

УДК 681.586

Лихолат В.С., Манко Г.І.

ПІДВИЩЕННЯ РОБАСНОСТІ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

ДВНЗ «Український держаний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

Стаття присвячена проблемам синтезу систем автоматичного регулювання, що забезпечують задовільну якість функціонування в умовах суттєвої невизначеності інформації про параметри об'єктів регулювання. Зауважено, що використання традиційних методів синтезу може призвести до того, що синтезована система не задовольняє поставленим до неї вимогам. Показана доцільність використання в таких умовах регуляторів, що використовують логіку нечітких множин. Вирішується задача синтезу нечіткого регулятора температури реактора полімеризації поліметилметакрилату. Синтезовані традиційний аналоговий пропорційно-інтегральний регулятор і нечіткий регулятор. Для нечіткого регулятора у пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab створена система нечіткого виводу, що використовує дві вхідні лінгвістичні змінні. Першою є помилка регулювання, другою – інтеграл цієї помилки. Для цих вхідних змінних і для виходу регулятора задані функції приналежності. Сформована база правил, яка для кожної комбінації значень вхідних змінних визначає найбільш правдоподібний терм вихідної змінної. Для порівняльного оцінювання синтезованих регуляторів створена Simulink-модель, яка включає обидва регулятори. Для визначення робасності регуляторів змінювались параметри об'єкта регулювання відносно тих, для яких розраховувались параметри налаштування. В результаті моделювання отримані перехідні процеси регуляторів для двох режимів – розрахункового і при суттєвих відхиленнях від розрахункових умов. Виявлено, що зміна параметрів об'єкта регулювання суттєво погіршує якість традиційного регулятора, тоді як якість нечіткого регулятора залишається задовільною. Тобто використання систем регулювання з використанням нечіткої логіки підвищує робасність управ-ління.

Ключові слова: Matlab, Simulink, лінгвістична змінна, нечіткий регулятор, ПІ-регулятор, система автоматичного регулювання, функції приналежності, якість регулювання.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-6-2-17-22

Постановка проблеми

Традиційно в системах автоматичного регулювання (САР) параметрів хіміко-технологічних процесів (ХТП) використовують пропорційно-інтегральні (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори. Проте їх використання пов'язане з низкою проблем.

По-перше, існуючі методи розрахунку налаштувань регуляторів не завжди забезпечують необхідну якість регулювання. Практика показує, що використання методу Копеловича іноді призводить до отримання нестійкої САР. Більш досконалі методи Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick хоч і забезпечують

стійкість, але часто не дають оптимальної якості регулювання. По-друге, наявність невизначеності, яка має місце при дослідженні технологічних процесів як об'єктів управління, призводить до того, що синтезована за усіма правилами САР може виявитись недієздатною в реальних умовах виробництва. Це викликає необхідність синтезу робасних САР, які якісно працюють при значних флуктуаціях параметрів ХТП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням проектування систем управління в умовах невизначеності присвячена значна кількість наукових публікацій. Один з найбільш

повно опрацьованих підходів до вирішення завдання синтезу робасних систем використовує поняття систем з параметричною інтервальною невизначеністю [1]. У таких системах параметри задаються не числами, а діапазонами їх можливих значень – інтервалами. Аналіз і синтез інтервальних систем виконується шляхом дослідження поведінки системи при різних комбінаціях граничних значень параметрів.

Недоліком інтервальних методів є те, що вони не гарантують робасної стійкості і оптимальної якості управління.

Інший підхід до вирішення задач управління в умовах невизначеності – інформаційний пропонується у роботі [2]. Тут обґрунтовується доцільність використання інформаційної невизначеності в задачах ідентифікації об'єктів управління.

