

УДК 681.518.5

MANAGEMENT SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL FACILITIES OF FOOD INDUSTRY WITH PREDICTIVE MODELS

N. Lutska, R. Baidaiev, T. Herasymenko

National University of Food Technologies

L. Vlasenko

State University of Trade and Economics

Key words:

Regulator

MPC

Mathematical model

Criterion

Robust system

Technological object

Control

Article history:

Received 20.05.2022

Received in revised form

02.06.2022

Accepted 16.06.2022

Corresponding author:

N. Lutska

E-mail:

lutskanm2017@
gmail.com

ABSTRACT

Development and implementation of intelligent automated control systems increases the leading efficiency indicators of industry manufactures, provides an increase in the number of products, reducing production costs, and rising work productivity. Systems with complex control algorithms, in particular systems with predictive controllers are used to minimize the impact of parametric and structural disturbances on the technological object of food industry and to provide the highest quality characteristics of transients.

The object of the work is to develop an intelligent control system for technological objects of food industry using an adaptive MPC controller and to define recommendations on its applying to solve typical problems in the automation of technological processes and complexes field in comparison with classical PID-regulators, which are adjusted according to the integral-quadratic and robust criteria.

The article analyzes the current researches on the theory of predictive regulators and options for their implementation, describes the principle of operation of such regulators, and compares different methods of predictive control. There were synthesized systems with PID-controller, and its tunings were found by minimizing the integral-quadratic and robust criterion, as well as systems with an adaptive MPC device for a typical technological object of food industry. The identifier of the system with adaptive MPC uses a polynomial discrete autoregressive model of the moving average ARX.

Based on the results of the research recommendations for use of control systems with different types of regulators for technological objects were formulated, which contain the characteristics of the object, its mathematical model, and system requirements.

DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-3

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ З ПРОГНОЗУВАЛЬНИМИ МОДЕЛЯМИ

Н. М. Луцька, Р. В. Байдаєв, Т. М. Герасименко

Національний університет харчових технологій

Л. О. Власенко

Державний торговельно-економічний університет

Розробка і впровадження інтелектуальних автоматизованих систем керування (ІАСК) підвищує основні показники ефективності виробництва, забезпечує збільшення кількості продукції, зниження витрат на виробництво та зростання продуктивності праці. Для мінімізації впливу параметричних і структурних збурень на технологічний об'єкт харчової промисловості та забезпечення максимально якісних характеристик перехідних процесів застосовують системи з ускладненими алгоритмами регулювання, зокрема системи з прогнозувальними регуляторами.

У статті розроблено інтелектуальну систему керування технологічними об'єктами харчової промисловості з використанням адаптивного MPC регулятора та визначено рекомендації щодо його використання для розв'язання типових задач у галузі автоматизації технологічних процесів і комплексів у порівнянні з класичними ПІД-регуляторами, налаштування яких здійснюється за інтегрально-квадратичним та робастним критерієм.

Виконано аналіз сучасних досліджень теорії прогнозувальних регуляторів і варіантів їх впровадження, описано принцип роботи таких регуляторів, наведено порівняння різних методів прогнозувального керування. Синтезовано системи з ПІД-регулятором, налаштування яких знайдено при мінімізації інтегрально-квадратичного та робастного критерію, а також системи з адаптивним MPC-пристроєм для типового технологічного об'єкта харчової промисловості. Ідентифікатор останньої системи використовує поліноміальну дискретну авторегресійну модель ковзного середнього ARX. Виконано порівняльний аналіз перехідних процесів для комбінованого типу вхідного сигналу, максимально наближено до реальних умов при номінальних і випадкових невизначеностях.

За результатами дослідження сформульовані рекомендації щодо застосування систем з різними типами регуляторів для технологічних об'єктів, що містять характеристики об'єкта, його математичної моделі та вимог до системи.

Ключові слова: регулятор, MPC, математична модель, критерій, робастна система, технологічний об'єкт, керування.

Постановка проблеми. Системи з використанням Model Predictive Control (MPC) почали розвивати на початку шістдесятих років XX століття. Їх застосовували до виробництв нафтохімії та енергії, оскільки це задачі управління в умовах високої складності математичних моделей об'єктів. На сьогодні практичний спектр застосування методів MPC та їх універсальність значно розширюються, що дає змогу управляти багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі склад-

ною структурою, яка включає нелінійність, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані змінні, враховувати невизначеності в завданні об'єктів і збурень (Camacho & Bordons, 2007; Schwenzer, Ay, Bergs & Abel, 2021). Крім того, з'являються нові методи та варіанти реалізації прогнозувального управління, які можна застосувати для технологічних об'єктів харчової промисловості.

Для синтезу ІАСК будь-якого виробництва важливе значення відіграє коректна ідентифікація об'єкта управління. Для прогнозувальних регуляторів адекватність математичної моделі оригіналу має вирішальне значення. Також вкрай важлива ідентифікація неконтрольованих збурень, які діють на об'єкт. Часто ці збурення мають сильну випадкову складову. При правильній ідентифікації можна синтезувати MPC регулятор, який забезпечить проходження технологічного процесу з мінімальними якісними критеріями.

