

**МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО НАЛАШТУВАННЯ ПІ-РЕГУЛЯТОРІВ ІЗ
ВРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ**

Ю. О. Ромасевич, доктор технічних наук, доцент

В. С. Ловейкін, доктор технічних наук, професор

А. П. Ляшко, кандидат технічних наук

В. В. Макарець, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: romasevichyuriy@ukr.net

Анотація. Розроблено метод оптимального налаштування ПІ-регуляторів при врахуванні обмежень. Метод ґрунтується на зведенні задачі налаштування до задачі безумовної оптимізації. Для цього було запропоновано спеціальний комплексний критерій, який характеризується бажаними топологічними властивостями. Останні отримані за допомогою вагових коефіцієнтів, що враховують вимоги щодо стійкості системи, обмежень та комплексу критеріїв, які відображають небажані показники регулювання. Наперед задані топологічні властивості критерію дали змогу знайти його глобальний. У роботі для цієї мети була використана модифікація методу рою часточок ME-PSO, яка характеризується переініціалізацією рою при умові його стагнації.

Для оцінки ефективності використання методу були виконані розрахунки коефіцієнтів ПІ-регулятора при обмеженні за перерегулюванням (прийнято, що воно повинно бути нульовим). Критерієм оптимізації була швидкодія регулювання. У результаті отримано, що для чотирьох тестових передаточних функцій (другого та третього порядків; одна передаточна функція відповідає об'єкту регулювання із часовою затримкою) швидкодія регулювання значно збільшується при забезпеченні обмеження за перерегулюванням.

Отримані результати порівнювались із тими, що відповідають регуляторам, що налаштовані із використанням інших (відомих у інженерній практиці) методів налаштування ПІ-регуляторів (порівнювані методи дають змогу отримати нульове перерегулювання). Крім того, аналіз якості автоматичного регулювання був проведений із використанням показників: середньоінтегральної похибки та середньоінтегрального регулювання.

Розроблений підхід доволі універсальний. Він може використовуватись для синтезу оптимальних систем регулювання у тому числі і нелінійних.

Ключові слова: регулятор, оптимізація, критерій, обмеження, налаштування, метод рою часточок

Актуальність. ПІД-регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів. У близько 90...95% [1] регуляторах, які в даний час експлуатуються у різних галузях народного господарства, використано ПІД алгоритм. Причиною такої популярності є простота побудови і промислового використання, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість [2].

Перший метод налаштування ПІД-регулятора був розроблений Циглером і Нікольсом у 1942 році [3]. Нині існує тисячі методів налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора [4]. Деякі з них отримали значне поширення у практичній діяльності (наприклад, метод Циглера-Нікольса). Роботи у цій галузі тривають: вони викликані необхідністю налаштування регуляторів, які б дозволили оптимально (за деяким критерієм) проводити регулювання технологічних параметрів та враховувати обмеження (наприклад, на перерегулювання, потужність виконавчого пристрою, кількість енергоресурсів, що витрачається на регулювання тощо) для складних (досить часто нелінійних) об'єктів. Крім того, складність задач регулювання зростає, що також є стимулом для розробки нових методів оптимального налаштування регуляторів.

Розробники ПІД-регуляторів, прагнучи задовольнити зростаючі потреби у якості автоматизації технологічних процесів, проводять дослідження щодо нових алгоритмів налаштування регуляторів. Це підтверджує проведений кількісний аналіз отриманих у світі патентів (таблиця 1) за класом G05B11/42 „Автоматичні регулятори. Електричні. З одержуванням пропорційної характеристики з залежністю від часу, наприклад П.І., П.І.Д.”

Аналізуючи дані табл. 1, можна встановити стабільну світову тенденцію щодо збільшення кількості способів налаштування ПІД-регуляторів. Нажаль, ця тенденція не відноситься до України.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із сучасних напрямків розвитку задач оптимального налаштування ПІД-регуляторів є використання різноманітних метаевристичних методів. З цією метою використовуються методи

рою часточок та його модифікації [5, 6], генетичні алгоритми [7], метод мурашиних колоній [8] та інші біонічні підходи [9]. Потреба у використанні цих методів зумовлена тим, що вони дають змогу досить ефективно знаходити глобальні екстремуми оптимізаційних критеріїв. Це, у свою чергу, дає змогу використати всі наявні резерви (у сенсі обраного критерію оптимізації) для підвищення ефективності автоматичного регулювання.

