

Лошак К.Р.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

НАЛАШТУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ У ЗМІШУВАЛЬНОМУ БАКУ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН

Особливістю сучасних металовмісних стічних вод промислових підприємств є наявність у їхньому складі широкого спектра хімічних речовин. Для них є характерними високі концентрації забруднень, значні коливання їхньої кількості та складу, наявність широкого спектра органічних домішок (поверхнево-активні речовини, емульговані домішки, феноли, нафтопродукти тощо) і солей. Велика кількість компонентів у стічних водах негативно впливає на якість і складність їх очищення. Для очищення можуть використовуватися такі методи, як: введення реагентів, які сприяють осадженню металів, сорбції органічних домішок, укрупнення маленьких частинок (колоїдів), руйнування комплексів, відновлення та окислення. Кислоти використовуються для підкислення очищених стічних вод до нейтрального рівня рН перед скиданням у водойми чи каналізацію, луги – для осадження важких металів.

Основними способами впливу на окислювально-відновні процеси очистки стічних вод є контроль показників рН та окислювально-відновного потенціалу E_h за допомогою регулювання різномісних реагентів: лугів, кислот, відновлювачів та окислювачів. Розроблення сучасних систем автоматичного регулювання параметрів E_h та рН потребує вдосконалення наявних алгоритмів функціонування систем автоматизації, розроблення адекватних математичних моделей контурів регулювання та впровадження комп'ютерного моделювання для отримання оптимальних параметрів системи.

У промисловості за частих змін концентрації хімічних речовин стічних вод і впливу неконтрольованих збурень на об'єкт регулювання значення його параметрів постійно змінюються, що потребує ручної установки нових значень налаштувань пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора та його адаптації. Але у зв'язку з обмеженнями в часі, складністю процесу ідентифікації та відсутністю можливості контролю збурень часто неможливо розрахувати оптимальні значення налаштувань регулятора. А це, у свою чергу, призводить до зниження ефективності роботи всього технологічного процесу. Тому виникає проблема оптимізації процесу адаптації регулятора.

Метою роботи є проведення детального аналізу найпоширеніших методів налаштування типових і нечітких регуляторів у системах автоматичного регулювання (САР) параметрів рН та E_h , у багатоконпонентних стічних водах. Об'єктом дослідження виступає змішувальний реактор хімічних речовин механічного типу за реагентного способу обробки стоків.

Ключові слова: змішувальний бак хімічних речовин, нейтралізація стічних вод, автоматизована система управління, нечіткий регулятор, пропорційно-інтегральний регулятор, пасивна ідентифікація об'єкта регулювання.

Постановка проблеми. Особливістю сучасних металовмісних стічних вод промислових підприємств є наявність у їхньому складі широкого спектра хімічних речовин. Для них є характерними високі концентрації забруднень, значні коливання їхньої кількості та складу, наявність широкого спектра органічних домішок (поверхнево-активні речовини, емульговані домішки, феноли, нафтопродукти тощо) і солей. Велика кількість компонентів у стічних водах негативно впливає на якість і складність їх очищення. Для очищення можуть використовуватися такі методи,

як: введення реагентів, які сприяють осадженню металів, сорбції органічних домішок, укрупнення маленьких частинок (колоїдів), руйнування комплексів, відновлення та окислення. Кислоти використовуються для підкислення очищених стічних вод до нейтрального рівня рН перед скиданням у водойми чи каналізацію, луги – для осадження важких металів.

У процесі осадження металів важливим є врахування наявності сумішей важких металів, які, як правило, мають різні показники рН осадження. Також необхідно звернути увагу на

амфотерні властивості більшості металів, що може призвести до вторинного розчинення створених малорозчинних хімічних з'єднань за підвищення рН їх осадження.