В.Я. Ротач [3] ствержує, що вирішити задачу синтезу САР недетермінованими об'єктами чисто формальними методами зазвичай взагалі не вдається – доводиться залучати, особливо на початковому етапі формування структур і алгоритмів функціонування регуляторів, думки досвідчених експертів. Замість методів теорії ймовірностей застосовуються методи теорії нечітких множин. Синтез нечітких регуляторів розглядається, наприклад, у роботах [4,5].

У статті [6] розглядається гібридна структура системи управління, яка поєднує в собі елементи традиційного і нечіткого управління. Тут запропонований уніфікований алгоритм синтезу статичної зворотного зв'язку по виходу, заснований на використанні апарату лінійних матричних нерівностей, для побудови внутрішнього «чіткого» і зовнішнього «нечіткого» контурів управління.

Формування цілей статті

Метою наших досліджень є порівняння робасності ПІ-регуляторів, синтезованих традиційним методом і з використанням нечіткої логіки при суттєвій невизначеності параметрів об'єкта регулювання.

Вклад основного матеріалу дослідження

Як об'єкт з невизначеними параметрами був вибраний реактор полімеризації поліметилметакрилату, математична модель якого описана у статті [7]. Стандартними методами для нього синтезований регулятор температури у реакторі.

Динаміка об'єкта надана аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W(s) = \frac{K_{об}}{T_{об} + 1} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

де $K_{об}=0,83$; $T_{об}=1188$ с; $\tau=59$ с.

Для такого об'єкта розраховані оптимальні налаштування ПІ-регулятора з передатною функцією

$$W(s) = K_p + \frac{1}{T_i s}, \quad (2)$$

де $K_p=4,22$; $T_i=140,86$ с.

Моделювання САР виконувалось у пакеті Simulink, в якості регулятора був використаний блок Fuzzy Logic Controller. Для виконання функцій ПІ-регулятора на вхід блока треба подати, крім сигналу помилки регулювання, ще й сигнал проінтегрованої помилки. Таким чином, система нечіткого виводу використовує дві вхідні лінгвістичні змінні E1 і E2 та одну вихідну U, що є напругою, яка подається на електронагрівач реактора.

Синтез нечіткого регулятора здійснюється у пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи Matlab. Використовується програма Fuzzy Logic Designer, яка запускається командою fuzzy.

У вікні Fuzzy Logic Designer у полі Name замінюється ім'я за замовчуванням input1 на E1. У меню Edit вікна вибирається опція Add variable – Input. Замінюється нове ім'я на E2. Треба також змінити ім'я вихідної величини. Для цього клацнути мишею по прямокутнику, під яким надпис output. У полі Name ставиться U. Зберігається нечітка система під ім'ям PI (комбінація клавіш Ctrl+S).

У меню Edit вікна програми вибирається опція Membership Function (функції приналежності). У вікні Membership Function Editor для входу E1 встановлюється діапазон значень Range, рівний [-5, 5]. Вводяться функції приналежності для цього входу згідно з рис. 1.

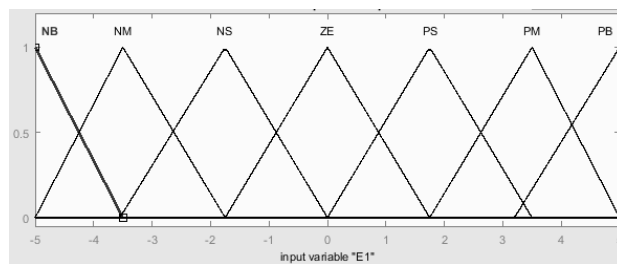


Рис. 1. Функції приналежності для входу E1

Термами лінгвістичних змінних були вибрані значення: NB – негативно велике, NM – негативно середнє, NS – негативно мале, ZE – близьке до нуля, PS – позитивно мале, PM – позитивно середнє, PB – позитивно велике.

лике. Відповідно треба ввести 7 функцій, що відповідають таким значенням входу.

