

**СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Дослідження присвячені рішенню проблеми побудови ефективних адаптивних систем оптимального керування нестационарними технологічними процесами харчової промисловості.

Робота виконана в плані найважливіших державних задач по розробці теоретичних основ і технічному удосконалюванню складних автоматичних і автоматизованих систем керування технологічними процесами, розробці методів синтезу машинних алгоритмів адаптивних систем оптимального керування нестационарними технологічними об'єктами.

Розв'язок задач технічного переозброєння харчової промисловості України і збільшення виробництва конкурентоспроможної на світовому ринку продукції високої якості агропромисловим комплексом вимагає проведення великого комплексу науково-дослідних робіт у всіх областях харчового виробництва. Це важлива невідкладна державна проблема України як члену Світової організації торгівлі та напередодні вступу України до Європейського союзу.

Харчова промисловість України визначає економічну незалежність держави з великими природними сільськогосподарськими ресурсами та великою кількістю переробних підприємств, загальна виробнича потужність яких значно перевищує внутрішні потреби країни. Це в першу чергу відноситься до цукрових і спиртових заводів. Існує велика кількість різноманітних складових сировини і проміжкових продуктів, які неможливо повністю контролювати в реальному часі і відповідно змінювати необхідні технологічні параметри для отримання якісного продукту.

Цільове призначення роботи складається в рішенні проблеми створення принципово і якісно нових адаптивних систем оптимального керування нестационарними динамічними об'єктами, що працюють у реальному масштабі часу, реалізованих на основі застосування адаптації, ідентифікації, аналізу і прогнозування станів об'єкта керування в параметричному і фазовому просторах, а також керуючих цифрових обчислювальних комплексів, що забезпечують високу якість функціонування в умовах початкової невизначеності, нестационарності, широкого діапазону зміни внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів і неповного вектора виміру фазових координат.

Метою даного дослідження є підвищення якості й ефективності функціонування технологічного устаткування харчових виробництв шляхом розробки оптимальних способів і систем автоматичного управління відповідними нелінійними нестационарними технологічними процесами.

Для досягнення мети даного наукового дослідження розв'язано задачі:

1. підвищення ефективності методів синтезу систем оцінки, аналізу і прогнозування станів нестационарних об'єктів керування в параметричному і фазовому просторі за поточними вимірюваннями координат системи керування;
2. вдосконалення методу синтезу і побудови системи оцінки перехідної матриці станів об'єктів керування для роботи в реальному часі за визначеним критерієм ефективності;
3. розвитку методів синтезу адаптивних систем оптимального керування багатовимірними, лінійними нестационарними технологічними об'єктами з неповним вектором виміру фазових координат з використанням методів синтезу систем параметричної і фазової ідентифікації шляхом підвищення точності математичних моделей, зменшення кількості і спрощення обчислень для збільшення швидкодії адаптивного керування;
4. вдосконалення методу лінеаризації нелінійностей адаптивних систем оптимального керування для підвищення точності і спрощення обчислень;
5. створення математичного і програмного забезпечення адаптивних систем оптимального керування, а також систем оцінки, аналізу і прогнозування станів нестационарних об'єктів керування в параметричному і фазовому просторі в реальному часі, що є основою для побудови складних адаптивних і автоматизованих систем.

Вирішена проблема створення теоретичних основ і методів побудови складних автоматичних і автоматизованих систем оптимального керування багатовимірними, лінійними, нестационарними технологічними об'єктами, реалізованими на основі застосування методів адаптації, ідентифікації, аналізу і прогнозування станів об'єктів керування в параметричному і фазовому просторах.

Основні наукові результати, що відрізняються науковою новизною роботи:

1. Вперше одержано метод синтезу системи оцінювання станів нестационарного об'єкта керування в параметричному і фазовому просторах, що ґрунтується на використанні компенсаційного методу із самонастроювальною моделлю об'єкта керування, що описує вільний і змушений рух і рішення нестационарних диференціальних рівнянь методом варіації параметрів, який припускає спільне використання самонастроювальної моделі вимушеного руху об'єкта керування з рівнобіжним

включенням, а також самонастроювальної моделі рішення однорідного диференціального рівняння, що враховує вільний рух об'єкта, з метою знаходження загального рішення вихідного диференціального рівняння і мінімуму обраного критерію ідентифікації.

2. Удосконалено метод синтезу системи оцінки перехідної матриці стану нестационарного об'єкта керування як однієї з основних динамічних характеристик оптимальної багатовимірної системи, на відміну від існуючих нормальна працездатність якого перевіряється на кожному ітеративному кроці системою самоконтролю.

