

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Жигайло Олексій Михайлович

УДК 664.7.001-5

**СТАТИСТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ
МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ У ЗАДАЧАХ
АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Одеса - 2001

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеської державної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник	кандидат технічних наук, доцент Хобін Віктор Андрійович , Одеська державна академія харчових технологій, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Офіційні опоненти:	доктор технічних наук, професор Аркад'єв Віктор Юр'євич , Херсонський державний технічний університет, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління
	кандидат технічних наук, доцент Харабет Олександр Миколаєвич , Одеський державний політехнічний університет, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів
Провідна установа	НВК “Київський інститут автоматики” , НАН України і Держпромполітики України, м. Київ

Захист відбудеться “22” листопада 2001р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.01 в Одеському державному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського державного політехнічного університету (м. Одеса, просп. Шевченка, 1).

Автореферат розісланий “20” жовтня 2001р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

_____ Ямпольський Ю.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з основних задач функціонування будь-якого виробництва є отримання максимально можливого економічного ефекту. В ринкових умовах це пов'язано з підвищенням конкурентноздатності виробленого продукту, зокрема за рахунок підвищення якості продукції, що випускається, і зниження її собівартості. Підвищення якості продукту вимагає більш чіткого дотримання умов технологічних регламентів виробничого процесу, а зниження собівартості – роботи технологічних агрегатів у найбільш ефективних режимах, що забезпечують їхню максимальну продуктивність при мінімальних затратах. Реалізація цих вимог прямо пов'язана з ефективністю роботи систем автоматичного управління (САУ) технологічними процесами (ТП).

У зернопереробній і харчовій промисловості (ЗП і ХП) ТП, розглянуті як об'єкти управління (ОУ), характеризуються неповнотою апріорної інформації, значним запізненням у каналах управління, інтенсивними неконтрольованими координатними і параметричними збуреннями. Останні зумовлюють нестационарність властивостей ОУ. Для підвищення ефективності управління нестационарними об'єктами доцільно використовувати адаптивні системи з регуляторами, що самоналаштовуються. У теорії автоматичного управління розроблено досить багато алгоритмів самоналаштування. Однак для об'єктів з описаними вище властивостями їхнє практичне застосування, як правило, не дає позитивних результатів. Тому задача розробки САУ, які б забезпечували високу якість управління нестационарними об'єктами з запізненням і інтенсивними збуреннями і, в остаточному підсумку, підвищували економічну ефективність виробництва, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі автоматизації виробничих процесів (АВП) Одеської державної академії харчових технологій (ОДАХТ) і відповідає основному науковому напрямку №3 ОДАХТ “Створення і розробка нового високоефективного обладнання, теорії, методів його розрахунку і проектування; автоматизація виробничих процесів харчових і зернопереробних виробництв”. Базу для підготовки дисертації склали науково-дослідна робота (НДР), проведена за держбюджетною темою: “Дослідження і розробка інтелектуальних систем управління гарантуючих зниження енергоємності і дотримання регламентів у зернопереробній і харчовій промисловості” з номером державної реєстрації №ДР 0196U004198. Здобувачем виконано один з розділів НДР за темою “Алгоритми і програми поточного оцінювання параметрів і ідентифікації моделей ОУ в реальному масштабі часу”.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення систем автоматичного управління нестационарними технологічними об'єктами з запізненням і інтенсивними неконтрольованими збуреннями за рахунок поточної ідентифікації об'єктів і адаптації алгоритмів

управління. Відповідно до профілю академії, у якій виконувалася робота, проведені дослідження орієнтовані, насамперед, на об'єкти зернопереробної промисловості.

Задачі дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

- розширити можливості методу типової статистичної ідентифікації (МТСІ) до рівня, який би забезпечував ефективне проведення процедури ідентифікації для об'єктів із запізненням і інтенсивними неконтрольованими збуреннями;
- провести порівняльний аналіз результатів ідентифікації тестового об'єкту, отриманих різними методами, у т.ч. розширеним МТСІ (РМТСІ), і показати його переваги;
- розробити і дослідити варіанти РМТСІ, що забезпечували б ефективне проведення процедури ідентифікації ОУ в контурі регулювання, у т.ч. у системах гарантуючого управління, і рішення задачі адаптації (самоналаштування) регулятора;
- виконати перевірку функціонування алгоритмів ідентифікації та адаптації на конкретном об'єкті – прес-грануляторі (ПГ) комбікормів, зокрема розробити адаптивну САУ ПГ і провести її виробничі випробування.

Об'єкт дослідження - системи автоматичного управління нестационарними технологічними об'єктами з запізненням і інтенсивними неконтрольованими збуреннями.

Предмет дослідження - методи статистичної ідентифікації динамічних моделей і алгоритми адаптивного управління об'єктами.

Методи дослідження. Теорія оцінювання динамічних процесів застосовувалася для отримання та обробки вихідних даних у процедури ідентифікації; теорія і методи статистичної ідентифікації ОУ - для формування визначеного набору моделей і забезпечення процесу їх дослідження; теорія автоматичного управління - для опису і реалізації алгоритмів управління; теорія випадкових процесів - для опису і реалізації систем гарантуючого управління; чисельні методи рішення задач оптимізації - для використання в алгоритмах ідентифікації та адаптації; імітаційне моделювання на ЕОМ - для ефективно розробки та дослідження цих алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- обґрунтовано доцільний набір динамічних моделей об'єктів, що мають запізнення, систем регулювання такими об'єктами, їх вхідних дій, які орієнтувалися на застосування в МТСІ і *вперше одержано* математичний опис взаємозв'язків між параметрами вибраних моделей об'єктів (систем регулювання) і параметрами взаємних кореляційних функцій (ВКФ) їх вхідних і вихідних змінних, що розширило область застосування МТСІ;
- *вперше проведено* порівняльні дослідження РМТСІ та найбільш відомих методів статистичної ідентифікації на об'єктах із запізненням в умовах дії на них некорельованих шумів різного спектрального складу;
- *дістав подальший розвиток* МТСІ, який полягає в розробці поетапної процедури його за-

стосування для ідентифікації об'єктів, охоплених контуром регулювання;

- *вперше розроблено і досліджено* алгоритми адаптації регуляторів на базі РМТСІ в режимі реального часу.