Основними способами впливу на окислювально-відновні процеси очистки стічних вод є контроль показників рН та окислювально-відновного потенціалу Eh за допомогою регулювання різнотипних реагентів: лугів, кислот, відновлювачів та окислювачів. Завдяки своїм хімічним властивостям відновлювачі та окислювачі, які дозуються для регулювання Eh, також одночасно впливають і на показник рН середовища. Наступне його коригування спричиняє зворотний зсув величини Eh. Крім того, зміна цих показників також відбувається під час протікання хімічних реакцій. Як наслідок, усе це створює значні складнощі у процесі підтримання оптимальних значень цих параметрів. Також виникає необхідність введення значної кількості реагентів, а в деяких випадках досягнення необхідних величин рН та Eh під час використання найпоширеніших одноконтурних систем автоматичного регулювання стає неможливим.

Розроблення сучасних систем автоматичного регулювання параметрів Eh та рН потребує вдосконалення наявних алгоритмів функціонування систем автоматизації, розроблення адекватних математичних моделей контурів регулювання та впровадження комп'ютерного моделювання для отримання оптимальних параметрів системи.

Постановка завдання. Мета статті – проведення детального аналізу найпоширеніших методів налаштування типових і нечітких регуляторів у системах автоматичного регулювання (САР) параметрів рН та Eh у багатокомпонентних стічних водах. Об'єктом дослідження виступає змішувальний реактор хімічних речовин механічного типу за реагентного способу обробки стоків.

Опис технологічного процесу

Хімічний процес окислення-відновлення токсичних домішок найбільш ефективно проводити у змішувальному реакторі періодичного (непроточного) типу, обладнаному механічною мішалкою. Для цього необхідним є ступінчате регулювання рН та Eh. Зумовлюється це тим, що окислювально-відновні реакції потребують значних затрат часу та дозування декількох реагентів, особливо за наявності органічних домішок у багатокомпонентних стічних водах.

Для прикладу розглянемо принцип ступінчатого дозування реагентів для відновлення шестивалентного хрому сульфідом натрію. Після

наповнення механічного змішувального реактора рідиною, у складі якої є з'єднання хрому, у нього під час постійного змішування ступінчато дозують реагенти для регулювання рН та Eh. Спочатку стоки підкислюють соляною кислотою для зменшення рівня рН до оптимального ($\text{pH} \leq 3$). Це необхідно для ефективного протікання реакції відновлення хрому (VI) у хром (III). При цьому під впливом кислоти рівень Eh води збільшується до 0,7–0,75 В. Наступним кроком у воду вводять розчин сульфїту натрію для зменшення показника Eh до першого проміжного значення потенціалу $\text{Eh} = 0,45\text{--}0,55$ В, за досягнення якого починається реакція відновлення. З цього моменту подача реагентів зупиняється і далі протікає реакція відновлення хрому (VI) під час постійного перемішування стічних вод. У процесі реакції споживаються іони водню, та, як наслідок, показник рН у рідині досягає критичного значення $\text{pH} > 3$, що призводить до її сповільнення. Далі, цикли послідовного дозування кислоти та відновлення для поступового ступінчатого зменшення показника Eh та стабілізації рН повторюються до повного відновлення хрому (VI) за заданого кінцевого значення показника $\text{Eh} = 0,2$ В. Реакція відновлення хрому (VI) вважається закінченою, якщо на заданому кінцевому відрізку часу стабілізації хімічного процесу параметри рН та Eh не будуть досягати рівня, вище зазначених кінцевих показників.

Ступінчате дозування також можна використовувати з метою окислення фенолів, ціанідів, роданідів та інших токсичних домішок. Це реалізується дозуванням окислювачів для підвищення показника Eh і наступним регулюванням рН за допомогою кислот і лугів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження налаштування регуляторів у системі автоматичного управління показників Eh та рН розроблено математичну модель (рис. 1) процесів реагентної обробки стоків у механічному змішувальному реакторі періодичної дії. Аналіз експериментальних даних показує, що об'єкт є багатовимірним, із двома зв'язаними входами та виходами. У процесі були знайдені передатні функції прямих і перехресних зв'язків між вхідними та вихідними параметрами. Передатна функція прямого каналу регулювання рН демонструє вплив витрати кислоти на зміну показника рН у змішувальному реакторі:

