількістю отриманих патентів у Китаї, США, Південній Кореї та Японії.

Кількість отриманих патентів за класом G05B13/00 показує стабільну динаміку, яка від 2018 року має незначне зростання. Це пояснюється збільшенням частки патентів, що отримані у США (38 штук). Зазначимо, що у період від 2009 до 2018 рр. патентне відомство цієї країни за цим класом не зареєструвало жодного патента.

Отже, можна встановити стабільну світову тенденцію щодо збільшення кількості розробок, пов'язаних із ПД-регуляторами. На жаль, ця тенденція не стосується України. Лідером у цьому напрямку є Японія та Китай. Крім того, стабільну динаміку щодо кількості отриманих патентів зберігають США, Південна Корея та країни Західної Європи.

Мета. У подальшому викладі зупинимося лише на ПІ-регуляторі, оскільки саме такий тип регулятора є найпоширенішим на практиці (застосування диференціальної складової педбачає застосування фільтрів).

Метою роботи є розроблення методу оптимального налаштування ПІ-регуляторів, що дало змогу врахувати вимоги щодо обмежень у процесі регулювання та забезпечити мінімізацію небажаних показників якості автоматичного регулювання.

Методика проведення досліджень. Проблема оптимального налаштування ПІ-регулятора містить такі аспекти: множина критеріїв оптимізації, множина обмежень та вимога стійкості

регулювання. Припустимо, що математична модель регульованої системи відома (наприклад, це диференціальне рівняння). Тоді задачу оптимального налаштування ПІ-регулятора можна подати у такому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} Cr_{\kappa} \rightarrow \min, \kappa \in (\overline{1, K}); \\ f_{\lambda} \left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i \right) \leq F_{\lambda}, \lambda = (\overline{1, L}); \\ u = K_p (r - x(t - \tau)) + T_I^{-1} \int_0^t (r - x(t - \tau)) dt; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} x = r, \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d^j x(t)}{dt^j} = 0; \\ \sum_{j=0}^m A_j \frac{d^j x(t)}{dt^j} = \sum_{i=0}^n B_i \frac{d^i u}{dt^i}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де Cr_{κ} – κ -й критерій мінімізації (не втрачаючи загальності у постановці задачі, приймаємо, що всі критерії відображають різні небажані характеристики процесу регулювання); K – загальна кількість критеріїв оптимізації; K_p та T_I – коефіцієнти налаштування ПІ-регулятора; f_{λ} – λ -а функція, яка в загальному випадку залежить від регульованої змінної x та її вищих похідних за часом, регулювання u та його вищих похідних за часом, а також коефіцієнтів A_j та B_i ; F_{λ} – граничне значення λ -ї функції; L – загальна кількість обмежень у оптимізаційній задачі; τ – часова (транспортна) затримка; r – уставка; x – регульована величина; u – регулювання (вихідний сигнал ПІ-регулятора); A_j та B_i – j -й та i -й коефіцієнти (параметри), що входять до математичної моделі об'єкта регулювання (диференціальне рівняння).

Розв'язок задачі (1) – це такі значення коефіцієнтів K_p, T_I , які задовольняють всі її умови. Слід зазначити, що бажано знайти парето-оптимальний розв'язок задачі (1).

Зауважимо, що в сенсі обчислювальної складності задача (1) є непростюю, особливо для значних m і n . Саме тому ефективність алгоритму оптимізації має вирішальне значення.

У процесі застосування алгоритму на кожній його ітерації слід перевіряти нерівності (1). Це ускладнює роботу алгоритму. Тому існує необхідність звести початкову задачу (1) до задачі із одним критерієм без обмежень.

