

Ляшенко С. О.,
Фесенко А. М.

Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

E-mail:

lyashenkosa05@ukr.net

alla.ecology3006@gmail.com

**ЗАСТОСУВАННЯ АДАПТИВНОГО
ПІДХОДУ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ
ВИПАРЮВАННЯ В ЦУКРОВОМУ ЗАВОДІ
ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИЧНОЇ МОДЕЛІ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-186-200>

УДК 519.71:[681.5:664.1]

Ляшенко С.О., Фесенко А.М. Застосування адаптивного підходу в системі керування технологічним процесом випарювання в цукровому заводі за допомогою статичної моделі.

Анотація. У статті розглядається система керування технологічним процесом випарювання цукрового соку у випарних установках. Проведено аналіз регресійної моделі процесу випарювання, який показав: модель має ряд властивостей, що обмежують сферу її застосування у завданнях керування. Розглянута побудова математичних моделей ТП випарювання цукрового виробництва, які відображають динаміку процесів і засновані на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Визначено основні напрямки підвищення ефективності роботи в системі керування динамічним технологічним процесом випарювання, що дає можливість оптимізувати режими випарювання соку. Розглянуто основні підходи до визначення ефективних математичних моделей, які математично описують процес випарювання соку у багатокорпусній установці. Розкрито переваги та недоліки математичних моделей, що застосовуються в системі математичного забезпечення контролю оптимізаційних режимів роботи випарної установки. Розглянуто ефективні алгоритми оцінки регресійних коефіцієнтів показників процесу у статичних моделях. З цією метою запропоновано та досліджено алгоритм прискореної ідентифікації, який відрізняється від існуючих вищою швидкістю збіжності та стійкістю за наявності похибок при вимірюванні, що підтвердилося при побудові моделей ТП цукрового виробництва. Застосування даного алгоритму при побудові математичних моделей ТП цукрового виробництва забезпечило досягнення припустимої похибки ідентифікації (10%) за 20-30 тактів. Використання даного алгоритму разом із розробленим алгоритмом адаптивного керування виявилось дуже ефективним під час вирішення завдань стабілізації вихідних змінних роботи випарного відділення, забезпечуючи похибку керування (стабілізації), яка не перевищує 10%.

Ключові слова: адаптивний підхід, статична модель, процес випарювання, оцінка, регресійний коефіцієнт, ідентифікатор.

Liashenko S.O., Fesenko A.M. Application of adaptive approach in control system of evaporation process at sugar factory using static model.

Abstract. The article discusses the control system of the juice evaporation process in evaporator units. A regression model of the evaporation process is analyzed, revealing that the model possesses a number of properties that limit its applicability for control tasks. The

paper addresses the development of mathematical models of the sugar production evaporation process that reflect process dynamics and are based on material and energy balance equations.

The main directions for improving the efficiency of the control system for the dynamic evaporation process are identified, allowing for optimization of juice evaporation modes. The key approaches to determining effective mathematical models that describe the juice evaporation process in a multi-effect evaporator are considered. The advantages and disadvantages of mathematical models used in the mathematical support system for optimizing the evaporator operation modes are outlined.

Effective algorithms for estimating regression coefficients of the juice evaporation process indicators, described by static models, are reviewed. For this purpose, an accelerated identification algorithm is proposed and investigated. This algorithm differs from existing ones by its higher convergence rate and robustness in the presence of measurement errors, as confirmed during the development of sugar production process models.

The application of this algorithm in constructing mathematical models of the sugar production process ensured an acceptable identification error (10%) within 20–30 cycles. The use of this algorithm, in combination with the developed adaptive control algorithm, proved highly effective in solving stabilization problems of output variables in the evaporator section, maintaining a control (stabilization) error not exceeding 10%.

Key words: *adaptive approach, static model, evaporation process, estimation, regression coefficient, identifier.*

Постановка проблеми

Цукрове виробництво є складним комплексом, що відноситься до основних продуктових галузей аграрної промисловості держави. Цукрове виробництво у переробній галузі сільськогосподарського напрямку є одним з найбільш складних та енергозатратних. Підвищення ефективності цукрового виробництва базується на застосуванні найсучасніших технологій виробництва, обладнання, оптимізації режимів роботи, автоматизованих систем керування процесами та обладнанням, а також удосконалення організації цукрового виробництва [1, 2].

Найбільш енергозатратним етапом цукрового виробництва є випарювання цукрового соку у випарній установці. Для підвищення ефективності та оптимізації режимів роботи важливе значення має розробка математичного забезпечення системи керування ТП випарювання. Підвищення ефективності керування процесом випарювання здійснюється шляхом впровадження простих регресійних моделей у математичне забезпечення, що враховують показники перероблюваного соку у випарній установці (ВУ) цукрового заводу [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження динамічних властивостей таких складних об'єктів як випарна установка дуже часто викликає складнощі через нелінійність об'єкта, яка відображається диференційними рівняннями в частинних похідних. Тому часто використовується підхід щодо застосування спрощення опису (лінеаризація в межах робочих режимів, опис об'єктів з розподіленою структурою за допомогою звичайних диференційних рівнянь тощо), що дає можливість уникнути складнощів, які виникають при дослідженні таких систем і отримати ефективні моделі. Необхідно відмітити, що якість систем керування, яка в значній мірі залежить від розрахунку алгоритмів керування, в свою чергу, часто вимагають спрощення моделей.

За результатами статистичного аналізу та застосування кореляційних методів були встановлені зв'язки між вхідними та вихідними параметрами процесу випарювання, а застосування МНК дозволило отримати регресійну модель для БВУ заводу при $R^2 = 0,65 - 0,8$. Як показав розрахунок статистичних критеріїв згоди Фішера і Ст'юдента, отримана модель досить адекватно відображує властивості процесу випарювання [3]. Аналіз регресійної моделі показав, що модель не завжди можна використовувати у системі керування динамічними об'єктами. Тому доцільним став розгляд питання побудови математичних моделей ТП випарювання для цукрового виробництва, що відображають динаміку процесів і засновані на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Отримані моделі використовуються при реалізації систем керування ТП випарювання [4, 5].

У зв'язку зі складністю застосування моделей через нелінійність об'єктів, що описуються, до того ж диференціальними рівняннями у частинних похідних, на практиці виправданим є застосування спрощених моделей, які можуть адекватно відображати реальність процесу випарювання. Це стало основою для дослідження можливості керування динамічними об'єктами за допомогою їхніх статичних моделей та оцінювання отримуваних при цьому втрат. Як показано у роботі, ці втрати визначаються співвідношенням швидкості зміни необхідного значення вихідного сигналу та власних значень матриці стану об'єкта [5, 6].

Наприклад, в певних умовах можливе застосування керування динамічним об'єктом з використанням статичних моделей [7].