$$W_{11}(S) = \frac{0,01}{22,3S + 1}$$

Передатна функція перехресного каналу зв'язку характеризує вплив витрати кислоти на зміну показника рН:

$$W_{12}(S) = \frac{-0,0012}{15,4S + 1}$$

Знак «мінус» показує, що зростання показника рН призводить до зменшення показника Eh. Знайдемо передатну функцію каналу регулювання Eh:

$$W_{22}(S) = \frac{0,0025}{17,1S + 1}$$

Передатна функція впливу витрати відновлювача на зміну Eh у стічних водах.

$$W_{21}(S) = \frac{-0,01}{32,6S + 1}$$

Автоматичне регулювання з використанням нечіткої логіки

У промисловості за частих змін концентрації хімічних речовин стічних вод і впливу неконтрольованих збурень на об'єкт регулювання значення його параметрів постійно змінюються, що потребує ручної установки нових значень налаштувань пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора та його адаптації. Але у зв'язку з обмеженнями в часі, складністю процесу ідентифікації та відсутністю можливості контролю збурень часто

неможливо розрахувати оптимальні значення налаштувань регулятора. А це, у свою чергу, призводить до зниження ефективності роботи всього технологічного процесу. Погіршує ситуацію необхідність використання активних методів ідентифікації об'єкта для отримання додаткової інформації. У деяких системах використання активних методів ідентифікації може призвести до їхньої нестійкої роботи. Тому виникає проблема оптимізації процесу адаптації регулятора. Пасивна ідентифікація об'єкта не завжди є ефективною, але може бути оптимальною під час залучення до ручного налаштування з аналізу перехідного процесу досвідченого експерта.

Особливістю пасивної ідентифікації об'єкта регулювання є те, що вона не вносить похибки в технологічний процес, але її достовірність досить низька та може призвести до погіршення якості процесу регулювання. Налаштування регуляторів у традиційних системах автоматичного регулювання є досить складним і потребує детального коригування параметрів коефіцієнта передачі K_p постійного інтегрування об'єкта T_i . Під час проведення налагоджувальних робіт це виконується вручну, як правило, під час використання перехідної характеристики системи. Спираючись на сучасні методи вирішення подібних завдань, пропонується проаналізувати їх на основі теорії нечіткої логіки.