Основний принцип MPC полягає у визначенні в певний момент часу k послідовності керувальних дій:

$$\hat{u}(k+i|k), (i=0,1,\dots,H_p-1), \quad (1)$$

яка буде прикладена до об'єкта, щоб забезпечити максимальний збіг траєкторії прогнозованих значень виходу $\hat{y}(k+H_p|k)$ з рекомендованою траєкторією руху $r(k+i|k)$ на горизонті H_p . Вирішується це завдання за допомогою мінімізації вибраної вартісної функції. Тоді, згідно з концепцією віддаляючого горизонту, в момент часу k тільки перше значення входу $\Delta u(k)$ вектора майбутніх приростів сигналу оптимального керування реально застосовується до об'єкта. Решта оптимальних входів відкидається, і нове завдання оптимального керування вирішується в момент часу $k+1$.

Враховуючи складність технологічних процесів харчової промисловості та в умови невизначеності їх функціонування актуальним буде застосування адаптивних MPC-алгоритмів. Тоді MPC-пристрій прогнозує майбутню поведінку, використовуючи лінійну нестационарну модель технологічного процесу. На практиці такі прогнози ніколи не є точними, і ключовою метою налаштування при цьому є розробка MPC, нечутливих до помилок прогнозування. Якщо об'єкт суттєво нелінійний, розподілений або його характеристики різко відрізняються з часом, точність прогнозування математичної моделі може погіршитися настільки, що якість MPC стає неприйнятною. Адаптивний MPC може вирішити цю проблему, адаптувавши модель прогнозування до змінюваних умов експлуатації. Тож адаптивний MPC використовує фіксовану структуру математичної моделі, але дає змогу параметрам моделі еволюціонувати з часом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи прогнозувального керування MPC використовують математичну модель об'єкта будь-якої складності. Основними перевагами MPC-регуляторів є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку та високі адаптивні властивості. Такі регулятори застосовуються для багатовимірних і багатозв'язних об'єктів зі складною структурою, в тому числі і для нелінійних процесів, базуються на оптимізації в режимі реального часу з обмеженнями на регульовальні й керувальні змінні з урахуванням невизначеностей моделі об'єкта та збурень.

Принцип роботи таких регуляторів (Schwenzer, Ay, Bergs & Abel, 2021; Bemporad, Ricker & Morari, 2018; Seborg, Edgar, Mellichamp & Doyle, 2016; Kojima & Tomikawa, 2009):

- для заданої моделі об'єкта та початкових умов в момент k виконується прогнозування поведінки системи під дією керуючого сигналу на певному відрізку часу — горизонт прогнозу H_p (Prediction Horizon);

- за оптимізаційною схемою знаходиться оптимальний керувальний сигнал за комплексним функціоналом, що може враховувати як мінімум енергетичних витрат, так і максимальне відслідковування траєкторій прогнозовувальних і рекомендованих значень виходу, з урахуванням всіх існуючих обмежень та горизонту керування H_c (Control Horizon);

- згідно з концепцією віддаляючого горизонту застосовується лише керування на першому кроці ($k-k+1$), інші значення відкидаються і нова задача оптимального керування розв'язується з новими вхідними значеннями на кроці $k+1$.

Залежно від виду прогнозувальної моделі та оптимізаційної схеми розрізняють варіанти реалізації прогнозувального керування, найбільш розповсюджені з них, їх переваги та недоліки наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння прогнозувальних методів керування

Назва методу/ літературне джерело	Особливості методики	Переваги та недоліки	Область застосування
1	2	3	4
Динамічне матричне керування — DMC (Dynamic matrix control) (Camacho & Bordons, 2007; Montenegro, Ayala & Ibarra, 2022; Wang, Cai & Zan, 2022; Patan, 2021)	Використовує динамічну матрицю для прогнозу та метод квадратичного програмування при оптимізації.	Переваги: простота розрахункової схеми. Недоліки: використовується лише для лінійних стаціонарних процесів; великий горизонт прогнозу.	Нафтохімічна індустрія з багатофакторними процесами.
Модельне алгоритмічне керування — MAC (Model algorithmic control) (Camacho & Bordons, 2007; Patan, 2021; Kurnyta-Mazurek, Szolc, Henzel & Falkowski, 2021; Holkar & Waghmare, 2010)	Використовує імпульсну модель відгуку для прогнозу.	Переваги: простота розрахункової схеми; підсилена робастність щодо помилок ідентифікації. Недоліки: використовується лише для стабільних процесів.	Енергетика, скловипікання, парогенератори тощо.
Прогнозувальне функціональне керування — PFC (Predictive functional control) (Camacho & Bordons, 2007; Holkar & Waghmare, 2010; Richalet & O'Donovan, 2009; Bouhenchir, Cabassud & Le Lann, 2006; Rossiter & Aftab, 2021)	Використовує автоматичну компенсацію при збігові в базових точках бажаного та прогнозного значення виходу. Сигнал керування побудований як лінійна комбінація базисних функцій.	Переваги: робастність до помилок розрахунків; простота настройки. Недоліки: не ефективний для складних нестационарних об'єктів; — вимагає оптимізацію в реальному часі.	Робототехніка, космічна техніка, реактори, нагрівачі, чорна та алюмінієва промисловість.

