

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку суспільних продуктивних сил одне з чільних місць займають технологічні процеси відновлення енергетичних та природних ресурсів, харчової і фармацевтичної промисловостей. Вони відбуваються в хіміко-технологічних системах (ХТС) Моно-Ієрусалимського з періодичним або неперервним режимом. В систему вноситься субстрат, система мікроорганізмів, інколи додаткові ініціюючі речовини. В результаті реакції утворюються основні (цільові) та побічні продукти. Основними параметрами процесів служать температура, тиск і лужність середовища, причому температура може виступати управляючим параметром.

Проведення процесів в неперервному режимі економічно ефективніше ніж у періодичному, однак ряд важливих технологічних процесів може відбуватися тільки в останньому. Це, зокрема, виробництво алкогольних та кисломолочних харчових продуктів, а також таких фармацевтичних препаратів як вітаміни, антибіотики, гормони. Тому дослідження ХТС з періодичним режимом становить особливий інтерес. Завданням їх математичного моделювання є дослідження динаміки концентрацій згаданих речовин.

В монографіях [Жаботинский А. М., 1974] та [Кафаров В. В., 1976–1986] закладено теоретичні основи моделювання ХТС на основі функціональних операторів та їх якісного аналізу на основі теорії нечітких множин. З достатнім ступенем точності можна вважати, що зміни концентрацій відбуваються лише в часі. Основою моделювання виступають жорсткі системи нелінійних диференціальних рівнянь з початковою умовою. Проте динаміка процесів в системах характеризуються значною невизначеністю, що виникає внаслідок їх реалізації колективами активних систем із складною поведінкою — колективами мікроорганізмів. Невизначеність посилюється неоднорідністю останніх в умовах промислового використання. Ідентифікація моделей ускладнюється неповною спостережуваністю динаміки їхнього стану в промислових умовах.

Моделюванню систем з періодичним режимом присвячено ряд досліджень. В роботах [Andrés-Toro B., 1997–2004] та [Carrillo-Ureta G. E., 2001] досліджується вплив температури реакції на динаміку основних та побічних продуктів. В роботі [Medawar W., 2003] розглянуто модель впливу керованого зворотнього зв'язку на затримку ферментаційного процесу.

Згадані моделі побудовані і досліджені лише в лабораторних умовах, а тому потребують суттєвого доопрацювання для використання в моделюванні промислових технологічних процесів, які характеризуються суттєвішою невизначеністю. В роботі [Trelea I. C., 2002] побудовано адаптивну модель, яка постулює, що невизначеність процесу присутня лише в одному з параметрів рівняння стану побічного продукту. Значення цього параметру уточнюється в міру нагромадження експериментальних спостережень, проте вплив невизначеності на основні параметри і змінні стану ХТС там не досліджено. В роботі [Lin Y., 2006] методами інтервального аналізу досліджується вплив апріорно заданої невизначеності на параметри та початкові умови автономної системи. Однак цей підхід не дозволяє налаштовувати модель під конкретні процеси, а також не враховує впливів температури та зворотнього зв'язку з продуктом на їх перебіг.

У випадку аналізу широких інтервалів невизначеності ефективними є адаптивні моделі, котрі уточнюють прогноз в міру надходження експериментальних вимірювань тих чи інших змінних стану системи. Переважна більшість побудованих адаптивних моделей [Smets I. Y., 2003], [Ляшенко И. Н., 1996], [Чуб К. Ф., 2000], [Mailleret L., 2004] та [Lubenova V., 2000] призначені для моделювання динаміки систем з неперервним режимом, де вони використовуються для забезпечення оптимальної швидкості перебігу процесів за рахунок регулювання по відхиленню. Однак оптимальна швидкість проходження процесів в системах з періодичним режимом невідома, тому використання згаданих моделей для їх прогнозування неможливе.

Таким чином побудова адаптивних моделей динаміки систем з періодичним режимом, що враховують невизначеність параметрів процесу є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить покращити управління згаданими технологічними процесами в умовах промислового використання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідна робота за темою дисертації проводилася у відповідності з координаційним планом науково-технічних програм Міністерства освіти та науки України, розділ “Методи оптимізації, програмне забезпечення та інформаційні технології у складних системах”, відповідно до планів навчальної та науково-дослідної роботи Тернопільського національного економічного університету, зокрема: науково-дослідної роботи на тему “Методи та засоби математичного моделювання складних систем на основі теоретико-множинного та інтервального підходів” (0106U012529) та українсько-бельгійського науково-дослідного проекту по гранту NATO Linkage Collaborative Grants Program: “Development of Precision Control System for Thermal Objects Control” (PST.CLG.977647).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка адаптивних моделей нечітких процесів в системах Моно-Ієрусалимського, методів їх ідентифікації та синтезу управління з мінімальними кінцевими інтенсивностями побічних продуктів. Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено завдання:

- проаналізувати відомі адаптивні моделі динаміки систем з неперервним та періодичним режимом, визначити можливі напрямки їхнього розвитку;
- розробити підхід до ідентифікації точкових моделей в умовах неповноти експериментальних даних, а саме відсутності спостережень траєкторії концентрації мікроорганізмів.
- розробити адаптивну модель нечітких процесів на базі агрегату ідентифікованих термодерованих точкових моделей.
- з використанням вищезгаданої моделі розробити метод синтезу температурного управління технологічним процесом, що мінімізує кінцеві інтенсивності побічних продуктів.

Об'єкт досліджень: нечіткі процеси в системах Моно-Ієрусалимського.

Предмет досліджень: моделі динаміки нечітких процесів в системах Моно-Ієрусалимського та методи їх ідентифікації.

Методи досліджень: комп'ютерне моделювання з використанням експериментальної бази вимірювань в умовах конкретних виробничих процесів. Для вирішення поставлених задач в дисертації застосовувались методи лінійної алгебри, оптимізації і чисельного розв'язання жорстких систем звичайних диференціальних рівнянь для параметричної ідентифікації точкових моделей систем Моно-Ієрусалимського, тео-

рія нечітких множин для врахування невизначеності їхнього стану.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримав подальший розвиток метод параметричної ідентифікації точкових моделей Моно-Ієрусалимського з неспостережуваною змінною стану для автономного, керованого зворотнім зв'язком та термokerованого випадків на основі модифікації функції мети, врахування природних обмежень на ідентифіковані коефіцієнти, а також спеціальних схем ідентифікації. Метод забезпечує збіжність процедури ідентифікації для вказаних типів задач при застосуванні відповідного початкового наближення.

2. Вперше розроблено метод побудови початкового наближення в задачі параметричної ідентифікації автономної системи Моно-Ієрусалимського на основі формалізації його типових характеристик. Це дозволило отримати початкові наближення, які забезпечують збіжність процедури параметричної ідентифікації при використанні градієнтних методів.

3. Отримав подальший розвиток метод агрегату точкових моделей для побудови адаптивних моделей нечітких процесів в системах Моно-Ієрусалимського. Його доповнено процедурами уточнення прогнозного коридору у випадку розташування спостережуваних значень поблизу найімовірніших, що дозволило забезпечити його звуження для всіх можливих випадків динаміки спостережуваних значень.

4. Вперше розроблено метод синтезу управління періодичною системою Моно-Ієрусалимського з мінімальними інтенсивностями побічних продуктів на основі агрегату точкових моделей та генетичного алгоритму. Він на відміну від існуючих, враховує невизначеності оцінок як основного, так і побічних продуктів, дозволяє виявляти напрямки покращення технологічних процесів вказаного виду, забезпечуючи підвищення їхньої узагальненої характеристики в середньому на 11 % за оцінкою мінімального ризику.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі розроблених математичних моделей та методів їх ідентифікації реалізовано програмний комплекс, який дозволяє моделювати динаміку процесів з періодичним режимом в умовах конкретного виробництва і надає рекомендації по управлінню ними з метою забезпечення бажаних кінцевих інтенсивностей основного і побічних продуктів. Це програмне забезпечення може використовуватися в різних технологічних процесах для спостереження за їхнім ходом, покращення якості продукції і підготовки кваліфікованого персоналу. На його базі розроблено методичне забезпечення, яке використовують у навчальному процесі в Тернопільському національному економічному університеті для викладання дисциплін “Теорія і методи оптимізації” та “Моделювання систем”.

