

УДК 681.5

І. М. Голінко, І. Є. Галицька

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА МОДУЛЬНИМ КРИТЕРІЄМ ЯКОСТІ

Вступ

Введення в експлуатацію систем автоматичного керування (САК) складних технологічних процесів займає багато часу, вимагаючи для свого виконання кваліфікованих фахівців. Під час налагодження САК, наладчики віддають перевагу інженерним методикам визначення параметрів ПІ та ПІД регуляторів, використовуючи для розрахунку динамічні властивості об'єкта керування (ОК) [1]. Проте, у багатьох випадках виявляється, що якість функціонування систем керування є низькою, це спричиняє відповідні економічні втрати (звичайно приховані, оскільки вони не реєструються).

На сучасному етапі вимоги до функціонування систем керування зросли. САК повинна забезпечувати необхідну якість регулювання, мінімізувати витрату матеріальних та/або енергетичних ресурсів для досягнення поставлених цілей, а також обмежувати зношення регулюючих пристроїв та збільшувати термін їх служби.

Постановка задачі

Виходячи із викладеного, метою роботи є розробка експрес-методу оптимізації налаштувань ПІ регулятора у САК із мінімізацією керуючого впливу. Додаткова умова – простота методу та зручність використання.

Оптимальне налаштування ПІ регулятора

Розглядається одноконтурна САК, структурна схема якої представлена на рис. 1. САК складається із об'єкта керування (ОК), суматора та регулятора, $y_3(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – помилка регулювання, $u(t)$ – сигнал керування, $y(t)$ – вихідний сигнал ОК.

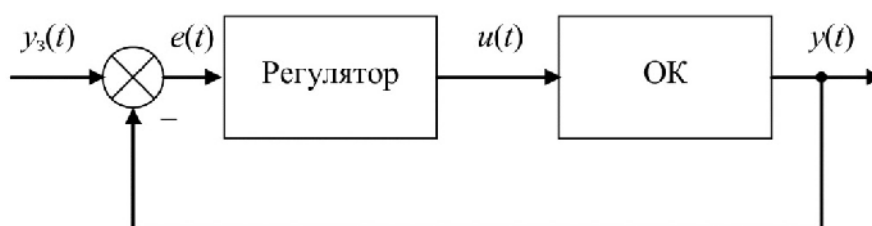


Рис. 1. Структура САК

В задачах оптимального керування квадратичні критерії знайшли широке застосування внаслідок можливості аналітичного пошуку розв'язку [2]. З розвитком інформаційних технологій та числових методів з'являється можливість використання модульних критеріїв. Для оптимізації САК будемо розглядати обидві інтегральні форми, що дозволить порівняти якість розв'язку:

$$I = \begin{cases} \int_0^{t_f} (q|e| + r|y_3 - Ku|) dt, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_f} (qe^2 + r[y_3 - Ku]^2) dt, & Nk = 2. \end{cases} \quad (1)$$

Тут q та r – вагові коефіцієнти; K – коефіцієнт передачі ОК; Nk - критерій якості. Критерій (1) адаптований до задач динамічної оптимізації САК технологічних процесів, де коректно враховується сигнал керування $u(t)$ [3].

Для більшості випадків інженерних розрахунків САК в якості динамічної моделі ОК використовується передатна функція [1]:

$$W_{OK}(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-p\tau}, \quad (2)$$

де T – постійна часу й τ – запізнювання в ОК.

Динамічні властивості САК за каналом регулювання визначаються передатною функцією розімкнутої системи (РС). Якщо в якості “одиниці часу” приймається постійна часу ОК – передатна функція РС прийме вид (у безрозмірній формі):

$$W_{PC}(p) = K_r^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* p} \right) \frac{e^{-p\tau^*}}{p + 1}, \quad (3)$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{T}, \quad T_i^* = \frac{T_i}{T}, \quad K_r^* = K \cdot K_r, \quad (4)$$

тут K_r , T_i – коефіцієнт передачі та час інтегрування ПІ регулятора. Далі змінні із індексом * позначатимуть динаміку САК у масштабі постійної часу ОК (T).

Таким чином, оптимізується САК, де ОК представляється передатною функцією:

$$W_{OK}^*(p) = \frac{e^{-p\tau^*}}{p + 1}. \quad (5)$$

При цьому, динамічні властивості ОК визначаються тільки відносним запізнюванням τ^* , тоді як ПІ регулятор характеризується безрозмірними параметрами K_r^* , T_i^* .