3. Вперше одержано метод синтезу системи параметричної ідентифікації, який, на відміну від існуючих методів, дає можливість без попередніх перетворень переходити до синтезу оптимального закону керування в термінах простору станів для детермінованих і стохастичних об'єктів. Враховуються початкові умови вектора стану і спрощується процедура синтезу і побудова систем ідентифікації.

4. Дістала подальший розвиток безпошукова адаптивна система ідентифікації нестационарних лінійних об'єктів керування, що знайдена методом градієнта при ітеративному принципі її роботи і являє собою багатоконтурну дискретну нелінійну самонастроювальну систему автоматичного керування з параметричним зворотним зв'язком, отримана математична модель і алгоритм функціонування адаптивної системи ідентифікації нестационарного об'єкта керування, структура якого описується параметричною передатною функцією.

5. Удосконалено метод рішення задачі відновлення повного вектора стану динамічних систем, що описуються звичайними нелінійними диференціальними рівняннями, у якому реалізується схема рішення двоточної крайової задачі визначеного типу і використовується узагальнений алгоритм умовно-оптимальної фільтрації. Знайдене рішення задачі оцінювання повного вектора стану нелінійних систем за результатами спостережень може бути застосоване до широкого кола задач визначення стану динамічних систем при обмеженому складі вимірюваних параметрів.

6. Удосконалено математичний метод Вінера лінеаризації нелінійних систем параметричної ідентифікації адаптивних систем оптимального керування. Знайдені лінійні еквіваленти систем параметричної ідентифікації дозволяють застосовувати відомі класичні методи аналізу стійкості лінійних систем для оцінки запасів стійкого функціонування нелінійних систем параметричної ідентифікації нестационарних об'єктів керування.

7. Удосконалена адаптивна система оптимального керування нестационарним технологічним об'єктом із застосуванням систем оцінювання, аналізу і прогнозування станів об'єкта керування в параметричному і фазовому просторах, що має властивості штучного інтелекту. Система забезпечує програмне відпрацювання задачі адаптивної стабілізації в умовах неповної інформації стосовно стану лінійних нестационарних об'єктів керування. Система, яка реалізована на базі керуючих ЦОМ, за відомими на інтервалі параметрами і їх статистичними властивостями забезпечує ідентифікацію і прогнозування стану, розрахунок і вироблення квазіоптимального керування за швидкодією і витратами машинної пам'яті, що задовольняють обмеженням сучасних ЦОМ.

При огляді літератури й аналізу стану досліджуваної проблеми побудови адаптивних систем керування виділяється з загальної теорії систем один з основних наукових напрямків, зв'язаний з розвитком адаптивних систем, дається їхня класифікація, вказуються основні невирішені задачі даної проблеми як у загальному плані, так і стосовно до конкретних нестационарних динамічних об'єктів керування. Формулюється математична постановка проблеми побудови адаптивних систем оптимального керування нестационарними об'єктами; виконується теоретичне дослідження нестационарного технологічного процесу контролю і керування, побудова його математичної моделі в термінах простору стану, а також дослідження керованості і спостережуваності нестационарного об'єкта керування.

Поставлена проблема досліджень враховує всі головні задачі при знаходженні стратегії адаптивних систем оптимального керування як детермінованими, так і стохастичними об'єктами: інформативність, реалізуємість, стійкість і якість. Тому рішення цих задач задовольняє вимогам поставленої проблеми і виявляється практично реалізованим при належному виборі параметрів функціоналу оптимізації.

Для рішення задач поставленої проблеми дослідження - розробки методів алгоритмічного синтезу інформаційних систем оцінки, аналізу і прогнозування станів нестационарних об'єктів керування в параметричному і фазовому просторі, розробки методів алгоритмічного синтезу адаптивних систем оптимального керування, а також створення їх математичного і програмного забезпечення використано математичні моделі зазначених нестационарних технологічних процесу контролю і керування нестационарними динамічними об'єктами, які найбільш повно задовольняють умовам поставленої проблеми дослідження. При цьому передбачається, що отримані в результаті розробки методи алгоритмічного синтезу систем оцінювання, аналізу стану і керування, а також підхід до рішення задач створення їхнього математичного забезпечення, можуть бути поширені на більш широкий клас нестационарних динамічних об'єктів керування.

