

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Ю.М. КОРЕНЕЦЬ,
О.К. КОПАЙГОРА, Д.П. ЗАКІНА, В.І. НЕВІДІН

Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ЗАМОРОЖУВАНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

Теоретично доведено, що ідентифікація процесів виробництва заморожуваних продуктів харчування здійснюється шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою методів оптимізації немінімальнофазових об'єктів харчової промисловості визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє побудувати алгоритми керування, які адаптуються до змін параметрів об'єкту. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами при зміні їх параметрів і режимів роботи, збуреного середовища та цілей керування. Алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання при виробництві заморожуваних продуктів досягаються за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожуваних сортів хліба, дисперсія регульованого параметру знизилась в 2,1 раз, а час перехідного процесу зменшилась на 25% у порівнянні з ПІД-регулюванням.

Ключові слова: ідентифікація, алгоритми керування, адаптація, адаптивні системи, керування виробництвом, заморожування хлібобулочних виробів.

V. KHOROLSKYI, Yu. KORENETS,

O. KOPAYHORA, D. ZAIRINA, V. NEVIDIN,

Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine

AUTOMATED PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS FROZEN FOODS

In the process of providing the population of the Dnieper region with man-made areas with "smart" food, the main role is played by the high-quality food industry. Demographic and socioeconomic trends in the deteriorating health of people living and working in contaminated areas in the context of the Covid-19 pandemic require scientists to develop a nutrition system and technologies for the production of nutrient-balanced multicomponent foods. This problem must be solved through the introduction of high technology (high technology), using automated robotic systems, biotechnology (Biotech), nanotechnology (Nanotech) and information and communication technologies (Ictech).

Abstract It is theoretically proved that the identification of frozen food production processes is carried out by determining the modes of operation of the controlled process and the dimension of its state, based on which the optimization of non-minimum phase objects of the food industry determines the structure and parameters of the process model to change the parameters of the object.

Adaptive systems of optimal control of the processes of production of bakery products have been developed, which allows to improve the quality of control of these processes while changing their parameters and modes of operation, perturbed environment and management goals. The developed algorithms are implemented with the help of modern microprocessor systems that work as identifiers and provide automatic quasi-optimal adjustment of control systems for technological stages of food production.

It is established that the optimum quality of regulation in the production of bread is achieved with the help of adaptive digital regulators, namely: when using adaptive digital regulators in the control system of stages of production of frozen varieties of bread, the variance of the regulatory parameter is reduced by 2.1 times and the time of the transition process will be reduced by 25 % compared to PID control.

Keywords: identification, control algorithms, adaptation, adaptive systems, production management, freezing of bakery products.

Постановка проблеми. У процесі забезпечення населення Придніпровського регіону з техногенними територіями «розумними» продуктами харчування головну роль відіграє індустрія харчових продуктів високої якості. Демографічні та соціально-економічні тенденції погіршення здоров'я людей, що мешкають і працюють на забруднених територіях в умовах пандемії Covid-19 вимагають від науковців розробки системи раціонального харчування та технологій виробництва полікомпонентних харчових продуктів, збалансованих по нутрієнтному складу. Цю проблему потрібно вирішувати за рахунок впровадження високих технологій (high technology), з використанням автоматизованих робототехнологічних комплексів, біотехнологій (Biotech), нанотехнологій (Nanotech) та інформаційно-комунікаційних технологій (Ictech)[1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасній практиці автоматизованого виробництва високоякісної продукції харчування для регіонів з високим рівнем забруднення є тенденція збільшення виробництва охолоджених і заморожуваних напівфабрикатів та готових продуктів з використанням цифрової платформи «Іжа» [2]. Ця тенденція тісно пов'язана з проблемою забезпечення екологічною вітчизняною сировиною, ефективних способів її переобки з упровадженням робототехнологічних комплексів, алгоритмів керування, програмного забезпечення (ПЗ) цифрової платформи «Іжа». Питаннями автоматизованого виробництва харчів в Україні займаються вчені багатьох ЗВО, серед них Б.М. Гончарук, А.П. Ладанюк, В.Г. Трегуб, І.В. Ельперін, Л.О. Злобін, С.М. Швед, Я.І. Проць та багато інших вчених і наукових колективів [3, 4]. У період коронавірусних пандемій збільшення об'ємів виробництва продуктів