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
Розширене прогнозувальне самоадаптивне керування — EPSAC (Extended prediction self-adaptive control) (Holkar & Waghmare, 2010; Su, Hermanto, Braatz & Chiu, 2016; Dutta, De Keyser & Nopens, 2012; Su, Hermanto, Braatz & Chiu, 2012)	Використовує дискретну передатну функцію для прогнозу, оцінка параметрів якої виконується за рекурсивним методом найменших квадратів. Керування розраховується за один крок за значенням налаштованого фільтр-поліному.	Переваги: проста схема розрахунку керування.	Технологічні процеси в загальному.
Розширене інтервальне адаптивне керування — EHAC (Extended horizon adaptive control) (Holkar & Waghmare, 2010; Martín-Sánchez, Lemos & Rodellar, 2012)	Використовує однокроковий критерій прогнозу та багатопараметрий регулятор.	Переваги: не потрібні матричні розрахунки. Недоліки: чутливість до структури затримки.	Технологічні процеси в загальному.
Узагальнене прогнозувальне керування — GPC (Generalized predictive control) (Holkar & Waghmare, 2010; Wang & Li, 2022; Zhang, Zhou, Li, Hou & Fang, 2013)	Використовується багатокрокова функція якості та регресійна модель прогнозу.	Переваги: ефективне при нестационарних збуреннях та для не мінімально-фазових систем.	Цементні млини, башти для сушки, роботизовані руки.
Нейромережеве інверсне прогнозувальне керування — INNPC (Inverse Neural Network Predictive Control) (Stogiannos, Alexandridis & Sarimveis, 2018)	Регулятором є нейронна мережа, що здатна переводити об'єкт з поточного стану в заданий за заданий горизонт прогнозу.	Переваги: висока стійкість до відмов; висока швидкодія; стійкість до шумів вхідних даних; адаптація до змін. Недоліки: потребує навчання нейронної мережі.	Електромеханічні процеси.

Мета дослідження: розробка інтелектуальної автоматизованої системи керування технологічними об'єктами харчової промисловості з використанням адаптивного прогнозувального регулятора та визначення рекомендації щодо його використання для розв'язання типових задач у галузі автоматизації технологічних процесів та комплексів. MPC протягом багатьох років є ефективним інструментом управління для широкої ланки багатовимірних нелінійних динамічних систем. У статті розглядається задача синтезу адаптивного MPC-пристрою для

технологічного об'єкта — пластинчастого теплообмінника, нелінійна математична модель якого отримана на основі матеріальних і теплових балансів.

Матеріали і методи. Математична модель пластинчастого теплообмінника з протилежною течією теплоносія та продукту має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + V \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{\tau} (T_{st}(x,t) - T(x,t)), \\ \frac{dT_{st}(x,t)}{dt} = C_1 (T(x,t) - T_{st}(x,t)) - C_2 (T_{st}(x,t) - T_t(x,t)), \\ \frac{\partial T_t(x,t)}{\partial t} + V_t \frac{\partial T_t(x,t)}{\partial x} = \frac{1}{\tau_t} (T_{st}(x,t) - T_t(x,t)), \end{cases} \quad (2)$$

де T , T_t , T_{st} — відповідно, температури гріючої, нагріваючої рідин і температура стінки відповідно; V , V_t — лінійні швидкості відповідно гріючої та нагріваючої рідин, що залежать від витрат потоків; C_1 , C_2 , τ , τ_t — коефіцієнти, що в загальному випадку, окрім конструктивних параметрів теплообмінника, залежать від нестационарних коефіцієнтів тепловіддачі, теплоємності та густини рідин; t , x — відповідно, часова та просторова координати. До системи (2) обов'язково додаються початкові та крайові умови.

Коли регулятору необхідне прогнозування (на початку кожного інтервалу управління), він використовує лінійну стаціонарну модель, відповідну поточним умовам, спрощена параметрична схема якої наведена на рис. 1, де ΔG , ΔG_t — відповідно, відхилення витрат через теплообмінник гріючої та гарячої води; ΔT_{in} , ΔT_{tin} — відповідно, відхилення температур на вході в теплообмінник гріючої та гарячої води; ΔT — відхилення температури нагрітої рідини.

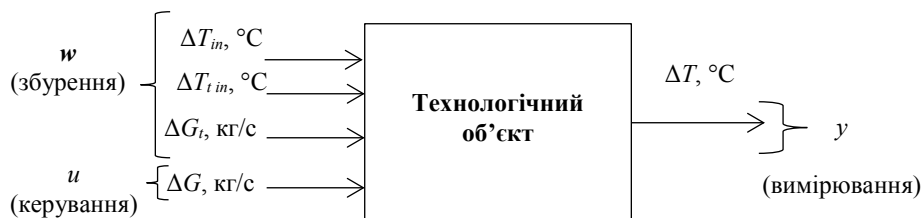


Рис. 1. Спрощена параметрична схема пластинчастого теплообмінника

На рис. 2 наведено структурну схему системи керування з адаптивним МРС-регулятором та ідентифікатором. Адаптивний МРС можна використовувати в двох варіантах: якщо існує нелінійна математична модель технологічного об'єкта, то ідентифікатор здійснює поточну лінеаризацію у робочій точці; якщо лінійну або нелінійну математичну модель отримати неможливо, то здійснюється поточна (оперативна) ідентифікація моделі в замкненому контурі. Другий варіант є більш узагальненим і практичним та потребує мінімальних затрат на додаткові апріорні дослідження.