Основні практичні результати дисертаційної роботи використані:

– для врахування невизначеності і неповноти експериментальних даних при параметричній ідентифікації та моделюванні систем Моно-Ієрусалимського за допомогою адаптивних моделей нечітких процесів в межах виконання науково-дослідної роботи на тему “Методи та засоби математичного моделювання складних систем на основі теоретико-множинного та інтервального підходів” (0106U012529);

– для синтезу управління термokerованим процесом завантаження періодичного термоагрегату з заданим технологічним режимом термообробки за допомогою методів стохастичної оптимізації в межах виконання українсько-бельгійського нау-

ково-дослідного проекту по гранту NATO Linkage Collaborative Grants Program “Development of Precision Control System for Thermal Objects Control” (PST.CLG.977647);

– у навчальному процесі на кафедрах економічної кібернетики та комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету при викладанні курсів “Теорія і методи оптимізації” та “Моделювання систем”.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, викладені у дисертаційній роботі, отримані автором особисто. Здобувачем досліджено підходи до моделювання та ідентифікації хіміко-технологічних систем; проаналізовано чисельні результати ідентифікації сімейства автономних, керованих зворотнім зв’язком і термokerованих систем; вдосконалено алгоритм методу адаптації складу агрегату точкових моделей; розроблено комп’ютерні програми для моделювання динаміки хіміко-технологічних процесів ферментації на основі розроблених моделей і методів.

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем розроблено точкову модель термokerованої системи Моно-Ієрусалимського, що поєднує кращі сторони моделей [Andrés-Toro B., 1997–2004] та [Trelea I.C., 2002]; досліджено, що джерелами невизначеності ферментаційних процесів є неоднорідність субстрату та складна поведінка систем мікроорганізмів; для врахування невизначеності запропоновано трактувати параметри моделі як інтервальні або нечіткі числа; розроблено метод параметричної ідентифікації цієї моделі в умовах повної спостережуваності змінних стану системи [1]; розроблено методи параметричної ідентифікації сімейства автономних і термokerованих моделей частково спостережуваних систем, що ґрунтуються на спеціальній процедурі початкового оцінювання параметрів автономних моделей, методі дзеркального відображення від’ємних значень коефіцієнтів для врахування природних обмежень на їхні значення, спеціальній функції мети, а також схем розбиття загальної задачі ідентифікації на послідовність підзадач з меншою розмірністю; розроблено адаптивну нечітку модель динаміки системи на основі агрегату ідентифікованих термokerованих моделей [2, 9]; розроблено метод синтезу температурного управління процесом, що мінімізує інтенсивність побічних продуктів хіміко-технологічної системи на основі генетичного алгоритму [3]; розроблено методи структурної і параметричної ідентифікації систем з керованим зворотнім зв’язком [4]; розроблено модель перехідного процесу завантаження періодичної системи термообробки та метод синтезу температурного управління ним, що базується на алгоритмах стохастичної оптимізації [5, 6, 10].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації були представлені та обговорювалися на 9 міжнародних конференціях, семінарах і симпозіумах: III Міжнародній науково-практичній конференції “Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів” (Хмельницький, 2004 р.); III Міжнародному науково-технічному симпозіумі “Інтелектуальні засоби збору даних і сучасні обчислювальні системи: розробка та застосування IDAACS’2005” (Болгарія, Софія, 2005 р.); VIII та IX Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії: TCSET’2006, 2008” (Львів – Славсько, 2006 та 2008 рр.); XIII Міжнародній конференції з автоматичного управління “Автоматика 2006” (Вінниця, 2006 р.); IX Міжнародній науково-технічній конференції “Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці CADSM’2007” (Львів – Поляна, 2007 р.); V Міжнародній

науково-практичній конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів КСАВП 2007” (Хмельницький, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції Національного авіаційного університету “Комп’ютерні системи та мережні технології 2008” (Київ, 2008 р.), Літній Школі-семінарі “Індуктивне моделювання: теорія і застосування” Відділу інформаційних технологій індуктивного моделювання Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій і систем НАН та МОН України (Київ – Жукин, 2008 р.)

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 10 друкованих працях, загальним обсягом 53 сторінок, у тому числі 6 — у фахових виданнях, 4 — у матеріалах конференцій. Дві статті — одноосібні.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та семи додатків.

Загальний обсяг роботи — 187 сторінок. Основний зміст викладено на 146 сторінках. Робота містить 27 рисунків та 12 таблиць. Список використаних джерел охоплює 129 найменувань. Додатки на 27 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, вказано основні методи досліджень, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів.

В **першому розділі** висвітлено проблеми моделювання хіміко-технологічних систем (ХТС) Моно-Ієрусалимського. Проведено порівняльний аналіз існуючих підходів до побудови їхніх моделей, ідентифікації та синтезу управління технологічними процесами з мінімальними інтенсивностями побічних продуктів.

Динаміка ізотермічних ферментаційних процесів в ХТС з періодичним режимом описується задачею Коші для автономної системи нелінійних диференціальних рівнянь зі структурою Моно-Ієрусалимського

$$\begin{cases} X'(t) = (A_1 H_G[S(t), P(t)] - A_2) X(t), \\ S'(t) = -A_3 \frac{S(t)}{A_4 + S(t)} X(t), \\ P'(t) = -A_7 S'(t), \end{cases} \quad (1)$$

з початковою умовою $X(0) = X_0, S(0) = S_0, P(0) = 0$, де $X(t), S(t), P(t)$ — концентрації мікроорганізмів, субстрату та продукту, $H_G[S(t), P(t)]$ — передавальна функція зворотнього зв’язку, яка описує залежність питомої швидкості росту мікроорганізмів від інтенсивностей субстрату $S(t)$ та продукту $P(t)$, A_1 — коефіцієнт швидкості росту мікроорганізмів, A_2 — коефіцієнт швидкості відмирання мікроорганізмів, A_3 — максимальна швидкість реакції переробки субстрату, A_4 — коефіцієнт Моно, що дорівнює концентрації субстрату при половині швидкості росту, A_7 — коефіцієнт продуктного синтезу. На даний час побудовано сімейство моделей на базі структури (1) при різних формах передавальної функції $H_G[S(t), P(t)]$. Зокрема, слід відзначити функції Хіншельвуда, Ієрусалимського, Бергтера, модифіковану функцію Хіншельвуда та Андре-Торо. Всі вони забезпечують зменшення швидкості росту мікроорганізмів при збільшенні інтенсивності продукту $P(t)$.

Управління системами Моно-Ієрусалимського здійснюється налаштуванням температурного режиму. Температура впливає на параметри швидкості росту мікроорганізмів і споживання субстрату, тому в термодерованих моделях стаціонарні коефіцієнти $A_1 \div A_7$ автономних моделей (1) заміщені функціями Арреніуса $H_i[\alpha, K] = \exp(C_i - E_i K^{-\alpha})$, що описують залежність швидкості хімічних реакцій від температури. Для моделювання технологічних процесів необхідно провести параметричну ідентифікацію цих моделей. В умовах повної спостережуваності системи, коли відслідковується динаміка всіх її змінних стану $X(t)$, $S(t)$, $P(t)$, цю задачу можна розв'язати методами регресійного аналізу за допомогою стандартних засобів математичних пакетів. Однак в промислових умовах відсутні спостереження змінних стану концентрації мікроорганізмів $X(t)$ та основного продукту $P(t)$. За таких умов задачі параметричної ідентифікації автономних (1) та керованих систем відносяться до класу некоректно поставлених і вимагають спеціальних методів розв'язання.

Одночасно з розвитком системи мікроорганізмів відбувається синтез продуктів, які характеризуються концентрацією корисних речовин (основного продукту) і допустимими рівнями шкідливих домішок (побічних продуктів). В харчовій промисловості побічні продукти негативно впливають на якість кінцевих виробів, оскільки псують їхні смакові та ароматичні характеристики або становлять канцерогенні домішки. Тому становить практичний інтерес задача синтезу температурного управління процесом, що забезпечує мінімізацію кінцевих інтенсивностей побічних продуктів

$$\left\{ P_{BN}(\vec{T}, t_{\max}), P_{BM}(\vec{T}, t_{\max}) \right\} \xrightarrow{\vec{T}} \min, \quad (2)$$

при забезпеченні входження кінцевої інтенсивності основного продукту в інтервал

$$P^- \leq P(\vec{T}, t_{\max}) \leq P^+, \quad (3)$$

де $P(\vec{T}, t_{\max})$, $P_{BM}(\vec{T}, t_{\max})$, та $P_{BN}(\vec{T}, t_{\max})$ — оцінки кінцевих (в час $t = t_{\max}$) інтенсивностей основного і побічних продуктів при застосуванні температурного управління, що описується кусково-лінійною функцією $T(t)$, $t \in [0, t_{\max}]$, яка параметризована у векторі \vec{T} . Ці оцінки отримуються з розв'язку задачі Коші для систем термодерованих диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} P'_{BM}(t) = -H_8[1, T(t)]S'(t), \\ P'_{BN}(t) = -H_9[-1, S(t)]S'(t) - H_{10}[-1, -T(t)]P_{BN}(t), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X'(t) = (H_1[1, T(t)]H_G[T(t), S(t), P(t)] - H_2[1, T(t)])X(t), \\ S'(t) = -H_3[1, T(t)] \frac{S(t)}{H_4[1, T(t)] + S(t)} X(t), \\ P'(t) = -H_7[1, T(t)]S'(t), \end{cases} \quad (5)$$

$$X(0) = X_0, \quad S(0) = S_0, \quad P(0) = P_{BM}(0) = P_{BN}(0) = 0. \quad (6)$$

Розв'язання задачі (2–6) вимагає параметричної ідентифікації термодерованої системи (4–6) та застосування деякого оптимізаційного методу з метою пошуку температурного управління \vec{T} , що забезпечує виконання умов (2), (3). Важливою проблемою при цьому виступає вибір підходу до обробки векторної функції мети (2). Аналіз оптимізаційних методів показав, що для її розв'язання як в багатокритеріальному так і однокритеріальному (після агрегування) випадках найкращим співвідно-

шенням характеристик збіжності та обчислювальних затрат володіють еволюційні алгоритми. А найефективніші результати можна отримати наближенням Парето-множини розв'язків задачі за допомогою багатокритеріальних генетичних алгоритмів, що обумовило їхнє використання в дисертації.