для здорового харчування з використанням білкових інгредієнтів рослинного і тваринного походження можливо за рахунок розробки пакету цифрових технологій та системи алгоритмізованих взаємовідносин споживачів здорового харчування з виробниками у вигляді інформаційної системи виробництва «розумної» продукції з промисловим Інтернет-речей [2]. Подібні системи розроблені на основі технологій Industry-4.0 в країнах ЄС і представляють значний інтерес для харчової промисловості України. Метою статті є розробка автоматизованих систем керування виробництвом продуктів харчування з вбудованими цифровими платформами та робототехнічними інтенсифікаторами процесів заморожування напівфабрикатів і готової продукції.

Виклад основного матеріалу досліджень. Автоматизоване виробництво харчів – хлібобулочних виробів для людей, що мешкають на територіях з техногенним тиском представляє собою складне роботизоване виробництво. Важливою ознакою такої системи є використання цифрової платформи «Іжа», промислового інтернет речей, SCADA I MES-системи та інтелектуальних датчиків рН-параметрів, запаху, температурних режимів роботи технологічних апаратів та робототехнічних інтенсифікаторів (PIK) гетерогенного середовища, програмного забезпечення (ПЗ), міні-ЕОМ. На вхід $\{X\}$ виробничої системи надходять параметри $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ що характеризують робочі характеристики сировини, води, електрики, газу. Вихідні параметри виробничої системи $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \bar{Y}_3$ – відповідно хліба, заморожуваного хліба і заморожуваного тіста [1]. На рис. 1 наведено автоматизовану систему керування технологічної лінії (АСКТЛ) з виробництва смарт-продуктів харчування – хлібобулочних виробів з лікувальними характеристиками, в якій використано адаптивні системи керування (АСК), а саме: дільниці сировини АСК_{д.с.}; АСК_{д.о.} – дільниці опари; АСК_{д.т.} – дільниці виробництва тіста; АСК_{д.в.} – дільниці випікання; АСК_{д.з.т.} – дільниці заморожування тіста; АСК_{д.з.х.} – дільниці заморожування хліба. АСКТЛ через інформаційну шину Profibus DP зв'язана з цифровою платформою «Іжа», промисловим інтернет речей, SCADA-системами, та міні-ЕОМ з програмним забезпеченням (ПЗ) та робототехнічними інтенсифікаторами (PIK). Останні взаємодіють з гетерогенним середовищем опара-тісто і за рахунок керованих кавітаційних впливів відіграють важливу роль в процесі збагачення тіста природними біокоригуючими інгредієнтами [1, 4, 5].

Виникає завдання щодо розробки цифрових адаптивних алгоритмів стабілізації вихідних параметрів об'єкту переробки сировини (борошна) в продукцію з лікувально-профілактичними властивостями.