1. Кількість отриманих патентів за 2010-2019 рр.*

Країна (організація)	Позначення патентів	Роки									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Україна	UA	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Російська федерація	RU	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-
Австралія	AU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Канада	CA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Китай	CN	17	22	22	32	25	25	35	53	65	56
Бразилія	BR	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Польща	PL	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
США	US	3	2	2	2	1	3	5	3	5	10
Німеччина	DE	1	2	-	-	-	3	-	1	1	-
Японія	JP	1	-	-	-	-	-	3	-	1	3
Корея	KR	3	2	3	3	1	1	2	2	8	-
Всесвітня організація по захисту інтелектуальної власності (World Intellectual Property Organization)	WO	1	-	2	2	-	2	-	2	-	2
Європейський патентний офіс (European Patent Office)	EP	-	2	2	1	2	2	-	-	4	5
Всього: 449	-	26	29	29	40	27	37	46	62	81	72

*станом на 09.03.2019

Однією із особливостей практичної реалізації регуляторів є різноманітні обмеження. Вони, як правило, накладаються зі сторони виконавчого пристрою і можуть бути пов'язані, наприклад, із його допустимою потужністю (для нагрівних установок), пропускну здатністю (для трубопроводів), перевантажувальною здатністю (для двигунів) тощо [10]. Врахування обмежень повинно виконуватись на етапі налаштування регулятора. Зазначимо, що задачі оптимального налаштування регуляторів із обмеженнями у сенсі виконання розрахунків є доволі складними [11, 12], інколи непридатними до практичного застосування. Тому виникає необхідність розробки такого методу, який би давав змогу проводити оптимальне налаштування регуляторів і був би доволі простим у використанні.

Оскільки найбільше поширення на практиці отримали ПІ-регулятори, то подальший виклад матеріалу буде відноситись саме до них.

Мета дослідження полягає у розробці методу оптимального налаштування ПІ-регулятора, який дає змогу врахувати обмеження (наприклад, на перерегулювання, тривалість регулювання тощо) які накладаються на процес регулювання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати постановку задачі оптимального налаштування ПІ-регулятора із обмеженнями, які накладаються зі сторони об'єкта регулювання; 2) розробити критерій оптимізації, який дозволить звести задачу налаштування регулятора до задачі безумовної оптимізації; 3) виконати розрахунок коефіцієнтів ПІ-регулятора за допомогою розробленого методу для декількох тестових передаточних функцій; 4) провести аналіз отриманих результатів та вказати перспективи подальших досліджень.

Матеріали і методи дослідження. Задача оптимального налаштування ПІ-регулятора включає комплексний оптимізаційний критерій та обмеження на регулювання. Перший можна представити у наступному вигляді:

$$Cr = \sum_{i=1}^n w_i m_i I_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де w_i – i -те значення вагового коефіцієнта, який враховує вагу одиничного критерію I_i ; I_i – i -тий одиничний критерій, який відображає деяку небажану характеристику

процесу регулювання (наприклад, середнє значення похибки) і тому повинен бути мінімізований; m_i – i -те значення коефіцієнта, який перетворює добуток $m_i I_i$ у безрозмірну величину; n – кількість одиничних оптимізаційних критеріїв.

Обмеження на регулювання можна представити у такому вигляді:

$$f_e\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, \mathbf{A}\right) \leq B_e, \quad k = \overline{(0, K)}, \quad q = \overline{(0, Q)}, \quad e = \overline{(1, E)}, \quad (2)$$

де x – регульований параметр (фазова координата системи); u – регулювання (вихідний сигнал ПІ-регулятора); K – порядок об'єкта регулювання (порядок полінома знаменника передаточної функції об'єкта регулювання); Q – порядок полінома чисельника передаточної функції об'єкта регулювання; f_e – e -тий показник, який у загальному випадку залежить від регульованого параметра x та його вищих похідних за часом, регулювання u та його вищих похідних за часом, а також вектора постійних параметрів системи та коефіцієнтів налаштування ПІ-регулятора \mathbf{A} ; B_e – e -те граничне (максимально допустиме) значення величини показника f_e .

Крім критерію (1) та обмежень (2) обов'язково повинна виконуватись умова стійкості системи регулювання, які можна записати так:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x = r; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d^k x}{dt^k} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де r – завдання (уставка).

