

FEATURES OF MODELLING CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL OBJECTS WITH UNCERTAINTIES

N. Lutska, L. Vlasenko, V. Tsyhanenko
National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
<i>Parametric uncertainty</i> <i>Structural uncertainty</i> <i>Nonsmooth optimization</i> <i>Sensitivity</i> <i>Robustness</i>	<p>This article presents the results of modelling a control system of a technological object having significant parametric and structural uncertainties. The task of synthesis of PI-controller, which parameters are calculated by minimizing H_∞-norm properties of a system, was considered in this study. The parameters were determined by the method of nonsmooth optimization. The analysis of the quality of transition processes of the investigated control system was conducted regarding the change of objective and the disturbance at nominal and the worst-case parameters of the plant with PI-controllers, one of which has the settings calculated by minimizing the first half-period of oscillation for nominal plant, and another one has the settings calculated using the general criterion for robust synthesis.</p>
<p>Article history: Received 10.04.2016 Received in revised form 01.05.2016 Accepted 15.05.2016</p> <p>Corresponding author: N. Lutska E-mail: lutskaya@yandex.ru</p>	

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ З НЕВИЗНАЧЕНОСТЯМИ

Н.М. Луцька, Л.О. Власенко, В.В. Циганенко
Національний університет харчових технологій

У статті отримано результати моделювання системи керування технологічним об'єктом із суттєвими параметричними та структурними невизначеностями. Розглянуто задачу синтезу ПІ-регулятора, параметри якого розраховані за мінімізацією H_∞ -норми замкненої системи. Пошук параметрів проводився за допомогою методу негладкої оптимізації. Проведено аналіз якості перехідних процесів досліджуваної системи керування відносно зміни завдання та відносно збурення при номінальних і найгірших комбінаціях невизначеностей об'єкта з ПІ-регуляторами, один з яких має параметри налаштування, розраховані за мінімізацією першого півперіоду коливань для номінального об'єкта, а другий — за загальним робастним критерієм синтезу.

Ключові слова: *параметрична невизначеність, структурна невизначеність, негладка оптимізація, чутливість, робастність.*

Постановка проблеми. При побудові ефективної системи керування проєктант оперує апріорною інформацією про властивості технологічного

об'єкта керування та апостеріорною інформацією, що отримана шляхом проведення доексплуатаційної низки дослідів на самому об'єкті при певних умовах його роботи. Як правило, на основі отриманої інформації будується наближена лінійна модель процесу, на основі якої, а також вимог до якості процесу керування, обирається структура та параметри регулятора [1].

Загальновідомо, що задача синтезу будь-якого регулятора зводиться до знаходження стабілізуючого регулятора, який би відповідав, окрім досягнення заданої стійкості і якості системи керування, ще й додатковим вимогам. Зазвичай структура регулятора задана заздалегідь і основною проблемою визначення його налаштувань.

Останнім часом активно розвиваються такі аналітичні теорії синтезу регуляторів: H_∞ -теорія, μ -синтез, l_1 -підхід тощо [2—5], що суттєво покращують роботу систем керування, але серйозною проблемою залишається синтез регуляторів, які задовольняють критерії якості. На практиці, як і раніше, використовують традиційні регулятори (П-, ПІ-, ПІД-регулятори), що зарекомендували себе як доступні та зрозумілі при вирішенні промислових завдань [6, 7].

Однак отримана система керування може виявитися чутливою до параметрів чи структури об'єкта, а також зміни навколишнього середовища, оскільки не враховуються невизначеності, при якій вона була синтезована. До таких невизначеностей належать: неточність апроксимації нелінійного об'єкта лінійними ланками; неточність ідентифікації параметрів моделі об'єкта, що обумовлюється умовами проведення дослідів у режимах, які лише наближені до робочих; нелінійні характеристики датчиків і виконавчих механізмів; зміна характеристик зовнішніх збурень і шумів у каналах вимірювання. Крім того, при постійній експлуатації технологічний об'єкт може змінити свої характеристики, а технічні засоби зношуються, що погіршує якість перехідних процесів, збільшує енергетичні витрати та спричиняє псування кінцевого продукту.

Об'єктом дослідження є система керування технологічним процесом, що має суттєві невизначеності як параметричного, так і структурного типів. У ході попередніх досліджень встановлено, що якість систем керування технологічними об'єктами із суттєвими невизначеностями незадовільна, а налаштування локального ПІ-регулятора потребують додаткових дій. Зважаючи на вищевикладене, метою дослідження є підвищення якості регулювання технологічним об'єктом, що функціонує в умовах параметричної та структурної невизначеностей, шляхом налаштування ПІ-регулятора за робастним критерієм.