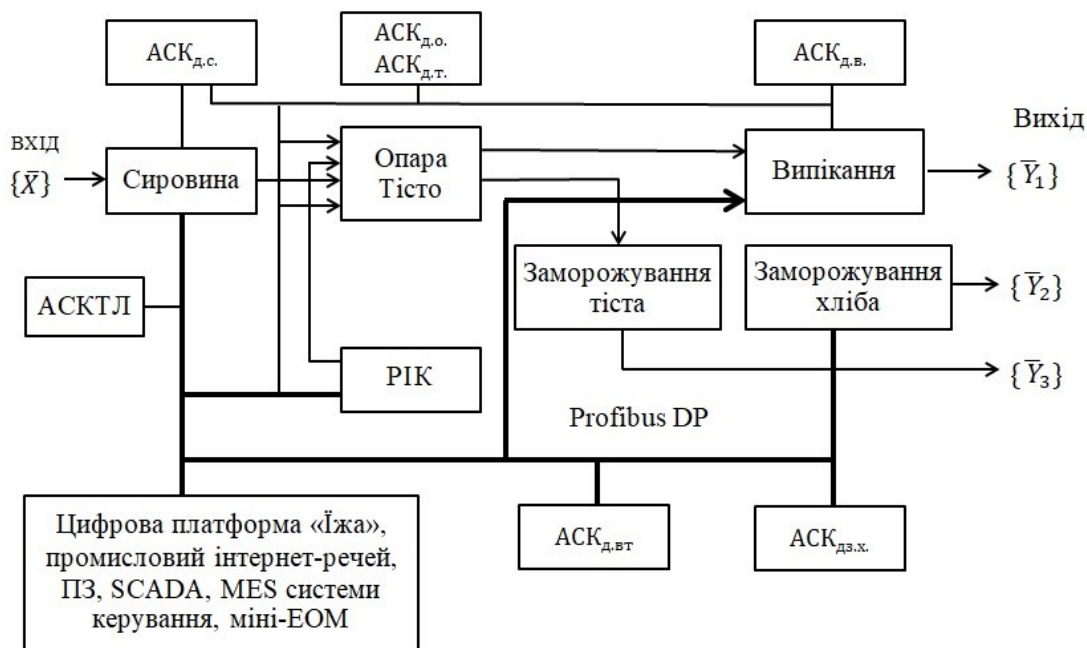


Рис. 1. Автоматизована система керування виробництва хлібобулочних виробів.

Ці алгоритми реалізуються за допомогою сучасних мікропроцесорних систем (МП), які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматичне квазіоптимальне налагодження систем. Передавальна функція системи керування стабілізації регулюемого параметру (густини тіста,) може бути записано у вигляді рівняння:

$$W_{сист}(P) = \frac{W_{pez}(P) * W_{об}(p)}{W_{pez}(P) * W_{об}(P) + 1} \tag{1}$$

При цьому об'єкт регулювання опишемо:

$$W_{об}(P) = \frac{K_D E^{-p\tau}}{T_p + 1} = \frac{E^{-p\tau}}{\frac{T}{K_0} * p + 1 / K_0} = \frac{E^{-p\tau}}{a_1 p + a_0} \quad (2)$$

де $a_1 = T/K_0$, $a_0 = 1/K_0$ – коефіцієнти.

Після підстановки в рівняння (6) виразу (7) одержимо :

$$W_{сист}(P) = \frac{(K_{II}(P) + K_I)e^{-\tau p}}{p(a_1 p + a_0) + (K_{II} p + K_I)e^{-\tau p}} \quad (3)$$

Якщо подати на вхід системи стрибок $q(t)$ передавальну функцію (8) запишемо:

$$W(p) = \int_0^{\infty} q(t) e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} q(t) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i!} p^i (t)^i dt = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \int_0^{\infty} q(t) \frac{t^i}{i!} dt = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i \quad (4)$$

де $\mu_i = \int_0^{\infty} q(t) \frac{t^i}{i!} dt$ – момент функції.

Ряд у виразі (8) одержано в результаті розкладу e^{-pt} в ряд $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (p\tau)^i}{i!}$ та зміною порядку операції сумування та інтегрування, що допустимо внаслідок розмірної збіжності степеневого ряду. Порівняємо вирази (9) та (8), а також замінюючи $e^{-p\tau}$ рядом одержимо:

$$\sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i [a_1 p^2 + a_1 p + (K_{II} p + K_I) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \tau^j p^j] = (K_{II} p + K_I) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \tau^k p^k \quad (5)$$

Порівнюючи в лівій і правій частинах коефіцієнти при одних і тих ступенях p , одержимо систему рівняння виду:

$$\mu_0 a_0 + \mu_0 k_{II} + K_I \mu_1 (-1)^1 + \mu_0 K_I (-1)^1 \tau = K_{II} + K_I (-1)^1 \tau \quad (6)$$

для першого ступеня p .

$$\mu_0 a_1 + (-1)^1 \mu_1 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} + \mu_0 K_{II} (-1)^1 \tau + K_I \mu_2 + \mu_1 \tau K_I + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 = (-1)^1 \tau K_{II} + \frac{k_I}{2} \tau^2 \quad (7)$$

для другого ступеня p

$$\begin{aligned} & (-1)^2 \mu_1 a_1 + (-1)^2 \mu_2 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} p + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 + (-1)^2 K_I \mu_3 + (-1)^2 \mu_2 \tau K_I + \\ & + (-1)^2 \mu_2 K_I (-1) \tau + (-1)^1 \mu_1 K_I \frac{1}{2} \tau^2 + \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 = \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 + \frac{1}{6} K_I (-1)^3 \tau^3 \end{aligned} \quad (8)$$

для третього ступеня.