Задача (1)-(3) є задачею комплексної оптимізації із обмеженнями. Зазначимо, що у сенсі виконання розрахунків подібні задачі є досить складними. У деяких випадках вони настільки ускладнюють задачу (наприклад при значній кількості обмежень), що не дозволяють знайти глобальний мінімум критерію (1).

Для кращого розуміння суті задачі (1)-(3) наведемо її графічну інтерпретацію (рис. 1).

Із рис. 1 видно, що розв'язок задачі (1)-(3) представляє собою кон'юнкцію трьох множин коефіцієнтів пропорційної K_p та інтегральної T_i складових ПІ-регулятора. Перша множина M_1 включає такі значення коефіцієнтів, які

забезпечують мінімуми (глобальні та локальні) критерію (1) (точка, яка зображена зірочкою позначає шуканий розв'язок задачі (1)-(3)). Друга множина M_2 включає значення коефіцієнтів K_p та T_i , які забезпечують виконання умов (2). Третя множина M_3 включає всі значення коефіцієнтів налаштування регулятора, які забезпечують стабільність регулювання (3).

Процес пошуку розв'язку задачі (1)-(3) полягає у використанні певного методу, який реалізований у вигляді ітераційного алгоритму. У процесі використання алгоритму на кожній ітерації повинні перевірятись умови (2) та (3). Це ускладнює роботу алгоритму.

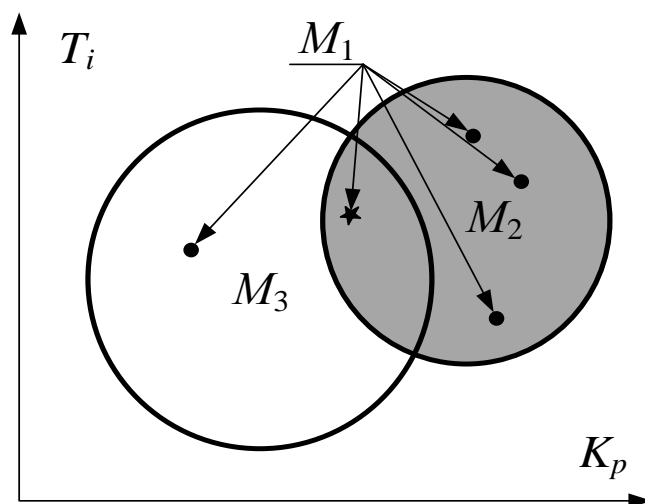


Рис. 1. Умовне графічне зображення кон'юнкції множин M_1 , M_2 та M_3 , на яких шукається розв'язок задачі (1)-(3)

Для того, щоб забезпечити виконання умов (2) і (3) та знайти мінімум критерію (1) зведемо вихідну задачу до задачі безумовної оптимізації. Для цього використаємо наступний критерій:

$$ComCr = Cr + \delta_{fn} \left(y_0 |x(T) - r_{\Delta}| + \sum_{k=1}^K y_k \left| \frac{d^k x(T)}{dt^k} \right| \right) + \delta_{uneq} \sum_{e=1}^E p_e \left| f_e \left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A \right) - B_e \right| \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $ComCr$ – комплексний критерій оптимізації, який включає обмеження (2) та відображає вимоги стійкості (3); r_{Δ} – допустиме відхилення регульованого

параметра від завдання (на практиці, як правило, приймають $r_{\Delta}=0,05r$); T – момент часу, коли виконуються умови

$$\begin{cases} |x(T) - r| \leq r_{\Delta}, \\ \frac{d^k x(T)}{dt^k} \approx 0; \end{cases} \quad (5)$$

де δ_{fin} – ваговий коефіцієнт, який відображає важливість виконання умов (3); δ_{uneq} – ваговий коефіцієнт, який відображає важливість виконання умов (2); y_0 – коефіцієнт, який зводить розмірність регульованого параметра до безрозмірного вигляду; y_k – k -тий коефіцієнт, який зводить розмірність k -того компонента суми до безрозмірного вигляду; p_e – коефіцієнт, який зводить розмірність показника f_e до безрозмірного вигляду.