Для вводу функцій в меню Edit вибрати опцію Add Custom MF, у вікні Custom Membership Function у полі MF name ввести ім'я функції приналежності, а у полі Parameter list – координати початку, середини і кінця графіка функції. Для функції NB ввести координати $[-10, -5, -3.5]$ для NM – $[-5, -3.5, -1.75]$ і так далі. Для функції PB ввести $[3.5, 5, 10]$.

У вікні Membership Function Editor вибирається вхід E2, встановлюється діапазон значень Range, рівний $[-100, 100]$, видаляються всі функції приналежності і вводяться заново згідно з рис. 2.

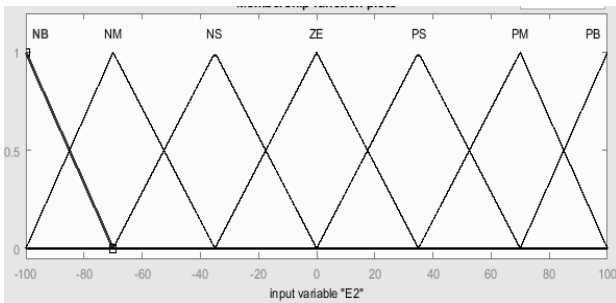


Рис. 2. Функції приналежності для входу E2

У вікні Membership Function Editor вибрати вихід U, встановити діапазон значень Range, рівний $[0, 100]$, видалити всі функції приналежності і ввести їх заново згідно з рис. 3.

Правила формування U в залежності від значень E1 і E2 наведені на рис. 4.

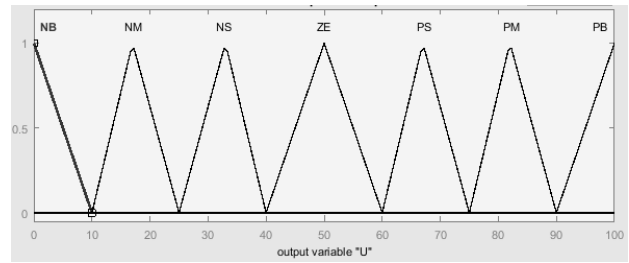


Рис. 3. Функції приналежності для виходу U

E2 \ E1	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Рис. 4. Правила логічного виводу

Правила формуються за принципом: якщо вхід E1 приймає значення з верхнього рядка таблиці, а вхід E2 приймає значення з лівого стовпчика, то вихід приймає значення, яке знаходиться на перехресті відповідного рядка і стовпчика. Наприклад:

if (E1 is NM) and (E2 is PS) then (U is NS).

Усього треба ввести $7 \cdot 7 = 49$ правил.

Для введення правил у вікні Fuzzy Logic Designer у меню Edit вибирається опція Rules. У вікні Rule Editor з переліків значень входів E1 і E2, а також виходу U вибираються значення згідно з таблицею і тиснеться кнопка Add rule.