Динамічний об'єкт, яким є випарна установка можна відобразити рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{A}x + \tilde{B}u; \\ y &= \tilde{C}x, \end{aligned} \quad (1)$$

де u - керуючий сигнал; y - скалярний вихідний сигнал; x - N - мірний вектор стану; \tilde{A} , \tilde{B} і \tilde{C} - матриця розмірностей $N \times N$, $N \times 1$ і $1 \times N$ відповідно.

Цей динамічний об'єкт можна відобразити у канонічному вигляді

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + Bu; \\ y &= Cz, \end{aligned} \quad (2)$$

де $A = \text{diag} \lambda_i$ - діагональна матриця власних значень A ; $z = G^{-1}x$ - вектор канонічних змінних; $B = G^{-1}\tilde{B}$; $C = (1, 1, \dots, 1)$; G^{-1} - матриця, зворотна матриці Вандермонда.

Задача керування об'єктом (2) на інтервалі $[0, T]$, з умов мінімуму функціоналу задається наступним чином:

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T (y^*(t) - y(t))^2 dt, \quad (3)$$

де $y^*(t)$ - необхідне значення вихідного сигналу. Відповідно

$$\max_{[0, T]} |y^*(t)| \leq \delta. \quad (4)$$

З використанням його статичної моделі

$$\hat{y} = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = -CA^{-1}Bu(\infty) = \alpha u(\infty), \quad (5)$$

для необхідного керування $u(t)$

$$u(t) = \frac{y^*(t)}{\alpha} \quad (6)$$

можна отримати наступну оцінку втрат

$$\tilde{F} \leq KN \lambda_{\min}^{-2} \delta^2, \quad (7)$$

де $\alpha = -CA^{-1}B$; $k = \alpha^{-2} \sum_{i=1}^N (\lambda_i^{-1} c_i b_i)^2$; λ_{\min} - мінімальне власне значення.

Відповідно, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою статичної

моделі визначаються відношенням швидкості змін вихідного сигналу δ та власних значень матриці A об'єкту і при малих значеннях δ будуть незначними.

Розглянувши загальний критерій керування за умови, що швидкість необхідного вихідного сигналу обмежена, для закону керування за статичною моделлю, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою статичної моделі можна оцінити наступним чином [7, 8]

$$\begin{aligned}
 |F_2 - F'_2| &\leq k_2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{\delta}{\lambda_i} \right| \left(\frac{1}{\lambda_i T} (e^{\lambda_i T} - 1) - 1 \right) + \\
 &+ k_3 \sum_{i=1}^N \frac{\delta^2}{\lambda_i^2} \left(1 - \frac{2}{\lambda_i T} (e^{\lambda_i T} - 1) + \frac{1}{2\lambda_i T} (e^{2\lambda_i T} - 1) \right) \leq \\
 &\leq k_2 \sum_{i=1}^N \left| \frac{\delta}{\lambda_1} \right| + k_3 \sum_{i=1}^N \frac{\delta^2}{\lambda_1^2} \leq N \left(k_2 \frac{\delta}{|\lambda_{max}|} + k_3 \frac{\delta^2}{\lambda_{max}^2} \right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

де

$$F'_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\beta (y^*(t))^2}{\alpha^2 + \beta} dt. \tag{9}$$

$$k_2 = 2 \frac{\beta Y \alpha}{(\alpha^2 + \beta)^2} \sum_{i=1}^N \left| \frac{c_i b_i}{\lambda_i} \right|; \tag{10}$$

$$k_3 = \frac{\alpha^2}{(\alpha^2 + \beta)^2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i b_i}{\lambda_i} \right)^2. \tag{11}$$

Таким чином, втрати від керування динамічним об'єктом за допомогою його статичної моделі визначаються відношенням зміни необхідного значення вихідного сигналу до власних значень матриці A . Наявність інформації про властивості моделі об'єкту дає можливість оцінити ці втрати.

Якщо при дослідженні об'єкта присутні перешкоди вимірювань, то задачі як ідентифікації, так і керування ускладнюються. При цьому змінюються і величини втрат при використанні статичної моделі.

З досліджень відомо, що при використанні статичної моделі [4, 7, 8]

$$y = \alpha u + Dw + \xi, \tag{12}$$

де w - вектор похибки розмірності $N \times 1$; ξ - скалярна похибка виміру вихідної величини; $D = -CA^{-1}$ - вектор розмірності $1 \times N$.

Відповідно, при обмежених швидкостях змін перешкод, втрати можуть бути оцінені наступним чином:

$$\tilde{F}_1 \leq k_1 \sum_{i=1}^N \frac{(\delta + \gamma_\xi + (n-1)\gamma_w)^2}{\lambda_i^2} \leq k_1 \cdot N \frac{(\delta + \gamma_\xi + (N-1)\gamma_w)^2}{\lambda_{min}^2}, \tag{13}$$

де $k_1 = \alpha^{-2} \sum_{i=1}^N (\lambda_i^{-1} c_i b_i)^2$.

Оскільки $\delta^2 < (\delta + \gamma_\xi + (N-1)\gamma_w)^2$, то можна зробити висновок, що наявність похибок w та ξ призводить до збільшення втрат при керуванні динамічним об'єктом за

допомогою статичної моделі [7]. У зв'язку з цим для вирішення задачі оптимізації роботи випарної установки найбільш ефективно можна використовувати методи адаптивного керування, де ідентифікація здійснюється у реальному часі і дає можливість оцінити зміни характеристик процесів, що призводить до корекції алгоритму керування. Як результат, підвищується і якість керування.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності процесу випарювання соку за рахунок оптимізації режимів роботи випарної установки шляхом розробки та застосування адаптивного керування в системі керування технологічним процесом випарювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючі підходи щодо побудови математичних моделей, які застосовуються в системі математичного забезпечення керування ТП випарювання і запропонувати прості моделі, що адекватно та швидко реагують на зміни ТП. Крім того, важливою складовою забезпечення роботи ефективних моделей ТП є розробка адаптивного алгоритму керування, в якому якість керування залежить від точності рішень задач ідентифікації показників та оцінок режимів роботи.

Результати досліджень

Особливості функціонування систем адаптивного керування. Особливості функціонування задачі ТП випарювання полягає в тому, що нелінійність та нестаціонарність рівнянь, які відображають реальні технологічні процеси, приводять до того, що при керуванні такими процесами значення параметрів регулятора вибирають такими, щоб забезпечити найкраще керування в певній компромісній точці. Для оптимізації системи в декількох точках необхідна корекція параметрів регулятора відповідно до змін робочих умов.

Тому урахування нестаціонарності параметрів досліджуваних процесів призводить до необхідності використання адаптивного підходу при керуванні, який забезпечує своєчасну та правильну розробку рішення про зміну керуючих впливів. Ефективне розв'язання задачі пов'язане із введенням у контур керування ідентифікатора, що працює за деяким адаптивним алгоритмом. Система керування працює наступним чином:

- ідентифікатор оцінює в дискретні моменти часу параметри моделі;
- отримана оцінка подається в регулятор для формування керуючого впливу, мінімізуючого відхилення поточного значення виходу об'єкта від необхідного.