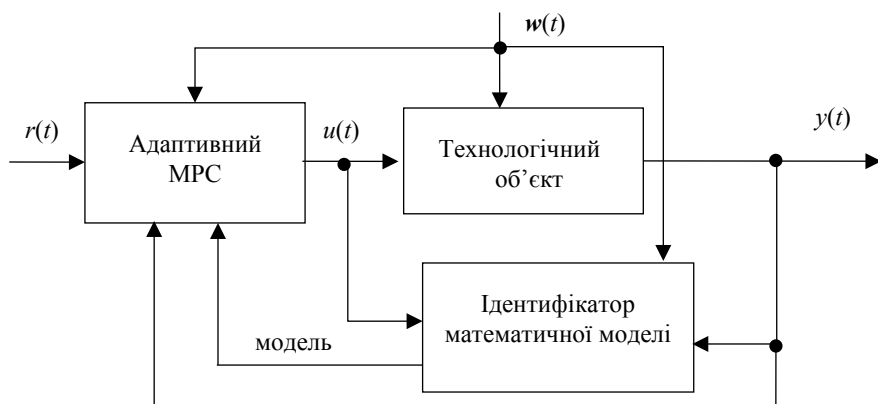


Рис. 2. Структура системи керування з адаптивним MPC-регулятором та ідентифікатором

Ідентифікатор математичної моделі (рис. 3) реалізує рекурсивну оцінку поліноміальної дискретної моделі ARX (авторегресійна модель ковзного середнього) з двома входами $G_A(t)$ та $G(t)$ (інші два збурення вважаються невимірюваними) та одним виходом $T(t)$. Ідентифікація здійснюється на кожному інтервалі керування, далі модель перетворюється в простір змінних стану і надходить до регулятора, де обробляється згідно зі стандартним MPC-алгоритмом. Порядок моделі не вище третього.

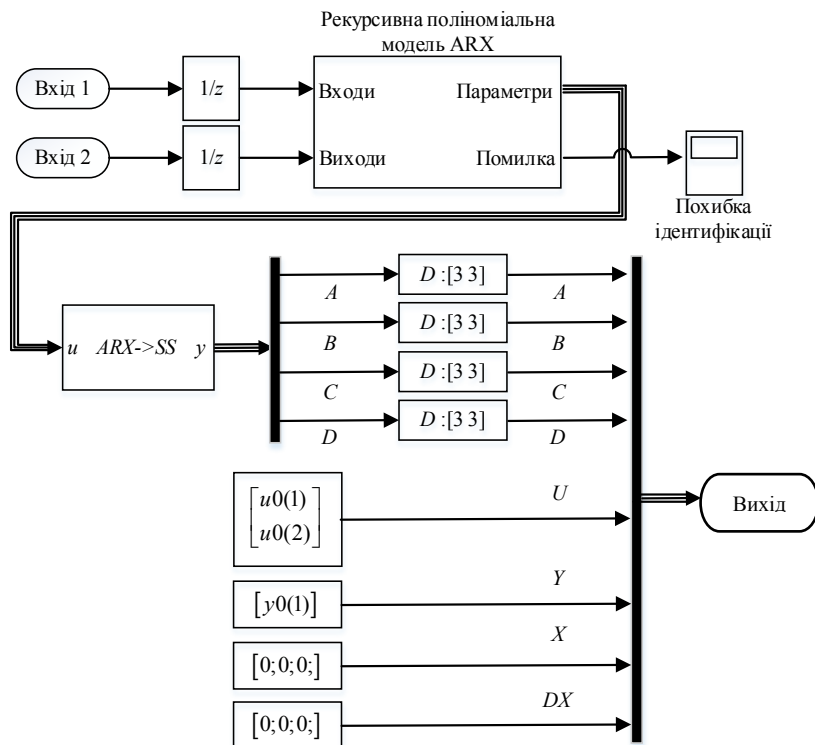


Рис. 3. Структурна схема ідентифікатора

Керуюча дія виробляється на кожному кроці керування відповідно до критерію згортки виду:

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_u(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_{\epsilon}(z_k),$$

де $z_k^T = [u(k|k)^T u(k+1|k)^T \dots u(k+p-1|k)^T \epsilon_k^T]$ — розв'язок оптимізаційної задачі; k — поточний інтервал керування; p — інтервал прогнозування;

$$J_y(z_k) = \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^p \left\{ \frac{w_{i,j}^y}{s_j^y} \left[r_j(k+i|k) - y_j(k+i|k) \right] \right\}^2 \quad \text{— складова, що визначає}$$