У якості вихідних даних задачі використана система диференціальних рівнянь, що описують поведінку нестационарного об'єкту n -го порядку, з відомими таблично-заданими (з обраним кроком дискретності) параметрами у вигляді математичного чекання коефіцієнтів вихідних диференціальних рівнянь у дискретних точках інтервалу керування $[0, T_k]$, а також їх границі. Для нестационарних систем високого порядку, коли правильність отриманих результатів викликає сумнів, будь-яка спроба перевірити отриманий результат шляхом використання рівняння Беллмана через трудомісткість може виявитися неспроможною. Тому приходиться жертвувати строгою оптимальністю і розробляти субоптимальні алгоритми стохастичного керування. Зокрема, введення вагового коефіцієнта штрафу E в критерій дозволяє уникнути труднощів, викликаних обмеженнями на керування, шляхом варіювання величини E в таких межах, при яких компоненти вектора керування не досягають області насичення.

Рішення даної задачі аналізу стану засновано на використанні методів ідентифікації і прогнозування вектора стану, що відображаються в алгоритми оцінювання й екстраполяції фазових координат. Вибір і включення того або іншого алгоритму екстраполяції в алгоритм аналізу стану залежить від динамічних властивостей об'єкту керування і може бути визначений у процесі моделювання. Задача прийняття рішення повинна реалізуватися в припущенні відомого вектора стану. З огляду на задані технічні вимоги, алгоритм визначення керувань будуватиметься в дискретній формі з використанням методу динамічного програмування.

Синтезовані найбільш ефективні алгоритми параметричної і фазової ідентифікації. Синтезовано алгоритм оцінки однієї з основних динамічних характеристик нестационарних об'єктів керування - перехідної матриці стану, приводяться їхні математичні моделі і їхня реалізація.

Зважаючи на те, що керуючі координати $U_\mu (\mu = 0, 1, \dots, S)$, постійні на інтервалах $(n-1)T_1 < t < nT_1$, впливають на настроювання параметрів моделі тільки в дискретні моменти часу $nT_1, (n+1)T_1, \dots, (n+l)T_1$, тоді взявши суму всіх значень $U_\mu (\mu = 0, 1, \dots, S)$ циклу n до l , отримаємо аналітичний вираз для сімейства вихідних характеристик керуючих контурів самонастроювання системи ідентифікації нестационарного об'єкта керування.

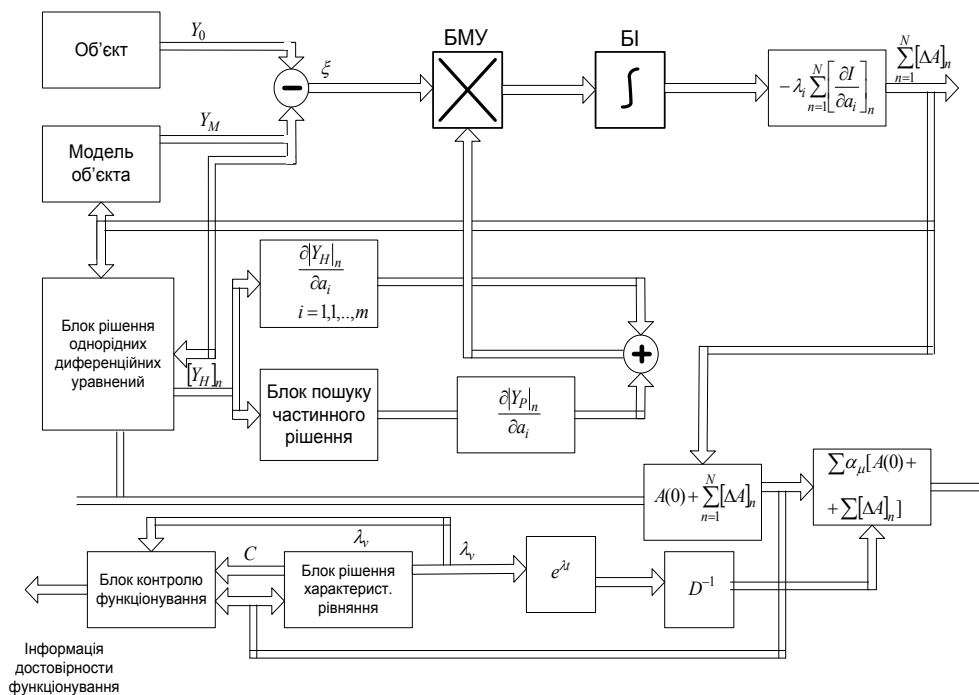


Рис. 1. Схема системи оцінювання перехідної матриці стану

Аналіз отриманих виразів показує, що:

1) залежності керуючих координат систем ідентифікації нестационарних об'єктів керування при мінімізації їхніх алгоритмів функціонування методом градієнта з використанням самонастроювальної моделі являють собою кусочно-постійні функції часу, виражені у вигляді кінцевих числових рядів, що збігаються тим швидше, чим швидше кожна оцінка параметру моделі наближається до відповідного параметра об'єкта.