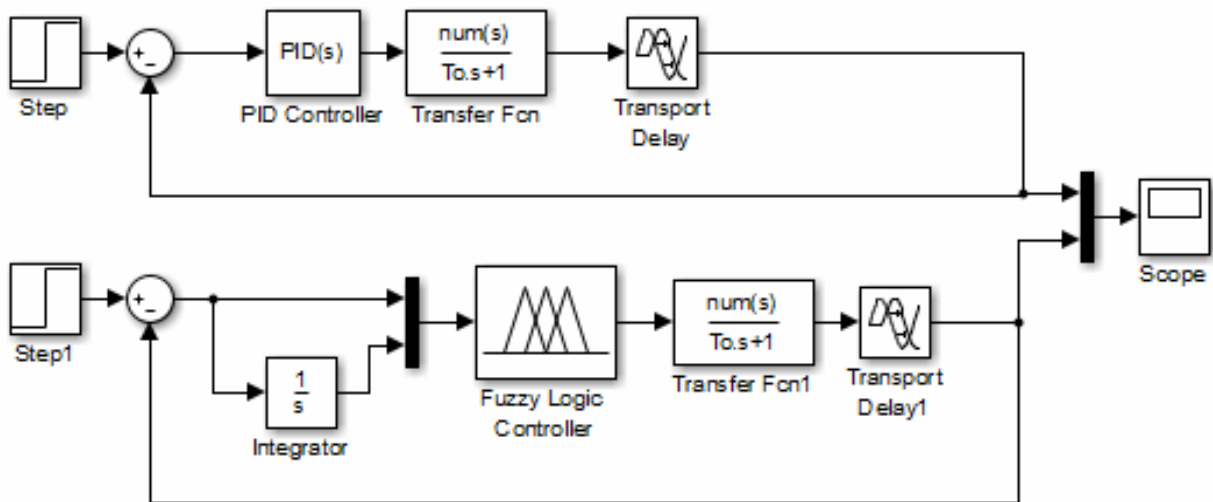


Рис. 5. Simulink-модель для дослідження регуляторів

Для порівняння роботи традиційної і нечіткої САР, створена Simulink-модель, яка включає обидва регулятори з виведенням виходів систем на один осцилограф (рис. 5).

Здійснено два сеанси моделювання. Перший при вищенаведених значеннях параметрів об'єкта (рис. 6), другий з відхиленнями значень параметрів (рис. 7). Суцільна лінія відповідає графіку перехідної функції традиційного аналогового регулятора, пунктирна – нечіткого регулятора.

Як бачимо, у першому випадку якість роботи традиційного регулятора вища, але при зміні параметрів об'єкта якість суттєво порушується. Збільшується перерегулювання, режим роботи приймає коливальний характер. В той же час робота нечіткої САР залишається достатньо якісною.

Висновки

Виконане порівняння робастності систем регулювання, синтезованих традиційним методом і з використанням нечіткої логіки. Для порівняльного оцінювання синтезованих регуляторів створена Simulink-модель, яка включає обидва регулятори. Отримані перехідні процеси регуляторів для двох режимів – розрахункового і при суттєвих відхиленнях від розрахункових умов. Результати дослідження показали, що наявність невизначеності параметрів об'єкта регулювання впливає на якість роботи нечіткого регулятора значно менше у порівнянні з традиційним регулятором.

Таким чином, для забезпечення робастності в умовах суттєвої невизначеності параметрів об'єктів регулювання доцільно використовувати САР, що використовує нечітку логіку.

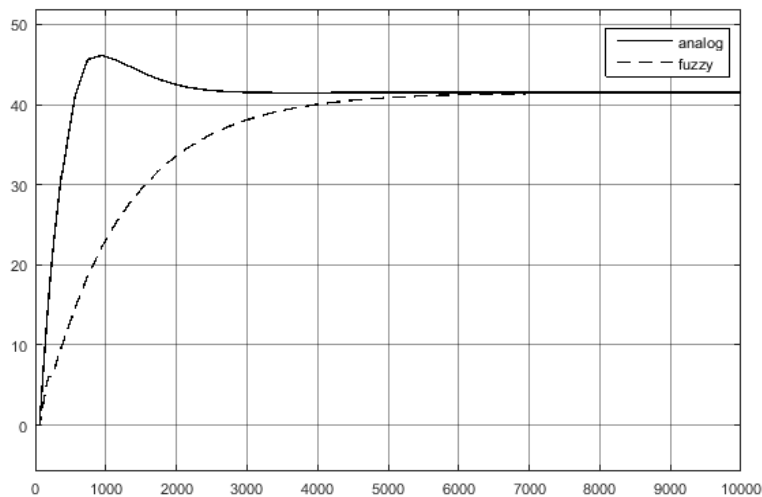


Рис. 6. Перехідні функції регуляторів при розрахункових умовах ($K_0=0,83$; $T_0=1188$; $\tau=59$)