Обчислюємо рівняння (13) відносно a_0 і одержимо :

$$a_0 = \mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} \quad (9)$$

Обчислюємо рівняння (14) відносно a_1 і підставимо замість a_0 його значення та одержимо квадратичне рівняння виду :

$$a_1 = \frac{\mu_1}{\mu_0} (\mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0}) + K_{II} \tau + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I - \frac{K_{II}}{\mu_0} \tau + \frac{1}{2\mu_0} K_I \tau^2 \quad (10)$$

Підставляючи a_0 і a_1 в рівняння (15) одержимо кубічне рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0^2} K_I \tau + 2\mu_1 K_{II} \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0^2} K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I \tau - \mu_2 K_{II} \tau - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 + \frac{1}{2\mu_0} K_I \tau^2 + \\ & + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 + \frac{1}{2} K_{II} \tau^2 - \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 + \frac{1}{6} K_I \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \\ & + \mu_1 \mu_2 \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \mu_1 \mu_2 K_{II} K_I + \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} + \mu_0 K_{II} + \mu_3 K_I = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

За умовою ідентифікації процесу виробництва хлібобулочних виробів межі знаходження кореня $\tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max}$, $\tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max}$, то ці рівняння легко обчислюються методом Бісекції (золотого перетину) [6]. Знайдений корінь τ^* буде значенням часу запізнення. Після чого, підставляючи τ^* в рівняння (14, 15) одержимо відповідно значення a_0^* і a_1^* .

В системі, в якості блока ідентифікації використано МП, який виконує наступні функції:

1. Видає команду щодо введення сигналу в систему керування (фіксує момент подачі скачка) від РІК.
2. Вводить в пам'ять значення імпульсної перехідної функції в момент t .
3. Обчислює моменти за формулою:

$$\mu_i = \sum_{j=0}^N q(t_j) t_j^i \frac{1}{i!} (t_j - t_{j-1}) \quad (12)$$

4. Обчислює рівняння (11) методом Бісекції

5. Визначає τ^* , a_0^* , a_1^* , τ^* , a_0^* , a_1^* .

6. Перераховує K_0 , T .

7. За методом максимального ступеня стійкості корегує коефіцієнти K_{II} і K_I

Блок – схема адаптивної цифрової системи керування тістомісильного відділення (технологічні апарати 1,2, 3,4 .5,6,7,8) наведена на рис 2.

Ця система працює в циклі з робототехнологічним комплексом виробництва тістових напівфабрикатів 8. та робототехнічної системи замороження 9 хліба 10 Якість борошна та опари в системі керування вимірюється інтелектуальним датчиком Д1 склад тіста (запах) – датчиком Д2. Цифрові сигнали з інтелектуальних датчиків Д1,Д2, Д3,Д4 ,надходять на пристрій введення (ПВВ) МП 1, який в подальшому розраховує коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 , а також чинники K_0 , T . За методом максимальної ступені стійкості МП розраховує також коефіцієнти K_{II} і K_I III – регуляторів Р1,Р2. Регулятор Р1 відпрацьовує сигнал керування, який за допомогою тристороннього перетворювача ТПЧ1 і двигуна АД1 змінює продуктивність агрегату Н щодо транспортування опари в тістомісильну машину 5. Система адаптивного керування мішалкою 6 з регулятором Р2 та виконавчими механізмами ВМ1, ТПЧ2, АД2 керує продуктивністю апаратів 5 та 7.

Така система цифрового керування комплексом дозволяє збільшити продуктивність стадії випікання хліба на 6-7% [1]. В останні п'ять років у процесі виконання портфеля замовлення ОПР та топ-менеджери хлібозаводів, які працюють на стадію заморожування хліба \bar{V}_2 \bar{V}_3 стикаються з високими вимогами споживачів до їх продукції. В цьому випадку виникає необхідність розробки цифрових алгоритмів керування процесом виробництва заморожуваних сортів хліба з контролем вхідних і вихідних змінних за допомогою інтелектуальних датчиків Д3, Д4, Д5.