2) Математична модель системи ідентифікації нестационарних багатовимірних об'єктів керування, що описуються системою лінійних диференціальних рівнянь, при інтегральному критерії якості є подвоєний інтеграл від добутку різниці вихідних сигналів об'єкта і моделі на частинну похідну від вихідного сигналу моделі об'єкта керування за відповідним параметром.

3) Безпошукова адаптивна система ідентифікації нестационарних лінійних об'єктів керування, що знайдена методом градієнта при ітеративному принципі її роботи, представляє собою багатоконтурну дискретну нелінійну самонастроювальну систему автоматичного керування з параметричним зворотним зв'язком.

Результати технічної реалізації і виконане фізичне моделювання адаптивної системи ідентифікації нестационарного об'єкта керування другого порядку підтверджують працездатність отриманих алгоритмів, можливість їхньої приладової і програмної реалізації, а також правильність теоретичних досліджень і обраних алгоритмічних і технічних рішень.

Синтезовано рекурентний алгоритм оцінювання фазового стану лінійних нестационарних технологічних об'єктів керування у вигляді

$$\hat{X}_{K+1/K+1} = \hat{X}_{K+1/K} + K_{K+1}(Y_{K+1} - H_{K+1}\hat{X}_{K+1/K}), \quad (1)$$

$$P_{K+1/K+1} = (I - K_{K+1}H_{K+1})P_{K+1/K}, \quad (2)$$

$$\hat{X}_{K+1/K} = \Phi_{K+1,K}\hat{X}_{K/K} + \Gamma_{K+1,K}Z_K + G_{K+1,K}f_K, \quad (3)$$

$$P_{K+1/K} = \Phi_{K+1,K}P_{K/K}\Phi_{K+1,K}^T + \Gamma_{K+1,K}Q_K\Gamma_{K+1,K}^T + G_{K+1,K}\theta_K G_{K+1,K}^T, \quad (4)$$

$$K_{K+1} = P_{K+1/K}H_{K+1}^T(H_{K+1}P_{K+1/K}H_{K+1}^T + R_{K+1})^{-1}. \quad (5)$$

Формули (1) – (5) описують алгоритм обробки дискретної інформації і зручні для програмної реалізації, тому що їх використання в k -й момент не вимагає запам'ятовування всієї зафіксованої раніше інформації і згортання підлягають матриці невеликих порядків, рівних розмірності вектора виміру виходу. Для початку рекурентної процедури обчислення необхідні апріорні дані про коваріаційні матриці шумів Q , θ , R і початковий стан системи X_0 , P_0 .

Одержаний метод синтезу системи параметричної ідентифікації дає можливість без попередніх перетворень переходити до синтезу оптимального закону керування в термінах простору станів для детермінованих і стохастичних об'єктів з врахуванням початкових умов вектора стану, завдяки чому спрощується процедура синтезу і побудова систем ідентифікації. Отримані математична модель і алгоритм функціонування системи параметричних оцінок нестационарного об'єкта керування пояснюються функціональною схемою, наведеною на рис.2.

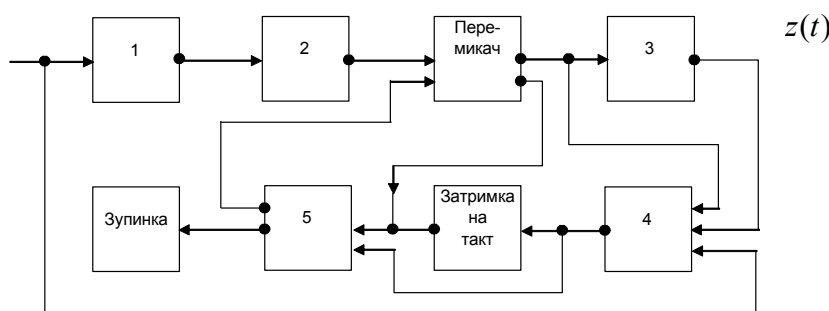


Рис.2. Функціональна схема системи обробки інформації: 1- блок статистичної обробки вибірки вимірів; 2- обчислювач підвектора y ; 3 - блок реалізації алгоритму рішення двоточкової крайової задачі; 4 - блок фільтрації; 5 - блок логічного аналізу.