Практичне значення одержаних результатів. РМТСІ є алгоритмізованою процедурою, яка може бути реалізована на сучасних мікро-процесорних засобах управління, що дозволить виконати ідентифікацію об'єктів із запізненням і адаптацію їхніх регуляторів без проведення спеціальних експериментів у режимі нормального функціонування.

Алгоритми адаптації регулятора і оптимізації режимів роботи ПГ комбікормів, що розроблені на основі РМТСІ, пройшли виробничу перевірку в складі гарантуючої САУ ПГ на Куліндорівському КХП. Результати випробувань підтвердили працездатність і ефективність цих алгоритмів та відображені у відповідному акті від 15.02.2001. Це дозволяє рекомендувати розроблену САУ ПГ для застосування на підприємствах ЗП і ХП.

Матеріали дисертації і програмна реалізація алгоритму, що ґрунтується на застосуванні РМТСІ, впроваджені в навчальний процес на кафедрі АВП ОДАХТ і використовуються в дисципліні “Ідентифікація моделей технологічних об'єктів”.

Особистий внесок здобувача. У публікаціях в співавторстві особистий внесок полягає в наступному: в [1] отримано математичний опис взаємозв'язків між параметрами моделей об'єктів із запізненням і параметрами ВКФ змінних на їхніх входах і виходах, що поширило область застосування МТСІ, а також розроблено алгоритм ідентифікації ОУ на основі РМТСІ; в [2] сформульовано основні принципи побудови алгоритму адаптації регулятора, що базуються на ідентифікації типових моделей об'єктів і систем управління; в [3] проведено порівняльні дослідження розробленого РМТСІ і найбільш відомих методів статистичної ідентифікації; в [5] запропонована процедура поетапної ідентифікації ОУ в замкнутому контурі регулювання та розглянуто її застосування у складі гарантуючої САУ; в [6] запропоновано варіанти ідентифікації ОУ в частотній області; в [8] представлено теоретичне підґрунтя для розрахунку оцінок кореляційних функцій рекурентним способом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях: XXXII науковій конференції ВТІ (м. Воронеж, 1993р.), науково-практичних конференціях “Хлібопродукти-94”, “Хлібопродукти-2000” (м. Одеса, 1994р. і 2000р.), по автоматичному управлінню “Автоматика-99” (м. Харків, 1999р.), наукових конференціях ОДАХТ (м. Одеса, 1994-2001р.).

Публікації. Опубліковано 8 друкованих праць. З них 5 статей (4- у збірках наукових праць ОДАХТ, 1- у збірці наукових праць ХП) і 3 тези у збірках тез доповідей на наукових конференціях ОДАХТ.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, за-

гальних висновків, списку використаних літературних джерел з 122 найменувань, додатків і викладена на 220 сторінках. Вона містить 55 рисунків, 17 таблиць і 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі розглядається задача статистичної ідентифікації динамічних об'єктів і актуальність її застосування в системах адаптивного управління на підприємствах ЗП і ХП.

Проаналізовано різні ТП у галузях ЗП і ХП. При цьому було виділено ряд загальних особливостей: 1) інтенсивна зміна властивостей сировини, стану робочих органів і параметрів енергоносіїв; 2) значний вплив перерахованих факторів на характеристики і режими роботи обладнання; 3) наявність запізнення і інерційності в реакції на управляючу дію; 4) чітка регламентація значень великої кількості параметрів, порушення яких приводять до зниження якості продукції, незворотнім втратам сировини і енергії; 5) близькість енергозберігаючих режимів роботи до неприпустимих, у т.ч. до аварійних.

Проведений аналіз дозволив сформулювати властивості ТП, розглянутих як ОУ, у виді таких характеристик: 1) канали перетворення вхідних дій для відносно невеликого діапазону їх зміни можуть бути описані лінійними інерційними ланками другого порядку з запізненням; 2) параметричні збурення можуть бути представлені як квазідетерміновані низькочастотні періодичні функції; 3) координатні збурення можуть бути описані моделлю випадкового процесу зі стохастичною центрованою складовою і адитивною їй низькочастотною періодичною складовою; 4) в ОУ присутнє обмеження типу “аварійна ситуація”, що формально виражається в наявності граничного значення y^{GP} , перевищення якого неприпустиме. Приведені властивості пояснюють нестационарний характер процесів, що протікають в обладнанні підприємств ЗП і ХП. Для підвищення якості управління такими об'єктами доцільно застосовувати адаптивні алгоритми.

У розділі коротко розглянуто різні за класифікаційними ознаками варіанти адаптивних систем. Серед них найбільш опрацьованими і ефективними вважаються системи з самоналаштуванням, в яких реалізується пошукова процедура адаптації з проміжною ідентифікацією моделі ОУ і подальшим розрахунком за нею параметрів налаштування регулятора.

Тому що задача ідентифікації моделі об'єкту або системи є ключовою у процесі адаптації, то в першу чергу вирішувалося питання про вибір методу ідентифікації. Як альтернативні варіанти розглядалися такі: методи ідентифікації, що використовують різні обчислювальні алгоритми – метод найменших квадратів, узагальнений метод найменших квадратів, метод інструментальної змінної; метод підпросторів, що використовує подання моделей у формі простору станів; методи кореляційного аналізу, засновані на рішенні рівняння Вінера-Хопфа, і, у тому числі, МТСІ. Для

наших умов, як найбільш перспективний, було вибрано МТСІ.