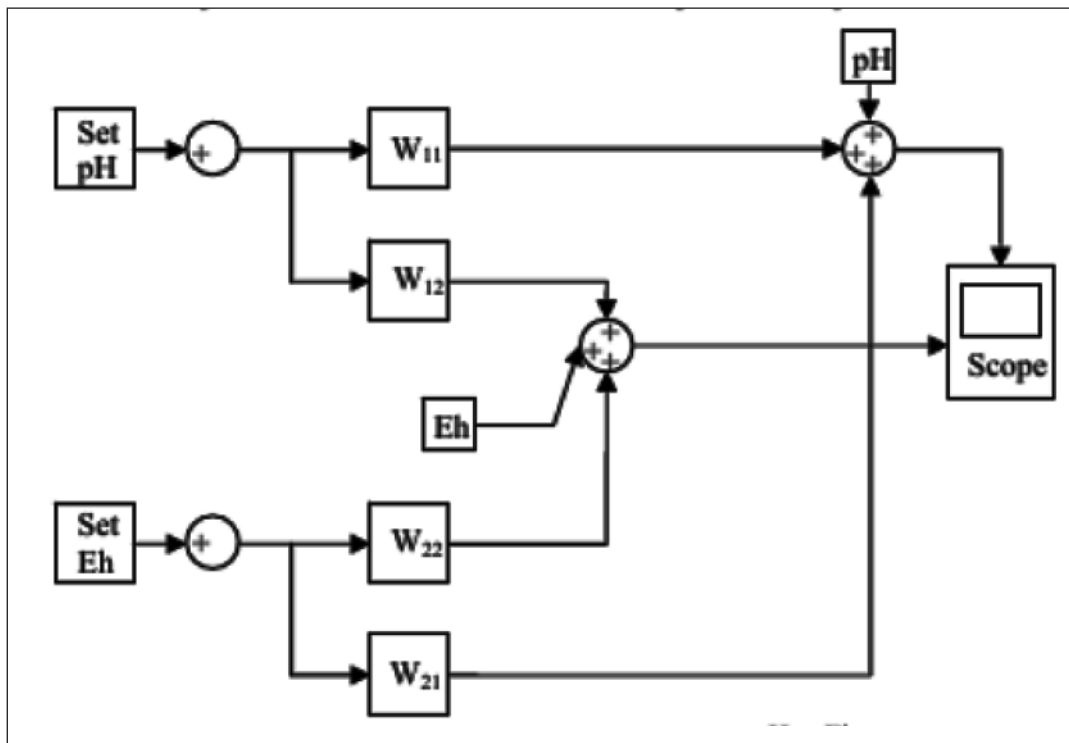


Рис. 1. Реалізована в середовищі MatLab математична модель процесів ступінчатого регулювання параметрів рН та Eh

Для проведення процедури адаптації розробляється нечітка адаптивна модель системи з використанням нечіткого адаптера, який працює на основі алгоритму Мамдані (рис. 2).

N – зовнішні збурення; Z – завдання; T_p – час регулювання; A_I – перша амплітуда перехідного процесу; Y – вихідне значення

Під час розрахунку параметрів за допомогою формул складно отримати оптимальні налаштування регулятора, оскільки аналітичні розрахунки найчастіше базуються на спрощених моделях

об'єкта. Також у цьому випадку не враховується нелінійності, присутні в керуючому впливі, а параметри K_p та T_i мають певні похибки.

Спосіб коригування параметрів динамічного налаштування щодо розрахованих значень може бути якісним або нечітким. Останній реалізується у вигляді лінгвістичних правил, які були складені досвідченим шляхом:

– якщо перехідний процес характеризується слабкими коливаннями та великою тривалістю, то коефіцієнт пропорційності слід збільшити, а постійний час – зменшити;