Всі коефіцієнти, крім δ_{uneq} , є постійними. Зміна δ_{uneq} описується так:

$$\delta_{uneq} = \begin{cases} \Delta_{uneq}, & \text{якщо } f_1\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_1 > 0 \vee f_2\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_2 > 0 \vee \dots \\ \dots \vee f_E\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_E > 0; \\ 0, & \text{якщо } f_1\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_1 \leq 0 \wedge f_2\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_2 \leq 0 \wedge \dots \\ \dots \wedge f_E\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_E \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

де Δ_{uneq} – постійний коефіцієнт, величина якого визначається важливістю виконання умов (2). Зазначимо, що величини Δ_{uneq} та δ_{fin} повинні відрізнитись на декілька порядків. Це дає змогу сформуванню бажану топологію критерію (4): спочатку

алгоритм оптимізації рухається по поверхні функції $\delta_{uneq} \sum_{e=1}^E p_e \left| f_e\left(\frac{d^k x}{dt^k}, \frac{d^q u}{dt^q}, A\right) - B_e \right|$.

Пройшовши границю множини M_2 , ця функція перетворюється в нуль і алгоритм продовжує пошук глобального мінімуму критерію (4) рухаючись по поверхні суми

$Cr + \delta_{fin} \left(y_0 |x(T) - r_{\Delta}| + \sum_{k=1}^K y_k \left| \frac{d^k x(T)}{dt^k} \right| \right)$, в якій друга складова зменшується досить

швидко. Це викликано знаходженням таких коефіцієнтів K_p та T_i при яких умови (5)

виконуються (як правило, множина M_3 є доволі великою і тому алгоритм оптимізації знаходить її швидко).

Залежність (6) дає змогу алгоритму оптимізації потрапити на множину M_2 і вже не вийти за її межі. Це дозволяє знайти такі величини K_p та T_i при яких обмеження (2) будуть виконуватись.

Мінімізація критерію (4) може виконуватись, наприклад, за допомогою одного із метаевристичних методів. У подальших розрахунках використано модифікований метод рою часточок ME-PSO [12].