Метод синтезу системи оцінки станів нестационарного об'єкта керування в параметричному і фазовому просторах заснований на використанні компенсаційного методу із самонастроювальною моделлю об'єкта керування, що описує вільний і вимушений рух і рішення нестационарних диференціальних рівнянь методом варіації параметрів. Це припускає спільне використання самонастроювальної моделі вимушеного руху об'єкта керування з рівнобіжним включенням, а також самонастроювальної моделі рішення однорідного диференціального рівняння, що враховує вільний рух об'єкта, з метою знаходження загального рішення вихідного диференціального рівняння і мінімуму обраного критерію ідентифікації.

Аналіз структури розробленого алгоритму дає підставу вважати, що викладений підхід до рішення задачі оцінювання повного вектора стану нелінійних стохастичних систем за результатами спостережень може бути застосований до широкого кола задач визначення стану динамічних систем при обмеженому складі вимірюваних параметрів.

Порівняльний аналіз рівнянь, що використовуються у процедурах відновлення й умовно оптимальної фільтрації, показує, що структура в них схожа. В обох процедурах вирішуються рівняння типу Ріккати, обчислюються якобіани, використовується однакова структура рівнянь оцінювання (наближення).

Система керування з гнучким параметричним зворотним зв'язком забезпечує оптимальність значень параметрів регулятора нестационарного об'єкта керування на кожній ітерації:

- алгоритм прогнозування фазових координат (виберемо для конкретності випадок параболічної наближеної екстраполяції):

$$\hat{X}_{k+1/k} = X_{k+1/k} + C(\hat{X}_{k-1/k-1} - 3\hat{X}_{k/k} - 2\hat{X}_{k+1/k}); \quad (6)$$

- алгоритм визначення керувань на вході об'єкта:

$$U_{k+1} = \int at[L_{k+1} \hat{X}_{k+1/k+1} + \varphi], \quad (7)$$

- алгоритм розрахунку керуючої інформації на вході виконавчого пристрою

$$\Delta U_{k+1}^0 = \Delta U_{k+1}^{(i)} - U_k^{(i)}, \quad t_{k+1}^{(i)} = t_{k+1} - (\tau_{k+1}^{(i)} + \tau), \quad \tau_{k+1}^{(i)} = \frac{\Delta U_{k+1}^{(i)}}{C}, \quad U_{k+1}^{(i)} = C_{liqn} \Delta U_{k+1}^{(i)}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (8)$$

Удосконалено математичний метод Вінера лінеаризації нелінійних систем параметричної ідентифікації адаптивних систем оптимального керування. Знайдені лінійні еквіваленти систем параметричної ідентифікації дозволяють застосовувати відомі класичні методи аналізу стійкості лінійних систем для оцінки запасів стійкого функціонування нелінійних систем параметричної ідентифікації нестационарних об'єктів керування.

Розроблені методи синтезу систем ідентифікації дозволили здійснити апаратну і програмну реалізацію моделей адаптивних систем параметричної ідентифікації нестационарних технологічних об'єктів і виконати їх експериментальні дослідження на функціональність і точність оцінювання динамічних характеристик.

Практична цінність отриманих результатів роботи полягає в тому, що створене математичне і програмне забезпечення адаптивних систем ідентифікації, аналізу, прогнозування і керування нестационарними технологічними процесами, доведені до машинних програм, перевірені цифровим моделюванням на ЕОМ і впроваджені на реальних технологічних об'єктах.

Аналіз техніко-економічних показників результатів промислового впровадження отриманих у роботі алгоритмів, математичного і програмного забезпечення АСК і процесів керування технологічними об'єктами підтверджує їхню працездатність і економічну ефективність.

Економічний ефект від їхнього впровадження досягається за рахунок скорочення вартості і часу розробок алгоритмів і програм, збільшення ефективності і термінів експлуатації дорогого устаткування, а також поліпшення якості керування технологічними об'єктами. Промислова експлуатація технологічних об'єктів підтвердила високу ефективність синтезованих адаптивних систем керування при нормальній роботі та пуско-зупинних режимах.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використані в ЗАТ «НВО «Харчопроматоматика» (м. Одеса), ТОВ «Шаргородцукор» (Деребчинський цукровий завод, Шаргородський район, Вінницька обл.), ТОВ «РегВінІнвест» (Красносілківський цукровий завод, Бершадський район, Вінницька обл.), Кирнасівському цукровому заводі (Тульчинський район, Вінницька обл.), ВАТ СКТБ «Елемент» (м.Одеса), НВО «Агромет» (м.Одеса, Хоростковський та Борщівський спиртові заводи Тернопільської обл.) при проектуванні і реконструкції систем управління технологічним обладнанням харчових виробництв.

УШАКОВ Едуард Павлович - к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комплексної механізації технологічних процесів Вінницького національного аграрного університету. Eushakov2002@ukr.net

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у промисловості, комп'ютерне моделювання.