У результаті, модель, що була отримана в процесі ідентифікації, виконує роль прогнозуючої моделі, яка дає можливість визначити значення вихідної змінної об'єкту, яке встановлюється на його виході при подачі на вхід певних сигналів. Очевидно, що ефективність процесу керування суттєво залежить від якості отриманих математичних моделей.

Важливою особливістю промислових технологічних процесів, якими необхідно керувати, є високий рівень апіорної невизначеності щодо характеристик об'єкта керування.

Адекватним математичним апаратом для вирішення проблеми синтезу оптимальних законів керування в умовах невизначеності є теорія дискретних адаптивних систем керування, серед яких значного поширення набули адаптивні системи з ідентифікатором у контурі (АСІ). Відмінністю традиційної схеми керування є

введення додаткового контуру ідентифікації та блоку налаштування параметрів регулятора [8, 9, 10].

Динамічні моделі можуть бути приведені до моделей у просторі станів, що відображено у вигляді [8, 9, 11]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t); \\ y_v &= Cx(t) + Du(t) + Hw(t) + v(t), \end{aligned} \quad (14)$$

де $y_v(t)$ – вектор вимірів; $w(t), v(t)$ – випадкові процеси відповідно в каналах керування та вимірювання, які являють собою білі гауссівські шуми з математичними очікуваннями $M(w)=M(v)=0$, $M(ww^T)=Q_1$, $M(vv^T)=R_1$, $M(wv^T)=N_1$; C, D, H, G – постійні матриці відповідних розмірів (стаціонарний випадок).

Для відділення випарювання, вектори, що входять до опису x, u, w, y_v є такими:

$$x = [\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta h_5]^T$$

- вектор координат стану системи, що створений рівнями розчину в корпусах ВУ;

$$u = [\Delta S_1, \Delta S_2, \Delta S_3, \Delta S_4, \Delta S_5]^T$$

- вектор керування, що містить потоки між відповідними корпусами;

$$w = [\Delta S_0, \Delta W_1, \Delta W_2, \Delta W_3, \Delta W_4, \Delta W_5]^T$$

- вектор збурень, що утворюється витратами вторинної пари по корпусах;

$$y_v = x = [\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_4, \Delta h_5]^T$$

- вектор спостережень, компонентами якого є рівні розчину корпусах ВУ.

Розглядаючи лінійний динамічний стохастичний об'єкт (14) напишемо вираз для виходу у вигляді

$$y(k) = \theta^T q(k) + w(k), \quad (15)$$

де $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_{N_A}, b_1, b_2, \dots, b_{N_B})^T$ – вектор параметрів об'єкта;

$q(k) = (-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-N_A), u(k-2), \dots, u(k-N_B))^T$ – вектор стану;

$w(k)$ – похибка вимірювання; $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретний час.

Поставимо у відповідність об'єкту модель, що налаштовують у вигляді

$$\hat{y}(k) = \hat{\theta}^T(k-1)q(k), \quad (16)$$

де $\hat{y}(k)$ – вихід моделі; $\hat{\theta}(k-1) = (N_A + N_B)$ – мірний вектор параметрів, що налаштовуються.

До цієї форми можна приводити й інші описи процесів, де здійснюють керування [11].

Тоді, розглядаючи критерій [10],

$$J_k = M\{(y(k) - \hat{y}(k))^2\} = M\{(y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k))^2\} \quad (17)$$

і мінімізуючи його за $\hat{\theta}$, приходимо до оптимального по швидкості дії однокрокового алгоритма Качмажа (1.38) [8, 10]:

$$w(k+1) = w(k) - \gamma \frac{e(k+1)}{\|\nabla f(k+1)\|^2} \nabla f(k+1), \quad (18)$$

де $\gamma \in (0, 2)$ – коефіцієнт навчання, а мінімізація критерію

$$J_k = \sum_{i=0}^k (y(i) - \hat{\theta}^T(i-1)q(i))^2,$$

приводить до рекурентного методу найменших квадратів (РМНК).

Отримуючи оцінки невідомих коефіцієнтів математичної моделі, блок налаштування параметрів регулятора здійснює корекцію для того, щоб досягти необхідної якості процесів керування. Таким чином, адаптивний регулятор, що сам

налаштовується, змінює закон регулювання, підлаштовуючи свої коефіцієнти під керований процес.

Розробка та дослідження алгоритму прискореної ідентифікації. Розглянуті динамічні моделі дозволяють досить точно розрахувати керуючі дії за усередненими (за зміну, добу) вихідними даними, проте вони непридатні при оперативному керуванні процесами.

Застосування адаптивного підходу засноване на заміні складної нелінійної моделі лінійною моделлю зі змінними параметрами, оцінювання яких здійснюється у реальному часі. В якості такої моделі зазвичай використовується рівняння псевдолінійної регресії [12, 13], аналогічне (19).

$$y(k) = \theta^T x(k), \quad (19)$$

де $\theta = (h_0, h_1, \dots, h_m, h_{11}, \dots, h_{mm}, \dots, h_{mm-m})^T$ – вектор невідомих параметрів;
 $x(k) = (1, u(k-1), \dots, u(k-m), u^2(k-1), u(k-1)u(k-2), \dots, u^q(k-m))^T$

- узагальнений вектор входів.

Зазначимо, що до виду (19) можуть бути приведені різні рівняння, які описують лінійні та нелінійні динамічні об'єкти [11, 14, 15].

У зв'язку з цим до ідентифікатора, що працює в АСІ, висуваються певні вимоги, основними з яких можна вважати наступні [11, 14]:

- алгоритм ідентифікації має забезпечувати збіжність оцінок параметрів до справжніх значень параметрів у всій області дискретних змін входних змінних;
- ця збіжність не повинна зникати при включенні регулятора;
- обчислювальна процедура, що реалізує алгоритм, має бути досить простою;
- алгоритм ідентифікації повинен забезпечувати стеження за змінними параметрами об'єкта.

Практично всі рекурентні алгоритми, що використовуються в даний час, отримуються шляхом мінімізації квадратичного функціоналу і використовують при побудові оцінки безпосередні вимірювання входних і вихідних сигналів. Існує цілий клас алгоритмів, в яких крім безпосередньо виміряних значень сигналів використовуються їх деякі перетворення або додатково вводяться в алгоритм деякі допоміжні або інструментальні змінні [14, 15].