В другому розділі вдосконалено методи ідентифікації систем Моно-Ієрусалимського в умовах неповної спостережуваності їхніх змінних стану.

Оскільки в більшості промислових виробництв спостереження за ходом процесу ведуться лише через вимірювання концентрації субстрату $S(t)$, а концентрації мікроорганізмів $X(t)$ та продукту $P(t)$ — неспостережувані змінні, то ідентифікацію необхідно проводити лише по траєкторіях $S(t)$. Розв'язання задач ідентифікації систем в умовах неповної спостережуваності містить значні труднощі, які посилюються суттєвою нелінійністю терموкерованих моделей (4–6). Тому на початковому етапі доцільно розглядати простіші задачі ідентифікації автономних систем (1), параметри яких слугують початковим наближенням для систем із керуванням.

Нехай $S_{sim}(\vec{P}, t_i) = S(t_i)$ — модельна оцінка концентрації субстрату в дискрет часу t_i , $i = \overline{0, N}$, що отримується з розв'язку задачі Коші при встановленні параметрів системи (1) відповідно до вектора $\vec{P} = (A_1 \ A_2 \ \dots \ A_7)^T$. Тоді задачу ідентифікації невідомих параметрів $A_1 \div A_7$ можна записати як мінімізацію суми квадратів неув'язок по спостереженій траєкторії концентрації субстрату $S_{real}(t_i)$

$$F_1(\vec{P}) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N [S_{sim}(\vec{P}, t_i) - S_{real}(t_i)]^2 \xrightarrow{\vec{P}} \min. \quad (7)$$

Параметрична ідентифікація із застосуванням градієнтних методів оптимізації по функції мети (7) характеризується їх слабкою збіжністю. Аналіз системи (1) виявив, що наслідками цього є виродження задачі в некоректну через неспостережуваність змінної $X(t)$ та відсутність обмежень на коефіцієнти $A_1 \div A_7$, які повинні бути додатними згідно природи явища, а також значна залежність збіжності методів оптимізації від початкового наближення значень параметрів системи (1).

Для усунення некоректності задачі враховано, що в промислових умовах можна отримати наближену експериментальну оцінку X_{real}^* максимального значення концентрації мікроорганізмів $X(t)$. На цій основі функцію мети (7) доповнено регуляризуючим доданком $F_2(\vec{P}) = [X_{sim}^*(\vec{P}) - X_{real}^*]^2$, тобто квадратом різниці між експериментальною X_{real}^* та модельною $X_{sim}^*(\vec{P})$ оцінками максимальної концентрації мікроорганізмів

$$F_1(\vec{P}) + \alpha F_2(\vec{P}) \xrightarrow{\vec{P}} \min, \quad (8)$$

де $X_{sim}^*(\vec{P}) = \sup_{t \in [0, t_{max}]} X(t)$ при встановленні параметрів системи (1) відповідно до вектора

$\vec{P} = (A_1 \ A_2 \ \dots \ A_7)^T$, α — регуляризуючий параметр.

Невід'ємність параметрів (1) забезпечується методом дзеркального відображення їхніх від'ємних оцінок у додатні в процедурі обчислення функції мети $A_i = |P_i|$, $i = \overline{1, 7}$, де P_i — обчислена алгоритмом ідентифікації оцінка коефіцієнта A_i .

Щоб подолати проблему сильної залежності якості ідентифікації від початкового наближення розроблено метод наближення значень параметрів. Він базується

на допущеннях, отриманих внаслідок аналізу типових траєкторій змінних системи (1). Якщо на момент часу $t = t^*$ концентрація мікроорганізмів дорівнює максимальній $X(t^*) = X^*$, $X'(t^*) = 0$, то на момент часу $t = 0.5t^*$ концентрація мікроорганізмів близька до половини від максимальної $X(0.5t^*) = 0.5X^*$. До моменту $t = t^*$ споживається приблизно половину активних вуглеводів субстрату $S(t^*) = 0.5S_0$, а на момент $t = 0.5t^*$ споживається 1/4 активних вуглеводів субстрату $S(0.5t^*) = 0.75S_0$. Користуючись різницеvими співвідношеннями за експериментальними даними можна наближено оцінити значення похідних концентрації субстрату і мікроорганізмів в час $t = t^*$ та $t = 0.5t^*$. Експериментальні дослідження показують прямопропорційну залежність між швидкістю споживання субстрату та концентрацією мікроорганізмів, тобто значення коефіцієнта A_4 близьке до нуля. Його зручно нормувати початковою концентрацією субстрату $A_4 = kS_0$, де k — деякий коефіцієнт пропорційності.

З використанням висунутих допущень можна побудувати наближення параметрів для всіх моделей сімейства Моно-Ієрусалимського (1) шляхом підстановки їхніх формул в модельні рівняння. Зокрема для моделі з передавальною функцією Андре-Торо $H_G[S(t), P(t)] = S(t)/[A_5 + P(t)]$, отримаємо наступні формули наближень

$$A_1 = \frac{15X'(0.5t^*)}{8X(0.5t^*)}, \quad A_2 = \frac{2}{3}A_1, \quad A_3 = -\frac{(2k+1)S'(t^*)}{X^*},$$

$$A_4 = kS_0, \quad A_5 = 0.5S_0, \quad A_7 = 0.5. \quad (9)$$

Беручи до уваги те, що задача параметричної ідентифікації зводиться до оптимізаційної задачі високої розмірності (від четвертого до шостого порядку, залежно від виду зворотнього зв'язку $H_G[S(t), P(t)]$ в сімействі моделей (1)) доцільно провести додаткові дослідження, яким чином можна покращити збіжність процедури ідентифікації за рахунок розбиття загальної задачі на послідовність підзадач з меншою розмірністю. В кожній такій підзадачі має проводитись уточнення значень невеликої групи параметрів, а результат однієї підзадачі подається як початкове наближення при розв'язку наступної. Множину підзадач, на які розбивається основна задача ідентифікації називатимемо схемою параметричної ідентифікації.

При обчисленні наближень коефіцієнтів A_1 та A_2 використовуються приблизні гіпотези про динаміку неспостережуваної траєкторії концентрації мікроорганізмів $X(t)$, що полягають в оцінках X^* , $X(0.5t^*)$ та $X'(0.5t^*)$. Для оцінювання коефіцієнтів A_3 і A_4 використано точніші співвідношення на основі спостереженої траєкторії концентрації субстрату $S(t)$. Тому висловлено припущення, що ефективною буде та схема ідентифікації, де в першу чергу уточнюються саме коефіцієнти A_1 та A_2 .

Описані методи параметричної ідентифікації дозволили розробити метод структурної ідентифікації моделей систем з керованим зворотнім зв'язком, які використовуються при моделюванні технологічних процесів виноробного бродіння. З його допомогою отримуються структурно-стійкі моделі, максимальна відносна похибка ідентифікації яких не перевищує 5 % при найвірогідніших оцінках параметрів моделі, що відповідає порядку похибки вимірювань для значень керованого зворотнього зв'язку в діапазоні $P_0 \in [0, 85.9]$, див. рис. 1.

Ідентифіковані параметри автономних моделей виступають початковим набли-

женням для задач параметричної ідентифікації сімейства термодерованих моделей. Постановка останніх записується аналогічно до задач ідентифікації автономних моделей (7–8). Проте вектор параметрів \bar{P} замість стаціонарних коефіцієнтів A_1, A_2, \dots, A_7 містить коефіцієнти нестационарних функцій Арреніуса $\bar{P} = (C_1 \ E_1 \ C_2 \ E_2 \ \dots \ C_7 \ E_7)^T$.

Процедура вимірювання коефіцієнтів енергії активації E_i передбачає складні лабораторні дослідження для ряду ізотермічних режимів. Тому в даній роботі використано значення енергії активації з літературних джерел (Andres-Toro, 1998; Carrillo-Ureta, 2001).