Найважливіша вимога до налаштування ПІ-регулятора – це стійкість, яка математично представлена четвертим рядком системи (1). Вирази, які описують вимогу стійкості, можуть бути замінені єдиним термінальним критерієм – сумою норми похибки та норм її вищих похідних за часом. Однак, у практиці прийнято вважати, що об'єкт регулювання є стійким, якщо змінна x досягла діапазону $(0,9 \dots 1,05)r$, а вищі похідні змінної x із часом незначні. Отже, ми можемо замінити вимоги стійкості таким термінальним критерієм:

$$Ter = \begin{cases} 0, \text{ якщо } 0,95r \leq x(T_s) \leq 1,05r \wedge \frac{d^j x(T_s)}{dt^j} < sv_j; \\ \delta_T \sqrt{(x(T_s) - r)^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{d^j x(T_s)}{dt^j} \right)^2}, \text{ якщо} \\ 0,95r > x(T_s) \vee x(T_s) > 1,05r \vee \frac{d^j x(T_s)}{dt^j} > sv_j, \end{cases} \quad (2)$$

де T_s – момент часу, коли умови стійкості дотримуються; sv_j – допустиме (близьке до нуля) значення j -ї похідної x за часом; δ_T – термінальний коефіцієнт, який відображає важливість досягнення умов стійкості. Абсолютний мінімум критерію (2) дорівнює нулю. Коли його досягнуто, то вимоги стійкості практично виконуються.

Зазначимо, що у виразі (2) використано Евклідову норму фазового вектора у момент часу T_S (друга умова). У деяких випадках (наприклад, для об'єктів регулювання вищих порядків) кращі результати можна отримати, використовуючи Манхеттенську норму $|x(T_S) - r| + \sum_{j=1}^m \left| \frac{d^j x(T_S)}{dt^j} \right|$.

Проблему зведення множини критеріїв Cr_k до єдиного (комплексного) можна вирішити так:

$$CC = \sum_{k=1}^K w_k g_k Cr_k \rightarrow \min, \quad (3)$$

де w_k – k -й ваговий коефіцієнт, що відображає важливість критерію Cr_k ; g_k – коефіцієнт k -го критерію, що зводить добуток $Cr_k g_k$ до безрозмірного вигляду.

Сукупність нерівностей (другий рядок системи (1)) може бути замінена таким критерієм:

$$Cr_{ineq} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } F_\lambda - f_\lambda\left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i\right) \geq 0; \\ \delta_p \sum_{y=1}^Y (F_y - f_y\left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i\right)), \text{ якщо} \\ F_1 - f_1\left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i\right) < 0 \vee F_2 - f_2\left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i\right) < 0 \dots \\ \dots \vee F_L - f_L\left(\frac{d^j x(t)}{dt^j}, \frac{d^i u}{dt^i}, A_j, B_i\right) < 0, \end{cases} \quad (4)$$

де y – індекс невиконаної нерівності у вимогах (1); Y – загальна кількість невиконаних нерівностей; δ_p – штрафний коефіцієнт.

Тепер ми можемо записати узагальнений критерій оптимізації. Перш ніж ми наведемо його, слід зробити зауваження. Кожен із критеріїв (2)–(4) має різну важливість. Для того, щоб врахувати це, узагальнений критерій комплексної оптимізації повинен мати належні особливості топології. Ми запропонували його топологію у формі “яма в ямі”:

$$Cr = Ter + Cr_{ineq} + CC \rightarrow \min, \quad (5)$$

Графічно топологію критерію (5) зображено на рис. 4.

Верхня яма відображає топологію критерію (1), середня яма відповідає критерію (3) і, нарешті, нижня має топологію критерію (2). Вкладеність описаних ям забезпечується коефіцієнтами δ_T і δ_p , які повинні встановлюватися так, щоб $\delta_T \gg \delta_p > 0$.

Саме така топологія критерію (5) дозволить оптимізаційному алгоритму виконати спуск до глобального мінімуму, що означатиме знаходження розв'язку поставленої задачі.

Для того, щоб використати критерій (5) для обчислення невідомих коефіцієнтів K_p , T_I необхідно сформулювати функцію, входами якої є ці аргументи, а виходом – значення критерію (5). Ця MISO-функція (Multi In – Single Out) ґрунтується на відомій математичній моделі об'єкта регулювання, що охоплений зворотним зв'язком із ПІ-регулятором. Отже, її можна подати графічно у такому вигляді (рис. 5).