якість вихідних сигналів на горизонті прогнозу; n_y — кількість вихідних змінних; s^y — масштабні фактори вихідних змінних; w^y — вагові коефіцієнти вихідних змінних;

$$J_u(z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left\{ \frac{w_{i,j}^u}{s_j^u} \left[u_j(k+i|k) - u_{j,target}(k+i|k) \right] \right\}^2 \quad \text{— складова, що виз-}$$

начає вид сигналів керування на горизонті прогнозу; u_{target} — задане значення для керованих змінних; n_u — кількість керованих змінних; s^u — масштабні фактори для керованих змінних; w^u — вагові коефіцієнти для керованих змінних;

$$J_{\Delta u}(z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=0}^{p-1} \left\{ \frac{w_{i,j}^{\Delta u}}{s_j^{\Delta u}} \left[u_j(k+i|k) - u_j(k+i-1|k) \right] \right\}^2 \quad \text{— складова, що ви-}$$

значає вид приросту сигналів керування на горизонті прогнозу; $w^{\Delta u}$ — вагові коефіцієнти для приростів керованих змінних;

$J_{\epsilon}(z_k) = \rho_{\epsilon} \epsilon_k^2$ — складова, що визначає величину дозволу порушення обмежень (для м'яких обмежень); ϵ_k — величина провисання (зазору) на інтервалі керування k ; ρ_{ϵ} — вага штрафу за порушення обмежень.

До оптимізаційної задачі обов'язково додаються обмеження на керування, приріст керування та вихідні змінні. Всі обмеження також можуть бути гнучкі та жорсткі. Останні, як правило, відносяться до технічних обмежень.

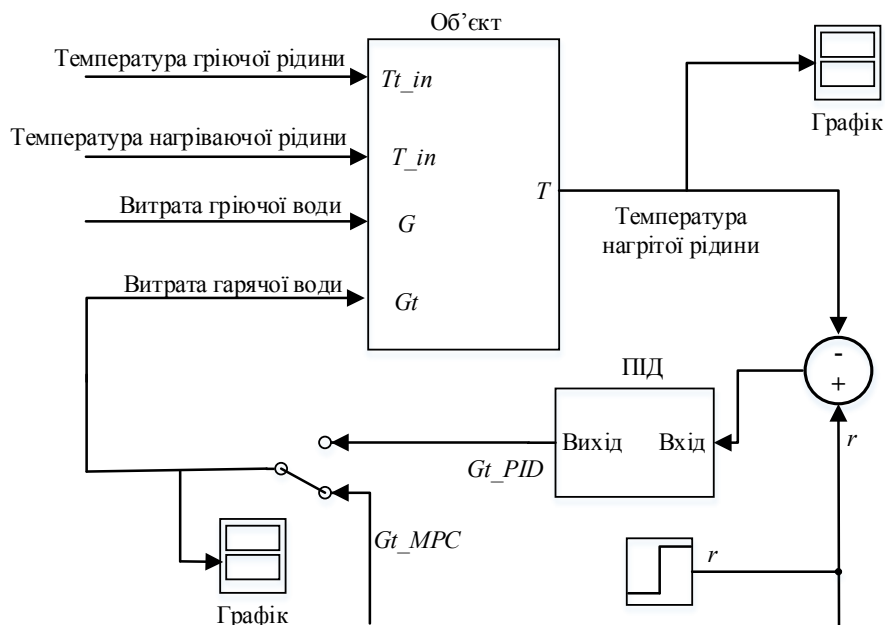
Параметрами налаштування такої системи керування є:

- для регулятора: час дискретизації T_s ; час керування k ; час прогнозування p , вагові коефіцієнти $w^{y,u,\Delta u}$ та ρ_{ϵ} ;

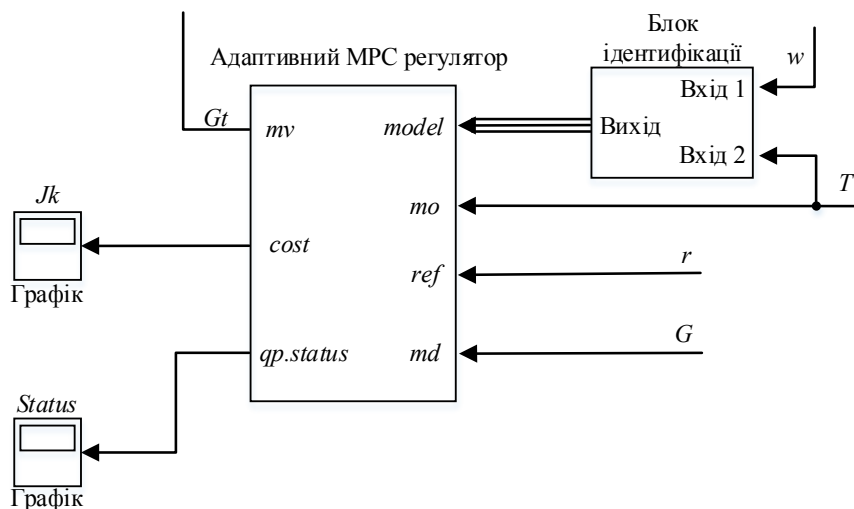
- для ідентифікатора: порядок моделі; початкові параметри моделі.

