

**ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ РОБАСТНО-ОПТИМАЛЬНИХ СИСТЕМ
КЕРУВАННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ
ІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТЯМИ**

Н. М. ЛУЦЬКА, кандидат технічних наук
Національний університет харчових технологій
e-mail: lutskaya@yandex.ru

***Анотація.** Запропоновано порівняльну характеристику сучасних методик синтезу систем керування для технологічних об'єктів з невизначеностями. Розглянуто основні характеристики методів розробки робастно-оптимальних регуляторів, їх переваги та недоліки, а саме: Loopshaping, 2-Ріккати підхід, μ -синтез, LMI-підхід, а також оптимізаційний метод негладкого синтезу. Подано передатні функції робастних регуляторів, параметри та структура яких синтезовані за критерієм мінімуму H_∞ -норми замкненої системи.*

Наведено структуру системи керування, за якою проведено моделювання систем з різними робастними регуляторами, а також розраховано показники якості та стійкості систем на всьому діапазоні невизначеності. Найкращі показники виявилися у системі з регулятором, що розрахований за алгоритмом μ -синтезу, однак порядок регулятора набагато вищий за порядок об'єкта. Найменшу область невизначеності, за якої система зберігає стійкість, виявлено в системі з PID-регулятором, параметри якого розраховані за алгоритмом негладкого синтезу.

***Ключові слова:** технологічний об'єкт, регулятор, керування, невизначеність, робастно-оптимальна система*

Підвищення якості продукції та зменшення енергетичних витрат на харчових підприємствах безпосередньо пов'язано з якістю та стійкістю перехідних процесів у системі автоматичного керування. Їх можна досягти використовуючи сучасні алгоритми синтезу регуляторів, а саме: оптимальні, робастні, адаптивні та інтелектуальні. Єдиного підходу вибору того чи іншого регулятора та його налаштувань немає. Це обґрунтовується специфікою об'єктів керування та умов їх функціонування, тому визначення та обґрунтування відповідного регулятора є актуальною задачею як в теоретичному, так і практичному аспекті.

Нині новітня теорія керування пропонує широкий спектр методів та алгоритмів синтезу регуляторів [1] для об'єктів із невизначеностями. Оптимальне керування, подане методами варіаційного числення, принципу максимуму та аналітичним конструюванням оптимальних регуляторів [2], знайшло свій розвиток у робастно-оптимальних алгоритмах [3], та на сьогодні є самостійною теорією синтезу робастних регуляторів. Ці регулятори

призначені для роботи в умовах суттєвих невизначеностей як параметрів, так і структури математичної моделі об'єкта.

Мета досліджень – проаналізувати сучасні методи синтезу робастних регуляторів для технологічних об'єктів керування з невизначеностями та на основі моделювання розробити поради щодо їх використання.

Матеріали і методика досліджень. Усі технологічні об'єкти, з точки зору їх автоматизації, є, більшою або меншою мірою, невизначеними. Невизначеності технологічних об'єктів виникають унаслідок неконтрольованих або неврахованих факторів та ведуть до недостовірної оцінки істинного значення процесу та неправильного розрахунку керуючих дій. Їх можна поділити на декілька видів: невизначеність технічних засобів автоматизації, тобто неточність подання та видачі інформації; математична невизначеність, тобто невизначеність, що виникає при описі та розрахунку математичних залежностей системи керування.

Наприклад, у табл. 1 подано основні напрями синтезу робастно-оптимальних регуляторів, засновані на лінійній моделі об'єкта керування, їх переваги та недоліки.

Проведемо моделювання системи керування з різними робастними регуляторами. Як об'єкт керування моделюються три послідовно з'єднані аперіодичні ланки першого порядку (прикладом такої моделі може бути кожухотрубний теплообмінник). Невизначеність моделюємо змінними постійними часу T_1 , T_2 , T_3 та коефіцієнта передачі k_0 , а також структурною мультиплікативною невизначеністю. На рис. 1 наведено структурну схему номінальної системи керування,

де r – завдання регулятору;

y – вихід об'єкта;

u – керування;

e – розузгодження;

z – контрольований вихід;

$K(s)$ – передатна функція регулятора;

W_1 , W_2 , W_3 – вагові функції ;

$H(s)$ – передатна функція замкненої системи.