У другому розділі представлені етапи і результати розробки робастного РМТСІ моделей динаміки.

Загальний стан теорії і практики ідентифікації характеризується існуванням різноманітних статистичних методів, орієнтованих на застосування ЕОМ. Однак, незважаючи на високий рівень теоретичних розробок, досвід їх успішного практичного застосування при побудові математичних моделей реальних динамічних об'єктів викликає визначені складності. У значній мірі це зумовлено належністю задачі статистичної ідентифікації до класу зворотніх, характерною рисою яких є їх некоректність. Внаслідок цього багато відомих обчислювальних схем нестійкі навіть при незначних похибках задання вихідних даних.

Найбільш ефективний підхід, що підвищує коректність процедури ідентифікації, полягає в заданні певного набору моделей вхідних дій, каналів об'єкту, контурів регулювання. Кінцева кількість моделей дозволяє вирішити задачу статистичної ідентифікації в аналітичному (загальному) виді для всіх можливих варіантів і використовувати ці готові рішення в конкретних задачах. Такий підхід, названий типовою статистичною ідентифікацією.

У роботі вибрані та обґрунтовані варіанти типових моделей об'єктів, контурів регулювання (Табл. 1) і їх вхідних дій (Табл. 2), що можуть бути використані для опису процесів у ЗП і ХП. Для всіх можливих сполучень моделі вхідні дії і моделі об'єкту (контур регулювання) задача статистичної ідентифікації була вирішена аналітично. При цьому її вихідне рівняння (1), що представляє собою відоме рівняння Вінера-Хопфа і пов'язує невідому імпульсну перехідну функцію

$$K_{wy}(\tau_k) = \int_0^{\infty} \omega(\theta) K_{wu}(\theta - \tau_k) d\theta. \quad (1)$$

$\omega(\theta)$ з автокореляційною функцією (АКФ) вхідного сигналу $K_{wu}(\tau_k)$ і ВКФ вхідного і вихідного сигналів $K_{wy}(\tau_k)$ об'єкту, що ідентифікується, зводилося до рішення інтегрального рівняння Вольтерри першого роду. Рішення здійснювалося спеціальною сепарацією структури ВКФ, яка отримувалася за допомогою перетворень Лапласа.

Таблиця 1

Типові моделі об'єктів і контурів регулювання

Статичні, диференціючі		Астатичні
аперіодичні	коливальні	
$W_1(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{Tp+1}$	$W_3(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}$	$W_5(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{p}$
$W_2(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(Tp+1)^2}$	$W_4(p) = \frac{kpe^{-\tau p}}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}$	$W_6(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{p(Tp+1)}$

Вибрані моделі АКФ - $K_{uu}^M(\tau_k)$ і отримані аналітично моделі ВКФ - $K_{uy}^M(\tau_k)$ складають базу розробленого PMTCL. Його реалізація, як алгоритму ідентифікації, зводиться до послідовного виконання трьох процедур.

Таблиця 2

Типові моделі вхідних дій

Кореляційна функція - $K_{uu}^M(\tau_k)$	Спектральна щільність - $S_{uu}^M(\omega)$
$K_1(\tau_k) = De^{-\alpha \tau_k }$	$S_1(\omega) = \frac{D2\alpha}{(\omega^2 + \alpha^2)}$
$K_2(\tau_k) = De^{-\alpha \tau_k } \cos \beta \tau_k $	$S_2(\omega) = \frac{D2\alpha(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2}$
$K_3(\tau_k) = De^{-\alpha \tau_k } (\cos \beta \tau_k + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta \tau_k)$	$S_3(\omega) = \frac{D4\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\omega^2\alpha^2}$

1. Процедура розрахунку оціночних значень АКФ $\hat{K}_{uu}(\tau_k)$ вхідного сигналу $u(t)$ і ВКФ $\hat{K}_{uy}(\tau_k)$ вхідного $u(t)$ та вихідного $y(t)$ сигналів об'єкту (системи) здійснюється рекурентно за формулами:

$$\hat{K}_{uu}^{(n)}(i\Delta\tau_k) = \hat{K}_{uu}^{(n-1)}(i\Delta\tau_k) + \frac{1}{n-i+1} \sum_{i=1}^{m_{акф}} f_u(n\Delta t) f_u((n-i+1)\Delta t), \quad (2)$$

$$\hat{K}_{uy}^{+(n)}(i\Delta\tau_k) = \hat{K}_{uy}^{+(n-1)}(i\Delta\tau_k) + \frac{1}{n-i+1} \sum_{i=1}^{m_{вкф}^+} f_u(n\Delta t) f_y((n-i+1)\Delta t), \quad (3)$$

$$\hat{K}_{uy}^{-(n)}(i\Delta\tau_k) = \hat{K}_{uy}^{-(n-1)}(i\Delta\tau_k) + \frac{1}{n-i+1} \sum_{i=1}^{m_{вкф}^-} f_y(n\Delta t) f_u((n-i+1)\Delta t), \quad (4)$$

де $\Delta\tau_k$ - крок приросту аргументів оцінок АКФ і ВКФ (вибирається рівним кроку дискретизації Δt сигналів $u(t)$, $y(t)$ по часу); $m_{акф}$, $m_{вкф}^-$, $m_{вкф}^+$ - кількість точок оцінок АКФ і ВКФ, що розраховується; $f_u(n\Delta t)$, $f_y(n\Delta t)$ - поточні значення сигналів $u(t)$, $y(t)$.