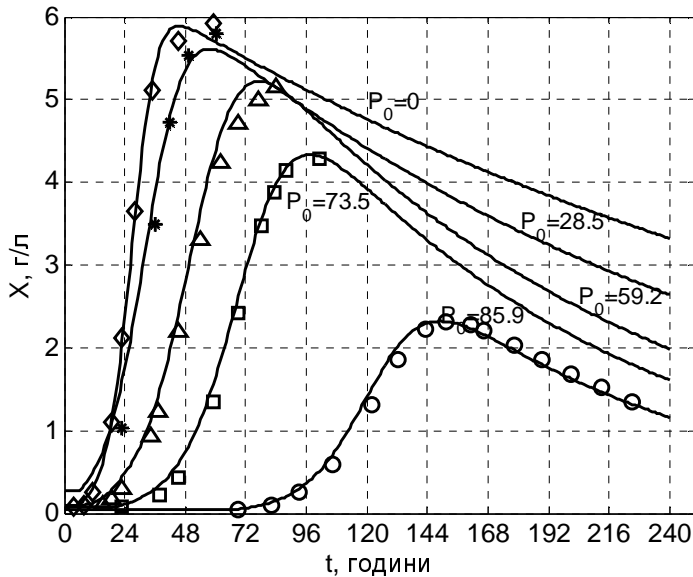


Рис. 1. Моделювання динаміки траєкторій $X(t)$ для $A_2\{P_{\min}\}=0.003$

Початкові наближення значень коефіцієнтів обчислюються на основі результатів параметричної ідентифікації автономної системи (1) та представлення коефіцієнтів загальної моделі у вигляді функцій Арреніуса за формулою $C_i = \ln A_i - E_i/T^*$, $i = \overline{1,7}$, де A_i — значення i -того ідентифікованого коефіцієнту автономної системи, T^* — значення характерної температури реакції, що оцінювалося рядом альтернативних підходів: за простим середнім, максимуму та

мінімуму по температурному профілю процесу.

В третьому розділі розроблено адаптивну нечітку модель для прогнозування динаміки процесів в системах Моно-Іерусалимського з періодичним режимом із врахуванням їхньої невизначеності. Модель базується на агрегаті ідентифікованих термодерованих систем Моно-Іерусалимського.

Розглянемо вплив невизначеності на перебіг процесів в системах Моно-Іерусалимського. На рис. 2 представлено спостережену множину траєкторій змінної стану $S(t)$ для ряду процесів, що відбувалися при однакових значеннях контрольованих параметрів. Видно суттєве розходження значень змінної $S(t)$ в процесі до 49.09 % відносно її

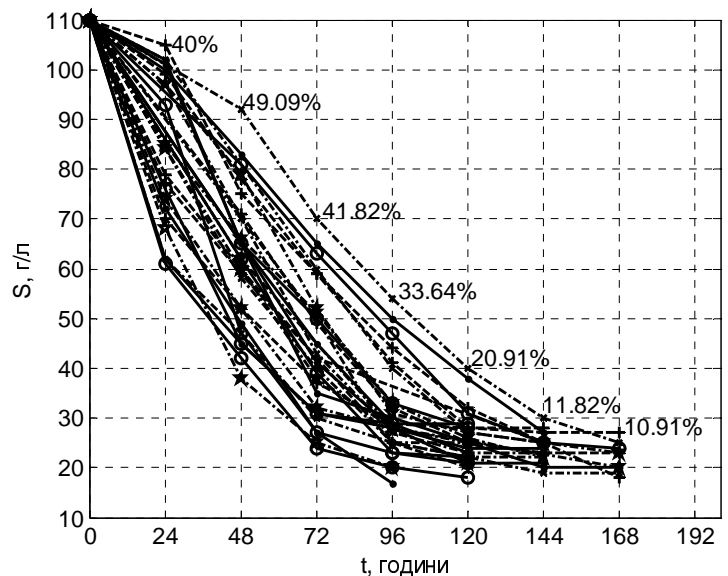


Рис. 2. Спостережена множина траєкторій змінної $S(t)$

початкового значення. Слід також відзначити сильну відмінність в формі траєкторій. Частина з них, що мають спільний початок, в другій половині процесу розходяться, а ті, що мали відмінну динаміку на початку, до другої половини процесу сходяться. Тобто співпадіння траєкторій в окремих точках не свідчить про їхню еквівалентність протягом всього процесу. Подібні спостереження за невизначеністю процесу наведено в [Trelea I. C., 2002; Kobayashi M., 2005].

Роботу [Trelea I. C., 2002] присвячено моделюванню траєкторій концентрації немонотонного побічного продукту P_{BN} під дією динамічних температурних профілів з врахуванням описаної невизначеності. При побудові цієї моделі Trelea виявив, що один з параметрів моделі у більшій мірі варіюється від процесу до процесу у порівнянні з іншими. На основі цього він постулює, що невизначеність присутня лише в цьому особливо варіативному параметрі, тоді як решта параметрів моделі покладаються інваріантними до реалізації процесу. Оцінки моделі будуються у вигляді довірчих інтервалів прогнозованої траєкторії концентрації немонотонного продукту, на основі допущень про нормальний розподіл згаданого параметра. Межі довірчого інтервалу звужуються в ході процесу шляхом адаптивного уточнення цього параметра в міру нагромадження спостережень динаміки P_{BN} . Недолік даного підходу полягає в тому, що він досліджує вплив невизначеності на значення лише одного параметру моделі і оцінки лише одного побічного продукту P_{BN} , ніяк не враховуючи її вплив на інші змінні стану і параметри системи Моно-Ієрусалимського.

В [Kobayashi M., 2005] джерела невизначеності описано повніше, проте, подібно до згаданих раніше робіт Andrés-Toro, в запропонованій там математичній моделі їхній вплив на динаміку процесу зовсім не досліджується. Kobayashi вважає, що основними джерелами невизначеності виступають неоднорідність субстрату та номер генерації системи мікроорганізмів (кількість циклів їхнього використання).

В дисертаційному дослідженні розроблено нову математичну модель процесу, котра володіє, подібно до моделі Trelea адаптивними властивостями і враховує невизначеність, спричинену неоднорідністю субстрату та складною поведінкою систем мікроорганізмів у всіх змінних стану системи. Слід відзначити, що адаптивність розробленої моделі не однопараметрична, як у Trelea, а багатопараметрична, тобто при надходженні нових спостережень динаміки процесу у звуженні інтервалу прогнозування приймає участь не один, а всі параметри моделі.

Розроблена модель базується на наступному основному допущенні: існує певний період стабілізації процесу $t \in [0, t_{stable}]$, протягом якого процес ще не цілком встановився і володіє більшою мірою невизначеності у порівнянні з ділянкою $t > t_{stable}$, де сукупність траєкторій процесу починає розмежовуватися на групи пучків, що коливаються в околі певних інтервалів. Останні називатимемо інтервалами неусувної невизначеності. Їхня ширина звужується поблизу найвірогідніших траєкторій і розширюється при віддаленні від них.

Прогнозні оцінки із спостережним рівнем невизначеності занадто розмиті (неточні), що утруднює задачу синтезу управління процесом з мінімальними побічними продуктами. Цих труднощів можна уникнути використовуючи адаптивні нечіткі моделі, інтервал невизначеності яких був би близьким до неусувного. Використання нечітких функцій обумовлено обмеженістю обсягів статистичної інформації щодо перебігів однотипних технологічних процесів внаслідок їх постійних удосконалень

та значної тривалості. Цих обсягів достатньо лише для моделювання траєкторій із спостереженим інтервалом невизначеності, без врахування їхньої адаптації.

Статистичний аналіз спостереженої множини траєкторій показав, що їхня динаміка в кожен момент часу процесу може бути описана функцією розподілу із трикутною густиною. З цього випливає, що густини функцій розподілу в інтервалах неусувної невизначеності також повинні бути трикутними. Тому для моделювання нечітких адаптивних траєкторій використано трикутні функції належності.

Процес адаптації траєкторій розпочинається після завершення періоду стабілізації при $t > t_{stable}$ на основі так званого прогнозного агрегату, що моделює неусувну невизначеність процесу. Потужність агрегату обмежена знизу мінімальною кількістю траєкторій $M(N_{traj})$, де N_{traj} — потужність їх спостереженої множини. Така структура агрегату моделює залежність ширини інтервалу неусувної невизначеності від вірогідності траєкторії поточної реалізації процесу (надалі поточної траєкторії).

Прогнозний агрегат будується шляхом параметричної ідентифікації термодерованих моделей (5), (6) по точкових траєкторіях змінної стану $S(t)$ всіх спостережуваних раніше технологічних процесів за допомогою розробленого в дисертації методу параметричної ідентифікації частково спостережуваних систем.

Агрегат формується так щоб, його найвірогідніше значення найменше відхилилося від поточної траєкторії. Якщо між поточним значенням та найвірогіднішим не проходить жодної траєкторії агрегату, то залишаємо в ньому не менше $M(N_{traj})$ траєкторій. При цьому повинне зберігатися центральне розташування найвірогіднішої траєкторії відносно поточної. На рис. 3, порівняно прогнози моделей без та з адаптацією, де зірочками позначено поточну траєкторію, пунктирними кривими зображено найвірогіднішу траєкторію $S_{агрег.}^{середнє}$ (тонкий пунктир) та інтервали прогнозування $[S_{агрег.}^-, S_{агрег.}^+]$ (товстий пунктир) моделі без адаптації, а відповідними суцільними кривими найвірогіднішу траєкторію $S_{адапт.}^{середнє}$ та інтервал прогнозування $[S_{адапт.}^-, S_{адапт.}^+]$ адаптивної моделі.