Нехай за інформацією інтелектуальних датчиків на хлібозаводах контролюються вхідні $x(t)$ і вихідні $y(t)$ чинники. Роботу тістомісильних агрегатів будемо контролювати за наступними каналами: а) сила борошна та якість інгредієнтів і закваски [1, 4, 5]. б) процентний вміст густини тіста та його запах в зливні тістомісильної машини; в) питома вага борошна і питома вага опари в стадіях виробництва тіста. Динаміку цих агрегатів опишемо лінійним диференціальним рівнянням виду :

$$\sum_{i=0}^n a_i y^i(t) = x(t - \tau), \quad (13)$$

де $x(t)$ та $y(t)$ – вхідний та вихідний сигнали об'єкту досліджень; a_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), τ – квазістаціонарні параметри об'єкту, при цьому a_i – параметри ідентифікації [1,6]. Параметри a_i , τ приймають значення із діапазону

$$a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}, \quad i=0,1,\dots,n, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\max} \quad (14)$$

За сигналами $x(t)$ та $y(t)$, які ми можемо вимірювати, необхідно визначити поточні значення параметрів a_i і τ ($i = 0, 1, \dots, n$). Для об'єкта, який працює в замкненому контурі з регулятором, коли вхідний сигнал має достатньо широкий частотний спектр (має безперервну спектральну щільність) пропонується наступний спосіб пасивної ідентифікації [6]. Вхідний і вихідний сигнали об'єкту пропускають через ряд лінійних фільтрів $N = n + 2$ порядку $K \geq N$ з передавальними функціями $W_i(p)$.

Будемо вважати, що $L^{-1}[W_i(p)]$ лінійно незалежні, де $L^{-1}[1, 6]$ - означає зворотне перетворення Лапласа. Тоді запишемо :

$$L^{-1}[W_L(p)] \neq \sum_{j=1}^N C_j L^{-2}[W_j(p)], \quad i \neq j \quad (15)$$

У результаті такої операції одержимо матрицю $y(t)$ і вектор $\bar{X}(t - \theta)$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1'(t), & \dots, & y_1^{(n-1)}(t) \\ y_2(t), & y_2'(t), & \dots, & y_2^{(n-2)}(t) \\ \dots & \dots & \dots, & \dots \\ y_{n+2}^1(t), & y_{n+2}^2(t), & \dots, & y_{n+2}^{(n+2)}(t) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\text{Де } \bar{X}(t - \theta) = (x_1(t - \theta), \dots, x_N(t - \theta)), \quad (17)$$

$$y^i(t) = L^{-1}[p^i W_i(p) y(p)], \quad 0 < \theta < \tau_{\max}$$

$$x_j(t) = L^{-1}[W_j(p) x(p)], \quad i = 0, \dots, n, \quad j = 1, \dots, (n + 2)$$

$x(p)$, $y(p)$ – зображення по Лапласу вхідного і вихідного сигналу об'єкту, який будемо описувати рівнянням виду (13). Доведемо, що одержані таким чином сигнали підкоряються системі тотожностей.

$$\sum_{i=0}^n a_i y_i^{(i)}(t) = x_i(t - \theta), \quad j = 1, \dots, N \quad (18)$$

$$\text{за умови, що } \theta = \tau \quad (19)$$

Дійсно, якщо перейти в рівняння (13) в частотну область, що допустимо внаслідок квазістаціонарності параметрів $a(i = 0, \dots, n)$, τ та помноживши дві частини на $W_j(p)$, одержимо з врахуванням (19) значення виду:

$$a_i w_j(p) * p^i y(p) = w_j(p) X(p) e^{-\theta p} \quad (20)$$

Якщо перейти у виразі (20) у частотну область і врахувати вираз (17), одержимо систему рівностей (18). Тому сигнали $y_j^i(t)$, $X_j(t - \theta)$ будемо використовувати для визначення a_i , τ , $i = 0, \dots, n$. З цією метою введемо вектори

$$\begin{aligned} \bar{b}(t, \theta) &= (b_0(t, \theta), \dots, b_n(t, \theta)) \\ \bar{c}(t, \theta) &= (c_1(t, \theta), \dots, c_n(t, \theta)) \end{aligned} \quad (21)$$