Для “відносного часу” ($t^* = t/T$) функціонал (1) прийме вигляд:

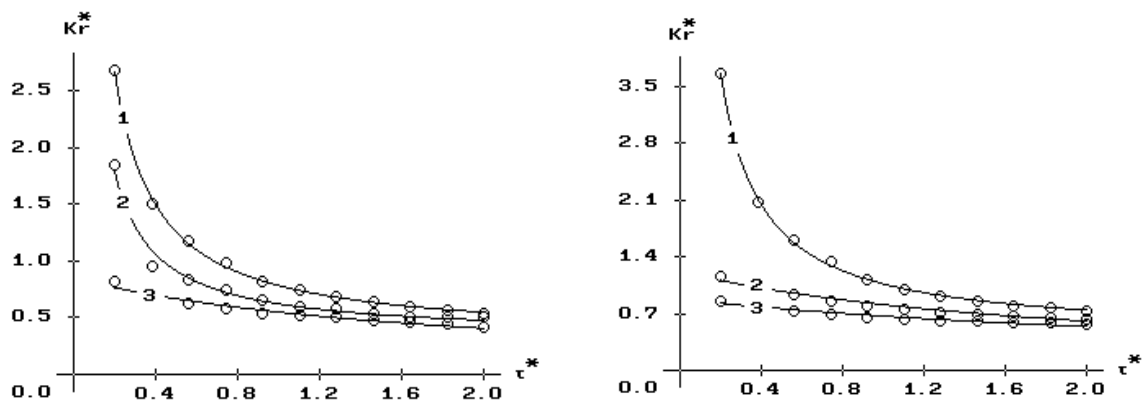
$$I^* = \begin{cases} \int_0^{t_f^*} (q|e^*| + r|y_3 - u^*|) dt^*, & Nk = 1; \\ \int_0^{t_f^*} (q[e^*]^2 + r[y_3 - u^*]^2) dt^*, & Nk = 2. \end{cases} \quad (6)$$

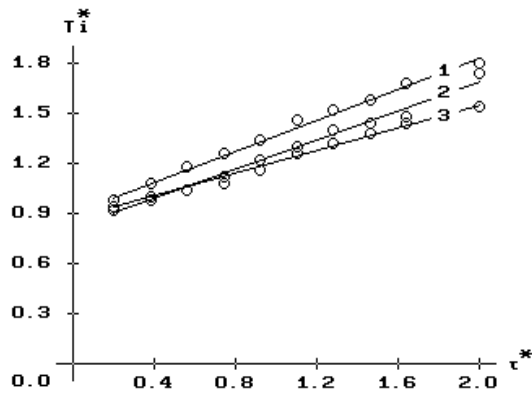
Пошук оптимальних налаштувань ПІ регулятора для ОК (5) за критерієм (6) проводився чисельно. Алгоритми пошуку оптимуму та програмна реалізація методів представлені в [4]. На рис. 2. представлено залежність оптимальних налаштувань ПІ регулятора від запізнювання τ^* ОК за критерієм (6). На графіках кружки показують розрахункові точки чисельного пошуку а криві 1, 2, 3 представляють апроксимуючі залежності знайдені методом найменших квадратів за критерієм:

$$E^* = \sum_{s=0}^m [y_s^* - f_a(\tau_s^*)]^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

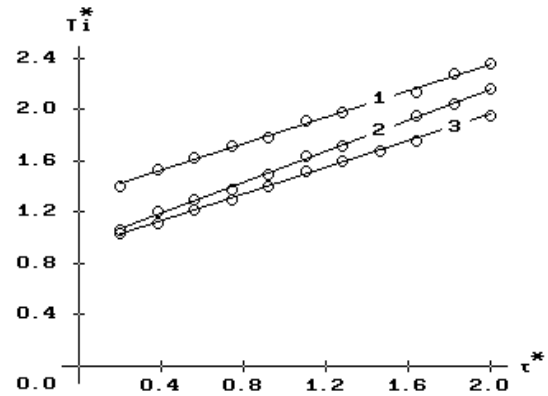
тут y_s^* – розрахункова точка параметра регулятора для τ_s^* знайдена методом Хука-Дживса, $f_a(\tau^*)$ – апроксимуюча функція. Пошук параметрів регулятора проводився в області $\tau^* \in [0.2 \dots 2]$, $m = 10$. Відрізок $\tau^* \in [0 \dots 0.2]$ не розглядався, для САК із аперіодичним ОК без запізнювання оптимальним є ПІ регулятор із $K_r^* \rightarrow \infty$.