Виклад основних результатів дослідження. Для того, щоб система мала робастні властивості, обирається H_∞ -критерій мінімізації замкненої системи, а налаштування робастного ПІ-регулятора розраховується за методом негладкої оптимізації (Nonsmooth multy-directional search). Переваги таких систем беззаперечні — проєктант системи керування особисто може обрати будь-яку структуру регулятора і розрахований регулятор має властивості робастності, адже синтезований за H_∞ -критерієм.

Одним із ефективних способів забезпечення робастних властивостей системи з одним входом-одним виходом є використання теорії чутливості, а також заснованого на цій теорії алгоритму loop shaping. Згідно з останнім, загальний робастний критерій синтезу для системи, що зображена на рис. 1, визначається так:

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_{\infty} \rightarrow \min_{K(s)}, \quad (1)$$

де $S(s)$ — передатна функція чутливості системи; $T(s)$ — функція додаткової чутливості та $K(s)$ — передатна функція регулятора; $L(s)$ та $R(s)$ — додаткові передатні функції, що визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} L(s) &= G(s)K(s), S(s) = [I + L(s)]^{-1}; R(s) = K(s)[I + L(s)]^{-1}; \\ u &= R(s)r, T(s) = L(s)[I + L(s)]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Так, в (1) перша складова критерію забезпечує мінімум параметричної чутливості, друга та третя — мінімум дестабілізуючих, відповідно, адитивної та мультиплікативної структурних невизначеностей. W_1, W_2, W_3 — вагові матриці, що визначають частотний діапазон впливу кожної із складових критерію (1). Даний критерій має назву *weighted mixed sensitivity* [2, 4].

На рис. 1 наведена структура синтезованої системи, де $r(t), u(t), e(t), d(t), y(t)$ — сигнали завдання, керування, розузгодження, збурення та вихідний сигнал відповідно; $G(q, s)$ — передатна функція об'єкта з параметричними невизначеностями q ; $K(s) = K_p + K_i/s$ — передатна функція ПІ-регулятора; Δ_1, Δ_2 — структурні невизначеності, представлені у вигляді лінійної динамічної системи (один вхід — один вихід) з обмеженнями: $\|\Delta_1\|_{\infty} \leq 1, \|\Delta_2\|_{\infty} \leq 1$.

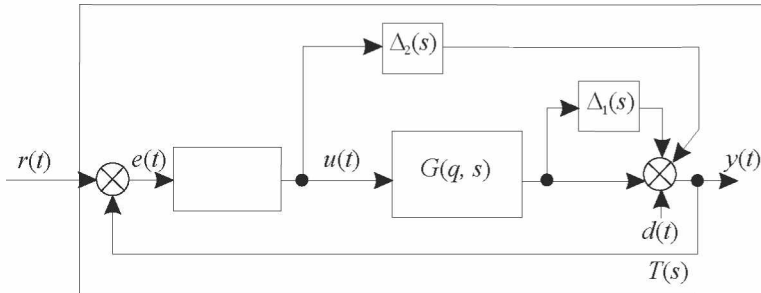


Рис. 1. Структурна схема системи керування

Однак при використанні алгоритму *loop shaping* за критерієм (1) порядок регулятора виявляється значно вищим за порядок об'єкта, тому пропонується використати критерій мінімізації (1) для знаходження параметрів ПІ-регулятора, використовуючи при цьому пошуковий алгоритм негладкої H_{∞} -оптимізації (*Nonsmooth multy-directional search*) [8—10].

Розглянемо об'єкт, математична модель якого описується аперіодичною ланкою першого порядку із запізнюванням:

$$G(s) = \frac{k_0}{Ts + 1} e^{-\tau s}. \quad (3)$$

При цьому розкладемо ланку запізнення в ряд Паде 2-го порядку, тоді математична модель об'єкта набуде такого вигляду:

$$G(s) = \frac{k_0 (1 - s\tau/2)}{(Ts + 1)(1 + s\tau/2)}, \quad (4)$$

де k_0 , T та τ — визначені в певному діапазоні параметри об'єкта.