2. Процедура ідентифікації моделі вхідного сигналу $u(t)$ реалізується в два етапи. На першому з них вирішується задача структурної ідентифікації, що зводиться до вибору з табл. 2 найкращої моделі АКФ. На другому - параметрична ідентифікація вектору $\vec{d} = \{\alpha, \beta\}$ зводиться до оптимізаційної задачі (5) і вирішується чисельними методами:

$$\vec{d}^* = \{\alpha^*, \beta^*\} = \arg \min \left[\left(K_{uu}^M(\tau_k, \vec{d}) - \hat{K}_{uu}(\tau_k) \right)^2 \right]. \quad (5)$$

3. Процедура ідентифікації моделі об'єкту (системи) також проходить у два етапи. На етапі структурної ідентифікації вибирається модель ВКФ - $K_{uy}^M(\tau_k)$. При цьому враховується результат

процедури 2, а також те, що даний вибір однозначно відповідає вибору моделі об'єкту (системи) з табл. 1, що підлягає ідентифікації. На етапі параметричної ідентифікації вектора $\bar{c} = \{k, T, \tau, \xi\}$ вирішується чисельними методами оптимізаційна задача (6):

$$\bar{c}^* = \{k^*, T^*, \tau^*, \xi^*\} = \arg \min \left[\left(K_{uy}^M(\tau_k, \bar{c}) - \hat{K}_{uy}(\tau_k) \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Результати ідентифікації, наведені у виді перехідних характеристик (ПХ) на рис. 1, для тестового статичного об'єкту шостого порядку (ПХ-1) в умовах некорельованих шумів, отримані із застосуванням таких методів: 1) розробленого PMTCl (ПХ-2); 2) методу параметричної ідентифікації, що використовує у виді обчислювального алгоритму узагальнений метод найменших квадратів (ПХ-3); 3) методу підпросторів, що використовує подання моделей у формі простору станів (ПХ-4); 4) методу кореляційного аналізу з “відбілюванням” оброблюваних сигналів, що використовує модель у виді імпульсної перехідної функції (ПХ-5). Ідентифікація виконувалася в умовах характерних для ЗП і ХП, а саме за наявності інтенсивних шумів (збурень f) широкого спектру - від низькочастотних до високочастотних (f_1 - f_3). Порівняльний аналіз результатів ідентифікації показав переваги розробленого PMTCl.

Рис. 1 ПХ тестового об'єкту і його моделей, ідентифікованих різними методами

У *третьому розділі* проведено дослідження можливості застосування PMTCl у задачах ідентифікації, де шуми корельовані з вихідною змінною каналу, що ідентифікується. Як приклади було обрано: 1) ідентифікацію моделі ОУ за каналом контрольованих збурень для синтезу інваріантних САУ; 2) ідентифікація моделі ОУ за каналом управління в складі замкнутого контуру регулювання. Рішення першої пов'язано зі зменшенням впливу кореляції шумів $f_k'(t)$ і $y'(t)$ за рахунок врахування динаміки замкнутого контуру САУ (рис. 2). Це досягається “відновленням” реально не існуючої змінної $f_k'(t)$ з $y(t)$:

$$f_k'(t) = (1 + W^{per}(p)W_{uy}^0(p))y(t) - W_{uy}^0(p)f_n(t), \quad (7)$$

або “пропуском” $f_k(t)$ через фільтр, що відповідає передаточній функції замкнутого контуру системи по каналу “ $f_k'(t)$ - $y(t)$ ” - $W_{f_k'y}^c(p)$.

Рис. 2 Структурна схема САУ при ідентифікації моделі ОУ за каналом контрольованих збурень

Неконтрольовані збурення $f_n(t)$ будуть вносити похибку у результати ідентифікації. Але оскільки $f_n(t)$ є некорельовані з $f_k(t)$ і $f_k'(t)$, то їх вплив за наслідками є аналогічним до розглянутого в попередньому розділі.

Найбільш високою є ступінь кореляції вхідної $u(t)$ і вихідної $y(t)$ змінної каналу ОУ, що ідентифікується, у другій задачі. У роботі вона вирішується з використанням розробленого *по-*

етапного РМТСІ. Істотною особливістю методу є те, що на вхід САУ (рис. 3), адитивно $y_{зд}(t)$, подається додатковий, некорельований з іншими вхідними сигналами, широкополосний випадковий стаціонарний сигнал $\Delta y^Л(t)$ (ДВС). Для його формування рекомендовані такі властивості: а) середньоквадратична частота $\Delta y^Л(t)$ повинна приблизно в 2 рази перевищувати середньоквадратичну частоту $y(t)$ без дії $\Delta y^Л(t)$; б) дисперсія $y(t)$, викликана $\Delta y^Л(t)$, повинна складати 10÷30% від дисперсії $y(t)$ без дії $\Delta y^Л(t)$.

Рис. 3 Структурна схема САУ при ідентифікації моделі ОУ
у замкнутому контурі

На першому етапі для формальної моделі системи управління (ФМС) за каналом завдання виду $W^3(p)$ із ПХ

$$h_{фмс}(t) = k \left(1 - (1/C) e^{-\xi(t-\tau)/T} \sin(C(t-\tau)/T + \theta) \right), \quad (8)$$

де $C = \sqrt{1 - \xi^2}$, $\theta = \arctg(C/\xi)$, використовуючи РМТСІ, проводиться ідентифікація параметрів k , T , τ , ξ .

На другому етапі та ж ПХ визначається на основі імітаційної моделі системи (ІМС). В ІМС у явному виді використовується модель ОУ за каналом управління (типова - виду $W^2(p)$ з параметрами k_o , T_o , τ_o) і той же алгоритм регулювання, що і в реальній системі, наприклад ПІД - алгоритм: $W^{рег}(p) = k_p (1 + 1/T_{із}p + T_{пр}p/(0,2T_{пр}p + 1))$.