Які будемо визначати із співвідношень:

$$b^{-T}(t, \theta) = Y^{-1}(t), G^{-T}(t - \theta), \tag{22}$$

$$\text{де } \bar{G}(t - \theta) = (X_1(t - \theta), \dots, X_{n+1}(t - \theta)) \tag{23}$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1'(t), & \dots, & y_1^{(m)}(t) \\ y_i(t), & y_i'(t), & \dots, & y_i^n(t) \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ y_n(t), & y_{n+1}^i(t), & \dots, & y_{n+1}^n(t) \end{bmatrix}, \tag{24}$$

$$C^{-T}(t, \theta) = b^{-T}(t, \theta) - X^{-T}(t - \theta) \tag{25}$$

При виконанні умови (15) $\text{rank } y(t) \gg n + 1$, а тому $Y^{-1}(t)$ існує. Як слідує із виразів (22-25) (n+1) - компонента вектору $\bar{C}(t, \theta)$ тотожність, яка рівна нулю, а в той же час (n+2) компонента в загальному випадку відрізняється від нуля. Як слідує із порівнянь виразів (18) і (22) в момент, коли виконується умова (24) $C_{n+2}(t, \theta)$ компоненти вектора $\bar{C}(t, \theta)$ обнулюються. При цьому виконується умова:

$$b_j(t_1, \theta) = a_j, j = 0, \dots, n \tag{26}$$

Утім оцінки поточних значень параметрів об'єкта можливо одержати із (22). Запропонований алгоритм можливо реалізувати на базі МП. Розглянемо приклад використання алгоритму керування в системі автоматичного регулювання процесом заморожування напівфабрикатів хліба [7]. Блок-схема такої системи наведена на рис.2. У цій системі якісний склад борошна та інгредієнтів контролюється датчиками Д2, Д3, Д4 витрати води автоматичним витратоміром 4 Сигнали з цих інтелектуальних датчиків і блока завдання через ПВВ надходять в МП1.

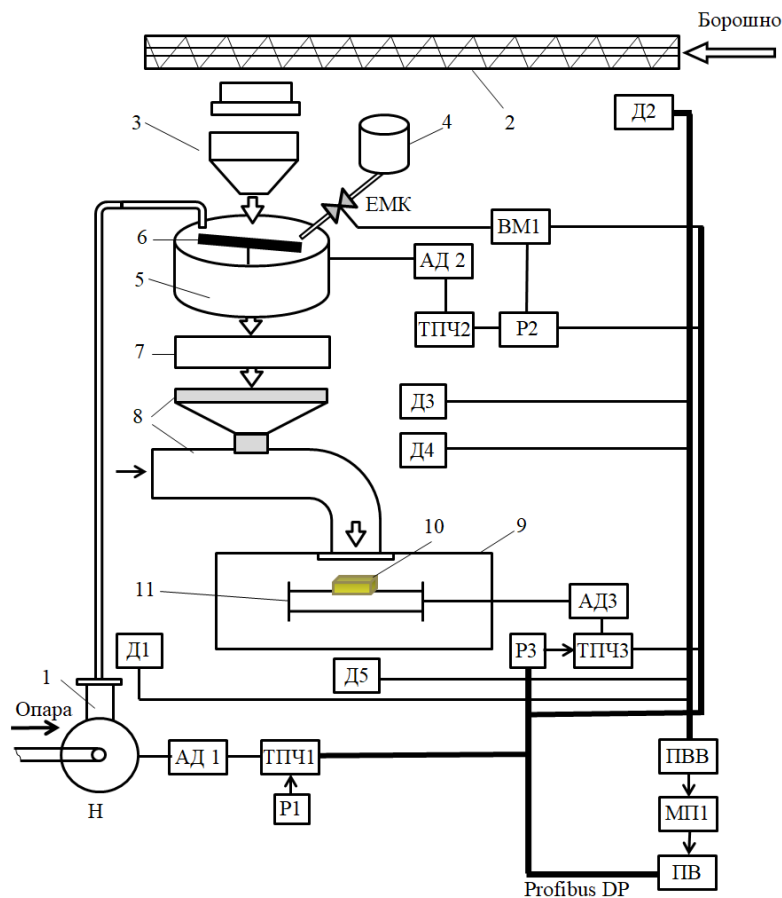


Рис. 2 – Адаптивна цифрова система керування тістомісильним відділенням:

1 – насос з електроприводом АД1–ТПЧ1; 2 – шнековий давач борошна; 3 – автоборошномірний пристрій; 4 – автоматичний водомірний бачок; 5 – тістомісильна машина; 6 – мішалка з електроприводом АД2 – ТПЧ2; 7 – п’ятисекційний бункер; 8 – робототехнологічний комплекс виробництва; 9 – холодильна камера; 10 – хліб; 11 – конвеєр з електроприводом АД3–ТПЧ3.