Математичною моделлю у цьому випадку є система диференціальних рівнянь, які описують динаміку регулювання. Зазначимо, що у теорії автоматичного регулювання для синтезу та аналізу систем поширення отримали передаточні функції. Однак, кожній передаточній функції можна поставити у відповідність диференціальне рівняння, і тому жодних проблем стосовно переходу від одного виду математичної моделі до іншої немає.

MISO-функція працює так. При введенні на її вхід чисельних значень K_p , T_I відбувається чисельне інтегрування диференціальних рівнянь, що описують динаміку регулювання (ці операції представляють тіло MISO-функції). Інтегрування рівнянь виконується для певного часового проміжку, який залежить від найбільшої постійної часу об'єкта регулювання. Його величину вибирають достатньою для того, щоб перехідний процес міг закінчитись, тобто щоб термінальний

критерій (2) міг дорівнювати нулю. Крок інтегрування може бути постійним або змінним. Крім того, можна також змінювати і метод чисельного інтегрування диференціальних рівнянь.

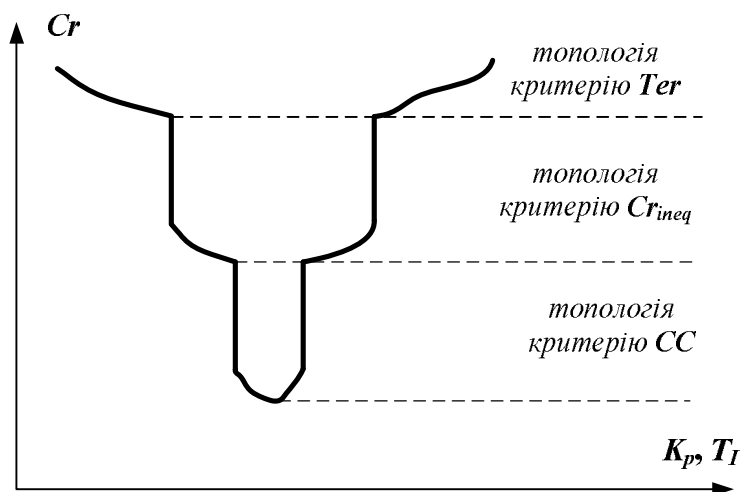


Рис. 4. Графік умовної залежності критерію (5) від коефіцієнтів регулятора K_p, T_I

Fig. 4. Plot of the criterion (5) as a function of PI-controller gains K_p, T_I



Рис. 5. Графічне представлення MISO-функції для проведення оптимального налаштування ПІ-регулятора

Fig. 5. Graphical interpretation of MISO-function for optimal PI-controller tuning

Знайшовши чисельний розв’язок диференціальних рівнянь у тілі MISO-функції, надалі формуються окремі компоненти критерію, (5) і їхня сума надходить на її вихід. Так MISO-функції вертає чисельне значення критерію (5).

Тривалість доступу до MISO-функції залежить від порядку об’єкта регулювання, величини кроку чисельного інтегрування, методу чисельного інтегрування та тривалості часового проміжку, протягом якого виконується моделювання регулювання об’єкта.

Сформувавши MISO-функцію, надалі можна використати один із методів чисельної оптимізації для того, щоб знайти оптимальні значення K_p, T_I . Оскільки топологія критерію (5) може бути достатньо складною, особливо це стосується топології критерію (3) (“нижньої ями”), то доцільним є використання різноманітних метаевристичних методів оптимізації. У подальших дослідженнях використано модифікований метод рою часточок ME-PSO [6], який значною мірою позбавлений недоліку передчасної збіжності (що певною мірою гарантує знаходження глобального мінімуму MISO-функції) та не потребує значних обчислювальних ресурсів для знаходження розв’язку задач. Модифікований метод рою часточок ME-PSO володіє достатньо потужними пошуковими властивостями для знаходження оптимальних значень коефіцієнтів K_p та T_I . Такі

властивості забезпечуються механізмом переініціалізації рою, який входить у режим стагнації. Використання цього методу для оптимального налаштування ПІ-регуляторів без обмежень дало відмінні результати [7], тому його обрано також і для поточного дослідження.