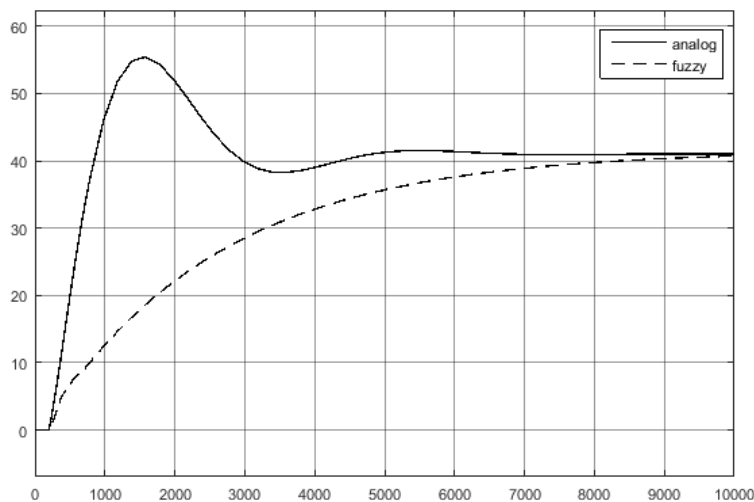


Рис. 7. Перехідні функції регуляторів при суттєвих відхиленнях від розрахункових умов ($K_0=0,83$; $T_0=2500$; $\tau=200$)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bhattacharyya S.P., Aniruddha Datla, Lee H. Keel.* Linear control theory : structure, robustness, and optimization. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 924 p.
2. *Manko G.I., Chistokletov E.P.* Use of information uncertainty in identification tasks // Computer Modeling: Analysis, Control, Optimization. – 2019. – № 1 (5). – С.30–35. <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2019-5-1-30-35>
3. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления: учебник для вузов, 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. *Гостев В.И.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: «Радиоаматор», 2008. – 972 с.
5. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
6. *Комнацкая М.Н.* Синтез гибридной системы управления полетом с оптимальным гашением действующих на него возмущений // Проблеми інформатизації та управління. – 2015. – № 2 (50). – С.76–85. <https://doi.org/10.18372/2073-4751.2.8946>
7. *Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А.* Исследование применения нечеткого регулятора в робастной системе управления // Вестник Международной Академии Системных Исследований. Информатика. Экология. Экономика. – 2017. – Т.19. – Ч.1. – С.3-12.

Надійшла до редакції 16.10.2019

ПОВЫШЕНИЕ РОБАСТНОСТИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Лихолат В.С., Манко Г.И.

Статья посвящена проблемам синтеза систем автоматического регулирования, обеспечивающих удовлетворительное качество функционирования в условиях существенной неопределенности информации о параметрах объектов регулирования. Замечено, что использование традиционных методов синтеза может привести к тому, что синтезированная система не удовлетворяет поставленным к ней требованиям. Показана целесообразность использования в таких условиях регуляторов, использующих логику нечетких множеств. Решается задача синтеза нечеткого регулятора температуры реактора полимеризации полиметилметакрилата. Синтезированы традиционный аналоговый пропорционально-интегральный регулятор и нечеткий регулятор. Для нечеткого регулятора в пакете Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab создана система нечеткого вывода, использующего две входные лингвистические переменные. Первой является ошибка регулирования, второй – интеграл этой ошибки. Для этих входных переменных и для

выхода регулятора заданы функции принадлежности. Сформирована база правил, которая для каждой комбинации значений входных переменных определяет наиболее правдоподобный терм выходной переменной. Для сравнительной оценки синтезированных регуляторов создана Simulink-модель, которая включает оба регулятора. Для определения робастности регуляторов изменялись параметры объекта регулирования в отношении тех, для которых рассчитывались параметры настройки. В результате моделирования получены переходные процессы регуляторов для двух режимов – расчетного и при существенных отклонениях от расчетных условий. Выявлено, что изменение параметров объекта регулирования существенно ухудшает качество традиционного регулятора, тогда как качество нечеткого регулятора остается удовлетворительным. То есть использование систем регулирования с использованием нечеткой логики повышает робастность управления.