При цьому за інформацією датчика ДЗ виконується реалізація контуру адаптивного регулювання, шляхом зміни подачі води в тістомісильну машину [5]. Алгоритми управління працює наступним чином. Нехай T_{KB} – інтервал квантування, який визначає дискретність вводу і виводу усіх сигналів у МПІ. Тоді сигнали із датчиків Д2, Д3, Д4, Д5, $x_i^j(t)$, $y_i^j(t)$ вводять в МПІ у дискретні моменти kT_{KB} , $k=0,1,2,\dots,N$. Величина запізнення апроксимується виразом $l * T_{KB}$, де l – приймає цілочисельне значення з діапазону:

$$0 \leq l \leq m, \tag{27}$$

де $m = \text{ent}[\frac{\tau_{\max}}{T_{KB}}] + 1$ — фіксоване число.

Введені в МП сигнали утворюють матрицю $Y(kT_{KB})$ та вектор $\bar{y}_{n+2}(kT_{KB})$, $\bar{X}(kT_{KB})$, де

$$\bar{y}_{n+2}(kT_{KB}) = (y_{n+2}(kT_{KB}), y_{n+2}^l(kT_{KB}), \dots, y_{n+2}^{(n)}(kT_{KB})) \tag{28}$$

$\bar{x}_e(kT_{KB}) = (x_1(k-e)kT_{KB}, \dots, x_{n-2}(k-l)kT_{KB})$, де l – змінюється в межах (27).

У процесі ідентифікації обчислюються вектори $\bar{b}(kT_{KB})$ та $(n+2)$ компоненти вектора $\bar{C}(kT_{KB})$, які є дискретними аналогами виразів (22) та (23).

$$\bar{b}(kT_{KB}) = Y^{-1}(kT_{KB})F * e^{-T}(kT_{KB}) \tag{29}$$

$$\bar{C}_N(kT_{KB}) = \bar{y}_{n+2}(kT_{KB}) \bar{b}((kT_{KB}, l) - \bar{x}_e((k-l)T_{KB})) \tag{30}$$

при різних l в межах (27). Потім обчислюється $l^* \mathbf{1}^* \mathbf{1}^*$, при якому функція $I(l) = |\bar{C}_N(kT_{KB}, l)|$ досягає максимуму. Запізнення і динамічні параметри оцінюють за формулою :

$$\tau^* = lT_{KB} \tag{31}$$

$$a_l = b_i(kT_{KB}, l), i = 0, \dots, N \tag{32}$$

Після реалізації вище описаного алгоритму МПІ через буферну пам'ять і ПВ впливає на регулятор РЗ та виконавчий механізм холодильної установки 9 конвеєра 11, змінюючи його швидкість за допомогою ТПЧЗ та АДЗ. При цьому мікропроцесор МПІ контролює тривалість заморожування тіста τ_T та хліба τ_x і температуру в діапазоні -20°C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$), що дозволяє адаптивним системам керування АСК_{д.з.т.}, АСК_{д.з.х.} відпрацьовувати показники якості системи [6, 7], використовуючи вищеописані адаптивні алгоритми керування.

На рис 3 представлені результати порівняльного дослідження цифрового ПІД – закону керування (крива 1) і регулятора, який реалізує адаптивний алгоритм (крива 2) і яке виконано із застосуванням програмного забезпечення, розробленого в середовищі MATLAB [7].

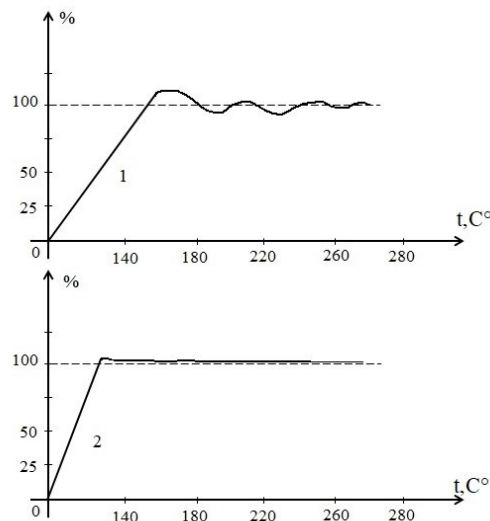


Рис. 3 – Графіки зміни в часі параметра якості тіста: 1 – ПІД-регулятор, 2 – ПІД-адаптивний регулятор.