Моделювання проводилось у середовищі Matlab з використанням функцій пакета Control System Toolbox і Robust Control Toolbox шляхом програмування. Номінальні параметри об'єкта: $k_0=1$ [од. вх./од. вих.], $T=100$ [с], $\tau=10$ [с], які змінювались довільно в діапазоні $[-50\% \dots +50\%]$.

Розрахунок параметрів ПІ-регуляторів проводився з використанням функції systune, що реалізує алгоритм [8—10] за критеріями: мінімізації першого півперіоду коливань для номінального об'єкта (PI) та за загальним робастним критерієм (1) (PI-robust). Результати виконання програми наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати визначення оптимальних настройок регулятора

Вид регулятора	Настройки регулятора	
	K_p	K_i
PI	4,4	0,0381
PI-robust	8,08	0,0575

Перехідні процеси будувалися для номінального режиму системи та для найгірших комбінацій параметричних і структурних невизначеностей, що визначались за допомогою функції wcgain, яка входить у Worst-Case Analysis, з точки зору амплітудно-частотної характеристики системи.

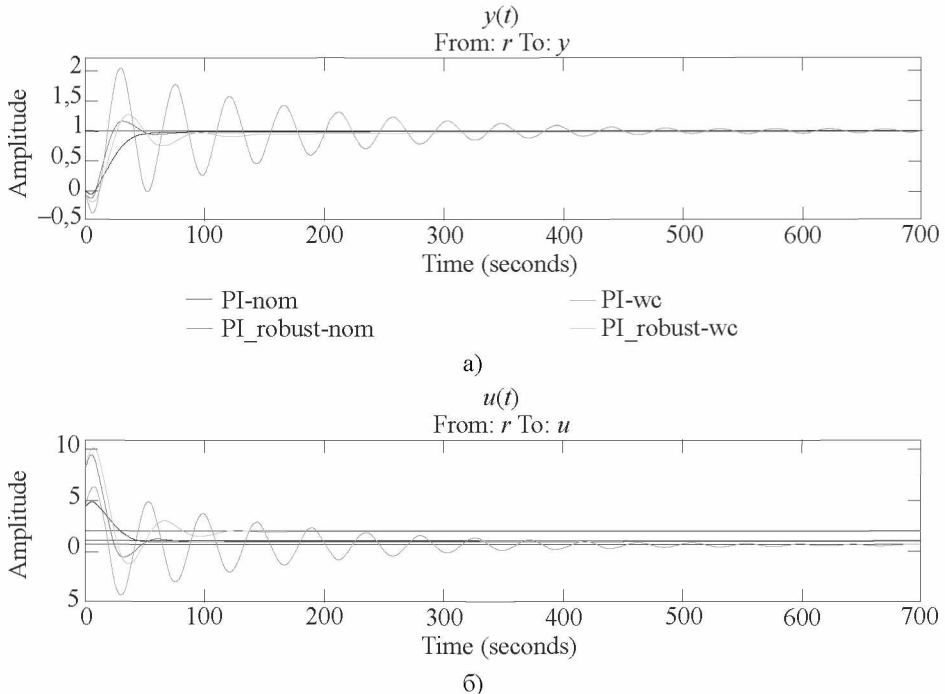


Рис. 2. Перехідні процеси відносно зміни ступінчатого сигналу завдання: а) зміна вихідного сигналу; б) зміна керування

На рис. 2—4 зображені перехідні процеси системи керування відносно зміни завдання та збурення при номінальних і найгірших комбінаціях невизначеностей системи з двома ПІ-регуляторами, перший з яких має настройки,

розраховані за мінімізацією першого півперіоду коливань для номінального об'єкта, а другий — за критерієм (1). Вид вхідного сигналу для рис. 2, 3 — одиничний стрибкоподібний, для рис. 4 — одиничний імпульсний.

З графіків на рис. 2 видно, що при зміні сигналу завдання для номінальної системи кращою є система з першим регулятором, однак при найгірших комбінаціях невизначеностей якість системи значно погіршується, що не спостерігається для другої системи. Наприклад, для рис. 2 у табл. 2 наведені порівняльні характеристики аналізу перехідних процесів для номінальної системи та системи з найгіршими комбінаціями невизначеностей (A_1 — динамічна похибка; $t_{\text{пр}}$ — час перехідного процесу; ψ — степінь затухання).