Зворотне перерахування параметрів регулятора до “дійсного” масштабу часу проводилося враховуючи (4). Результати апроксимації оптимальних налаштувань ПІ регулятора за критерієм (1) наведено в табл. 1.





a) $Nk=1$



б) $Nk=2$

Рис. 2. Оптимальні налаштування САК з ПІ регулятором

за критерієм (6): 1 – ($q=1, r=0$); 2 – ($q=1, r=1$); 3 – ($q=0, r=1$)

Таблиця 1.

Функціональні залежності оптимальних налаштувань ПІ регулятора

Регулятор		Параметри критерію		
		$q=1, r=0$	$q=1, r=1$	$q=0, r=1$
ПІ ($Nk=1$)	K_r	$\frac{1}{K} \left(0.312 + 0.471 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.005$	$\frac{1}{K} \left(0.333 + 0.289 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.023$	$\frac{1.556}{K(1.834 + \tau/T)},$ $E^* = 0.006$
	T_i	$0.9T + 0.465\tau,$ $E^* = 0.012$	$0.817T + 0.435\tau,$ $E^* = 0.008$	$0.873T + 0.337\tau,$ $E^* = 0.005$
ПІ ($Nk=2$)	K_r	$\frac{1}{K} \left(0.42 + 0.647 \frac{T}{\tau} \right),$ $E^* = 0.005$	$\frac{2.418}{K(1.981 + \tau/T)},$ $E^* = 0.008$	$\frac{2.801}{K(3.184 + \tau/T)},$ $E^* = 0.003$
	T_i	$1.324T + 0.515\tau,$ $E^* = 0.004$	$0.953T + 0.603\tau,$ $E^* = 0.002$	$0.928T + 0.52\tau,$ $E^* = 0.002$

Приклади моделювання САК

Приклад дослідження САК із використанням отриманих функціональних залежностей (табл. 1) продемонстровано нижче. Динамічні властивості ОК (2) вибрано довільно без прив'язки до конкретного технологічного апарату: $K = 3.67$; $T = 65$; $\tau = 14$. З цих причин динамічні властивості ОК та налаштування регулятора представляються без розмірностей. Використовуючи табл. 1 для можливих

варіантів критерію (1) розраховані налаштування ПІ регулятора, числові значення налаштувань зведені у табл. 2.

Таблиця 2.

Оптимальні налаштування ПІ регулятора за критерієм (1)

Регулятор		Параметри критерію		
		$q=1, r=0$	$q=1, r=1$	$q=0, r=1$
ПІ ($Nk=1$)	K_r	0.68	0.46	0.21
	T_i	65.01	59.2	61.46
ПІ ($Nk=2$)	K_r	0.93	0.3	0.22
	T_i	93.27	70.39	67.6

На рис. 3 представлені оптимальні перехідні процеси у САК. Аналіз результатів моделювання показує, що синтез САК за модульним критерієм якості ($Nk=1$) має ряд переваг. По-перше, (як не раз відзначалося в літературі) перехідні процеси в САК, розраховані за середньоквадратичним критерієм, мають підвищену схильність до наявності коливної складової у перехідних процесах (рис. 3 б, графік 1). По-друге, тривалість перехідних процесів у САК, синтезованих за модульними критеріями, менше (рис. 3 а).

Хочеться відзначити, що оптимізація САК за критерієм із мінімізацією сигналу керування зменшує коливність перехідних процесів у системі та знижує витрати матеріальних і/або енергетичних потоків на керування ТП (рис. 3 а, рис. 3 б, графік 2). У випадку синтезу САК тільки із мінімізацією керуючого впливу ($q=0$) – тривалість перехідних процесів затягується (рис. 3 а, рис. 3 б, графік 3), проте запас стійкості системи збільшується, що може бути корисним, якщо ОК в процесі роботи змінює свої динамічні властивості.