Якщо поточне значення є більшим (меншим) від найвірогіднішого, так, що між

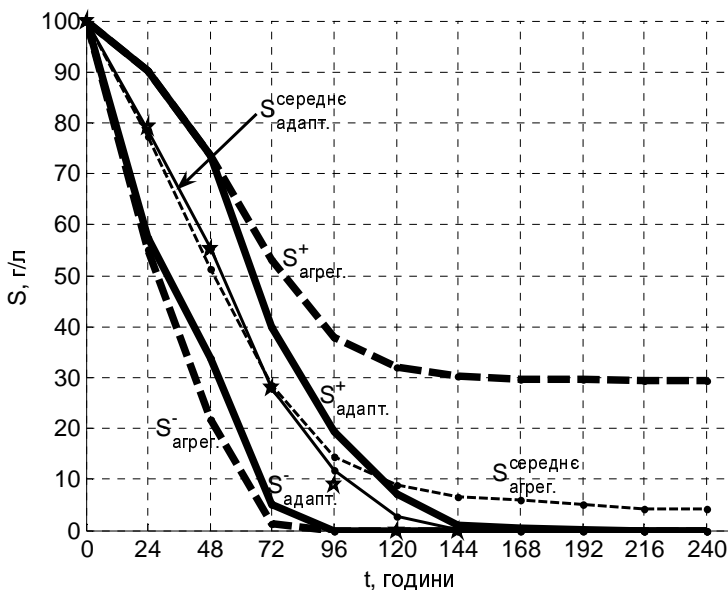


Рис. 3. Прогнозування типової реалізації процесу

ними проходить одна або кілька траєкторій агрегату, то вилучаємо з останнього необхідну кількість найвіддаленіших траєкторій. При цьому між новою найвірогіднішою та поточною траєкторіями не повинні проходити траєкторії агрегату.

Коли поточні значення виходять за межі множини спостережених, то будується додатковий агрегат на період цього виходу. Найвірогідніша траєкторія агрегату формується на основі граничної траєкторії спостереженої множини. Межа агрегату для траєкторій, що виходять за спостережену

множину утворюється шляхом симетричного проектування спостереженої межі агрегату відносно найвірогіднішої траєкторії. При поверненні траєкторії в спостережену множину відновлюється агрегат, сформований на останньому дискреті, що передував виходу. Цей випадок проілюстровано на рис. 4, де процес спочатку вийшов за межі спостереженої множини, а потім повернувся в неї. Відзначимо, що мінімальна потужність може зменшуватись лише у випадку, якщо прогнозовані кінцеві значення деяких траєкторій агрегату більші ніж поточне значення, оскільки такий прогноз суперечив би монотонності спадання величини $S(t)$.

З використанням описаних вище принципів адаптивного прогнозування побудовано адаптивну нечітку модель, що дозволяє враховувати невизначеності змінних стану процесу $X(t)$, $S(t)$, $P(t)$, $P_{BM}(t)$, $P_{BN}(t)$ у вигляді нечітких оцінок під дією довільних температурних управлінь \vec{T} .

Розглянемо підхід до розв'язання задачі (2–6) в умовах невизначеності за допомогою описаної адаптивної моделі. Для обробки нечітких оцінок, сформованих з її використанням, в процедурі розв'язку даної задачі досліджено два методи: метод Белмана-Заде, що полягає у комбінуванні обмежень та критеріїв та метод дефазифікації, тобто приведення нечітких оцінок в точкові. Застосовуючи ці методи одержуємо багатокритеріальні оптимізаційні задачі, які, подібно до задачі (2–6) характеризуються багатьма локальними екстремумами, тому для їх розв'язання застосовано багатокритеріальний генетичний алгоритм. З метою його застосування необхідно звести екстремальну задачу з обмеженнями до задачі без обмежень. Для цього введемо константу бажаного рівня основного продукту P^* , і обчислюватимемо штрафну функцію відхилення між нею та очікуваною оцінкою інтенсивності основного продукту $f_3 = |\hat{P}(\vec{T}, t_{\max}) - P^*|$, де $\hat{P}(\vec{T}, t_{\max})$ — очікувана оцінка. Щоб контролювати рівень невизначеності введемо додатковий критерій $f_4 = P^+(\vec{T}, t_{\max}) - P^-(\vec{T}, t_{\max})$, де $P^+(\vec{T}, t_{\max})$, $P^-(\vec{T}, t_{\max})$ — верхня та нижня межі нечіткої оцінки очікуваної інтенсивності основного продукту. Оцінки очікуваних інтенсивностей немонотонного $\hat{P}_{BN}(\vec{T}, t_{\max})$ і монотонного $\hat{P}_{BM}(\vec{T}, t_{\max})$ побічних продуктів позначимо f_1 та f_2 , відповідно.

В результаті роботи генетичного алгоритму отримується множина Парето-оптимальних розв'язків, що налічує сотні елементів. Необхідно вибрати ті з них, які дозволяють найефективніше розв'язати екстремальну задачу в конкретному випадку. Для виконання цього завдання побудовано спеціальну процедуру, що полягає у нормуванні чотирирівимірного метричного простору можливих значень функцій мети

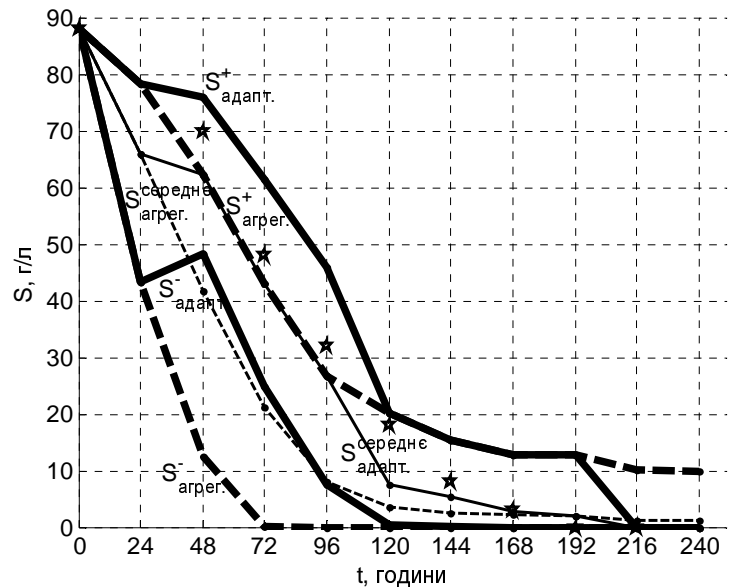


Рис. 4. Прогнозування атипової реалізації процесу

Парето-оптимальних розв'язків $\vec{F} = (f_1, f_2, f_3, f_4) \in R^4$ задачі, $\|\vec{F}\|_{\beta} = \sqrt{(f_1 \xi_1)^2 + (f_2 \xi_2)^2 + (f_3 \xi_3)^2 + (f_4 \xi_4)^2}$. Найкращим розв'язком вважається той, норма якого мінімальна. Ваги метрики $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ дозволяють врахувати як об'єктивні характеристики розхилу значень функцій мети, так і набір заданих користувачем відносних пріоритетів. Критерії, що можуть досягти 0 нормуються своїм значенням, а ті, що не досягають нуля — діапазоном можливих значень: $\xi_j = \beta_j / (\max_{R^4} f_j - \min_{R^4} f_j)$, $\xi_3 = \beta_3 / \max_{R^4} f_3$, де $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \geq 0$ — коефіцієнти відносної важливості відповідних функцій мети.

В четвертому розділі запропоновані математичні моделі та методи апробовано на технологічних процесах броварної і виноробної промисловостей. Наведено результати параметричної ідентифікації сімейства автономних і термокерованих моделей по теоретичних і виробничих траєкторіях в умовах неповної спостережуваності. Досліджено чисельні результати моделювання процесів броварного бродіння з використанням адаптивної нечіткої моделі, а також результати синтезу управління процесами з мінімальними концентраціями побічних продуктів. Описано програмний комплекс для отримання згаданих чисельних результатів.

Дослідження запропонованого методу параметричної ідентифікації частково спостережуваних систем проведено за даними як модельних, так і виробничих процесів. При проведенні ідентифікації по траєкторіях субстрату $S(t)$ модельних процесів істинні значення параметрів, по яких будуються траєкторії модельних задач і траєкторії концентрації мікроорганізмів $X(t)$ вважаються невідомими.