Таблиця 2. Порівняльні характеристики основних показників і критеріїв оцінки якості досліджуваних систем

Характеристика Стойкість	Стойкість	A_1	$t_{\text{пр}}$	ψ	$\int y(t)^2 dt$	$\int u(t)^2 dt$
<i>Для номінального режиму</i>						
PI	+	-	60 с	-	17,91	245,76
PI-robust	+	1,17	90 с	0,98	14,41	813,92
<i>Для найгірших комбінацій невизначеностей</i>						
PI	+	2,05	650 с	0,13	75,27	1835,8
PI-robust	+	1,28	250 с	0,95	21,94	1027,6

Якість перехідних процесів відносно зміни завдання з робастним регулятором гірша, що пояснюється використаним критерієм (1), який не враховує наявність збурень. Однак ресурс керування на рис. 3 для робастної системи значно менший.

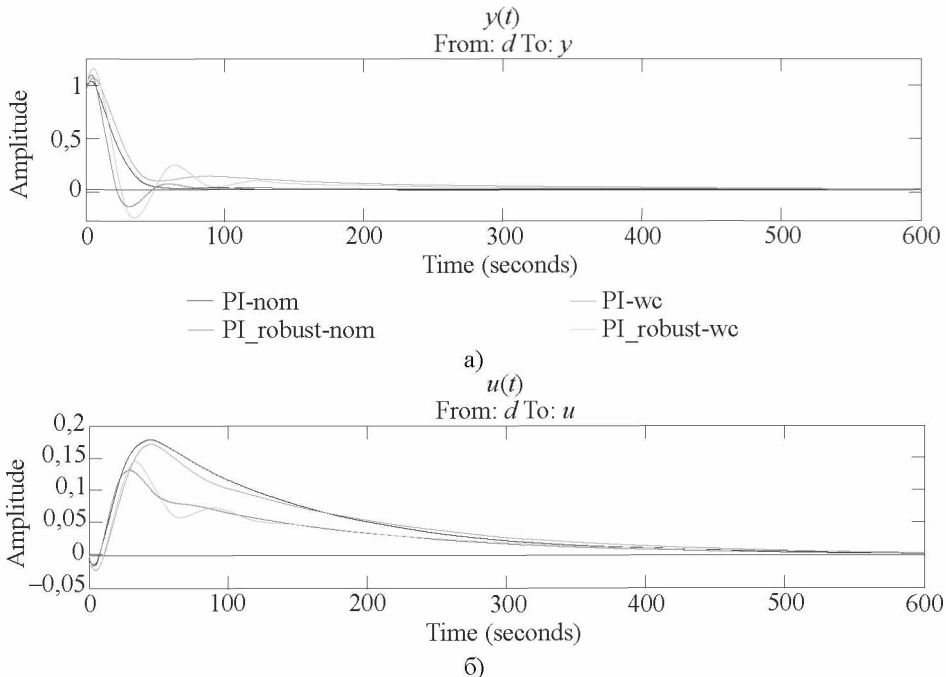


Рис. 3. Перехідні процеси відносно ступінчатого збурення: а) зміна вихідного сигналу; б) зміна керування