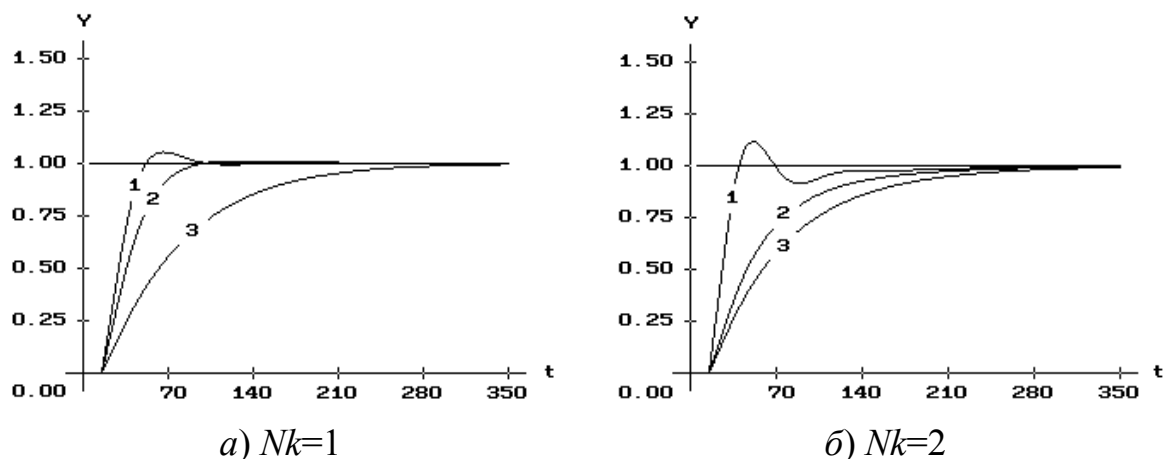


Рис. 3. Перехідні процеси в САК, оптимізовані за критерієм (1):
1 – ($q=1, r=0$); 2 – ($q=1, r=1$); 3 – ($q=0, r=1$)

У довіднику [1] представлені залежності для інженерного розрахунку регулятора САК, деякі з них представлені у табл. 3. За розрахунковими формулами (табл. 3) отримані числові значення параметрів ПІ регулятора для ОК, що розглядається як приклад. Розраховані значення параметрів зведені в табл. 4. На рис. 4 показані перехідні процеси в САК із параметрами регулятора табл. 4. Порівняння результатів моделювання (рис. 4) свідчить на користь використання запропонованих функціональних залежностей.

Таблиця 3.

Розрахункові залежності для САК із ПІ регулятором

Автор(и)	Критерій оптимізації	Розрахункові формули
Rovira і ін. (1969)	$\int_0^{t_f} e dt \rightarrow \min$	$K_r = \frac{0.758}{K} \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.861};$ $T_i = \frac{T}{1.02 - 0.323\tau/T};$ $0.1 \leq \tau/T \leq 1. \quad (R)$
Edgar (1994)	$\int_0^{t_f} e dt \rightarrow \min$	$K_r = \frac{0.67T}{K\tau}; T_i = 3.5\tau. \quad (E)$
Murrill (1967)	$\int_0^{t_f} e^2 dt \rightarrow \min$	$K_r = \frac{1.305}{K} \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.959};$ $T_i = \frac{T}{0.492} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{0.739};$ $0.1 \leq \tau/T \leq 1. \quad (M)$
Zhuang, Atherton (1993)	$\int_0^{t_f} e^2 dt \rightarrow \min$	$K_r = \frac{1.279}{K} \left(\frac{T}{\tau} \right)^{0.945};$ $T_i = \frac{T}{0.535} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{0.586};$ $0.1 \leq \tau/T \leq 1. \quad (Z)$

Таблиця 4.