Викладення основних результатів дослідження. Структурна схема та налаштування системи керування з ПІД- та МРС-регуляторами наведені на рис. 4 та в табл. 2 (відповідно до інженерних одиниць), не вказані налаштування виставлені за замовчуванням. ПІД-регулятор налаштовувався за інтегрально-квадратичним критерієм, а також за критерієм мінімальної чутливості — робастний

ПІД-регулятор (Lutska, Zaiets, Vlasenko, Shtepa, 2018). Моделювання систем про-
водилося для комбінованого типу вхідного сигналу, максимально наближеного
до реальних умов.



А)



Б)

Рис. 4. Фрагменти структурної схеми системи керування з дискретним ПІД-регулятором (А) з адаптивним MPC-регулятором (Б)

Таблиця 2. Налаштування та критерії систем при номінальних значеннях невизначеностей

Система керування	Налаштування регулятора	Критерії	
		Інт.-квадр.	$Hinf(w - y)$
ПІД-регулятор	$kp = 2.2$ $kd = 5$ $ki = 0.13$ $Ts = 1$ с	830	1.48
Адаптивний MPC	$p = 15$ $w^u = 1$ $\rho_\epsilon = 1$ $k = 3$ $w^y = 100$ $Ts = 1$ с	711	—
Робастний ПІД-регулятор	$kp = 0.46$ $kd = 3$ $ki = 0.23$ $Ts = 1$ с	880.5	0.61

При номінальних значеннях (рис. 5) невизначеностей об'єкта найкраще себе поводить система з адаптивним MPC, однак її якість також досить знижена, тому що ідентифікована математична модель не включає всі збурення об'єкта. Крім того в такій системі досить інтенсивні сигнали керування (рис. 6), що не бажані на практиці. Останнього можна уникнути шляхом збільшення обмеження на приріст сигналу керування, що, у свою чергу, призведе до зменшення якості вихідного сигналу. В номінальному режимі система з робастним ПІД-регулятором поводить гірше, ніж зі звичайним ПІД-регулятором, налаштування якого знайдені за інтегрально-квадратичним критерієм.

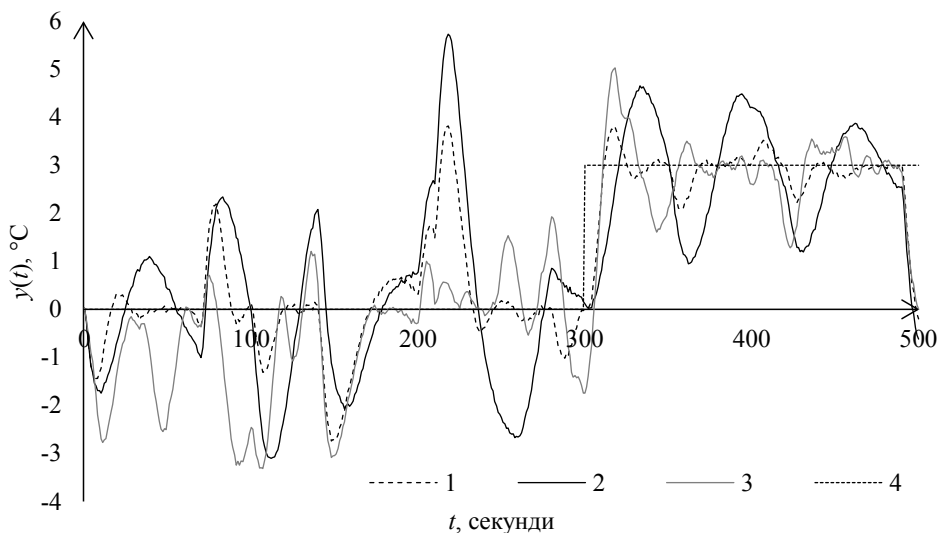


Рис. 5. Перехідні процеси в системах: 1 — з ПІД-регулятором; 2 — з робастним ПІД-регулятором; 3 — з MPC-регулятором; 4 — завдання

Як бачимо в номінальному режимі якість переходних процесів найвища у системи з MPC-пристроєм. Однак для цієї ж системи найбільший ресурс на керування. Спостереження за розв'язком оптимізаційної задачі на заданому інтервалі керування виявило, що значення кількості ітерацій не перевищує 15, що свідчить про високу швидкість виконання блоку оптимізації в заданому часовому інтервалі.