Надалі покажемо застосування розробленого методу для декількох задач оптимального налаштування ПІ-регуляторів.

Результати досліджень та їх обговорення. Для того, щоб оцінити ефективність розробленого методу, проведемо моделювання роботи оптимально налаштованих ПІ-регуляторів. Обмеженням у задачах оптимального налаштування регуляторів була вимога нульового перерегулювання. Критерієм оптимізації став показник середньоінтегральної похибки:

$$MIE = t_s^{-1} \int_0^{t_s} |e| dt, \quad (6)$$

де t_s – тривалості регулювання; e – похибка.

У проведених розрахунках ми свідомо обмежились одиничним критерієм, оскільки комплексні критерії потребують ґрунтовного аналізу впливу окремих компонентів критерію на ефективність застосування розробленого методу. Такий аналіз виходить за межі предмета поточного дослідження, однак він буде виконаний у подальших роботах авторів.

Усі розрахунки проведемо для об'єктів з передаточними функціями, які запропоновані у роботі [8]: $G_1(s)=1/(s+1)^2$, $G_2(s)=1/(s+1)^3$, $G_3(s)=(1-0,1s)/(s+1)^3$, $G_4(s)=e^{-2s}/(5s+1)^2$. Надалі було виконано моделювання процесу регулювання при відпрацюванні уставки ($r=1$) та розрахунок якісних показників регулювання: середньоінтегральної похибки (6); середньоінтегрального регулювання (MIC):

$$MIC = t_s^{-1} \int_0^{t_s} u dt. \quad (7)$$

Отримані у результаті виконання розрахунків дані занесено у таблицю. У таблиці також наведено чисельні дані, які відповідають іншим методам налаштування ПІ-регулятора, що дозволяють отримати нульове перерегулювання. Це методи: Циглера–Нікольса [3], AMIGO [9], Чьена–Хронеса–Резвіка [10], Лямбда [11]. Найменші дані у таблиці виділено жирним шрифтом.

Якісні показники регулювання за допомогою оптимально налаштованих ПІ-регуляторів

Quality indicators of control with optimal tuned PI-controllers

Метод налаштування	Значення		MIE	MIC	t_s , c
	K_p	T_i			
1	2	3	4	5	6
$G_1(s)$					
AMIGO	0,495	2,559	0,44	0,90	5,7
Чьена–Хронеса–Резвіка	1,449	1,618	0,25	1,08	5,9
Лямбда	0,293	4,828	0,35	0,79	13,2
Оптимальний	3,446	2,308	0,14	1,03	11,9
$G_2(s)$					
Циглера–Нікольса	1,229	3,438	0,25	0,98	12,3
AMIGO	0,295	5,637	0,40	0,81	13,6
Чьена–Хронеса–Резвіка	0,820	6,188	0,25	0,88	22,9
Лямбда	0,268	6,464	0,38	0,80	16,4
Оптимальний	1,788	3,675	0,19	0,98	16,4

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6
$G_3(s)$					
Циглера–Нікольса	1,135	4,025	0,24	0,95	15,6
AMIGO	0,280	5,974	0,40	0,81	14,5
Чьена–Хронеса–Резвіка	0,757	7,245	0,25	0,86	26,8
Лямбда	0,264	6,558	0,38	0,80	16,5
Оптимальний	1,693	3,833	0,20	0,97	16,7
$G_4(s)$					
Циглера–Нікольса	1,291	12,725	0,25	1,00	45,9
AMIGO	0,305	22,121	0,40	0,82	53,4
Чьена–Хронеса–Резвіка	0,861	22,905	0,25	0,89	85,0
Лямбда	0,270	26,142	0,37	0,80	67,1
Оптимальний	1,216	10,907	0,25	1,04	38,7