Оптимальні налаштування ПІ регулятора

Розрахункові формули	Критерій оптимізації	Значення параметрів
табл. 1	(1), $Nk=1, q=1, r=0$	$K_r=0.68; T_i=65.01$

(R)	$\int_0^{t_f} e dt \rightarrow \min$	$K_r=0.77; T_i=68.39$
(E)	$\int_0^{t_f} e dt \rightarrow \min$	$K_r=0.85; T_i=49$
табл. 1	(1), $Nk=2, q=1, r=0$	$K_r=0.93; T_i=93.27$
(M)	$\int_0^{t_f} e^2 dt \rightarrow \min$	$K_r=1.55; T_i=42.48$
(Z)	$\int_0^{t_f} e^2 dt \rightarrow \min$	$K_r=1.49; T_i=49.41$

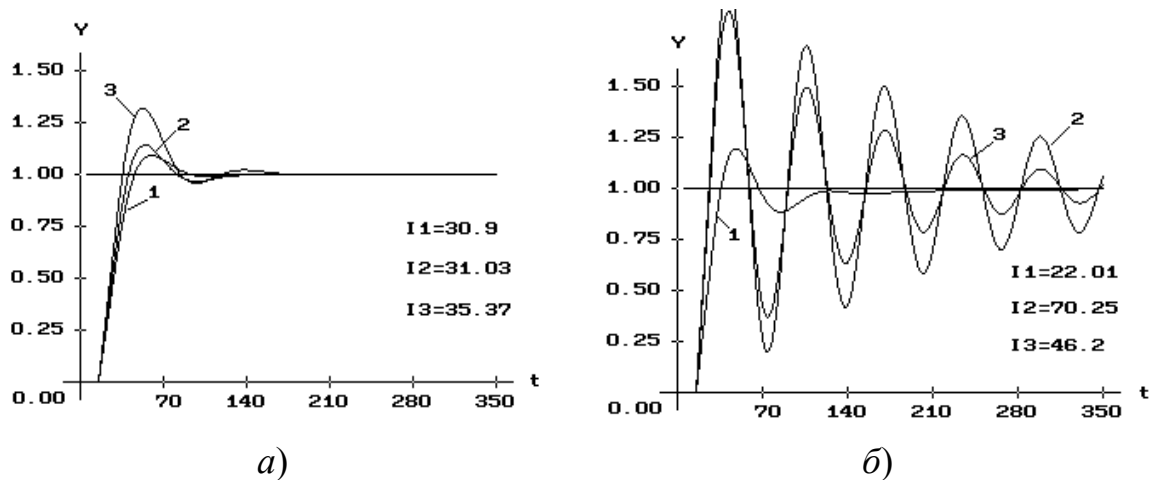


Рис. 4. Перехідні процеси в САК з ПІ регулятором:
 1 а – (1), $Nk=1, q=1, r=0$; 2а – (R); 3а – (E);
 1 б – (1), $Nk=2, q=1, r=0$; 2б – (M); 3б – (Z)

Висновки

Для оптимізації САК автори пропонують використовувати функціонал (1) із мінімізацією керуючого впливу. Запропонований критерій коректно враховує сигнал керування, що дозволяє мінімізувати витрату матеріальних та/або енергетичних потоків під час керування промисловими апаратами.

Отримано функціональні залежності для оптимізації налаштувань ПІ регулятора від динамічних властивостей ОК. Розрахункові формули відрізняються від існуючих своєю простотою, відсутністю степеневих залежностей, високою точністю пошуку. Отримані залежності рекомендується використовувати фахівцям із автоматизації для проектування систем керування та оптимізації існуючих.

На думку авторів, для синтезу оптимальних САК доцільно використовувати модульні критерії якості, що підтверджується

результатами моделювання. Квадратичні критерії якості знайшли широке розповсюдження внаслідок можливості аналітичного розв'язку задачі. З розвитком інформаційних технологій і чисельних методів перевага квадратичних критеріїв відходить на другий план у порівнянні з якістю розв'язку. Надалі планується одержати функціональні залежності оптимальних налаштувань цифрового ПІ регулятора для САК, де динамічні властивості ОК визначаються (2).

Список використаної літератури

1. *Aidan O'Dwyer Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / Aidan O'Dwyer. Dublin Institute of Technology, 2006. –545p.*
2. *Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-и тт.; Т.4: Теория оптимизации систем автоматического управления [Текст] / К. А. Пупков и др. М.: МГТУ, 2004. – 744 с.*
3. *Голінко, ІМ. Синтез оптимальних систем керування із мінімізацією керуючого впливу / І.М. Голінко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – №2(54), – С. 79–88.*
4. *Голінко, І.М. Моделювання та оптимізація систем керування [Текст]: монографія /І. М. Голінко, А. І. Кубрак. – Кам–Под.: Рута, 2012. – 262 с.*