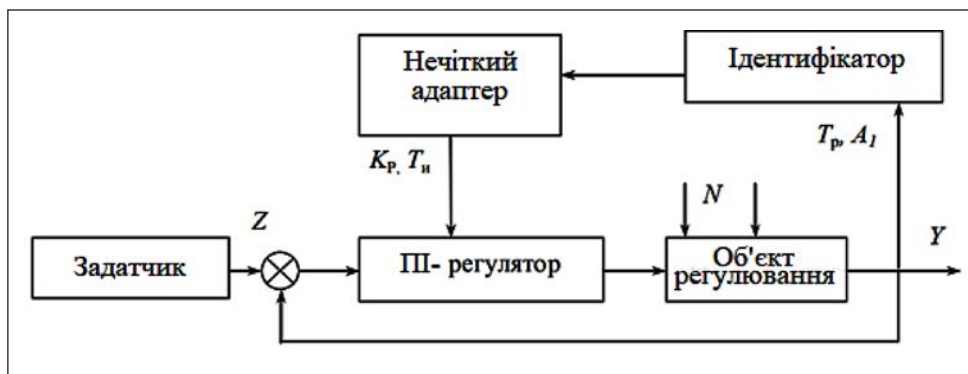


Рис. 2. Структурна схема нечіткої адаптивної САР

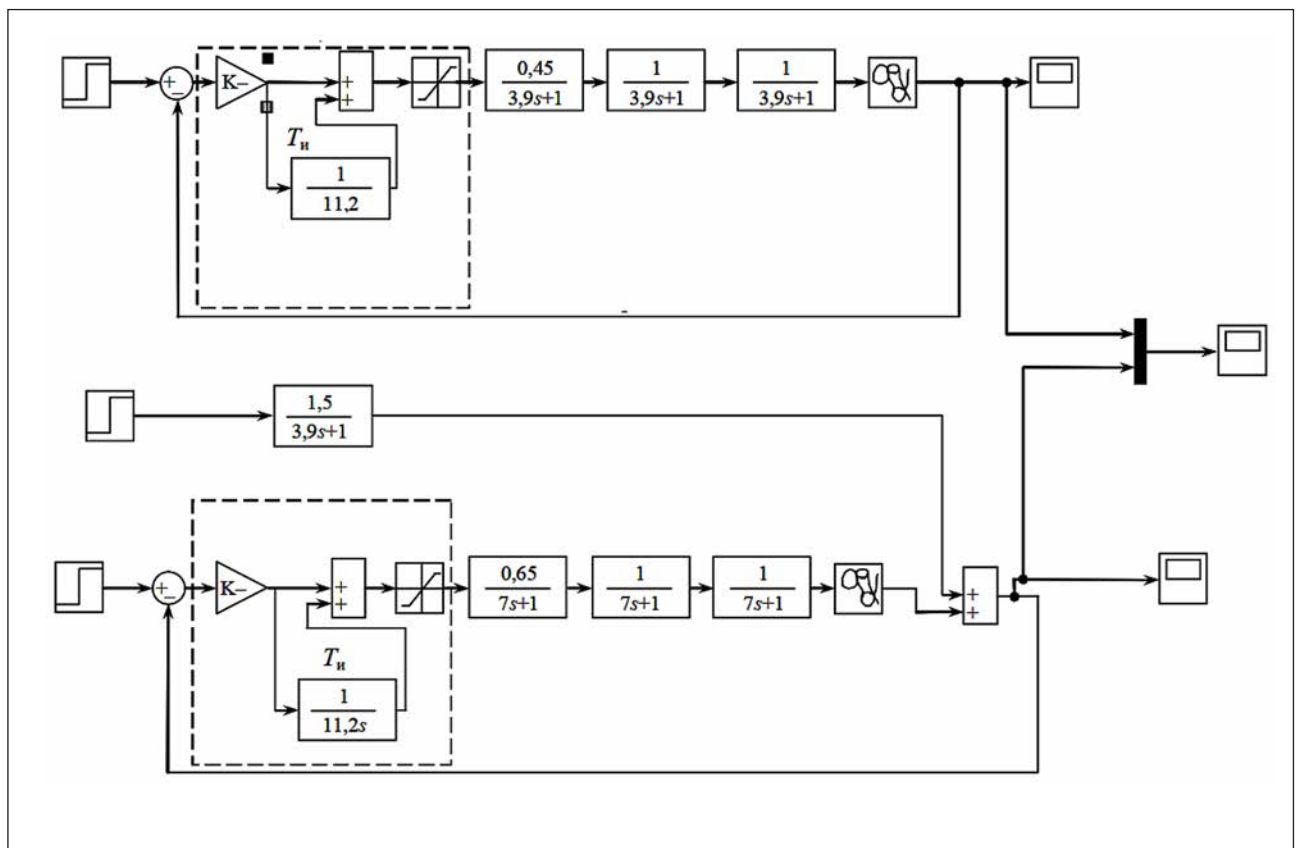


Рис. 3. Структурна схема моделювання САР з використанням нечіткого адаптера

– якщо перехідний процес характеризується сильними коливаннями, коефіцієнт пропорційності треба зменшити.

Для налаштування регуляторів динамічних систем автоматичного регулювання є такі правила:

– збільшення коефіцієнта K_p підвищує швидкість та знижує запас стійкості;

– зменшення коефіцієнта T_i призводить до того, що помилка регулювання з плином часу зменшується швидше;

– зменшення коефіцієнта T_d знижує запас стійкості;

– збільшення коефіцієнта K_d підвищує швидкість та запас стійкості.