При моделюванні номінальними параметрами об'єкта обрані: $k_0=10$; $T_{1-3}=100$, а їх зміна – в межах $-50\dots+50\%$. У табл. 2 наведені передатні функції регуляторів, що синтезовані за різними алгоритмами,

де LSh – регулятор, синтезований за Гловер-МакФарлан методом [6];

2-Ric – регулятор, синтезований за 2-Ріккати підходом;

Mu – регулятор, синтезований за алгоритмом μ -синтезу;

Nsm-pid – пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) регулятор, параметри якого знайдені методом негладкого синтезу. Структура регулятора та/або його налаштування знайдені за критерієм:

$$J(K(s)) = \max_{K(s) \in \Omega} \|H_{zr}(s)\|_{\infty},$$

де Ω – область регуляторів, що стабілізують об'єкт.

1. Порівняння методів робастно-оптимальних систем керування

Назва методу напряму	Літературне джерело	Математична модель об'єкта та види невизначень	Переваги та недоліки		Особливості методики
			Переваги	Недоліки	
Loopshaping	[1, 4]	Номинальна модель	Задається бажана частотна характеристика системи	Порядок регулятора вище за порядок об'єкта	Регулятор синтезується на основі взаємно простої факторизації
2-Ріккати підхід	[1, 3, 4]	Номинальна модель	Порядок регулятора, що дорівнює порядку об'єкта	Потребує додаткової перевірки на всій області невизначеності	Синтезується центральный регулятор за алгебраїчними рівняннями Ріккати
μ -синтез	[1, 3, 4]	Модель із усіма видами невизначень	Порядок регулятора, що дорівнює порядку об'єкта або більший за нього	Достатньо громіздкий метод синтезу	Базується на понятті структурованого сингулярного числа матриці та теоремі про малий коефіцієнт підсилення
LMI-підхід	[2, 4]	Матрична невизначеність	Будь-який порядок регулятора, включно зі статичним	Працює лише з одним типом невизначеності	Базується на квадратичній стабілізації та функції Ляпунова
Non-smoothsynthesis	[5]	Номинальна модель	Будь-який порядок регулятора, включно зі статичним	Значно менше значення норми H^∞ порівняно з попередніми методами	Ітераційний метод негладкого синтезу

2. Передатні функції регуляторів

Регулятор	Передатна функція
LSh	$\frac{4.649s^3 + 0.251s^2 + 0.006s + 0.001}{s^4 + 0.197s^3 + 0.019s^2 + 0.001s}$
2-Ric	$\frac{139.3s^3 + 4.179s^2 + 0.042s + 0.001}{s^4 + 5.546s^3 + 0.819s^2 + 0.056s + 0.001}$
Mu	$\frac{0.001(s + 0.01)(s + 0.003)(s + 0.0005)(s^2 + 0.023s + 0.0001)(s^2 + 0.025s + 0.0002)}{(s + 0.289)(s + 0.100)(s + 0.024)(s + 0.0006)(s^2 + 0.025s + 0.0002)(s^2 + 0.023s + 0.0004)}$
NSm-pid	$0.138 + 0.0001 \frac{1}{s} + 82.9 \frac{s}{1.98s + 1}$