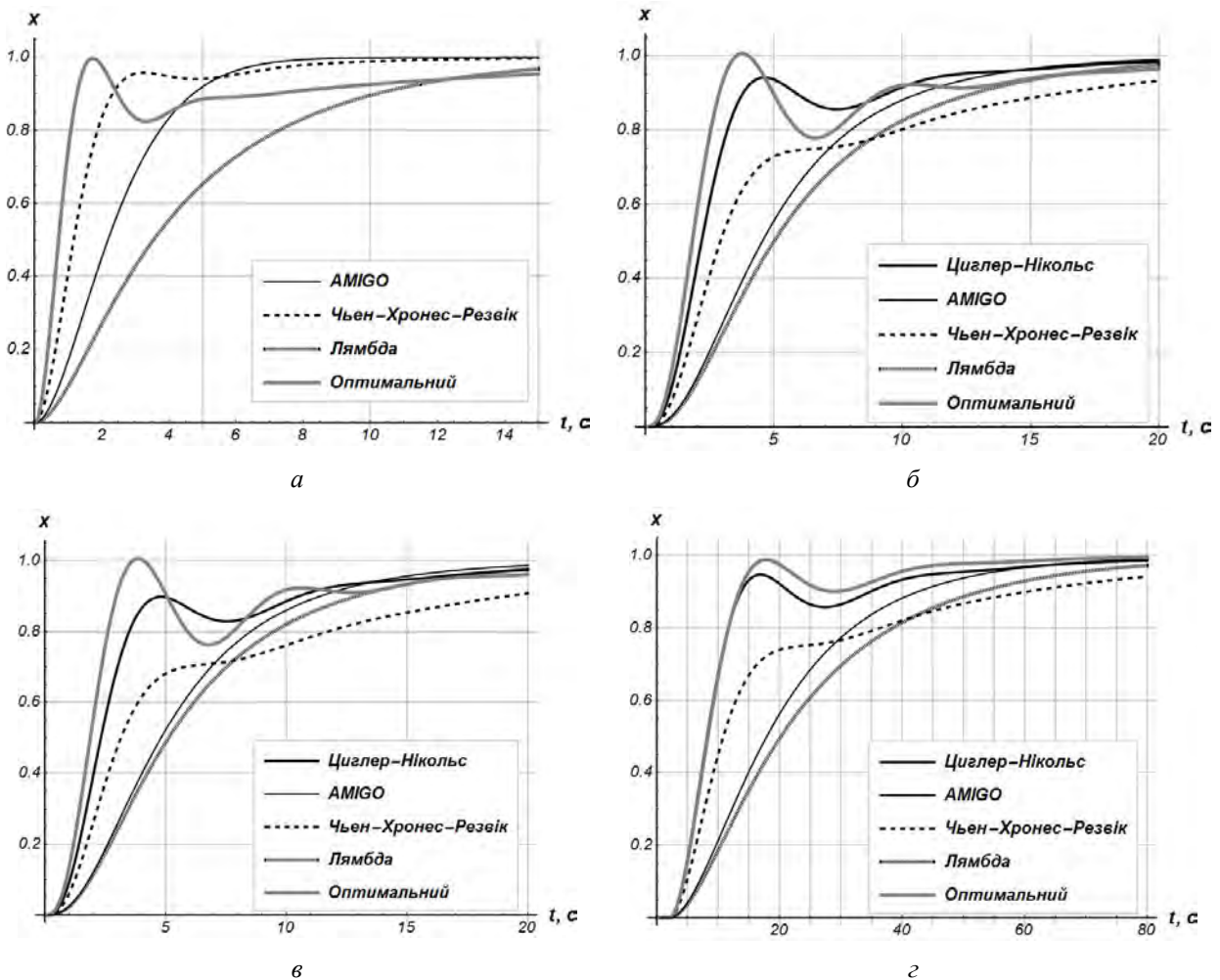


Рис. 6. Графіки динаміки регулювання із використанням налаштованих ПІ-регуляторів для передаточних функцій: а – $G_1(s)$; б – $G_2(s)$; в – $G_3(s)$; г – $G_4(s)$

Fig. 6. Plots of control via tuned PI-controllers for transfer functions: а – $G_1(s)$; б – $G_2(s)$; в – $G_3(s)$; г – $G_4(s)$