У межах комп'ютерного моделювання припустимо, що передатна функція об'єкта регулювання складається з декількох аперіодичних ланок із запізненням:

$$W(S) = \frac{K_p}{(T_u(S) + 1)^n} e^{-\tau(s)},$$

де значення випадковим чином поступово змінюються до 60% із плином часу; S – оператор Лапласу. Нехай передатна функція об'єкта регулювання по каналу завдання $Z - Y$ дорівнює:

$$W(S)^{Z-Y} = \frac{0,45}{(3,9S + 1)^3} e^{-0,52S}$$

Використовуючи налаштування, отриманні з формул, з показником коливальності для регуля-

тора $M = 1,55$, отримаємо $K_p = 3,86$; $T_i = 11,18$. Тестування налаштувань проводилось у програмному пікеті MatLab (Simulink), де було побудовано комп'ютерну модель САР (рис. 3) та отримано її перехідні характеристики (рис. 4, 5).

Для тестування стійкості системи у модель додається канал зовнішнього збурення $N-Y$ з передатною функцією:

$$W(S)^{N-Z} = \frac{1,5}{3,9S + 1}$$

та збільшуються значення параметрів об'єкта K_p та T_i на 60%. У результаті маємо таке:

$$W(S)^{Z-Y} = \frac{0,65}{(7S + 1)^3} e^{-0,52S}$$

Вимоги до процесу регулювання були такі: $A1 < 1,5$, $T_p < 60$ с. На основі аналізу можна сказати, що показники якості об'єкта погіршились, об'єкт є на межі ділянки стійкості та регулятор необхідно адаптувати під нові умови роботи об'єкта (рис. 4).

Під час розроблення нечіткого адаптера САР у середовищі MatLab для блока, який реалізує алгоритм Мамдані, було задано два входи – A_1 , T_p , та два входи – K_p , T_i . Використовуються функції належності Z - та S -подібного типу. Визначено дві нечіткі множини – мала (M) та велика (B) та універсуми вхідних і вихідних параметрів. Нечіткі множини описані за допомогою лінгвістичних змінних z і s та зображено аналітичним методом за формулами Z - та S -подібних функцій. Отже, маємо:

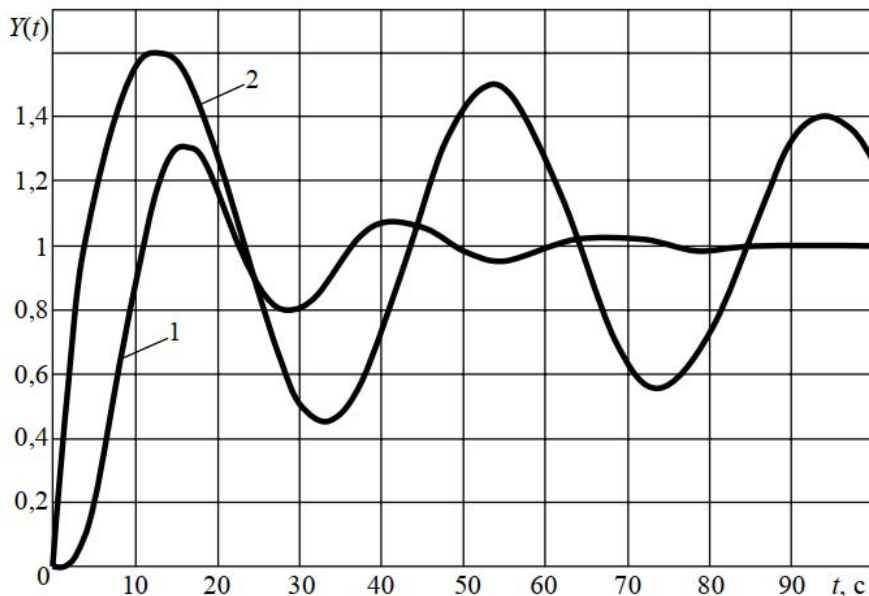


Рис. 4. Перехідні процеси нечіткої САР по каналу завдання: 1 – детермінований об'єкт; 2 – невизначений об'єкт