В якості основної процедура адаптивної ідентифікації використовується зазвичай РМНК

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k)], \quad (20)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)}, \quad (21)$$

де $P(0) = \alpha I$, $\alpha \gg 0$, і різні його модифікації [14-16], серед яких на тепер розповсюджено використання модифікації, що застосовує експоненціальне зважування інформації:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{\lambda + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)q(k)]; \quad (22)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \cdot \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{\lambda + q^T(k)P(k-1)q(k)} \right], \quad (23)$$

де $\lambda \in 0.995 \div 0.999$ - параметр зважування інформації.

У роботах [8, 12] було запропоновано алгоритм, що має властивості РМНК та градієнтного алгоритму з матричним коефіцієнтом посилення:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \alpha(k)Pe(k)x(k) + \beta(k)P(k)e(k)x(k), \quad (24)$$

$$\text{де } P^{-1}(k) = \lambda P^{-1}(k-1) + \gamma x(k)x^T(k), \quad (25)$$

$$\alpha^{-1}(k) = \mu(k) + mx^T(k)Px(k), \mu(k) > 0 \quad (26)$$

$$\beta^{-1}(k) = \mu(k) + mx^T(k)P(k-1)x(k), \mu(k) > 0 \quad (27)$$

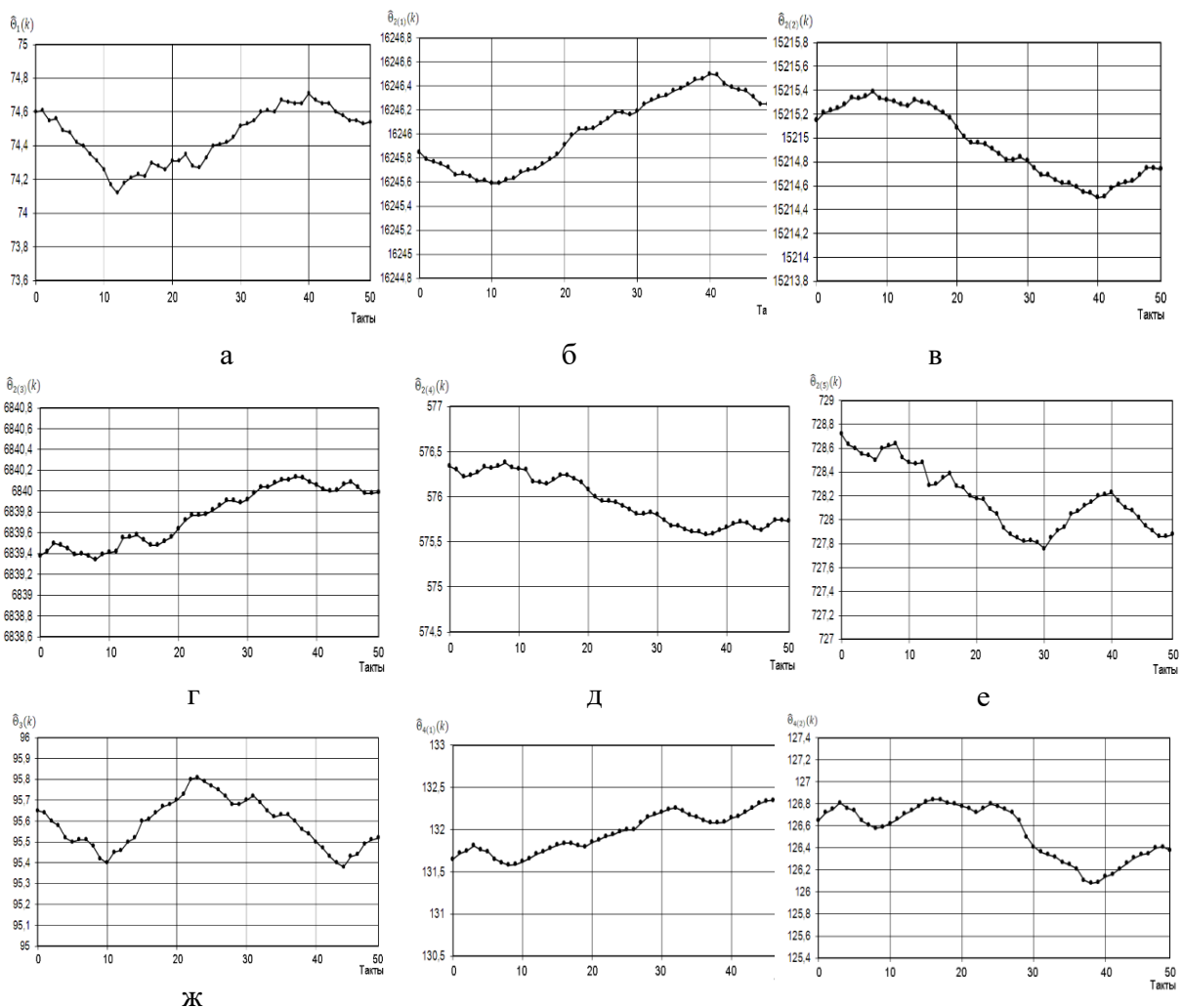
$$m = 2,0 < \lambda \leq 1,2 \leq \gamma\mu(k) \frac{8}{3}, \quad (28)$$

що має вищу швидкість збіжності в порівнянні з РМНК. Дослідження цього алгоритму відображено в роботах [8, 12].

З метою ідентифікації нестационарних процесів у БВУ використовувались алгоритми (22) і (23) з $\lambda = 0,99$. На рис. 1 показана зміна коефіцієнтів $\hat{\theta}_1(k), \hat{\theta}_2(k), \hat{\theta}_3(k), \hat{\theta}_4(k), \hat{\theta}_5(k)$ для регресійної моделі ТП випарювання (29), яка отримана за допомогою методу найменших квадратів (МНК), для випарної установки [4, 8, 12]:

$$Y = 23,7 + 3,86X_1 + 7,21X_2 - 0,95X_3 + 5,28X_4 + 12,7X_5. \quad (29)$$

При побудові регресійної моделі багатокорпусної випарної установки (БВУ) в якості вихідного параметру було вибрано вихід сиропу з БВУ Y , (S_1 , % до м.с.р.), а вхідними параметрами були: X_1 - витрати соку на вході в 1-й корпус БВУ, (S_0 , % до м. буряка); X_2^{1-5} - витрата пари в корпусах БВУ, (G_p , $\frac{кг}{год}$); X_3 - температура соку на вході в 1-й корпус БВУ, (θ_c , $^{\circ}C$); X_4^{1-5} - температура пари по корпусах БВУ, (θ_p , $^{\circ}C$); X_5^{1-5} - рівень розчину в корпусах БВУ, (h_p , м/ до загальної висоти кип. трубок, %). Крім того, при побудові регресійної моделі користувались й інформаційними показниками, такими як рівень соку у збірнику перед 1-м корпусом БВУ, витратою аміачної води перед БВУ, витратою конденсату ретурної пари і т.д.