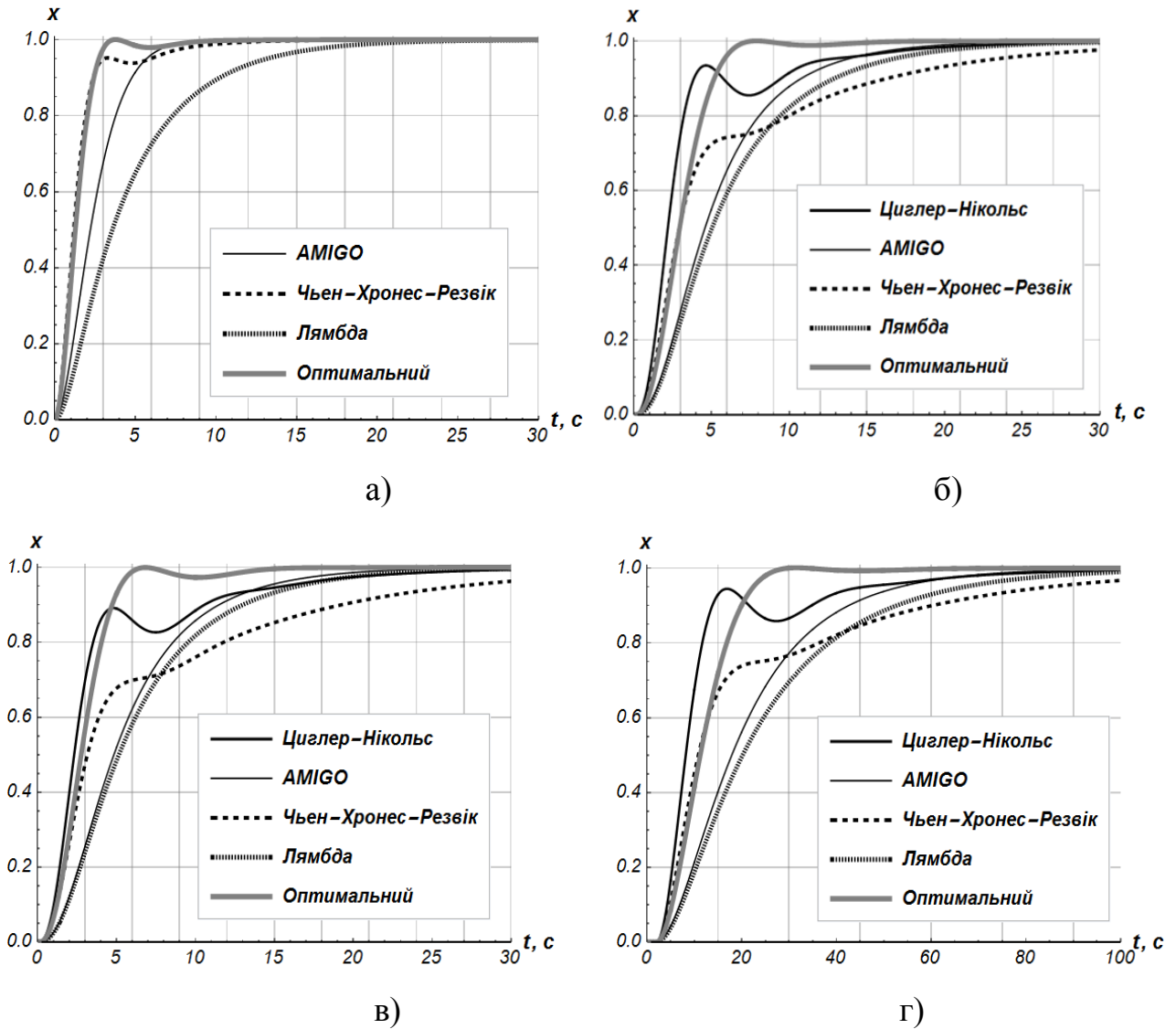
Результати досліджень та їх обговорення. Для ілюстрації ефекту від використання розробленого методу оптимального налаштування ПІ-регуляторів з його допомогою було виконано розрахунок коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора. У проведених розрахунках було використано обмеження на перерегулювання – воно повинно було бути нульовим. Для моделювання об'єктів регулювання використані тестові передаточні функції, які запропоновані у роботі [13]: $G_1(s)=1/(s+1)^2$, $G_2(s)=1/(s+1)^3$, $G_3(s)=(1-0,1s)/(s+1)^3$, $G_4(s)=e^{-2s}/(5s+1)^2$. Надалі було виконано моделювання процесу регулювання при відпрацюванні завдання ($r=1$) та розрахунок якісних показників регулювання: середньоінтегральної похибки (МІЕ), середньоінтегрального регулювання (МІС), та тривалості регулювання t_s . Отримані дані занесені у таблицю 2, де крім них записані також дані, які відповідають використанню ПІ-регуляторів, що налаштовані за допомогою інших методів. У табл. 2 внесені лише дані для тих методів налаштування ПІ-регулятора, які відповідають нульовому перерегулюванню.

Крім того, побудовано графічні залежності (рис. 2) досягнення регульованим параметром завдання для різних передаточних функцій та різних методів налаштування ПІ-регулятора.

Графічні залежності, які показані на рис. 2, дають змогу встановити, що швидкодія ПІ-регулятора, що налаштований за допомогою запропонованого методу є більшою. Це досягається за рахунок деякого погіршення інших якісних показників регулювання (табл. 2).

2. Якісні показники регулювання за допомогою налаштованих ПІ-регуляторів

Метод налаштування	Значення		MIE	MIC	t_s, c
	K_p	T_i			
1	2	3	4	5	6
Передаточна функція $G_1(s)$					
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	1,204	1,462	0,50	1,24	2,7
Передаточна функція $G_2(s)$					
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	0,609	3,182	0,53	0,98	5,8
Передаточна функція $G_3(s)$					
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	0,724	3,033	0,55	1,03	5,2
Передаточна функція $G_4(s)$					
Циглера-Нікольса	1,291	12,725	0,25	1,00	45,9
AMIGO	0,305	22,121	0,4	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	0,631	12,174	0,53	1,00	22,5



**Рис. 2. Графічні залежності зміни регульованого параметра для різних методів налаштування ПІ-регулятора та передаточних функцій:
а) $G_1(s)$; б) $G_2(s)$; в) $G_3(s)$; г) $G_4(s)$**