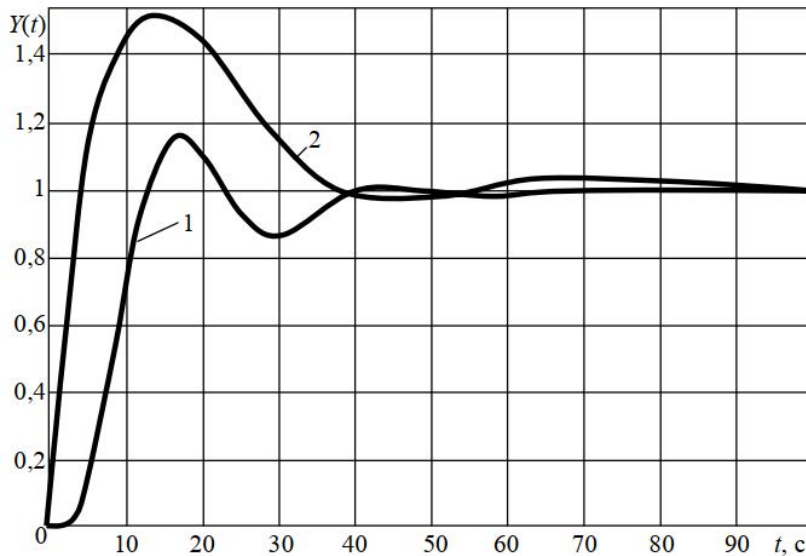


Рис. 5. Перехідні процеси нечіткої САР з новими налаштуваннями нечіткого адаптера: 1 – детермінований об’єкт; 2 – невизначений об’єкт

$$f_{\downarrow}z(x, a, b) = \left\{1, \frac{b-x}{b-a}, 0, x \leq aa < x < bb \leq x \right\},$$

$$f_{\uparrow}z(x, a, b) = \left\{0, \frac{x-a}{b-a}, 1, x \leq aa < x < bb \leq x \right\},$$

де a та b – числові параметри, які приймають певні дійсні значення та впорядковані відношенням $a > b$ на функції належності $f(x, a, b)$.

Як метод усунення спотворень обрано метод центру ваги, за якого:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n K_{pi} \mu(K_{pi})}{\sum_{i=1}^n \mu(K_{pi})},$$

$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^n K_{pi} \mu(T_{ui})}{\sum_{i=1}^n \mu(T_{ui})}$$

База знань розроблена на базі експериментальних даних і рекомендацій у середовищі MatLab.

Таблиця 1

База знань нечіткого адаптера

| |
|--|
| IF (A1 is M) and (TP is M) then (KP is B)(TI is M) (1) |
| IF (A1 is M) and (TP is B) then (KP is M)(TI is B) (1) |
| IF (A1 is B) and (TP is M) then (KP is M)(TI is M) (1) |
| IF (A1 is B) and (TP is B) then (KP is M)(TI is B) (1) |

У результаті аналізу роботи нечіткого регулятора за вхідних значень $A_i = 1,6$ та $T_p = 100$ с було отримано такі налаштування: $K_p = 1,58$, $T_i = 19,4$. Доведено ефективність роботи адаптера за допустимих показників якості $A_i = 1,3$, $T_p = 55,2$ с, які були визначені по перехідному процесу. Підставивши

отримані налаштування, отримаємо перехідні процеси (рис. 5), які відповідають необхідним вимогам.

Висновки. З аналізу перехідних характеристик можна зробити висновок, що САР, діючи на основі нечіткої логіки, є більш ефективною порівняно з використанням традиційного методу. Класичний метод затухаючих коливань у цьому випадку продемонстрував значно довший час регулювання, хоча можна зазначити відсутність помилки регулювання. Та треба взяти до уваги, що такий результат у методі затухаючих коливань був досягнутий лише завдяки експертному ручному налаштуванню ПІ-регулятора, ба більше, у чистому вигляді він призвів до розбіжного аперіодичного процесу. Це, у свою чергу, демонструє перевагу експертних методів, які реалізуються у нечітких моделях, порівняно з класичними. Хоча на основі проведеної роботи видно, що налаштування нечіткого регулятора – досить складний процес. Як видно, у разі невеликих збурень САР із нечітким адаптером викликає недопустиму помилку регулювання, яка може бути вирішена зміною завдання. Але можна зазначити, що, маючи всього декілька правил у базі знань, регулятор, який працює на основі нечіткого алгоритму, продемонстрував менший час регулювання порівняно з класичним регулятором. Зважаючи на це, можна отримати рекомендації для подальшого налаштування нечітких систем автоматичного регулювання, а саме: пошук та апробацію більш ефективних алгоритмів і використання баз знань з експертним або адаптивним налаштуванням.