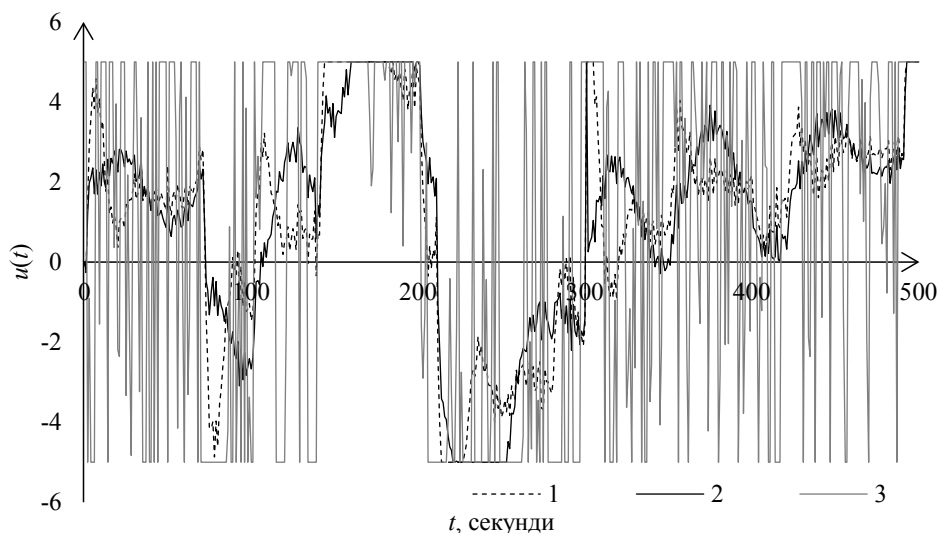


Рис. 6. Сигнали керування в системах з різними регуляторами

Зрозуміло, що при внесенні невизначеностей в об'єкт якість системи з ПД-регулятором, налаштування якого синтезовані за інтегрально-квадратичним критерієм значно погіршуються, а деяких випадках система стає нестійкою. При цих же умовах якість системи з адаптивним ПД-регулятором на рівні системи з номінальними невизначеностями. Система з МРС-пристроєм також має якісні перехідні процеси, однак на деяких ділянках перехідного процесу спостерігається значне підвищення критерію керування (рис. 7), що пояснюється низькою якістю результату ідентифікації математичної моделі об'єкта. Зокрема, поведінка невимірюваних збурень сприймається як еволюція об'єкта, на основі якої здійснюється пошук оптимального рішення. Крім того, на деяких проміжках спостерігається відсутність результату ідентифікації або оптимізації.

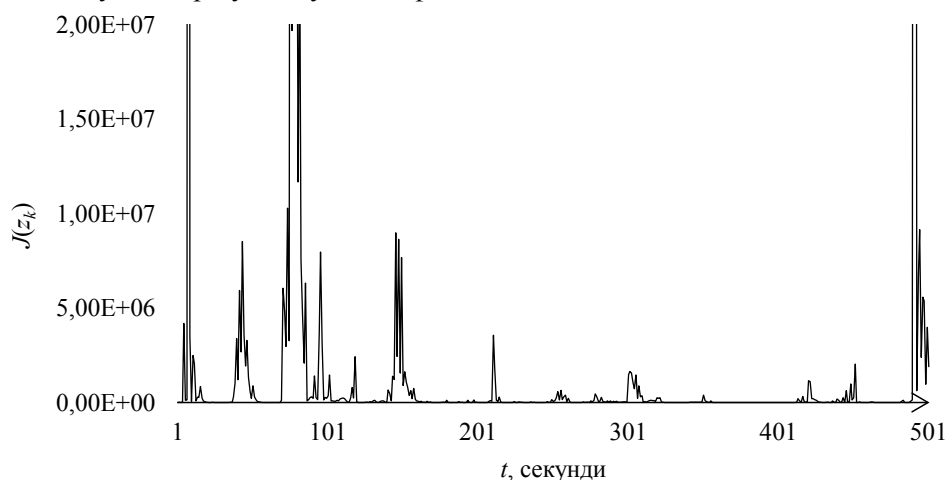


Рис. 7. Критерій оптимізації $J(z_k)$ в системі з МРС-пристроєм

Усе це вимагає використання в системах з МРС-пристроями додаткових процедур як стосовно врахування невимірюваних збурень, так і помилок при ідентифікації та оптимізації (Ладанюк, Власенко, Луцька & Смітюх, 2019). Перше можна подолати шляхом встановлення відповідних пристроїв вимірювання сигналів збурень, друге — застосуванням систем з переключенням при відслідковуванні результатів оптимізації.

Висновки

Системи керування з МРС-пристроями успішно розвиваються на практиці, при побудові та експлуатації систем керування технологічними процесами, що обумовлюється їх відносною простотою базової схеми формування зворотного зв'язку та поєднанням високих адаптивних властивостей. Однак використання такої системи керування потребує високої точності математичної моделі об'єкта, що враховує більшість суттєвих збурень. Крім того, збільшується кількість налаштувань системи керування. Робастний ПІД-регулятор вимагає мінімум налаштувань системи, працює у всьому діапазоні зміни невизначеностей в об'єкті та може бути налаштований на мінімальну чутливість. На основі проведеного дослідження можна сформулювати такі рекомендації щодо застосування розглянутих систем:

- системи керування з прогнозувальними моделями можна застосувати, якщо вимірюються більшість збурень, висока ємність об'єкта, параметри математичної моделі є квазістаціонарними, вимоги щодо якості системи високі (швидкість та точність). Крім того, при розробці таких систем необхідно проводити об'ємну науково-дослідну розробку, що потребує додаткових часових і грошових затрат;

- робастні регулятори застосовуються при структурній і параметричній невизначеності об'єкта керування та зовнішніх збурень, невисокій швидкості й точності до системи, високій надійності системи. Крім того, математична модель об'єкта при цьому має невисокий порядок, тому потребує низьких затрат на її розробку.