Передаточна функція ІМС за каналом завдання буде мати вид:

$$W_{y^{зд}y}^c(p) = \frac{(Ap^2 + Bp + k_p k_o) e^{-\tau_o p}}{Kp^4 + Gp^3 + Rp^2 + Sp + (Ap^2 + Bp + k_p k_o) e^{-\tau_o p}}, \quad (9)$$

де $K=0,2T_{із}T_{пр}T_oT_o$, $G=T_oT_{із}(0,4T_{пр}+T_o)$, $R=T_{із}(0,2T_{пр}+2T_o)$, $S=T_{із}$, $A=1,2k_p k_o T_{із}T_{пр}$, $B=k_p k_o(0,2T_{пр}+T_{із})$. Тому що аналітичний розв'язок неможливий через запізнення в знаменнику, то визначення значень $h^{ІМС}(t)$ проводиться чисельно з використанням рекурентного виразу:

$$\begin{aligned} h^{ІМС}(t) \Leftrightarrow h^{ІМС}(n\Delta t) = & [(4B_1 + 3B_2 + 2B_3 + B_4)y((n-1)\Delta t) - (6B_1 + 3B_2 + B_3) \times \\ & \times y((n-2)\Delta t) + (4B_1 + B_2)y((n-3)\Delta t) - B_1y((n-4)\Delta t) - (B_5 + B_6 + k_p k_o) \times \\ & \times (y((n-m)\Delta t) - y^{3Д}((n-m)\Delta t)) + (2B_5 + B_6)(y((n-m-1)\Delta t) - y^{3Д}((n-m-1)\Delta t)) - \\ & - B_5(y((n-m-2)\Delta t) - y^{3Д}((n-m-2)\Delta t))] / (B_1 + B_2 + B_3 + B_4). \end{aligned} \quad (10)$$

де $n = 0..N$, а N – кількість точок ПХ; Δt – крок дискретизації ПХ по часу; $m = E(\tau_o/\Delta t)$ – ціла частина від ділення τ_o на Δt ; $B_1=K/\Delta t^4$; $B_2=G/\Delta t^3$; $B_3=R/\Delta t^2$; $B_4=S/\Delta t$; $B_5=A/\Delta t^2$; $B_6=B/\Delta t$. Тому що параметри регулятора відомі, то за рахунок підбору $\vec{b} = \{k_o, T_o, \tau_o\}$ у (10) можна отримати $h^{ІМС}(t)$, що відповідає $h^{ФМС}(t)$. Підбір зручно звести до оптимізаційної задачі:

$$\vec{b}^* = \arg \min \left(\int_0^{t_{пх}} (h^{ІМС}(t, \vec{b}) - h^{ФМС}(t))^2 dt \right). \quad (11)$$

При підвищенні частки $\Delta y^Л(t)$ у дисперсії $y(t)$ якість ідентифікації підвищується, однак

погіршуються показники якості функціонування САУ. Зниження гостроти цієї проблеми можливо при періодичних включеннях $\Delta u^D(t)$ і проведенні процедури ідентифікації. Дослідження поетапного РМТСІ для тестової моделі ОУ проводилися при впливові на систему неконтрольованих збурень з різними властивостями. Отримані результати показали, що поетапний РМТСІ є досить грубим по відношенню до характеристик цих збурень.

На базі поетапного РМТСІ для систем гарантуючого управління (рис. 4) було розроблено та досліджено алгоритм самоналаштування (адаптації) регулятора. У таких системах задане значення $u^{3D}(t)$ для $y(t)$ формується розрахунком його “гарантуючого” значення $u^{\Gamma}(t)$, при якому з заздалегідь заданим значенням імовірності P_B на інтервалі часу оцінювання T_{oc} $y(t)$ не вийде за гранично припустиме значення $y^{\Gamma P}$. При цьому $u^{\Gamma}(t)$ для процедури ідентифікації є низькочастотним шумом.

Рис. 4 Структурна схема системи гарантуючого управління

Основу алгоритму самоналаштування регулятора складає послідовність оптимізаційних задач представлених на рис. 5.

Рис. 5 Ілюстрація порядку виконання оптимізаційних задач у процедурі налаштування регулятора

Тестування алгоритму реалізовувалося за допомогою спеціальної програми моделювання роботи системи гарантуючого управління на тривалих інтервалах часу $T_{mod}=20000 \tau_0^{nom}$ при інтенсивних параметричних збуреннях:

$$k_o(t) = k_o^{nom} + k_o^{max} \sin(2\pi t/T_k + \varphi_k); \quad \tau_o(t) = \tau_o^{nom} + \tau_o^{max} \sin(2\pi t/T_{\tau} + \varphi_{\tau}), \quad (12)$$

де $k_o^{nom}=1,5$; $T_o^{nom}=3,0$; $\tau_o^{nom}=2,0$; $k_o^{max}=1,0$; $\tau_o^{max}=1,0$; $\varphi_k=-0,7$; $\varphi_{\tau}=0,7$; $T_{\tau}=7000 \tau_o^{nom}$; $T_k=(2000 \div 7000) \tau_o^{nom}$. В якості критеріїв обрані: 1) $\hat{M}[y^{\Gamma P} - y(t)]$; 2) $\hat{M}[D(y(t))]$; 3) $\hat{N}_B$ - число викидів $y(t)$ за $y^{\Gamma P}$. Для порівняльного аналізу, за тих самих умов, було проведене моделювання роботи САУ з базовим, оптимально налаштованим, ПІД – регулятором. Фрагменти моделювання наведено на рис. 6 та рис. 7. А деякі їхні числові результати відображено в табл.3.