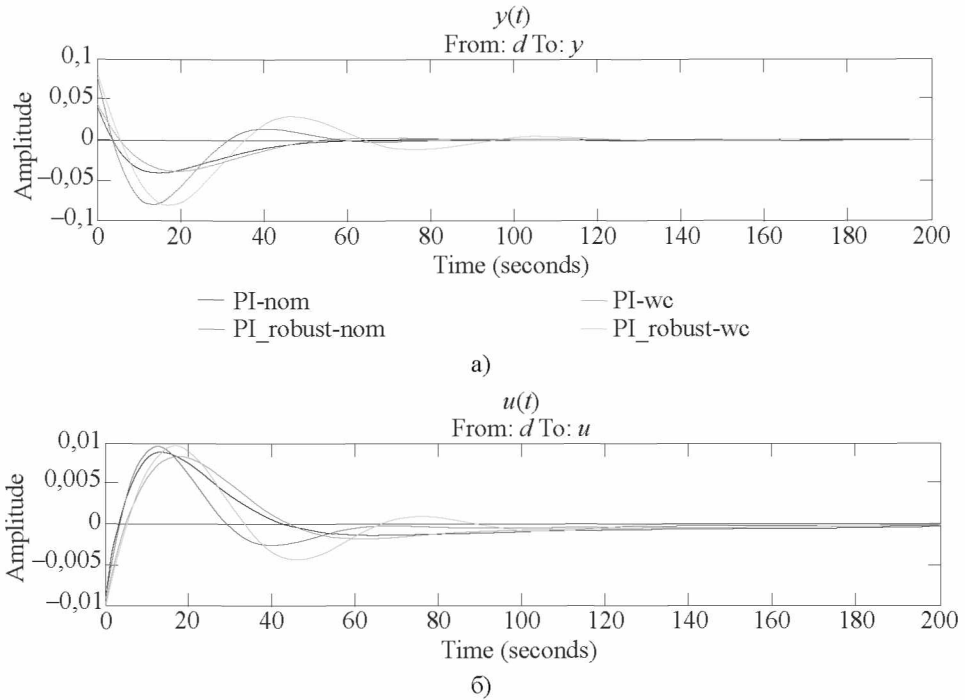


Рис. 4. Перехідні процеси відносно зміни імпульсного збурення: а) зміна вихідного сигналу; б) зміна керування

Висновки

Проведений аналіз перехідних процесів технологічного об'єкта з невизначеностями показав, що система залишається стійкою та відповідає заданій якості при найгірших комбінаціях невизначеностей. Використання робастних критеріїв для визначення налаштувань ПІ-регулятора покращує якість перехідних процесів лише для найгірших комбінацій невизначеностей, а критерій змішаної чутливості не враховує збурень, які завжди діють на технологічні об'єкти. Однак для технологічних об'єктів з одним входом — одним виходом, що має суттєві параметричні та структурні невизначеності, ефективним є застосування робастного ПІ-регулятора, параметри якого знайдені за алгоритмом негладкого H_∞ -синтезу.

Перспективним буде використання комбінованих робастних критеріїв, що враховують як сигнал завдання, так і збурення.

Література

1. Луцька Н. М. Розробка багатовимірних оптимальних регуляторів для випарної станції цукрового виробництва, що функціонує в умовах інтервальної невизначеності / Н.М. Луцька, Л.О. Власенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — Київ: НУХТ, 2013. — № 52. — С. 48—61.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 т. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. — 2-е изд.; перераб. и доп. — Т.4: Теория оптимизации систем автоматического управления. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 744 с.

3. Поляк Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. — Москва: Наука, 2002. — 303 с.
4. Луцька Н.М. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: [монографія] / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк. — Київ: Видавництво «Ліра-К», 2015. — 288 с.
5. Gryazina E.N. Stability regions in the parameter space: D-decomposition revisited / E.N. Gryazina, B. T. Polyak // Automatica. — 2006. — Vol. 42, # 1. — P. 13—26.
6. Datta A. Structure and Synthesis of PID Controllers / A. Datta, M.T. Ho, S.P. Bhattacharyya. — London: Springer-Verlag, 2002. — 241 p.
7. Åström K.J. Advanced PID control / K.J. Åström, T. Häggglund. — Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park. — NC, 2006. — 461 p.
8. Apkarian P. Controller Design via Nonsmooth Multi-Directional Search / P. Apkarian, D. Noll and D. Alazard // IFAC Conf. on System Structure and Control. — 2004. — Vol. 44, # 6. — P. 1923—1949.
9. Apkarian P. Nonsmooth optimization for multiband frequency domain control design / P. Apkarian, D. Noll // Automatica. — 2007. — Vol. 43, # 7. — P. 724—731. doi: 10.1016/j.-automatica.2006.08.031.
10. Apkarian P. Nonsmooth H_∞ synthesis / P. Apkarian, D. Noll // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2006. — Vol. 51, #1. — P. 71—86.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

Н.Н. Луцкая, Л.А. Власенко, В.В. Цыганенко

Национальный университет пищевых технологий

В статье получены результаты моделирования системы управления технологическим объектом с существенными параметрическими и структурными неопределенностями. Рассматривается задача синтеза ПИ-регулятора, параметры которого определены по минимизации H_∞ -нормы замкнутой системы. Поиск параметров проводился при помощи метода негладкой оптимизации. Проведен анализ качества переходных процессов исследуемой системы управления относительно изменения задания и относительно возмущения при номинальных и наихудших комбинациях неопределенностей объекта с ПИ-регуляторами. У одного из них настройки рассчитаны по минимизации первого полупериода колебаний для номинального объекта, а у другого — по общему робастному критерию синтеза.

Ключевые слова: *параметрическая неопределенность, структурная неопределенность, негладкая оптимизация, чувствительность, робастность.*