Із даних, які наведені у табл. 2, видно, що швидкодія оптимально налаштованого ПІ-регулятора більша у 2,11...4,88 разів – для об'єкта з передаточною функцією $G_1(s)$, у 2,12...3,95 разів – для об'єкта з передаточною функцією $G_3(s)$, у 2,79...5,15 разів – для об'єкта з передаточною функцією $G_3(s)$, у 2,04...3,77 разів – для об'єкта з передаточною функцією $G_4(s)$.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що розроблений метод є ефективним інструментом для оптимального налаштування автоматичних регуляторів для випадків накладання обмежень на параметри процесу регулювання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі розроблено метод оптимального налаштування регуляторів із врахуванням обмежень на параметри регульованого процесу. Він ґрунтується на зведенні вихідної задачі до задачі безумовної оптимізації комплексного критерію. Останній враховує обмеження та мінімізований показник (у рамках даного дослідження обмеження було представлено вимогою нульового перерегулювання, а показник, який необхідно було мінімізувати, відповідав тривалості регулювання).

Результати проведених чисельних розрахунків показали ефективність застосування методу, оскільки тривалість регулювання знизилась у рази.

Перспективи подальших досліджень полягають в перевірці ефективності розробленого методу для задач оптимального налаштування регуляторів для об'єктів високих порядків, а також нелінійних об'єктів. Крім того, необхідно також оцінити ефективність методу для інших (не розглянутих у роботі) обмежень, наприклад, для інтегральних показників (керування та похибки), величини та швидкості наростання регулювання тощо.

Список літератури:

1. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
2. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1 / Денисенко В.В. // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66-74.
3. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. - Trans. ASME. – 1942. – Vol. 64. – Н. 759–768.
4. O'Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd edition). Ireland: Imperial College Press. – 2009. – 623 p.
5. Latha K., Rajinikanth V., Surekha, P.M. PSO-Based PID Controller Design for a Class of Stable and Unstable Systems, ISRN Artificial Intelligence. – 2013. – P. 1-11.
6. Mehdi Nasri. A PSO-Based Optimum Design of PID Controller for a Linear Brushless DC Motor, International Science Index / Mehdi Nasri, Hossein Nezamabadi-pour, Malihe Maghfoori // Electrical and Information Engineering. – 2007. – Vol 1. – No 2. – P. 179-183.
7. Machine Learning Control: Tuning a PID Controller with Genetic Algorithms. External link: https://www.youtube.com/watch?v=S5C_z1nVaSg&t=485s

8. Ünal M. Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms / Ünal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. // Springer. – 2013. – 108 p.
9. Jagatheesan Kallannan. Ashour. Bio-Inspired Algorithms in PID Controller Optimization / Jagatheesan Kallannan, Anand Baskaran, Nilanjan Dey, Amira S. // CRC Press. – 2018 –76 p.
10. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 / Денисенко В.В. // Современные технологии автоматизации. – 2007. – С. 86-97.
11. Mikuláš Huba. Robust constrained PID control. International Conference Cybernetics and informatics, Vyšná Boca, Slovak Republic. –P. 1-18.
12. Romasevych Yu. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique / Romasevych Yu., Loveikin V. // Cybernetics and Information Technologies. – 2018. – 18(3) – P. 62-74.
13. Åström K.J. Benchmark Systems for PID Control / Åström K.J., Hägglund T. // International Federation of Automatic Control. – 2000. – P. 165-166.

References

1. Åström, K. J., Hägglund, T. (2006) Advanced PID control. ISA The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 460.
2. Denysenko, V.V. (2006). PYD-Rehulatory Pryntsypy Postroenyia Y Modyfykatsyy. Chast 1. [PID-controllers: Principles of Design and Modifications. Part 1]. Sovremennye Tekhnolohy Avtomatyzatsyy. 4, 66-74.
3. Ziegler, J. G., Nichols, N. B. (1942) Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME, 64, 759-768.
4. O'Dwyer (2009). Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd edition). Ireland: Imperial College Press, 623.
5. Latha, K., Rajinikanth, V., Surekha, P.M. (2013)/ PSO-Based PID Controller Design for a Class of Stable and Unstable Systems, ISRN Artificial Intelligence, 1-11.
6. Mehdi Nasri, Hossein Nezamabadi-pour, Malihe Maghfoori (2007) A PSO-Based Optimum Design of PID Controller for a Linear Brushless DC Motor, International Science Index. Electrical and Information Engineering, 1 (2), 179-183.
7. Machine Learning Control: Tuning a PID Controller with Genetic Algorithms. External link. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=S5C_z1nVaSg&t=485s
8. Ünal, M., Ak, A., Topuz, V., Erdal, H. (2013) Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms. Springer. – 108.
9. Jagatheesan Kallannan, Anand Baskaran, Nilanjan Dey, Amira S. Ashour. Bio-Inspired Algorithms in PID Controller Optimization. CRC Press, 76.
10. Denysenko, V.V. PYD-Rehulatory Voprosy Realyzatsyy. Chast 1. [PID-controllers. Issues of implementation. Part 1]. Sovremennye Tekhnolohy Avtomatyzatsyy, 86-97.
11. Mikuláš, Huba (2010) Robust constrained PID control. International Conference Cybernetics and informatics, Vyšná Boca, Slovak Republic, 1-18.
12. Romasevych, Yu., Loveikin, V. (2018) A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. Cybernetics and Information Technologies, 18(3), 62-74.