Таблиця 3

Результати функціонування гарантуючої САУ с адаптацією регулятора (1а) і без адаптації (1б)

T_k	Алгоритм регулювання	Критерії функціонування гарантуючої САУ		
		$\hat{M}[y^{\Gamma P} - y(t)]$	$\hat{M}[D(y(t))]$	$\hat{N}_B$
4000	1а	0,2468	0,0048	0
	1б	0,2824	0,0064	1
6000	1а	0,2498	0,0050	0
	1б	0,2819	0,0064	2
8000	1а	0,2666	0,0057	0

	16	0,3054	0,0074	1
--	----	--------	--------	---

Рис. 6 Ілюстрація роботи варіантів гарантуючої САУ у встановлених режимах при зміні параметрів об'єкту k_o і T_o/τ_o

Рис. 7 Ілюстрація процедур ідентифікації і налаштування регулятора

У *четвертому розділі* проведено розробку адаптивної САУ ПГ ком-бікормів на базі РМТСІ і наведено результати її виробничих випробувань.

Підвищення ефективності роботи ПГ припускає стабілізацію струму навантаження $I(t)$ привідного електродвигуна (ПЕД) матриці, що пресує, і температури продукту $\theta(t)$ після його гідротермічної обробки на рівнях близьких до гранично припустимого. Задача ускладнюється тим, що ПГ як ОУ, у силу зміни в широких діапазонах властивостей продукту, що пресується, параметрів пари, характеристик робочих органів, є істотно нестационарним, а гранично припустиме значення $\theta^{PP}(t)$ заздалегідь невідоме і відповідає дрейфуючому екстремуму характеристики перехресного каналу “витрати пари u_G – струм I ”. У точці екстремуму коефіцієнт передачі за каналом “ u_G – I ” дорівнює нулю. Тому ефективна САУ ПГ повинна будуватися на принципах гарантуючого управління і передбачати адаптацію параметрів регулятора струму та оптимізацію температурного режиму гідротермічної обробки за максимумом продуктивності (рис. 8). Адаптація здійснювалася на базі поетапного РМТСІ, а оптимізація – на базі ідентифікації ВКФ $K_{u_G I}(\tau_k = 0) = \mu(t)$, що здійснювалася “одноетапним” РМТСІ, реалізованим у блоці оцінки близькості екстремуму (БОБЕ).

Рис. 8 Структурна схема гарантуючої САУ ПГ з адаптацією параметрів регулятора струму і оптимізацією θ^{3D}

На базі імітаційного моделювання гарантуючої САУ ПГ було відпрацьовано її алгоритми і проведено порівняльний аналіз ефективності функціонування між різними варіантами систем: 1 – САУ з базовими ПД – алгоритмами регулювання $I(t)$ і $\theta(t)$; 2 – САУ з адаптивним ПД – алгоритмом регулювання $I(t)$; 3 – САУ з оптимізацією режимів роботи ПГ; 4 – САУ з адаптивним ПД – алгоритмом регулювання $I(t)$ і оптимізацією режимів роботи ПГ. Для усіх варіантів було встановлено однакове завдання на кількість виробленого продукту – 120 тонн. Критеріями, що відображують ефективність функціонування кожного із варіантів управління, було обрано середні значення затрат на електричну C_E та теплову C_T енергію. Крім того, розраховувалися значення показників якості, що характеризують динамічні властивості встановлених процесів $M[I(t)]$, $M[\theta(t)]$, $D[I(t)]$, $D[\theta(t)]$. Отримані результати приведено в табл. 4, з якої видно, що варіанти розробленої САУ ПГ (2-4) мають переваги перед відомим, особливо за продуктивністю. Останнє скорочує час роботи не тільки ПГ, але і всієї лінії гранулювання з маршрутами подачі сировини і відводу готового продукту. А це дає додаткову економію. За годину роботи лінії гранулювання затрати на електроенергію (без врахування затрат на ПГ) приблизно складають 60 кВт/год. Тоді,

при виробленні одним ПГ у середньому 120 тонн гранульованих комбікормів за добу (двозмінна робота), річна (300 днів) економія від впровадження 4-го варіанту управління, у порівнянні з досить ефективною базовою системою (1-й варіант), складе приблизно 19,8 тис. гривень.

Таблиця 4

Ефективність різних варіантів САУ ПГ

Код САУ	Серед. продуктивн.	Час роботи	Середні затрати на вироблення 10 тонн продукції			Показники якості			
			електр. енергія	теплова енергія	загальні затрати	$M[I(t)]$	$D[I(t)]$	$M[\theta(t)]$	$D[\theta(t)]$
№	тонн / год	Год	$\frac{\text{КВт}\cdot\text{год}}{\text{грн.}}$	$\frac{\text{Гкал}}{\text{Грн.}}$	Грн.	А	А ²	град	Град ²
1	7,42	15,41	$\frac{168,6}{33,72}$	$\frac{0,253}{37,95}$	71,67	167,3	21,19	75,0	0,84
2	7,67	14,35	$\frac{162,2}{32,44}$	$\frac{0,239}{35,85}$	68,29	168,8	16,88	75,0	0,78
3	8,44	13,39	$\frac{147,4}{29,48}$	$\frac{0,281}{42,15}$	71,63	170,8	12,91	82,2	1,05
4	8,36	13,53	$\frac{143,9}{28,78}$	$\frac{0,262}{39,3}$	68,08	170,6	12,98	81,4	1,84

Розроблені алгоритми управління прес-гранулятором пройшли виробничу перевірку на Куліндорівському КХП. Експериментальну установку було реалізовано на базі ПЕОМ Pentium-133 із встроєною картою введення/виведення PCL-818L фірми Advantech. Проведені випробування підтвердили результати моделювання.