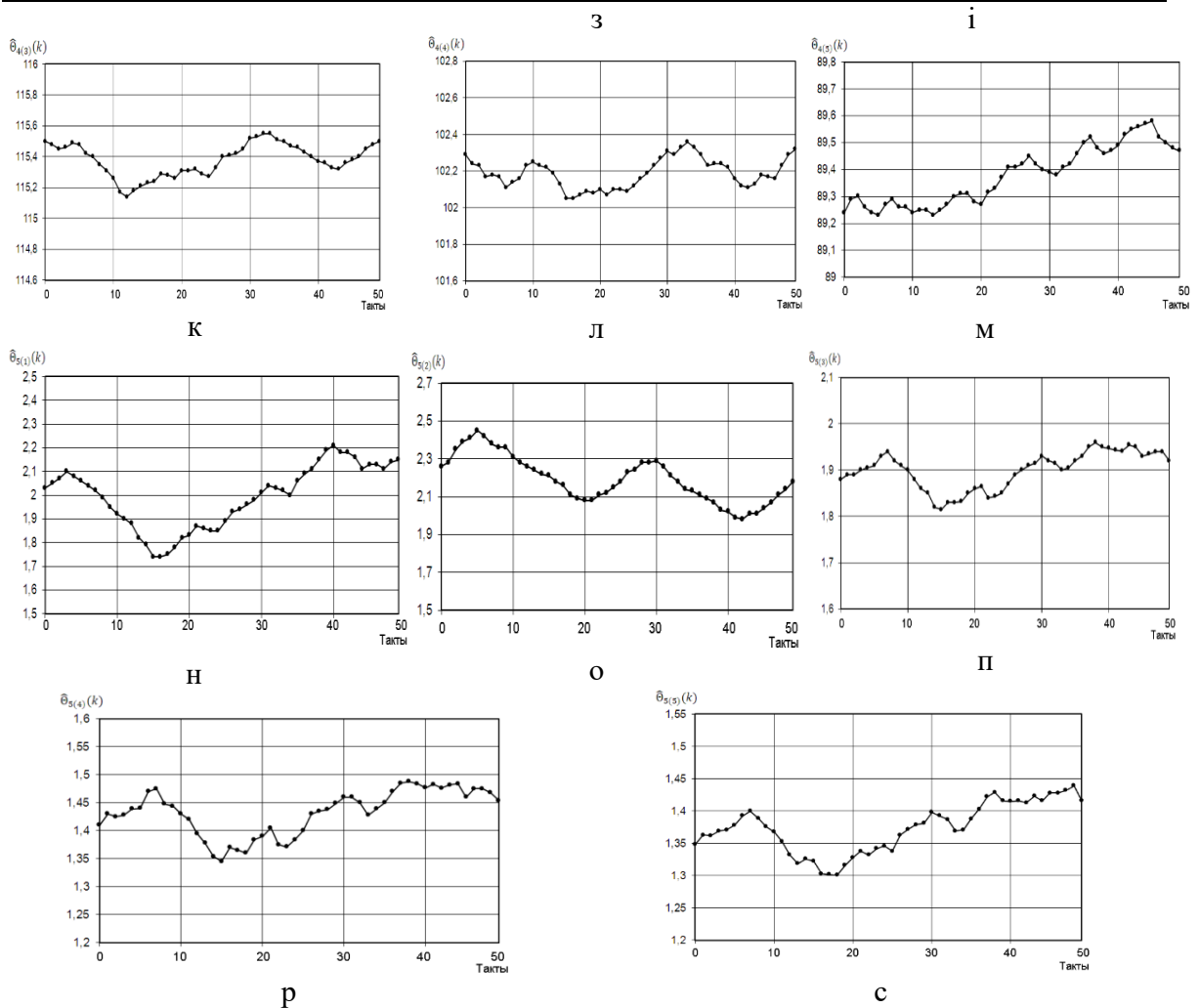


Рис. 1. (а – с) – Зміни регресійних коефіцієнтів моделі (29):
 а) для $\hat{\theta}_1(k)$; б-е) для $\hat{\theta}_2^{1-5}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ; ж) для $\hat{\theta}_3(k)$; з-м) для $\hat{\theta}_4^{1-5}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ; н-с) для $\hat{\theta}_5^{1-5}(k)$ з 1-го по 5 корпус БВУ

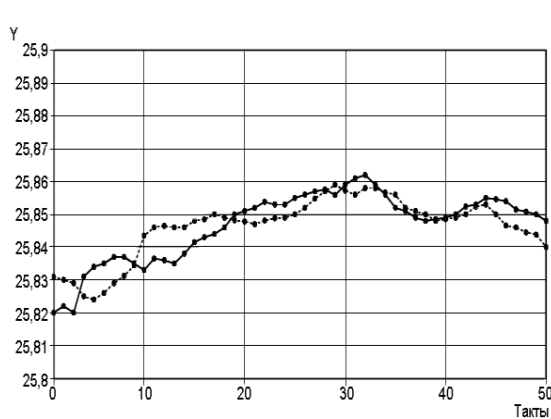


Рис. 2. Зміна виходу сиропу з ВУ

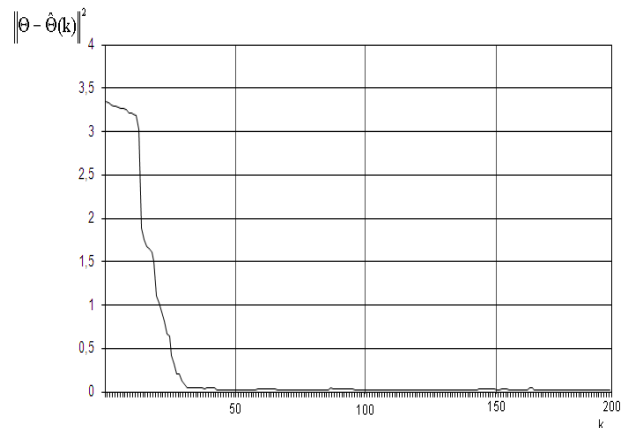


Рис. 3. Якість ідентифікації (зміна норми помилки $\|\theta - \hat{\theta}(k)\|^2$)

На рис. 2 наведена зміна виходу сиропу з БВУ, де суцільною лінією з кружками відображена реальна зміна вихідної змінної (зміна виходу сиропу з ВУ) Y , а пунктирною лінією з квадратами – зміна вихідних параметрів моделей, побудованих за допомогою алгоритмів (22) і (23). На рис. 3 наведена якість ідентифікації процесу випарювання. Помилка ідентифікації була практично нульовою.