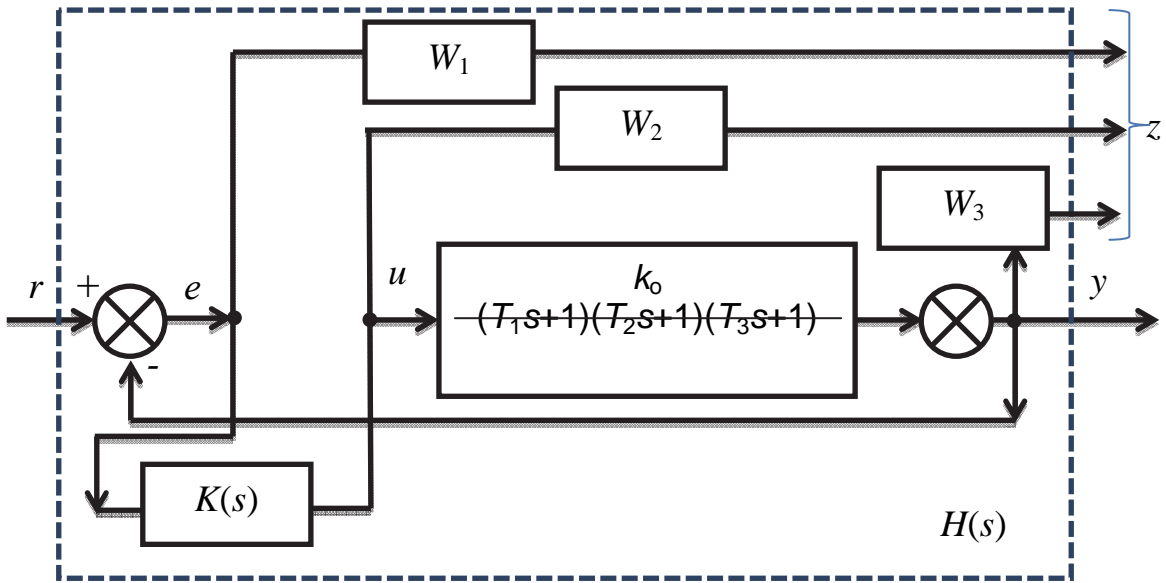


Рис. 1. Структурна схема системи керування в номінальному режимі

Результати досліджень. На рис. 2 показано перехідні процеси систем із різними робастними регуляторами. І хоча вид функції розузгодження для всіх систем майже однаковий, але функція керування істотно відрізняється, що пояснюється видом регулятора (табл. 2).