ВИСНОВКИ

В дисертації представлено нове рішення актуальної наукової задачі, яка полягає у вдосконаленні адаптивних систем автоматичного управління нестационарними технологічними об'єктами з запізненням і інтенсивними неконтрольованими збуреннями. Основу рішення склав розширений метод типової статистичної ідентифікації моделі ОУ і алгоритм адаптації регулятора, що базується на ньому. Це дозволяє підвищити техніко-економічні показники функціонування таких об'єктів. У ході виконання роботи було отримано такі найбільш важливі наукові і практичні результати:

1. Проаналізовано властивості ТП у ЗП і ХП, що обумовлюють природу їхнього запізнення і істотно нестационарний характер як об'єктів управління. З врахуванням цього зроблено обґрунтований вибір комплексу динамічних моделей каналів ОУ, їхніх систем регулювання і вхідних дій, які можна розглядати в якості типових.

2 Отримано математичний опис взаємозв'язків між параметрами типових моделей об'єктів (систем регулювання) і параметрами ВКФ змінних на їх входах і виходах, що дозволило розширити можливості МТСІ. На основі РМТСІ розроблено алгоритм ідентифікації типових моделей

об'єктів у розімкненому контурі і здійснено його програмну реалізацію.

3. Проведено порівняльний аналіз результатів ідентифікації тестового об'єкту, що належить до типових, різними методами. Він показав, що при впливі на ОУ неконтрольованих збурень різної інтенсивності, РМТСІ має важливі переваги, що дозволяють кваліфікувати його як робастний і рекомендувати до застосування.

4. Для ідентифікації ОУ в замкнутому контурі регулювання розроблено поетапний РМТСІ. На його основі програмно реалізовано і досліджено алгоритм адаптації (самоналаштування) регулятора, у т.ч. для систем гарантуючого управління. Дослідження показали, що застосування алгоритму поліпшує показники ефективності функціонування системи, зокрема імовірність дотримання встановлених регламентом обмежень.

5. Із застосуванням РМТСІ доопрацьовані алгоритми гарантуючого управління САУ ПГ. При цьому на базі поетапного РМТСІ реалізовано контур регулювання струму навантаження, а “одноетапного” – ідентифікація положення точки оптимального режиму гідротермічної обробки за максимумом продуктивності ПГ. Алгоритми адаптивного управління пройшли випробування у ході машинних імітаційних і натурних експериментів (акт виробничих випробувань адаптивної САУ ПГ на Куліндорівському КХП від 15.02.2001). Вони підтвердили їхню працездатність і ефективність. Це дозволяє рекомендувати розроблену САУ ПГ для застосування на підприємствах комбікормової промисловості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Хобін В. А., Жигайло О. М. Регуляризована процедура структурної і параметричної ідентифікації моделей динаміки на основі рівняння Вінера-Хопфа у часовій області // Удосконалення існуючих і розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. - Одеса, 1998. Вип. 18. - С. 190-195.

2. Хобін В. А., Жигайло О. М. Робастні процедури самоналаштування регуляторів на основі типових моделей // Удосконалення існуючих і розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. - Одеса, 1998. Вип. 19. - С. 228-233.

3. Хобін В. А., Жигайло О. М., Степанов М.Т. Порівняльний аналіз методів ідентифікації моделей динаміки // Удосконалення існуючих і розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. - Одеса, 1999. Вип. 20. - С. 192-196.

4. Жигайло А. М. Регуляризованная процедура идентификации моделей динамики и её применение в адаптивных системах управления // Системний аналіз, управління і інформаційні

технології: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Вип. 72. -Харків: ХДПУ, 1999. – С. 135-142.

5. Жигайло О. М., Хобін В. А. Ідентифікація моделі об'єкту в замкнутому контурі та її застосування в САУ ГБ // Галузь хлібопродуктів на порозі III тисячоліття: Наук. пр. / Одес. держ. акад. харч. техн. - Одеса, 2001. Вип. 21. - С. 153-157.

6. Хобин В. А., Жигайло А. М. Регуляризованная процедура идентификации моделей динамики на основе уравнения Винера-Хопфа в частотной области // Тез. докл. 54 науч. конф. Одес. технол. ин-та пищ. пром-ти им. М.В. Ломоносова. - Одесса, 1994. - С. 79.

7. Жигайло А. М. Алгоритмы параметрической идентификации моделей для задач управления и диагностики // Тез. докл. Первой нац. науч.-практ. конф. "Хлебопродукты - 94". - Одесса, 1994. - С. 190.

8. Хобин В. А., Жигайло А. М. Процедура оценивания корреляционных функций случайных процессов в реальном времени для идентификации моделей динамики // Тез. докл. 55 науч. конф. Одес. госуд. акад. пищ. техн. - Одесса, 1995. - С. 213.

Jigaylo A.M. Statistical identification of the models of dynamics and its application in tasks of adaptive control. – Manuscript.

Thesis for application for scientific degree of candidate of technical sciences – speciality 05.13.07 – automation of technological processes – Odessa State Polytechnic University, Odessa, 2001.

In the thesis there performed grounded selection of the complex of objects with backlog, control systems for such objects and their input actions which are typical for the technological processes in grain processing and food industry and designed for application in the method of typical statistical identification (MTSI).

These developments extended the field of MTSI application and allowed to work out effective identification algorithms for objects with backlog under strong disturbances in open or closed control loop. By using the extended MTSI and based on it step-by-step procedure of object identification in closed loop for guaranteeing control systems the adaptive (self-tuning) algorithm for the regulator was developed. It was developed its software implementation providing the solution of this take in real-time mode.

The adaptive and identification algorithms designed were applied for development of the economically effective control system for press-granulator. System is built up on the approach of guaranteeing control and provides the adaptation of the main drive current regulator parameters and optimization of the temperature mode of hydro-thermal processing by productivity maximum value. Efficiency of the system is proved by results of industrial tests.

Keywords: model, identification, control algorithm, adaptation, emergency fail-proof, press-

granulator.

Жигайло О. М. Статистична ідентифікація моделей динаміки та її застосування у задачах адаптивного управління. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Одеський державний політехнічний університет, Одеса, 2001.