Список літератури:

1. Плетньов Г.П. Автоматизоване управління об'єктами теплових електростанцій. Москва : Энергоиздат, 1981. 159 с.
2. Maly J., Hlavinek P. Cistení průmyslových odpadních vod. Brno : NOEL, 2000. 255 p.
3. Филипчук В.Л. Очищення багатоконпонентних металовміщуючих стічних вод промислових підприємств. Рівне : УДУВГП, 2004. 232 с.
4. Смирнов Д.Н., Генкин В.Е. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. Москва : Металлургия, 1989. С. 205–224.
5. Филипчук Л.В. Комплексне ступінчате регулювання рН та Eh стічних вод із застосування системи автоматичного введення реагентів. *Вісник НУВГП*. Рівне, 2011. № 4 (55), С. 63–71.
6. Коптев В.С., Манусова Н.Б. Автоматический контроль процессов электрохимической очистки хромосодержащих сточных вод. *Труды ВНИИВОДГЕО. Автоматизация и управление системами водоснабжения и водоотведения*. Москва : ВНИИВОДГЕО, 1988. С. 8–10.
7. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. Москва : Горячая Линия-Телеком, 2004. 143 с.

Loshak K.R., Beglov K.V. ADJUSTMENT OF THE FUZZY REGULATOR FOR AUTOMATIC CONTROL OF PARAMETERS IN THE MIXING TANK OF CHEMICAL SUBSTANCES

The peculiarity of modern metal-containing wastewater of industrial enterprises is the presence in their composition of a wide range of chemicals. They are characterized by high concentrations of contaminants, significant fluctuations in their quantity and composition, the presence of a wide range of organic impurities (surfactants, emulsified impurities, phenols, petroleum products, etc.) and salts. The large number of components in the wastewater adversely affects the quality and complexity of their treatment. Methods for cleaning can be used such as: introduction of reagents that contribute to the deposition of metals, sorption of organic impurities, the aggregation of small particles (colloids), the destruction of complexes, reduction and oxidation. Acids are used to acidify the treated wastewater to a neutral pH level before being discharged into water or sewage, alkalis to precipitate heavy metals.

The main ways of influencing the redox processes of wastewater treatment is to control the pH and redox potential of Eh by regulating various reagents: alkalis, acids, reducing agents and oxidizing agents. Development of modern systems of automatic regulation of parameters Eh and pH requires improvement of existing algorithms of functioning of automation systems, development of adequate mathematical models of contours of control and introduction of computer simulation for obtaining optimal system parameters.

In industry, with frequent changes in the concentration of wastewater chemicals and the effects of uncontrolled disturbances on a control object, the values of its parameters are constantly changing, which requires the manual adjustment of new values of the proportional-integral (PI) controller settings and its adaptation. However, due to time constraints, the complexity of the identification process and the lack of perturbation control, it is often not possible to calculate the optimal values for the controller settings. And this, in turn, leads to a decrease in the efficiency of the entire technological process. Therefore, there is a problem of optimizing the process of adapting the controller.

The purpose of this work is to carry out a detailed analysis of the most common methods of tuning typical and fuzzy regulators in the automatic control systems of pH and Eh parameters in multi-component sewage. The object of the study is a mechanical mixing reactor of mechanical type chemicals in the reagent method of wastewater treatment.

Key words: *chemical mixing tank, wastewater neutralization, automated control system, fuzzy controller, proportional-integral controller, passive identification of the control object.*