Для виявлення оптимальної процедури параметричної ідентифікації проведено дослідження збіжності трьох градієнтних оптимізаційних алгоритмів: Левенберга-Маркварта, Бroyдена-Флетчера та Нелдера-Міда від двох початкових наближень: одиничного та згенерованого запропонованим методом початкового оцінювання значень параметрів. Збіжність оптимізаційних алгоритмів оцінювалася за значеннями максимальних та середньоквадратичних похибок по траєкторіях $X(t)$ та $S(t)$.

Чисельні експерименти показали, що від одиничного наближення жоден з трьох досліджуваних оптимізаційних алгоритмів не збігається до істинного розв'язку задачі. В той же час ті самі алгоритми забезпечують повну збіжність до істинного розв'язку при застосуванні початкового наближення (9), що підтверджує його ефективність. Всі досліджувані моделі сімейства (1) забезпечили практично однакову точність, тому за критерієм простоти представлення для подальших досліджень слід рекомендувати модель на основі передавальної функції Андре-Торо $H_G[S(t), P(t)] = S(t) / [A_5 + P(t)]$.

Порівняння ефективності оптимізаційних методів засвідчило, що алгоритм Левенберга-Маркварта характеризується найменшими похибками ідентифікації. Крім того, у порівнянні з іншими двома алгоритмами, він вимагає меншу кількість обчислень функції мети. Порівнюючи між собою максимальні похибки ідентифікації $X_{\max.err.}$ по траєкторії концентрації мікроорганізмів $X(t)$, максимальні $S_{\max.err.}$ та середньоквадратичні $S_{std.err.}$ по траєкторії концентрації субстрату $S(t)$ при використанні різних значень регуляризуючого параметра α в (8), які наведено для типової реалізації траєкторій виробничого процесу в табл. 1, можна зробити висновок, що зна-

чення $\alpha \in \{0.01; 0.10; 1.00\}$ замалі, а значення $\alpha = 1000$ — завелике, оскільки призводять до зростання похибок $S_{\max.\text{err.}}$, $S_{\text{std.err.}}$, а також до деякого збільшення похибки $X_{\max.\text{err.}}$. Найкращі результати спостерігаються для значень $\alpha = 10$ та $\alpha = 100$, однак менші похибки досягаються при $\alpha = 10$, що приблизно дорівнює кількості експериментальних вимірів $\alpha \approx N \approx 10$.

Дослідження схем розбиття загальної задачі ідентифікації на послідовність підзадач з меншою розмірністю виявили, що найкраща збіжність до істинного розв'язку досягається при використанні однієї з двох схем ідентифікації: уточнення одразу всіх модельних коефіцієнтів A_1, A_2, \dots, A_7 або уточнення в три етапи — на першому уточнювати значення коефіцієнтів A_1 та A_2 , на другому етапі уточнювати значення коефіцієнтів A_3 і A_4 , а на останньому, третьому етапі — додатково уточнювати значення всіх модельних коефіцієнтів A_1, A_2, \dots, A_7 .

Таблиця 1

Вплив регуляризуючого параметра α на ідентифікацію параметрів моделі (1)

α	$X_{\max.\text{err.}}$	$S_{\max.\text{err.}}$	$S_{\text{std.err.}}$	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
0.01	1.609	2.180	1.220	0.033	0.033	0.158	1.097	55.000
0.10	1.400	2.057	1.233	0.033	0.033	0.153	1.097	55.000
1.00	0.025	2.507	1.318	0.038	0.037	0.129	1.097	55.000
10.00	0.000	2.526	1.316	0.038	0.037	0.128	1.098	54.999
100.00	0.000	2.578	1.329	0.038	0.037	0.128	1.096	55.000
1000.00	0.036	13.466	6.817	0.047	0.053	0.117	1.098	55.000

Застосування будь-яких інших схем ідентифікації, зокрема двоетапних, призводить до гіршої збіжності. Це підтвердило справедливність висловленого припущення про ефективність схеми ідентифікації, проте поставило нову проблему, що полягає у виборі виду схем для ідентифікації того чи іншого процесу.

Для регуляризації процедури вибору схеми проведено додаткові чисельні експерименти ідентифікації модельних траєкторій проміжних ізотермічних режимів. На основі аналізу отриманих результатів зроблено висновок, що друга схема ефективніша від першої у випадку, коли відношення максимальної концентрації мікроорганізмів X^* до початкової X_0 перевищує 2.000: $X^* / X_0 > 2.000$. Коли це відношення знаходиться в діапазоні $1.600 \leq X^* / X_0 \leq 2.000$, то схеми 1 та 2 дають однакову збіжність. А при $X^* / X_0 < 1.600$ ефективніше користуватися першою, простою схемою, оскільки вона менш затратна щодо тривалості обчислень

$$\begin{cases} \text{схема 1: } A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, & \text{якщо } X^* / X_0 \leq 2.000, \\ \text{схема 2: } A_1, A_2 \rightarrow A_3, A_4 \rightarrow A_1, A_2, \dots, A_7, & \text{якщо } X^* / X_0 > 2.000. \end{cases} \quad (10)$$

На рис. 5 наведено графік ідентифікації динаміки неспостережуваної змінної концентрації мікроорганізмів $X(t)$ по модельній траєкторії $S(t)$ для ізотермічного режиму 11 °С. Горизонтальною пунктирною лінією показано оцінку її максимального значення $X_{\text{real}}^* = 2.700$, яке не співпадає з істинним значенням 2.662, що помічене стрілочкою. Це наближає модельні експерименти до промислових умов, де отримання точної оцінки X^* утруднене. Дрібним пунктиром зображено траєкторію початкового наближення. Ідентифікована за другою схемою траєкторія повністю збігається з модельною траєкторією $X(t)$, яку наведено суцільною лінією, що відпо-

відає збіжності з істинним розв'язком задачі. Траєкторія ідентифікована за першою схемою, що відображена на рис. 5 лінією “крапка-пунктир” суттєво розходиться з модельною траєкторією. Це доводить ефективність застосування другої схеми при ідентифікації в даному випадку ($X^* / X_0 = 2.700 \cdot 1.000 > 2.000$). Для решти модельних задач ідентифікації одержано аналогічні за точністю результати.

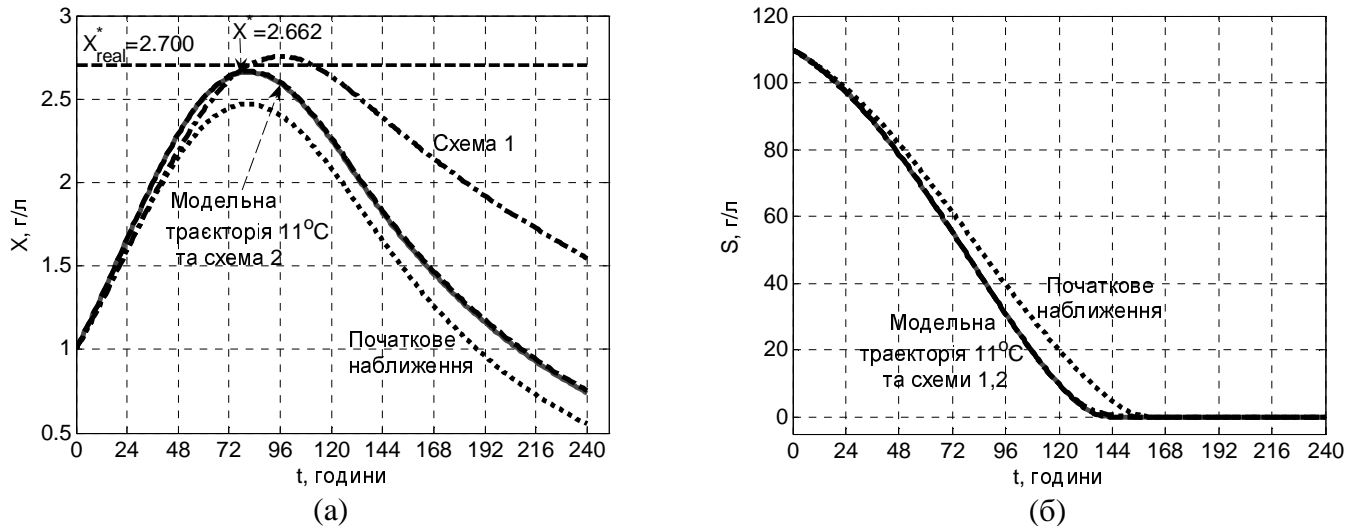


Рис. 5. Результат ідентифікації динаміки $X(t)$ (а) та $S(t)$ (б) по модельній траєкторії при 11°C

Дослідження результатів параметричної ідентифікації термодерованих моделей виду (1) показали, що процедура ідентифікації збігається до істинного розв'язку для всіх виробничих і модельних траєкторій при застосуванні початкових наближень, обчислених по ідентифікованих параметрах автономних систем із встановленням оцінки характерної температури T^* в максимальне значення температурного профілю $T^* = \sup T(t) | t \in [0, t_{\max}]$, що проілюстровано на рис. 6.