Ключевые слова: Matlab, Simulink, лингвистическая переменная, нечеткий регулятор, ПИ-регулятор, система автоматического регулирования, функции принадлежности, качество регулирования.

INCREASING THE ROBUSTNESS OF REGULATION SYSTEMS USING FUZZY LOGIC

Likhohat V.S., Manko G.I.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article is devoted to the problems of synthesis of automatic control systems, which provide satisfactory quality of functioning in the conditions of significant uncertainty of information about the parameters of control objects. It is noted that the use of traditional methods of synthesis can lead to the fact that the synthesized system does not meet its requirements. The expediency of using regulators based on logic of fuzzy sets in such conditions is shown. The problem of synthesis of fuzzy temperature controller of polymerization reactor of polymethyl methacrylate is solved. Traditional analog PI controller and fuzzy controller are synthesized. The fuzzy controller in the Matlab Fuzzy Logic Toolbox package has a fuzzy output system that uses two input linguistic variables. The first one is the regulation error, the second one is the integral of this error. These input variables and the controller output have accessory functions. A rule base that defines the most plausible term for the output variable for each combination of input variables is formed. For comparative evaluation of the synthesized regulators, a Simulink model was created, which includes both regulators. To determine the robustness of the controllers, the parameters of the control object were changed relative to those for which the adjustment parameters were calculated. As a result of the simulation, the transients of the controllers for the two modes are obtained – the calculated mode and the mode with significant deviations from the calculated conditions. It is found that changing the parameters of the control object significantly degrades the quality of the traditional controller, while the quality of the fuzzy controller remains satisfactory. That is, the use of control systems with fuzzy logic increases the robustness of control.

Keywords: Matlab, Simulink, linguistic variable, fuzzy controller, PI controller, automatic control system, membership functions, quality of regulation.

REFERENCES

1. Bhattacharyya S.P., Aniruddha Datla, Lee H. Keel. *Linear control theory: structure, robustness, and optimization*. CRC Press, Boca Raton, 2009, 924 p.
2. Manko G.I., Chistokletov E.P. *Use of information uncertainty in identification tasks*. Komp'üterne modelüvannâ: analiz, upravlinnâ, optimizaciâ [*Computer Modeling: Analysis, Control, Optimization*], 2019, No 1 (5), pp. 30–35. <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2019-5-1-30-35>
3. Rotach V.Ja. *Teorija avtomaticheskogo upravljenija: uchebnik dlja vuzov* [Theory of automatic control: textbook for universities]. MEI Publishers, Moscow, 2008, 396 p. (*in Russian*).
4. Gostev V.I. *Nechetkii reguljatory v sistemah avtomaticheskogo upravljenija* [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Radioamator, Kyiv, 2008, 972 p. (*in Russian*).
5. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MatLab* [Designing fuzzy systems using MatLab]. Hot Line, Telekom, Moskva, 2007, 288 p. (*in Russian*).
6. Komnackaja M.N. *Sintez gibridnoj sistemy upravljenija poletom s optimal'nym gasheniem dejstvujushhij na nego vozmushhenij* [Synthesis of a hybrid flight control system with optimal damping of disturbances acting on it]. *Problemi informatizacii ta upravlinnja* [The problems of information and control]. 2015, no. 2 (50), pp.76-85. (*in Russian*). <https://doi.org/10.18372/2073-4751.2.8946>
7. Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A. *Issledovanie primenenija nechetkogo reguljatora v robastnoj sisteme upravljenija* [The study of the use of a fuzzy controller in a robust control system]. *Vestnik Mezhdunarodnoj Akademii Sistemnyh Issledovanij. Informatika. Jekologija. Jekonomika* [Bulletin of the International Academy of Systems Studies. Informatics. Ecology. Economics], 2017, vol.19, no. 1, pp.3-12. (*in Russian*).