Розробка алгоритму адаптивного керування ТП випарювання. Об'єкт керування, який описується статичними моделями, з урахуванням того, що швидкість змін вихідного сигналу обмежена $\max_{t \in [0, T]} |\dot{y}^*(t)| \leq Y$ і при початкових нульових умовах, має вигляд [7, 8, 12]

$$y(t) - y^*(t) = -\frac{\beta y^*(t)}{\alpha^2 + \beta} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta} C \Lambda^{-1} \int_0^t e^{\Lambda(t-\tau)} B \dot{y}^*(\tau) d\tau. \quad (30)$$

Із (30) можна зробити висновок, що в результаті ідентифікації можна отримати математичний опис об'єкта у вигляді (31)[7, 8,12].

$$\begin{aligned} |y(t) - y^*(t)| &\leq \frac{\beta |y^*(t)|}{\alpha^2 + \beta} + \left| \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta} C \Lambda^{-1} \Lambda^{-1} (I - e^{\Lambda t}) B \right| = \\ &= \frac{\beta |y^*|}{\alpha^2 + \beta} + \left| \frac{\sum_{i=1}^N c_i \lambda_i^{-1} b_i \lambda_i^{-1} \delta \alpha (1 - e^{\lambda_i t})}{\alpha^2 + \beta} \right|. \end{aligned} \quad (31)$$

Так як задача керування об'єктом полягає у знаходженні відповідного закону зміни вхідних змінних q , який забезпечив би отримання заданої вихідної величини y^* , то припустимо, що для зміни вихідної величини на $\Delta y(k+1)$ необхідно мати і зміну вихідного вектору на $\Delta q(k+1)$, наприклад:

$$\Delta y(k+1) = \hat{\theta}^T(k) \Delta q(k+1). \quad (32)$$

Для знаходження Δx_{n+1} введемо в розгляд норму

$$\|\Delta q(k+1)\|_A^2 = \Delta q^T(k+1) A \Delta q(k+1), \quad (33)$$

де A - матриця вартості керуючих впливів.

Мінімізація (33) приводить до наступного алгоритму адаптивного керування [7, 12]

$$q(k+1) = \begin{cases} q(k), |\Delta y(k+1)| < \delta(k+1), \\ q^{max}, q(k) + \Delta q(k+1) \geq q^{max}, |\Delta y(k+1)| \% \geq \delta(k+1), \\ q(k) + \frac{\Delta y(k+1)}{\hat{\theta}^T(k) A^{-1} \hat{\theta}(k)} A^{-1} \hat{\theta}(k), q^{min} < q(k) + \Delta q(k+1) < q^{max}, \\ q^{min}, q(k) + \Delta q(k+1) \leq q^{min}, |\Delta y(k+1)| \geq \delta(k+1). \end{cases} \quad (34)$$

Хоча реалізація цього алгоритму керування не складна, якість керування залежить від точності рішення задачі ідентифікації, тому що в алгоритм керування входять оцінки, які отримані в процесі ідентифікації моделі псевдолінійної регресії (19).

Якщо $y(k) = \theta^T q(k)$, а необхідне значення вихідної змінної дорівнює $y^*(k)$, тоді, якщо з N вхідних змінних m є нерегульованими, для компенсації неузгодженості $y^*(k) - y(k)$ на k -му кроці необхідна розробка керуючих впливів, що мають вигляд:

$$q_j(k) = \frac{y^*(k) - \sum_{i=1}^m \theta_i(k-1) q_i(k)}{\sum_{j,i=m+1}^N a_{ji}^{-1} \theta_j(k-1) \theta_i(m-1)} \sum_{i=m+1}^N a_{ji}^{-1} \theta_i(k-1).$$

Необхідно відмітити, що при $N - m > 1$ мета керування буде досягнута за один крок, і у подальшому при $y^* = const$ уточнення коефіцієнтів моделі не здійснюється. Таким чином, одночасна ідентифікація і керування приводять до функціонального зв'язку між m нерегульованими та $(N - m)$ регульованими входами об'єкта. У

результаті виникнення такої кореляції зменшується швидкість процесу ідентифікації, а також можлива і її зупинка, тобто відбувається порушення умов ідентифікації в замкнутому контурі [4, 12, 13, 14]. Це підтверджується наступним чином.

Корекція параметрів здійснюється при наявності неузгодженості

$$\Delta y(k) = \theta^T q(k) - y^*. \quad (35)$$

Розглянемо величину $(\Delta y(k))^2$. Підставляючи в (35) необхідні значення $q_j(k) (j = \overline{m+1, N})$, отримаємо

$$(\Delta y(k))^2 = \left[\sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \frac{\sum_{j,l=m+1}^N \theta \hat{\theta}_i(k-1) a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_i(n-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1)} \right) q_i(k) + \dots \right. \\ \left. + y^* \frac{\sum_{j,l=k+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1)}{\sum_{j,l=k+1}^N a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1)} - 1 \right]^2.$$

Так як $\Delta y(k)$ – випадкова величина, то замість $(\Delta y(k))^2$ розглянемо величину $M\{(\Delta y(k))^2\}$. Тоді, якщо $q_i(k) (i = \overline{1, m})$ статистично незалежні випадкові величини з $M\{q_i\} = 0$, $M\{q_i^2\} = \sigma_q^2 (i = \overline{1, m})$, налаштування коефіцієнтів буде здійснюватися за виконання умови

$$M\{(\Delta y(k))^2\} = \sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \frac{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1) \hat{\theta}_i(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1)} \right) \sigma_q^2 + \\ + y^{*2} \left(\frac{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1)}{\sum_{j,l=m+1}^N a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1)} - 1 \right)^2 > 0 \quad (36)$$

Як очевидно з (36), процес ідентифікації може зупинитися у разі, коли $\theta_i = \hat{\theta}_i(k-1) (i = \overline{1, N})$, тобто при точному визначенні параметрів об'єкта, так і при виконанні рівностей:

$$\sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1) \hat{\theta}_i(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1) \theta_i; \\ \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \theta_j \hat{\theta}_i(k-1) = \sum_{j,l} a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_i(k-1).$$

Отриманий вираз (36) є досить загальним і дозволяє встановити умови зупинення процесу ідентифікації в конкретних завданнях для заданого числа регульованих входів, виду матриці вартості A та y^* .

Обговорення

Наявність у системі перешкод призводить до зміни властивостей оцінок, які отримані за допомогою адаптивних алгоритмів ідентифікації, і це ще більше ускладнює роботу ідентифікатора замкнутої системи. Нескладно уявити, що в цьому випадку для забезпечення перебігу процесу ідентифікації дисперсія відхилень вихідних змінних має перевищувати дисперсію перешкод. Наявність перешкоди може призвести до того, що процес ідентифікації не тільки не сходиться, а й почне розходитися. У загальному випадку для забезпечення стійкої роботи ідентифікатора в замкнутому контурі необхідно забезпечити умову стійкого збудження на вході об'єкта, що може бути досягнуто, наприклад, шляхом використання алгоритму керування виду

$$q_j(k) = \frac{y^* - \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_i(k-1)q_i(k)}{\sum_{j,l=k+1}^N a_{jl}^{-1} \hat{\theta}_j(k-1) \hat{\theta}_l(k-1)} \sum_{i=m+1}^N a_{ji}^{-1} \hat{\theta}_i(k-1) + \zeta_j(k), \quad (37)$$

де $\zeta_j(k)$ - сигнал збурення ($\zeta_j(k) \sim N(0, \sigma_{\zeta}^2)$).