Результати аналізу даних дають змогу стверджувати, що налаштовані за допомогою розробленого методу ПІ-регулятори зменшують показник (6). Наприклад, для передаточної функції

$G_1(s)$ він зменшився у 1,87–3,14 разу; для передаточної функції $G_2(s)$ – у 1,32–2,10 разу; для передаточної функції $G_3(s)$ – у 1,20–2,00 разу; для передаточної функції $G_4(s)$ існує три методи (зокрема і розроблений), які забезпечують мінімальне значення показника (6). Однак, при однакових чисельних значеннях показника (6) розроблений метод дає змогу зменшити тривалість регулювання у 1,18–2,19 разу.

Для передаточних функцій $G_1(s)$, $G_2(s)$ та $G_3(s)$ покращення якості регулювання за показником (6) досягається за рахунок деякого погіршення інших показників регулювання: тривалості регулювання та величини середньоінтегрального регулювання (7).

Для того, щоб проілюструвати результати моделювання оптимально налаштованого ПІ-регулятора, наведемо графічні залежності (рис. 6), де відображено процес досягнення регульованою величиною x уставки r для різних методів налаштування ПІ-регулятора.

Аналіз графічних залежностей, які показано на рис. 6, підтвердив, що за показником (6) оптимально налаштовані ПІ-регулятори працюють краще. Геометричний зміст показника (6) відповідає площі, яка обмежена величиною уставки r та графіком регульованої величини x . Для всіх наведених випадків ця площа є меншою.

Крім того, із рис. 6 видно, що для всіх випадків перерегулювання дорівнює нулю.

Висновки. Розроблено метод оптимального налаштування ПІ-регуляторів, який дає змогу врахувати різноманітні вимоги щодо якості процесу регулювання. Вказані вимоги набувають форми різноманітних обмежень.

Сутність методу полягає у зведенні задачі оптимального налаштування регулятора до задачі безумовної оптимізації узагальненого оптимізаційного критерію, який характеризується бажаними топологічними властивостями.

Результати застосування розробленого методу для задач налаштування ПІ-регуляторів, які працюють з об'єктами регулювання другого та третього порядків (зокрема із часовою затримкою), показали значне покращення якості регулювання за обраним критерієм (у межах цього дослідження таким критерієм була середньоінтегральна похибка).

Розроблений підхід можна також використати для синтезу оптимальних регуляторів довільної структури (зокрема нелінійних), оскільки він не накладає жорстких вимог на математичні властивості задачі (наприклад, на неперервність оптимізаційних критеріїв). Суттєва вимога щодо використання методу полягає у тому, що математична модель об'єкта регулювання повинна бути відомою (хоча її форма може бути довільною: передаточна функція, система диференціальних рівнянь тощо).

1. Åström K. J. Advanced PID control / K. J. Åström, T. Hägglund // ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p.
2. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1 / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
3. Ziegler J. G. Optimum settings for automatic controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
4. O'Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules / O'Dwyer // Ireland: Imperial College Press. – 3rd edition. – 2009. – 623 p.
5. Beginner's search <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=einsteiger> (доступ 09.03.2019)
6. Romasevych Yu. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique / Yu. Romasevych, V. Loveikin // Cybernetics and Information Technologies – 2018. – 18(3) – P. 62–74.
7. Romasevych Yu. PI-controller tuning optimization via PSO-based technique / Yu. Romasevych, V. Loveikin, S. Usenko // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY – R. 95 NR 7/2019. – P. 33–37.
8. Åström K.J. Benchmark Systems for PID Control / K.J. Åström, T. Hägglund // International Federation of Automatic Control – 2000. – P. 165–166.

9. Åström K. J. PID Controllers: Theory, Design and Tuning / K. J. Åström, T. Hägglund // Instrument Society of America NC: Research Triangle Park, 2 edition. – 1995. – 344 p.
10. Chien K. L. On the automatic control of generalized passive systems / K. L. Chien, J. A. Hrones, J. B. Reswick // Transaction of the ASME. – 1952. – Vol. 74. – No. 2 – P. 175–185.
11. Eriksson L. Control Design and Implementation of Networked Control Systems / L. Eriksson // Licentiate thesis' Department of Automation and Systems Technology, Helsinki University of Technology. – 2008. – 118 p.