Для розширення використання систем з прогнозувальними моделями для технологічних об'єктів харчової промисловості необхідна розробка додаткових процедур щодо надійності такої системи. Одним із шляхів подолання цього є застосування систем з переключенням.

Література

Ладанюк, А. П., Власенко, Л. О., Луцька, Н. М., Смітюх, Я. В. (2019). Проблема забезпечення стійкості інтелектуальних систем керування технологічними об'єктами. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 25(2), 7—15.

Bemporad A., Ricker N. L., Morari M. (2018). *Matlab. Model Predictive Control Toolbox: User's Guide. R2018b*. New York: Springer.

Bouhenchir, H., Cabassud, M., Le Lann, M. V. (2006). Predictive functional control for the temperature control of a chemical batch reactor. *Computers & Chemical Engineering*, 30(6—7), 1141—1154. <http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.02.014>.

Camacho E. F., Bordons C. (2007). *Model predictive control*. Springer. ISBN: 978-0-85729-398-5.

Chidrawar, S., Patre, B. (2008). Generalized predictive control and neural generalized predictive control. *Leonardo journal of sciences*, 7(13), 133—152.

- Dutta, A., De Keyser, R., Nopens, I. (2012). Robust nonlinear extended prediction self-adaptive control (NEPSAC) of continuous bioreactors. 2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) (pp. 658—664). IEEE. <http://doi.org/10.1109/MED.2012.6265713>.
- Holkar, K. S., Waghmare, L. M. (2010). An overview of model predictive control. *International Journal of control and automation*, 3(4), 47—63.
- Kurnyta-Mazurek, P., Szolc, T., Henzel, M., Falkowski, K. (2021). Control system with a non-parametric predictive algorithm for a high-speed rotating machine with magnetic bearings. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. <http://doi.org/10.24425/bpasts.2021.13899>.
- Kojima, H., Tomikawa, M. (2009). Model Predictive Control for Deflection-Limiting Maneuver of Flexible Structure. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 51(174), 267-274. <http://doi.org/10.2322/tjsass.51.267>.
- Lutska, N., Zaiets, N., Vlasenko, L., Shtepa, V. (2018). Effective robust optimal control system for a lamellar pasteurization-cooling unit under the conditions of intense external perturbations. *Ukrainian food journal*, 7(3), 511-521. <http://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-3-15>.
- Martin-Sánchez, J. M., Lemos, J. M., Rodellar, J. (2012). Survey of industrial optimized adaptive control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 26(10), 881—918. <http://doi.org/10.1002/acs.2313>.
- Montenegro, J., Ayala, P., Ibarra, A. (2022). Predictive Dynamic Matrix Control (DMC) for Ball and Plate System Used in a Stewart Robot. *International Conference on Computer Science, Electronics and Industrial Engineering (CSEI)* (pp. 237—253). Springer, Cham. http://doi.org/10.1007/978-3-030-97719-1_14.
- Patan, K. (2021). Model Predictive Control Methods. Diagnosis and Fault-tolerant Control Volume 2: From Fault Diagnosis to Fault-tolerant Control, 121.
- Richalet, J., O'Donovan, D. (2009). Predictive functional control: principles and industrial applications. Springer Science & Business Media. ISBN: 978-1-84882-492-8.
- Rossiter, J. A., Aftab, M. S. (2021). A Comparison of Tuning Methods for Predictive Functional Control. *Processes*, 9(7), 1140. <http://doi.org/10.3390/pr9071140>.
- Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., Abel D. (2021). Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 1327—1349. <http://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., Doyle III, F. J. (2016). *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons.
- Stogiannos, M., Alexandridis, A., Sarimveis, H. (2018). Model predictive control for systems with fast dynamics using inverse neural models. *ISA transactions*, 72, 161—177. <http://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.09.016>.
- Su, Q. L., Hermanto, M. W., Braatz, R. D., Chiu, M. S. (2012). A new extended prediction self-adaptive control (EPSAC) strategy for batch control. Взято з <http://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/74449>.
- Su, Q. L., Hermanto, M. W., Braatz, R. D., Chiu, M. S. (2016). Just-in-time-learning based extended prediction self-adaptive control for batch processes. *Journal of Process Control*, 43, 1—9. <http://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.04.009>.
- Wang, H., Li, Z. S. (2022). Multi-Area Load Frequency Control in Power System Integrated With Wind Farms Using Fuzzy Generalized Predictive Control Method. *IEEE Transactions on Reliability*. <http://doi.org/10.1109/TR.2022.3177045>.
- Wang, L., Cai, Y., Zan, X. (2022). Distributed Double-Layered Dynamic Matrix Control for Large-Scale System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. doi:10.1155/2022/4650342.
- Zhang, J., Zhou, Y., Li, Y., Hou, G., Fang, F. (2013). Generalized predictive control applied in waste heat recovery power plants. *Applied energy*, 102, 320—326. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.038>.