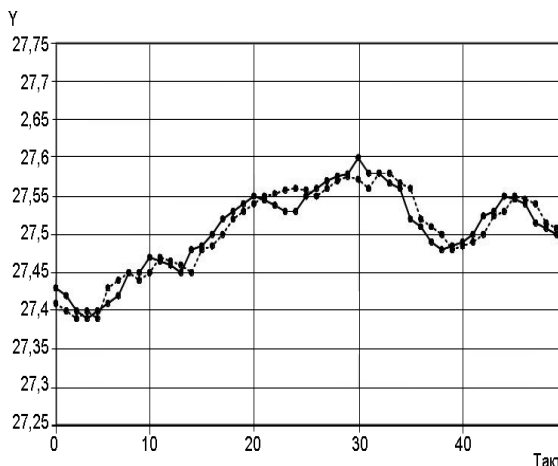


Рисунок 4 – Зміна вихідної змінної (вихід сиропу з ВУ)

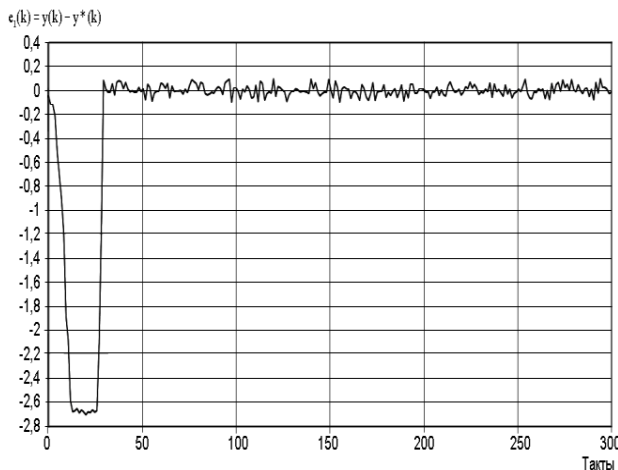


Рисунок 5 – Помилка керування (вихід сиропу з ВУ)

Процес стабілізації вихідної змінної (вихід сиропу з ВУ) під час використання моделі (29) з допомогою адаптивного алгоритму (34) наведено на рис. 4.

Суцільною лінією з колами відображено реальну зміну вихідних змінних при існуючому керуванні, а пунктирною - при адаптивному. Як і в розглянутому вище випадку на рисунках не відображено перехідний режим (режим ідентифікації), який має приблизно близько 30 тактів.

На рис. 5 показана помилка керування при стабілізації виходу сиропу з ВУ.

Висновки

1. У результаті статистичного аналізу та застосування кореляційних методів були встановлені зв'язки між вхідними та вихідними параметрами процесу випарювання, а застосування МНК дозволило отримати регресійну модель для ВУ заводу при $R^2 = 0,65 - 0,8$. Аналіз отриманої регресійної моделі показав, що модель має ряд властивостей, що обмежують сферу її застосування у завданнях керування. Тому доцільним став розгляд питання побудови математичних моделей ТП випарювання цукрового виробництва, що відображають динаміку процесів і заснованих на використанні рівнянь матеріального та енергетичного балансів. Проведений аналіз динамічних моделей випарного відділення цукрового заводу та синтезу регуляторів на основі моделей у просторі станів свідчить про складність вирішення цього завдання на основі фільтра Калмана, у зв'язку з необхідністю наявності досить великого обсягу апріорної інформації про властивості об'єкта, статистичних властивостей корисних сигналів та похибок. Використання ж у фільтрі неточно заданих коваріаційних матриць призводить до його розбіжності. У зв'язку з тим, що дослідження динамічних властивостей ТП випарювання часто проводили складно через нелінійність об'єктів, що описуються, до того ж диференційними рівняннями у частинних похідних, на практиці виправдовують себе спрощення (лінеаризація на краю робочих режимів тощо). Це стало основою для дослідження можливості керування динамічними об'єктами за допомогою їх статичних моделей та оцінювання отримуваних при цьому втрат. Як

показано у роботі, ці втрати визначаються співвідношенням швидкості зміни необхідного значення вихідного сигналу та власних значень матриці стану об'єкта. Нестационарність процесу випарювання та відсутність достатньої повної статистичної інформації можна враховувати за рахунок реалізації адаптивного керування ТП з ідентифікатором. З цією метою запропоновано та досліджено алгоритм прискореної ідентифікації, який відрізняється від існуючих вищою швидкістю збіжності та стійкістю за наявності перешкод похибок при вимірюванні, що підтвердилося при побудові моделей ТП цукрового виробництва. Застосування даного алгоритму при побудові математичних моделей ТП цукрового виробництва забезпечило досягнення припустимої помилки ідентифікації (10%) за 20-30 тактів. Використання даного алгоритму разом із розробленим алгоритмом адаптивного керування виявилось дуже ефективним під час вирішення завдань стабілізації вихідних змінних роботи випарного відділення, забезпечуючи помилку керування (стабілізації), яка не перевищує 10%.

2. Таким чином, нейромережеві технології, дають можливість вирішити питання, які виникають при роботі зі складними нелінійними об'єктами, або з об'єктами невідомої структури, як наприклад, робота випарної установки, і які не можна вирішити за допомогою звичайних методів адаптивного керування. При цьому, застосування в системі керування математичного забезпечення, з використанням ШНМ, що базуються на можливості самостійного навчання, дають можливість використовувати нейрорегулятори в умовах невизначеності, якими характеризуються технологічні процеси.

Список використаних джерел

1. Штангеев К. О. Энергозбереження на цукрових заводах України. Цукор України. 2014. № 2 (98). С.14-17.
2. Власенко Л. О., Ладанюк А. П. Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 2/3(44). С. 57-62. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>.
3. Ладанюк А. П. Координація функціонування технологічних дільниць цукрового заводу з урахуванням задач прогнозування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2006. № 6. С. 112-115.
4. Ляшенко С.О., Кісь В.М., Фесенко А.М., Ляшенко О.С. Визначення ефективності математичних моделей процесу випарювання соку для автоматизованих систем управління. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь. Вип. 9. Том 1. С. 1-20. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10.
5. Ляшенко С., Ляшенко А. Интеллектуальное управление технологическими процессами сахарного производства. Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. 2013. Vol. 15. №7. P. 145-150.
6. Білецький М.С., Безуглов А.О. Інтелектуальні регулятори в системах автоматизації технологічних об'єктів. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 року. Київ. НУХТ, 2017. 297 с. URL: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> С. 116-117.
7. Куник Е. Г., Коваленко А. Н., Ляшенко С. А. Управление динамическим объектом с помощью его статической модели. Научно-технический журнал «Радиоэлектроника и информатика». Харків. ХНТУРЭ. 2003. №2. С. 59-60.