Чисельні експерименти із адаптивною нечіткою моделлю проведено на спостереженнях 30 реалізацій промислових процесів броварного бродіння при різних температурних режимах. Отримані результати свідчать, що розроблена

адаптивна модель дозволила звужити підсумкові прогностні інтервали до п'яти з половиною разів відносно моделі без адаптації на початку процесу, в час $t \in [0, 48]$. На ділянці $t \in [48, 96]$ звуження коридору досягає в середньому 2.82 разів. А найсуттєвіше звуження спостерігається в кінці процесу при $t \geq 144$ за рахунок відкидання нереалізованих траєкторій агрегату.

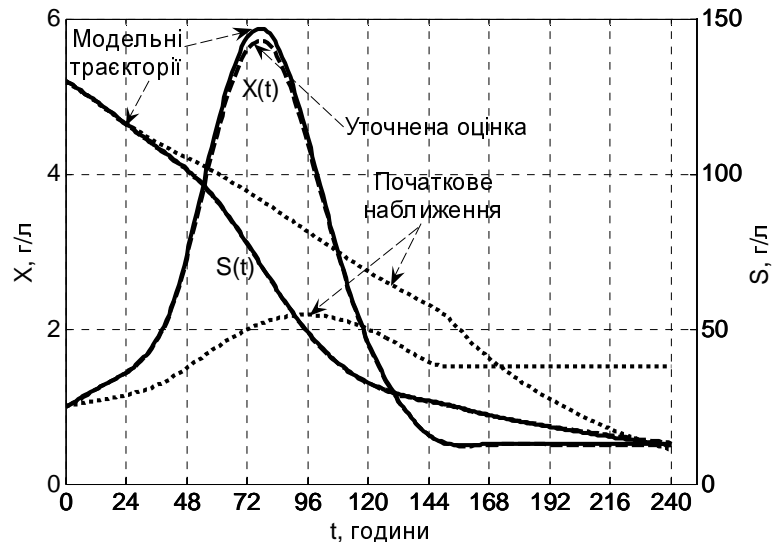


Рис. 6. Результат ідентифікації термодерованої системи по модельній траєкторії

Метод синтезу управління процесом з мінімальними побічними продуктами апробовано на технологічному процесі броварного бродіння, де немонотонним побічним продуктом виступає діацетил, а монотонним — етилацетат. Генетичний алгоритм (ГА), що є частиною згаданого методу, згенерував Парето-множину з 200 рівноцінних розв'язків. Для опрацювання даної множини застосовано описану процедуру її нормування.

В табл. 2, наведено оцінки значень концентрації основного і побічних продуктів при використанні емпіричного та згенерованого ГА режимів. Функції мети f_1 та f_2 описують концентрації побічних продуктів броварного бродіння: діацетилю та етилацетату. Функція мети f_3 характеризує відхилення очікуваного значення інтенсивності основного продукту — етанолу — від бажаного рівня. Функція мети f_4 описує ширину коридору невизначеності інтенсивності основного продукту. Кожна комірка таблиці складається з тріади дефазифікованих оцінок відповідного продукту: за нижньою межею по функції належності, за центром ваги та за верхньою межею по функції належності. В стовпчику “ k ” наведено індекси відповідних розв'язків в Парето-множині.

Таблиця 3 ілюструє величини відносного виграшу від використання режимів, згенерованих ГА у порівнянні з емпіричним режимом. Додатні значення проценту означають покращення у порівнянні з емпіричним режимом проведення процесу. Від'ємні значення означають погіршення по тому чи іншому критерію. Чим більше абсолютне значення проценту тим відповідний розв'язок в більшій мірі виграє чи програє емпіричному режиму.

Таблиця 2

Абсолютні значення функцій мети

Температурний профіль	$f_1 = \hat{P}_{BN}$	$f_2 = \hat{P}_{BM}$	$f_3 = \hat{P} - P^* $	$f_4 = P^+ - P^-$	\hat{P}	k
Емпіричний	[0.025; 0.064; 0.124]	[3.356; 3.710; 3.955]	[3.869; 8.744; 12.000]	8.131	[46.869; 51.744; 55.000]	—
$\vec{\beta}^0 = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0]$	[0.025; 0.049; 0.090]	[3.111; 3.903; 4.579]	[1.906; 7.837; 12.000]	10.094	[44.906; 50.837; 55.000]	41
$\vec{\beta} = [1.0, 1.5, 1.0, 1.5]$	[0.025; 0.061; 0.105]	[2.733; 3.299; 3.867]	[3.348; 8.780; 12.000]	8.652	[46.348; 51.780; 55.000]	57
$\vec{\beta} = [1.0, 1.5, 1.0, 2.3]$	[0.025; 0.072; 0.135]	[2.818; 3.102; 3.371]	[5.881; 9.742; 12.000]	6.119	[48.881; 52.742; 55.000]	140

В стовпчику “ $\sum_{i=1}^4 \Delta f_i, \%$ ” наведено значення узагальнених характеристик виграшу побудованих генетичним алгоритмом режимів відносно емпіричного режиму, що дорівнюють сумі виграшів по всіх функціях мети, причому перше значення тріади дорівнює оптимістичній оцінці, оскільки відповідає “найсприятливішій” можливій реалізації з мінімальними інтенсивностями побічних продуктів і мінімальною різницею з бажаним рівнем основного продукту; друге значення тріади відповідає оцінці максимальної вірогідності, відповідаючи реалізації з найвірогіднішими оцінками інтенсивностей продуктів; третє значення тріади дорівнює оцінці мінімального ризику, оскільки відповідає “найгіршій” можливій реалізації з найбільшою інтенсивністю

вністю побічних продуктів. Ця узагальнена характеристика не бере безпосередньої участі в процедурі вибору оптимального розв'язку, але може бути використана як підсумкова характеристика якості побудованого управління.

Видно, що процедура вибору прийнятного розв'язку без встановлення спеціальних значень вектора коефіцієнтів відносної важливості, коли він дорівнює одиничному вектору: $\vec{\beta} = \vec{\beta}^0 = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0]$, повертає розв'язок, що суттєво покращує показник по функції f_1 до 27.8 % (по верхній межі нечіткої оцінки), проте погіршує показники по функціях f_2 та f_4 . Щоб знайти розв'язок, який менше програє по цих функціях, для них було встановлено вищі значення коефіцієнтів відносної важливості у векторі $\vec{\beta}$. Це дозволило отримати розв'язок, що виграє порівняно з емпіричним режимом, несуттєво збільшуючи ширину коридору невизначеності до 6.4 %, але покращуючи значення по функціях f_1 та f_2 до 15.3 % та 2.2 % по верхній межі нечіткої оцінки та 4.9 %, 11.0 % по оцінці, дефазифікованій за центром ваги.

Спроба додатково зменшити невизначеність шляхом наступного збільшення ваги на функцію f_4 призвела до погіршення в оцінці f_1 немонотонного побічного продукту (діацетилу). Тому найприйнятнішим є другий розв'язок ($k=57$), який забезпечує підвищення узагальненої характеристики при мінімальному ризику (при найбільших можливих інтенсивностях побічних продуктів) на 11 %, див. третє значення в стовпчику $\sum_{i=1}^4 \Delta f_i, \%$ для $k=57$ (виділено жирним) в табл. 3.

Таблиця 3

Покращення значень функцій мети відносно емпіричного режиму

Температурний профіль	$\Delta f_1, \%$	$\Delta f_2, \%$	$\Delta f_3, \%$	$\Delta f_4, \%$	$\sum_{i=1}^4 \Delta f_i, \%$	k
$\vec{\beta}^0 = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0]$	[0.858; 23.385; 27.853]	[7.298; -5.209; -15.801]	[50.726; 10.366; 0.000]	-24.134	[34.748; 4.407; -12.082]	41
$\vec{\beta} = [1.0, 1.5, 1.0, 1.5]$	[0.208; 4.920; 15.331]	[18.571; 11.077; 2.205]	[13.469; -0.413; 0.000]	-6.408	[25.840; 9.175; 11.129]	57
$\vec{\beta} = [1.0, 1.5, 1.0, 2.3]$	[-1.000; -12.131; -8.728]	[16.037; 16.367; 14.765]	[-52.021; -11.415; 0.000]	24.750	[-12.234; 17.571; 30.787]	140

У додатках наведено форми функцій належності сукупності виробничих траєкторій, алгоритм аналізу атипових реалізацій процесу, екранну форму програмного комплексу для ідентифікації точкових та агрегатної моделей, результати модельних задач параметричної ідентифікації автономних систем та впливу регуляризуючого параметра α , тексти модулів, що є частиною програмного комплексу ідентифікації, а також подано документи, що підтверджують впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача моделювання динаміки технологічних процесів в хіміко-технологічних системах Моно-Ієрусалимського з врахуванням впливу невизначеності на її змінні стану. При цьому отримано такі наукові та практичні результати:

1. Розроблено методи параметричної ідентифікації точкових моделей частково

спостережуваних автономних систем, що дозволили досягти збіжності процедури ідентифікації до істинного розв'язку для всієї сукупності аналізованих модельних та виробничих траєкторій, а також розробити стійкий метод структурної ідентифікації моделей систем з керованим зворотнім зв'язком.