В дисертації проведено обґрунтований вибір комплексу моделей об'єктів з запізненням, систем регулювання такими об'єктами і їх вхідних дій. Вибрані моделі характерні для технологічних процесів в зернопереробній і харчовій промисловості та орієнтовані на застосування у методі типової статистичної ідентифікації (МТСІ). Це поширило область застосування МТСІ і дозволило розробити ефективні алгоритми ідентифікації для об'єктів з запізненням і інтенсивними неконтрольованими збуреннями, що знаходяться у разомкнутому та замкнутому контурі регулювання. Використовуючи розширений МТСІ і базуючися на ньому поетапну процедуру ідентифікації об'єкту в замкнутому контурі, для систем гарантуючого управління розроблено алгоритм адаптації (самоналаштування) регулятора. Здійснено його програмну реалізацію, що забезпечує рішення задачі в режимі реального часу. Розроблені алгоритми ідентифікації та адаптації застосовані при створенні економічно ефективної САУ прес-гранулятором. Система будується на принципах гарантуючого управління та передбачає: адаптацію параметрів регулятора струму навантаження головного привідного електродвигуна і оптимізацію температурного режиму гідротермічної обробки за максимумом продуктивності. Її ефективність підтверджена результатами виробничих випробувань.

Ключові слова: модель, ідентифікація, алгоритм управління, адаптація, безаварійність, прес-гранулятор.

Жигайло А.М. Статистическая идентификация моделей динамики и её применение в задачах адаптивного управления. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Одесский государственный политехнический университет, Одесса, 2001.

В диссертации произведён обоснованный выбор комплекса моделей объектов с запаздыванием, систем регулирования такими объектами и их входных воздействий (сигналов). Выбранные модели предназначены для описания технологических процессов в зерноперерабатывающей и пищевой промышленности и ориентированны на применение в методе типовой статистической

идентификации (МТСИ). Для них было решено интегральное уравнение Вольтерры первого рода, к которому сводилось исходное уравнение статистической идентификации (уравнение Винера-Хопфа). При этом получено математическое описание взаимосвязей между параметрами моделей объектов (систем регулирования) и параметрами взаимных корреляционных функций переменных на их входах и выходах. Это расширило возможности применения МТСИ на классы объектов с запаздыванием и систем регулирования с замкнутым контуром.

На основе МТСИ с расширенными возможностями (РМТСИ) разработан алгоритм идентификации типовых моделей объектов (систем регулирования), который даёт возможность проводить их идентификацию в режиме реального времени. Для его реализации разработана процедура рекуррентного расчёта оценочных значений автокорреляционной функции входного сигнала и взаимной корреляционной функции входного и выходного сигналов идентифицируемого объекта (системы) на “скользящем” интервале времени.

Проведен сравнительный анализ результатов идентификации тестового объекта с запаздыванием, находящегося в разомкнутом контуре, которые получены разными наиболее известными методами статистической идентификации. Он показал, что при действии на объект неконтролируемых возмущений с возрастающей интенсивностью, применение РМТСИ предоставляет более существенные преимущества, отличающие его от других. Это позволило квалифицировать РМТСИ как робастный и рекомендовать к применению на соответствующих объектах.

Разработаны и исследованы варианты применения РМТСИ для объектов и систем управления с коррелированными шумами. Одним из таких вариантов было решение задачи идентификации модели объекта по каналу контролируемых возмущений в САУ с обратной связью. Оно обеспечивалось уменьшением влияния корреляции шумов за счёт учёта динамики замкнутого контура САУ. Второй вариант заключался в необходимости идентификации модели объекта по каналу управления в составе замкнутого контура регулирования. При решении этой задачи было предложено применение поэтапной процедуры идентификации. Это снизило остроту проблемы, заключающейся в сильном влиянии роста интенсивности неконтролируемых шумов на точность идентификации. Полученные результаты позволили рекомендовать разработанные варианты к применению в адаптивных инвариантных системах и системах гарантирующего управления.

Для систем гарантирующего управления на базе поэтапной процедуры идентификации разработан алгоритм адаптации (самоастройки) регулятора и осуществлена его программная реализация, обеспечивающая решение задачи в режиме реального времени. Применение алгоритма адаптации улучшило показатели эффективности функционирования тестовой системы, в частности вероятность соблюдения установленных регламентом ограничений.

Разработанные алгоритмы идентификации и адаптации применены при модернизации САУ пресс-гранулятором, которая строилась на принципах гарантирующего управления. Модернизация

предусматривала настройку параметров регулятора тока нагрузки главного приводного электродвигателя (ПЭД) и оптимизацию температурного режима гидротермической обработки комбикорма по максимуму производительности. Адаптация выполнялась на основании результатов текущей идентификации модели канала регулирования “скорость питателя – ток нагрузки ПЭД матрицы”, так как именно этот канал в наибольшей степени подвержен интенсивным параметрическим возмущениям. Оптимизация базировалась на проведении текущей (косвенной) идентификации коэффициента передачи модели перекрёстного канала “расход пара – ток нагрузки ПЭД матрицы” и расчёта такого его максимально близкого к нулю значения, при котором гарантируется сохранение его отрицательности.

С использованием имитационного моделирования проведены предпусковые испытания разработанной гарантирующей САУ пресс-гранулятором. Применяемые в её составе алгоритмы идентификации, адаптации и оптимизации обеспечили повышение производительности прессы и снижение общих денежных затрат на использование электрической и тепловой энергии. Результаты моделирования показали, что ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения системы только на одном прессе, составит примерно 19,8 тыс. гривен. На базе экспериментального варианта технической структуры САУ пресс-гранулятором были проведены производственные испытания, которые подтвердили работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов управления.

Ключевые слова: модель, идентификация, алгоритм управления, адаптация, безаварийность, пресс-гранулятор.