Із аналізу кривих 1 та 2 слідує, що для САР з адаптивним законом управління час відпрацювання сигналу задавача впливу значно менше (крива 2), ніж в системі з ПД – цифрового керування (крива 1). При цьому відмітимо, що дисперсія регульовального параметру знизилась в 2,1 рази, а час перехідного процесу зменшився на 25% у порівнянні з ПД – цифровим керуванням.

Висновки. Теоретично доведено, що ідентифікація процесів виробництва хліба здійснюється шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та розмірності його стану, на основі чого за допомогою методів оптимізації немінімальнофазових об'єктів харчової промисловості визначається структура та параметри моделі процесу, що дозволяє побудувати алгоритми адаптації, які адаптуються до змін параметрів об'єкту. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами при зміні їх параметрів і режимів роботи, збуреного середовища та цілей керування. Розроблені алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють в якості ідентифікаторів і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання при виробництві хліба досягаються за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожуваних сортів хліба, дисперсія регульовального параметру знизилась в 2,1 рази, а час перехідного процесу зменшився на 25% у порівнянні з ПД-регулюванням.

Література

1. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / [В.П. Хорольський, Ю.М. Коренець, А.В. Возняк, О.В. Омельченко, Д.П. Заїкіна, О.К. Копайгора, А.В. Шеїна]; за редакцією професора В.П. Хорольського. – Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2019. – 204с.
2. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону / В.П. Хорольський, О.В. Хорольська, І.П. Діанов; за загальною редакцією професорів В.П. Хорольського та О.Б. Чернеги. – Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2020. – 564 с.
3. Гончаренко Б.М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : підручник / Гончаренко Б.М., Ладанюк А.П. – К. : НУХТ, 2014. – 530 с.
4. Швед С.М. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів / С.М. Швед, І.В. Ельперін // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 613(60). – С. 44–46.
5. Хроменков В.М. Технологическое оборудование хлебзаводов и макаронных фабрик / В.М. Хроменков. – СПб : ГЦОРД, 2004. – 496 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5 т. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ, 2004 – 784 с.
7. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Е.И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

References

1. Intelektualni systemy upravlinnya vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv / V.P. Khorolsky, YU.M. Korenets, A.V. Voznyak, O.V. Omelchenko, D.P. Zaikina, O.K. Kopayhora, A.V. Sheyina // Za redaktsiyeyu profesora V.P. Khorolskoho. – Kryvyy Rih: vydavets FOP Chernyavskyy D.O. – 2019, 204s.
2. Tsyfrovі systemy intelektualnoho upravlinnya pidpryemstvamy promyslovoho kompleksu rehionu / V.P. Khorolsky, O.V. Khorolska, I.P. Diyanov // za zahalnoyu redaktsiyeyu profesoriv V.P. Khorolskoho ta O.B. Chernehy. – Kryvyy Rih: vydavets FOP Chernyavskyy D.O. – 2020, 564s.
3. Honcharenko B.M., Ladanyuk A.P., Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv kharchovykh tekhnolohiy: Pidruchnyk – K.:NUKHT, 2014 – S.530
4. Shved S.M. Sistemnyi analiz tekhnologichnogo protsesu virobnytstva khlibobulochnykh vyrobiv / S.M.Shved, I.V.Yel'perin // Skhidno-Ëvropeys'kiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2012, №613(60) – S.44-46
5. Khromenkov V.M. Tekhnologicheskoye oborudovaniye khlebzavodov i makaronnykh fabrik / V.M. Khromenkov – SpB GTSORD, 2004 –S.496
6. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 5-i tt. 2-ye izd., pererab. i dop. T.3. Sintez regul'yatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya. – M.: Izd-vo MG TU, 2004 – 784s.
7. Dorf R. Sovremennyye sistemy upravleniya / R.Dorf, R.Bishop. Per. S angl. Ye.I.Kopylova. – M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2004. – 832s.

Надійшла / Paper received : 05.11.2020 р. Надрукована/Printed : 04.01.2021 р.