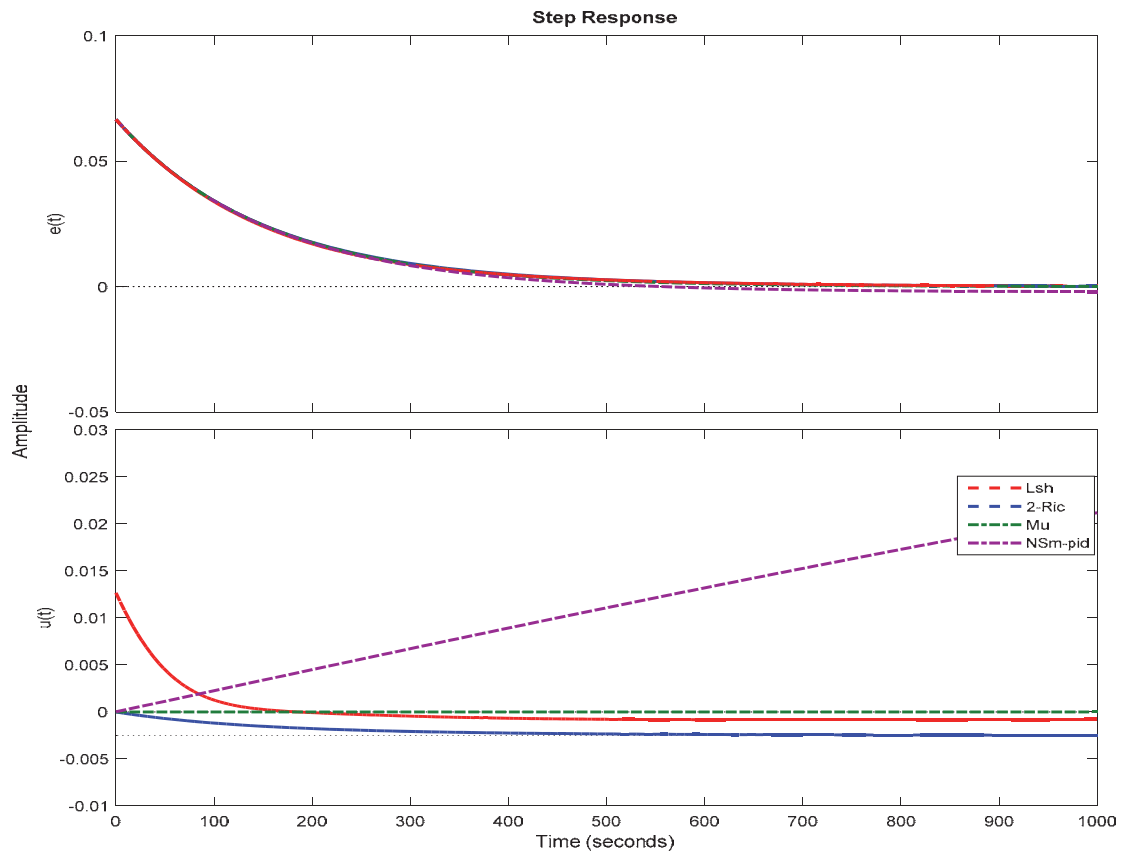


Рис. 2. Перехідні процеси в системі з різними робастними регуляторами

З табл. 3 видно, що найбільша область невизначеності, за якої система зберігає стійкість у системи з μ -регулятором, а також найменший ресурс керування. Система з NSm-pid-регулятором втрачає стійкість за найгірших комбінацій невизначеностей, тобто при тих невизначеностях (з області допустимих), за яких амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) має максимальне значення.

3. Порівняльні характеристики системи керування з різними типами регуляторів

$K(s)$ Хар-ка	LSh	2-Ric	μ	NSm-pid
Номінальний режим				
H_{∞} -норма	1.02	0.068	0.067	0.1
$ u^{\max} $	0.013	0.002	0.001	0.1
Система з найгіршою комбінацією невизначеностей				
Пік АЧХ	0.069	0.067	0.067	∞

Висновки

У роботі наведено порівняння сучасних методів робастно-оптимальних систем керування для об'єктів з невизначеностями. На основі моделювання виявлено, що найкращі характеристики, а саме: стійкість в усьому діапазоні невизначеностей та мінімум енергетичних витрат має система з регулятором, що розрахований за алгоритмом μ -синтезу, однак дана система має і найвищий порядок регулятора.

Як альтернативу, можна використовувати систему з регулятором, що синтезований за 2-Ріккати підходом, яка має низьку норму замкненої системи і порядок регулятора, що дорівнює порядку математичної моделі об'єкта. Регулятор, розрахований за Гловер-МакФарлан методом доцільно використовувати тоді, коли до системи ставляться жорсткі вимоги в частотній області. Систему з PID-регулятором, налаштування якого розраховувалися за критерієм мінімуму H_{∞} -норми ефективно використовувати лише за невеликої області невизначеності параметрів та структури моделі об'єкта керування.

Список літератури

1. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 784 с.
2. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. – М. : Наука, 2003. – 279 с.
3. Поляк Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М. : Наука, 2002. – 303 с.
4. Sánchez-Peña, Ricardo S. (1998). Robust Systems: Theory and Applications / Ricardo S. Sánchez-Peña, Mario Sznajder. – Wiley, New York, 490.
5. Apkarian, P. (2006). Nonsmooth H_{∞} Synthesis / P. Apkarian and D. Noll // IEEE Transactions on Automatic Control, 51, 1, 71–86.

6. McFarlane, D. C. (1989). Robust Controller Design using Normalised Coprime Factor Plant Descriptions / D. C. McFarlane, K. Glover. – Springer Verlag, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 138, 181.