8. Руденко О.Г., Бессонов А. А. Адаптивное управление многомерными нелинейными объектами на основе радиально-базисных сетей. Кибернетика и системный анализ. 2005. № 2. С. 9 -18.
9. Ковриго Ю. М., Степанець О. В., Баган Т. Г., Бунке О. С. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізацій «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 155 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriiaupravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf
10. Луцька Н. М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.07 “Автоматизація технологічних процесів”. Київ. 2006. 16 с.
11. Ладанюк А. П., Ладанюк О. А., Бойко Р. О., Іващук В. В., Кроніковський Д. О., Шумігай Д. А. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: монографія. Київ. Інтер Логістик Україна, 2015. 408 с.
12. Ляшенко С. А., Ляшенко А. С. Оценка модели псевдолинейной регрессии. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы та системи. 2010. № 1(25). С. 36-40.
13. Купін А. І. Сенько А. О., Мисько Б. С. Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту: 2-ге вид., перероб. і доп. Кривий Ріг: Синельников Д. А., 2019. 298 с.
14. Апостолюк В. О., Апостолюк О. С. Інтелектуальні системи керування: конспект лекцій. Київ. НТУУ «КПІ», 2008. 88 с.
15. EL Hamidi, Khadija & Mjahed, Mostafa & Elkari, Abdeljalil & Ayad, Hassan. (2020). Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering. 2020. 10.1155/2020/8642915.
16. Narendra KS, Mukhopadhyay S. Adaptive Control using Neural Networks and Approximate Models. IEEE Trans Neural Netw. 1997; 8(3): 475-85. doi: 10.1109/72.572089. PMID: 18255653.

References

1. Enerhozberezhennia na tsukrovyykh zavodakh Ukrainy / K. O. Shtanheiev ta in. Tsukor Ukrainy. 2014. № 2 (98). pp.14-17.
2. Vlasenko L. O. Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia tekhnolohichnoho kompleksu tsukrovoho zavodu za rakhunok vykorystannia metodiv diahnostryky ta prohnozuvannia / V. O. Vlasenko, A. P. Ladaniuk // Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy. – 2010. - № 2/3(44). – pp. 57-62.: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>
3. Koordynatsiia funktsionuvannia tekhnolohichnykh dilnyts tsukrovoho zavodu z urakhuvanniam zadach prohnozuvannia / A. P. Ladaniuk ta in. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. 2006. № 6. pp. 112-115.
4. Liashenko S.O., Kis V.M., Fesenko A.M., Liashenko O.S. Vyznachennia efektyvnosti matematychnykh modelei protsesu vypariuvannia soku dlia avtomatyzovanykh system upravlinnia. // Naukovyi visnyk TDAU. Melitopol. Vyp.9. vol.1, pp. 1-20. (DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10)

5. Liashenko S. Intelligent control of technological processes in sugar production / S. Lyashenko, A. Lyashenko // Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. - Lublin-Rzeszow, Vol. 15, No. 7. 2013. - P. 145-150.
6. Biletskyi M.S., Bezuhlov A.O. Intelktualni rehuliatory v systemakh avtomatyzatsii tekhnolohichnykh ob'ektiv // Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi Internet-konferentsii «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system keruvannia orhanizatsiino-tekhnichnymy ta tekhnolohichnymy kompleksamy», 22 lystopada 2017 r. K: NUKhT, 2017. 297 pp. - URL: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> S. 116-117
7. Kynyk E. H. Upravlenye dynamychemym ob'ektom s pomoshchiu eho statycheskoi modely / E. H. Kynyk, A. N. Kovalenko, S. A. Liashenko // Nauchno-tekhnycheskyi zhurnal «Radyoelektronika y ynformatyka. – Kh. : KhNTURE. – 2003. – №2. – pp. 59-60.
8. Rudenko O.H., Bessonov A. A. Adaptyvnoe upravlenye mnohomernymy nelyneinymy ob'ektamy na osnove radyalno-bazysnykh setei // Kybernetyka y systemnyi analiz. No2. 2005. pp. 9 -18.
9. Suchasna teoriia upravlinnia. Chastyna 2. Prykladni aspekty suchasnoi teorii upravlinnia: pidruchnyk dlia stud. spetsialnosti 151 «Avtomatyziatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», spetsializatsii «Avtomatyizovane upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy», «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohichni protsesy ta vyrobnytstva» /Iu. M. Kovryho, O. V. Stepanets, T. H. Bahan, O. S. Bunke. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017. 155 s. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23117/1/Suchasna-teoriiaupravlinnia_Kovrygo_et.al.pdf
10. Lutska N. M. Doslidzhennia ta syntezy optimalnykh rehuliatoriv dlia system avtomatyzatsii tekhnolohichnykh kompleksiv neperervnogo typu : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.13.07 “Avtomatyziatsiia tekhnolohichnykh protsesiv” / N. M. Lutska. – K., 2006. – 16 p.
11. Avtomatyziatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti: [monohrafiia] / A. P. Ladaniuk, O. A. Ladaniuk, R. O. Boiko, V. V. Ivashchuk, D. O. Kronikovskiy, D. A. Shumihai. K.: Inter Lohityk Ukraina, 2015. 408 p.
12. Liashenko S.A. Otsenka modely psevdolyneinoy rehressyy. / S. A. Liashenko, A. S. Liashenko // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Avtomatyka. Avtomatyziatsiia. Elektrotekhnichni komplekxy ta systemy». Khersonskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet. – Kherson, 2010. – № 1(25). – pp. 36-40.
13. Kupin A. I. Senko A. O., Mysko B. S. Identyfikatsiia ta avtomatyizovane keruvannia v umovakh protsesiv zbahachuvalnoi tekhnolohii na osnovi metodiv obchysluvalnoho intelektu: 2-he vyd., pererob. i dop. Kryvyi Rih: Synielnikov D. A., 2019. 298 p.
14. Apostoliuk V. O., Apostoliuk O. S. Intelktualni systemy keruvannia: konspekt lektsii. K.: NTUU «KPI», 2008. 88 p.
15. EL Hamidi, Khadija & Mjahed, Mostafa & Elkari, Abdeljalil & Ayad, Hassan. (2020). Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models for Nonlinear Dynamic Systems. Modelling and Simulation in Engineering. 2020. 10.1155/2020/8642915.
16. Narendra KS, Mukhopadhyay S. Adaptive Control using Neural Networks and Approximate Models. IEEE Trans Neural Netw. 1997; 8(3): 475-85. doi: 10.1109/72.572089. PMID: 18255653.