2. Розроблено метод параметричної ідентифікації сімейства термokerованих моделей з неспостережуваною змінною стану концентрації мікроорганізмів на основі результатів ідентифікації їхніх автономних аналогів. Цей метод збігається до істинного розв'язку на модельних задачах, а порядок значень параметрів, ідентифікованих по виробничих траєкторіях, збігається з даними, наведеними в літературі, що свідчить про їхню адекватність до фізичної природи явища.

3. Розроблено адаптивну модель нечітких процесів в термokerованих хіміко-технологічних системах, що дозволяє звузити прогнозні інтервали на початку процесу в середньому до п'яти з половиною разів відносно моделі без адаптації при прогнозуванні динаміки технологічних процесів броварного бродіння.

4. Розроблено метод синтезу управління хіміко-технологічним процесом з мінімальними інтенсивностями побічних продуктів при забезпеченні бажаної інтенсивності основного продукту. Метод побудовано на основі вищезгаданої адаптивної моделі та генетичному алгоритмі і на відміну від існуючих, він враховує невизначеності оцінок як основного, так і побічних продуктів.

5. Розроблено метод нормування множини Парето-оптимальних розв'язків задачі синтезу управління. Він враховує як об'єктивні особливості розхилу значень критеріїв задачі так і задані користувачем відносні пріоритети. Його використання дозволило знайти оптимальні умови проведення технологічного процесу броварного бродіння, що забезпечує зменшення концентрації немонотонного побічного продукту (діацетилу) на 4.9 %, а монотонного (етилацетату) на 11.0 %.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пасічник Р. М. Ідентифікація моделі броварного бродіння в умовах невизначеності / Р. М. Пасічник, Ю. Р. Піговський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — Вінниця, 2007. — № 1. — С. 10–15.
2. Пасічник Р. М. Адаптивна модель динаміки систем мікроорганізмів в умовах невизначеності / Р. М. Пасічник, Ю. Р. Піговський // Вісник Хмельницького національного університету. — Хмельницький, 2007. — Т. 1: Технічні науки, № 2. — С. 36–40.
3. Пасічник Р. М. Моделювання термokerованих систем Моно-Ієрусалимського з мінімальними побічними виходами в умовах невизначеності / Р. М. Пасічник, Ю. Р. Піговський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — Вінниця, 2008. — № 1 (11). — С. 69–75.
4. Пасічник Р. М. Ідентифікація системи Моно-Ієрусалимського з керованим зворотнім зв'язком / Р. М. Пасічник, Ю. Р. Піговський // Комп'ютинг. — 2008. — Т. 7, Вип. 1. — С. 146–152.
5. Пасічник Р. М. Вдосконалена система керування багатозонними термоагрегатами / Р. М. Пасічник, В. В. Кочан, Ю. Р. Піговський, М. Й. Дерлиця // Вісник технологічного університету Поділля. — Хмельницький : Хмельницький державний університет, 2004. — Ч. 1, Т. 1: Технічні науки, № 2 — С. 30–33.
6. Пасічник Р. М. Алгоритм управління перехідним процесом завантаження багато-

- зонного термоагрегату / Р. М. Пасічник, В. В. Кочан, Ю. Р. Піговський // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2005. — Т. 10, № 3. — С. 118–126.
7. Pigovsky Y. Model of periodical thermal chemical processes with fuzzy parameters / Y. Pigovsky // Proceedings of the International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET’2006). — Lviv-Slavsko, 2006. — P. 202–204.
 8. Pigovsky Y. An algorithm for minimization of detrimental outputs in low-temperature thermal-controlled processes / Y. Pigovsky // Proceedings of the International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET’2008). — Lviv-Slavsko, 2008. — P. 105–106.
 9. Pasichnyk R. Modeling dynamics of microorganisms systems under uncertainty / R. Pasichnyk, Y. Pigovsky // Proceedings of the IX-th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM’2007)”. — Lviv-Polyana, 2007. — P. 115–119.
 10. Pasichnyk R. Optimization approaches of multizone furnace loading process control / R. Pasichnyk, A. Vande Wouwer, Y. Pigovsky // Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS’2005). — 2005. — P. 370–377.

АНОТАЦІЯ

Піговський Ю.Р. Математичні моделі нечітких процесів в системах Моно-Ієрусалимського та методи їх ідентифікації. – *Рукопис.* Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи. — Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2008.

Робота присвячена розробці адаптивної математичної моделі, що дозволяє враховувати невизначеність перебігу процесів ферментації в хіміко-технологічних системах Моно-Ієрусалимського з періодичним режимом.

В дисертації розроблено методи параметричної ідентифікації сімейства автономних та термokerованих моделей систем Моно-Ієрусалимського, які забезпечують збіжність процедури ідентифікації у випадку неспостережуваності динаміки концентрації мікроорганізмів. З їх допомогою розроблено підхід до синтезу структури моделей систем з керуванням зворотнім зв'язком при неповноті вхідної інформації. Вдосконалено метод агрегату термokerованих точкових моделей для уточнення адаптивних нечітких оцінок, що описують невизначеність динаміки процесів. Вони дозволяють прогнозувати динаміку змінних стану системи під дією довільних температурних управлінь і адаптивно уточнюються в міру нагромадження експериментальних даних. Розроблено метод синтезу управління процесом з мінімальними інтенсивностями побічних продуктів на основі агрегату точкових моделей та генетичного алгоритму, який на відміну від існуючих, враховує невизначеності оцінок як основного, так і побічних продуктів, дозволяє виявляти напрямки покращення технологічних процесів, забезпечуючи зменшення шкідливих домішок броварного бродиння: немонотонного побічного продукту (діацетила) на 4.9 % та монотонного побічного продукту (етилацетату) на 11.0 %, при досягненні необхідного рівня основного продукту (етанолу) в 51.8 г/л.

АННОТАЦИЯ

Пиговский Ю.Р. Математические модели нечетких процессов в системах Моно-Иерусалимского и методы их идентификации. – *Рукопись*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 — математическое моделирование и численные методы. — Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2008.

Работа посвящена разработке адаптивной математической модели, позволяющей учитывать неопределенность в прохождении процессов ферментации в химико-технологических системах Моно-Иерусалимского с периодическим режимом.

В диссертации разработаны методы параметрической идентификации семейства автономных и термоуправляемых моделей систем Моно-Иерусалимского, которые обеспечивают сходимость процедуры идентификации в случае ненаблюдаемости динамики концентрации микроорганизмов. С их помощью разработан подход к синтезу структуры модели систем с управляемой обратной связью при неполноте входной информации. Улучшено метод агрегата термоуправляемых точечных моделей для уточнения адаптивных нечетких оценок, которые описывают неопределенность динамики процессов. Они позволяют прогнозировать динамику переменных состояния системы под действием произвольных температурных управлений и адаптивно уточняются в меру накопления экспериментальных данных. Разработано метод синтеза управления процессом с минимальными интенсивностями побочных продуктов на основе агрегата точечных моделей и генетического алгоритма, который в отличие от существующих, учитывает неопределенности оценок, как основного, так и побочных продуктов, позволяет определять направления улучшения технологических процессов указанного вида, обеспечивая уменьшение вредных примесей пивного брожения: немонотонного побочного продукта (диацетила) на 4.9 % и монотонного побочного продукта (этилацетата) на 11.0 % с достижением необходимого уровня основного продукта (этанола) в 51.8 г/л.

ABSTRACT

Pigovsky Y.R. Mathematical models of fuzzy processes in Monod-Iyerusalimskii systems and methods of their identification. – *Manuscript*. Thesis for a Ph.D (candidate of science) degree by specialty 01.05.02 — mathematical modeling and computing methods. — Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2008.

Dissertation is devoted to development of an adaptive mathematical model, which can be used for modeling fermentation processes dynamics in Monod-Iyerusalimskii systems under uncertainty.

In the present study methods for parametric identification of autonomous and thermal-controlled family Monod-Iyerusalimskii systems are developed. They are applicable for system identification in case of unobservability in dynamics of microorganism concentration. Using these methods an approach for structure synthesis of loopback-controlled system's model under incompleteness of input data is developed. An aggregate method of point-models is improved in order to refine adaptive fuzzy estimates, which takes into account uncertainty in process dynamics. They are applicable to predict process's state variables under every thermal regime and are adaptively refined according to cumulated experimental observations. A method synthesizing control of a process with minimal detrimental subproducts intensities is developed based on the point-models aggregate and a genetic algorithm, which in contrast to existing, takes into consideration uncertainty in estimates of main product as well as subproducts. It gives possibility to detect directions of further improvement in technical processes, and provides minimization of detrimental subproducts in brewing fermentations: nonmonotonous subproduct (diacetyl) to 4.9 % and monotonous subproduct (ethyl-acetate) to 11.0 % achieving necessary level of main product (ethanol) of 51.8 g/L.