13. Åström, K.J., Hägglund, T. (2000) Benchmark Systems for PID Control. International Federation of Automatic Control, 165-166.

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ ПИ-РЕГУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ

Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловейкин, А. П. Ляшко, В. В. Макарец

Аннотация. Разработан метод оптимальной настройки ПИ-регуляторов при учете ограничений. Метод основан на сведении задачи настройки к задаче безусловной оптимизации. Для этого предложен специальный комплексный критерий, характеризуется желанными топологическими свойствами. Последние полученные с помощью весовых коэффициентов, учитывающих требования к устойчивости системы, ограничений и комплекса критериев, отражающих нежелательные показатели регулирования. Заранее заданные топологические свойства критерия позволили найти его глобальный минимум. В работе для этой цели была использована модификация метода роя частиц ME-PSO, которая характеризуется переинициализацией роя при условии его стагнации.

Для оценки эффективности использования метода были выполнены расчеты коэффициентов ПИ-регулятора при ограничении по перерегулированию (принято, что оно должно быть нулевым). Критерием оптимизации было быстродействие регулирования. В результате получено, что для четырех тестовых передаточных функций (второго и третьего порядков, одна передаточная функция соответствует объекту регулирования с временной задержкой) быстродействие регулирования значительно увеличивается при обеспечении ограничения по перерегулированию.

Полученные результаты сравнивались с теми, которые соответствуют регуляторам, что настроены с использованием других (известных в инженерной практике) методов настройки ПИ-регуляторов (сравниваемые методы позволяют получить нулевое перерегулирование). Кроме того, анализ качества автоматического регулирования был проведен с использованием показателей: среднеинтегральной погрешности и среднеинтегрального регулирования.

Разработанный подход довольно универсальный. Он может использоваться для синтеза оптимальных систем регулирования в том числе и нелинейных.

Ключевые слова: регулятор, оптимизация, критерий, ограничения, настройки, метод роя частиц

THE METHOD OF OPTIMAL CONSTRAINED TUNING OF PI- CONTROLLERS

Yu. Romasevych, V. Loveikin, A. Lyashko, V. Makarets

Abstract. In the work, a method is developed for optimal tuning of PI-controllers with constraints. The method is based on reducing the tuning problem to the unconstrained optimization problem. In order to reduce the problem, a special complex criterion has been proposed. It is characterized by the desired topological properties. The latter have been obtained using weight coefficients that take into account the requirements

for system stability, constraints and a set of criteria that reflect undesirable controlling indicators. The predetermined topological properties of the criterion made it possible to find its global minimum. In the work, a modification of the ME-PSO particle swarm method has been used. It is characterized by reinitialization of the swarm in the stage of stagnation.

In order to show the effectiveness of applying the method, the coefficients of the PI controller with the constraint on overshoot (it is assumed that it should be zero) have been calculated. The optimization criterion was the settling time. As a result, it was found that for four test transfer functions (second and third orders, one transfer function corresponds to an object of regulation with a time delay), the settling time is significantly decreased while ensuring overshoot constraint.

The obtained results were compared with those that correspond to the controllers that are tuned using other (known in engineering practice) PI-controller tuning methods (compared methods allow to obtain zero overshoot). In addition, the analysis of the quality of controlling was carried out using indicators: mean integral error and mean integral control.

The developed approach is quite universal. It might be used for the synthesis of optimal control systems, including non-linear ones.

Keywords: *controller, optimization, criterion, constraints, tuning, particle swarm optimization*