Y. O. Romasevych, V. S. Loveikin, A. P. Liashko, V. V. Makarets
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

DEVELOPMENT OF PI-CONTROLLER OPTIMAL TUNING METHOD

© Romasevych Y. O., Loveikin V. S., Liashko A. P., Makarets V. V., 2019

Aim. The research aims to develop a method of optimal PI-controller tuning, which allows to take into account the constraints and to minimize the undesirable indicators of the automatic control quality. **Method.** In order to carry out the investigation, the problem of optimal PI-controller tuning was stated in a general form. The analysis of the elements of the problem has been conducted. It allowed substituting the elements to the requirements of individual minimization criteria. Development of the general (complex) criterion, which includes these criteria, was conducted with taking into account weight coefficients. They considerably differ from each other. It allowed created the desired topology of the general criterion. **Results.** Based on the problem of optimal PI-controller tuning with constraints, a method has been developed that ensures the stability of the automatic control, met the constraints and minimizes the complex optimization criterion. The implementation of the method is connected with the MISO-function, which should be minimized during the calculation process and which is based on the mathematical model of the plant. The method does not impose hard constraints on the mathematical properties of the problem (for example, the continuity of optimization criteria). **Scientific novelty.** For the first time, the method of optimal PI-controller tuning with constraints has been developed, which may be used for plants of arbitrary order. In addition, the method allows minimization of several optimization criteria, provided that the importance of each must be estimated by some numerical indicator. The developed method allows taking into account the conditions of stability. It can also be generalized for PID-controllers and controllers of arbitrary structure (including nonlinear ones). **Practical significance.** Significant reduction of the mean integral error is stated. It relates to the cases of the developed method application (in comparison with other engineering methods of PI-controllers tuning). The comparison has been made between those methods, which allow obtaining zero overshoot during setpoint reaching. For example, for a plant described by the transfer function $G(s)=1/(s+1)^2$, the mean integral error decreased by 1.87–3.14 times, for a plant with the transfer function $G(s)=1/(s+1)^3$ this criterion decreased by 1.32–2.10 times. The method may also be applied to the problems of minimization of other undesirable indicators of integral or positional type.

Key words: PI-controller, tuning, optimization, criterion, quality, transfer function.

1. Åström K. J., Hägglund T., Advanced PID control, ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
2. Denysenko V. V. “PYD-rehuliatory: pryntsyipy postroyeniya y modyfykatsyy. Chast 1” [“PID-controllers: the principles of design and modifications. Part 1”], Sovremennye tekhnolohyy avtomatyzatsyy [Modern automation technologies], No. 4, P. 66–74, 2006, [in Russian].
3. Ziegler J. G., Nichols N. B., Optimum settings for automatic controllers, Transactions of the ASME, 1942, Vol. 64, pp. 759-768.
4. O’Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules, Ireland: Imperial College Press, 3rd edition, 2009, 623 p.
5. Beginner’s search <https://depatinet.dpma.de/DepatisNet/depatinet?action=einsteiger> (access 09.03.2019)
6. Romasevych Yu., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique, Cybernetics and Information Technologies, 2018, 18(3), pp. 62–74.
7. Romasevych Yu., Loveikin V., Usenko S. PI-controller tuning optimization via PSO-based technique, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95 NR 7/2019, pp. 33-37.
8. Åström K.J., Hägglund T. Benchmark Systems for PID Control, International Federation of Automatic Control, 2000, pp. 165–166.
9. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, Instrument Society of America NC.: Research Triangle Park, 2 edition, 1995, 344 p.
10. Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B. On the automatic control of generalized passive systems, Transaction of the ASME, 1952, Vol. 74, No.2, pp. 175–185.
11. Eriksson L. Control Design and Implementation of Networked Control Systems, Licentiate thesis’ Department of Automation and Systems Technology, Helsinki University of Technology, 2008, 118 p.