References

1. K. A. Pupkov, N. D. Ehupov. (2004). Metody klassycheskoy i sovremennoy teoryi avtomaticheskogo upravleniya [Methods and Modern Classics Automatic management theory]. Moscow: Yzdatel'stvo MHTU im. N. E. Baumana, 784.
2. Aleksandrov, A. G. (2003). Optymal'nye i adaptivnye systemy [Optimal and adaptive systems]. Nauka, 279.
3. Polyak, B. T. (2002). Robastnaya ustoychivost' i upravlenye [Robust stability and control]. Nauka, 303.
4. Sánchez-Peña, Ricardo S. and Mario Sznaier (1998). Robust Systems: Theory and Applications. Wiley, New York, 490.
5. P. Apkarian and D. Noll. (2006). Nonsmooth H-infinity Synthesis. IEEE Transactions on Automatic Control, 51, 1, 71–86.
6. McFarlane, D. C., K. Glover. (1989). Robust Controller Design using Normalised Coprime Factor Plant Descriptions, Springer Verlag, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 181.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РОБАСТНО-ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

Н. Н. Луцкая

Аннотация. Предложена сравнительная характеристика современных методик синтеза систем управления для технологических объектов с неопределенностями. Рассмотрены основные характеристики методов разработки робастно-оптимальных регуляторов, их преимущества и недостатки, а именно: Loopshaping, 2-Риккати подход, μ -синтез, LMI-подход, а также оптимизационный метод негладкого синтеза. Приведены передаточные функции робастных регуляторов, параметры и структура которых синтезированы по критерию минимума H_∞ -нормы замкнутой системы.

Приведена структура системы управления, для которой проведено моделирование систем с различными робастными регуляторами, а также рассчитаны показатели качества и устойчивости систем на всем диапазоне неопределенности. Лучшие показатели оказались у системы с регулятором, рассчитанным по методу μ -синтеза, однако порядок регулятора намного выше, чем порядок объекта. Наименьшая область неопределенности, при которой система сохраняет устойчивость, обнаружена в системе с PID-регулятором, параметры которого рассчитаны по алгоритму негладкого синтеза.

Ключевые слова: технологический объект, регулятор, управление, неопределенность, робастно-оптимальная система

COMPARISON OF ROBUST-OPTIMAL PROCESS CONTROL SYSTEMS WITH UNCERTAINTY

N. Lutska

Abstract. The paper proposes a comparative description of modern methods of synthesis of control systems for process facilities with uncertainties. The basic characteristics of the methods, development of robust optimal controllers, their advantages and disadvantages, namely: Loop shaping, 2-Riccati approach μ -synthesis, LMI approach, and non smooth optimization method of synthesis. Transfer functions are given robust controls, parameters and structure is synthesized by the criterion of minimum standards H_{∞} -closed system.

The structure control system are given under which conducted simulations of different robust regulators and designed for quality and stability across the range of uncertainty. The most indicators were in control system that is designed for μ -synthesis algorithm, but the order of the controller is much higher than the order of the object. The smallest area of uncertainty in which the system remains stable detected in the system with PID-controller, whose parameters are calculated non smooth algorithm synthesis.

Keywords: process, regulator, control, uncertainty, robust-optimal system

УДК 631.3.83

ВИРОБНИЧА ПЕРЕВІРКА МОБІЛЬНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ ІЗ СИЛОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

В. Г. МИРОНЕНКО, доктор технічних наук
Ю. В. ГЕРАСИМЧУК, кандидат технічних наук
Р. В. МЕЛЬНИК, кандидат технічних наук
Д. В. ТИМОЩУК, старший науковий співробітник
В. М. СЛОБОДЯН, аспірант

Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства"

e-mail: roma_meln@mail.ru

Анотація. Наведено результати виробничої перевірки роботи мобільного енергетичного засобу із силовим електроприводом в тепличному господарстві ПАТ «Комбінат «Тепличний» та лабораторно-польових досліджень. Встановлено, що у виробничих умовах електротрактор за показниками технічної характеристики не поступається базовій моделі.

Ключові слова: мобільний енергетичний засіб, силовий електропривод, електротрактор, акумуляторна батарея

© В. Г. Мироненко, Ю. В. Герасимчук, Р. В. Мельник, Д. В. Тимощук, В. М. Слободян, 2016