

*Хорольський В. П., д-р техн. наук, професор¹**Коренець Ю. М., старший викладач¹**Копайгора О. К., асистент¹*

¹ Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

UDC 004.032.26.664.6

*Khorolskiy V. P., Grand PhD of Engineering sciences, Professor¹**Korenets Yu. M., Senior Lecturer¹**Kopayhora O. K., Assistant Professor¹*

¹ Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua

IDENTIFICATION METHODS AND ALGORITHMS OF ADAPTIVE SYSTEMS FOR DIRECT DIGITAL CONTROL OF FOOD PRODUCTION

Мета — розроблення методів ідентифікації та алгоритмів адаптивного керування складними динамічними об'єктами виробництва продукції харчування з лікувально-профілактичними властивостями для регіонів з техногенним навантаженням.

Методи. Під час проведення дослідження використано методи теорії ідентифікації систем (для вибору обґрунтування структури математичної моделі об'єкта керування), а також в основу досліджень покладені методи аналітичного конструювання оптимальних адаптивних регуляторів та обґрунтування принципів ідентифікації об'єктів з використанням методу максимального ступеня стійкості, а також розроблення алгоритмів оптимального керування виробництвом продукції харчування, методи нелінійної динаміки для визначення характеристик керованих процесів, методи імітаційного моделювання із застосуванням програмного забезпечення, розробленого в середовищі MATLAB для визначення ефективності запропонованих способів керування виробництвом хлібобулочних виробів.

Результати. 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 визначаються структура та параметри моделі процесу, що дає змогу побудувати алгоритми адаптації, які пристосовуються до змін параметрів об'єкта. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами в разі зміни їх параметрів і режимів роботи, збуреного середовища та цілей керування. Розроблені алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють як ідентифікатори і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання під час виробництва хліба досягаються за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожених сортів хліба, дисперсія регульованого параметра знизилась в 2,1 разів, а час перехідного процесу зменшиться на 25 % порівняно з ПІД-регулюванням.

Ключові слова: ідентифікація, алгоритми керування, адаптація, адаптивні системи, керування виробництвом, хлібобулочні вироби.

Надійшла до редакції 10.04.2019 р.

© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець, О. К. Копайгора, 2020

Постановка проблеми. Упровадження сучасних автоматизованих цифрових систем керування складними технологічними процесами виробництва з борошна екологічно чистих продуктів харчування з лікувально-профілактичними властивостями неможливо без розроблення принципів й алгоритмів та керованих пристроїв, які мають властивість адаптуватись до змін параметрів об'єкта [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій вітчизняних учених І. С. Гулий, І. В. Ельперина, В. Д. Кишенько, В. Г. Мирончука, М. М. Пушанко, В. М. Хроменкова, С. С. Шаруди, С. М. Швед та ін. свідчить про те, що технологічні процеси виробництва хлібобулочних виробів належать до складних, динамічних об'єктів з нестационарними параметрами, нелінійними залежностями і стохастичними змінними, що мають транспортні запізнювання, різні режими роботи і чутливі до якості вхідної сировини — борошна. Для керування процесами виробництва хлібобулочних виробів стали поширеними системи, що використовують або динамічні моделі керованих процесів з адаптацією параметрів, або статичну оптимізацію. Такі системи в умовах варіації збурень (якості борошна) і змінних режимів роботи обладнання не можуть забезпечити ефективного керування нелінійними процесами виробництва продукції [2,3,4,5]. Крім того, нестационарність і стохастичність керованих процесів потребує розроблення адаптивних систем керування, які ефективні в умовах збурень сировини, а продукція харчування повинна відповідати заданій якості та запитам споживачів [5].

Мета статті — розроблення методів ідентифікації та алгоритмів керування складними динамічними об'єктами виробництва продукції харчування з лікувально-профілактичними властивостями. Задля досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

— теоретично обґрунтувати принципи оптимального керування нелінійними процесами виробництва хлібобулочних виробів та визначити методи ідентифікації та адаптації об'єктів керування;

— розробити адаптивні цифрові системи керування виробництвом хлібобулочних виробів за методом максимального ступеня стійкості.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 показано блок-схему керування типовим об'єктом виробництва хлібобулочних виробів. Об'єкт у загальному вигляді опишемо виразом виду

$$W_{об} = \frac{K_{об} * e^{-\tau p}}{1 + \tau p}.$$

Керувати об'єктом будемо за допомогою пропорційно-інтегрального регулятора з введенням у закон регулювання інтеграла:

$$U_{PI}(t) = K_P [E(t) + K_I \int_0^t E(t) dt], \quad (1)$$

а також пропорційного регулятора з введенням у закон регулювання інтеграла і похідної від регульованої величини (ПІД-регулятор):

$$U_{ПИД}(t) = K_n [E(t) + K_I \int_0^t E(t) dt + K_D E(t)], \quad (2)$$

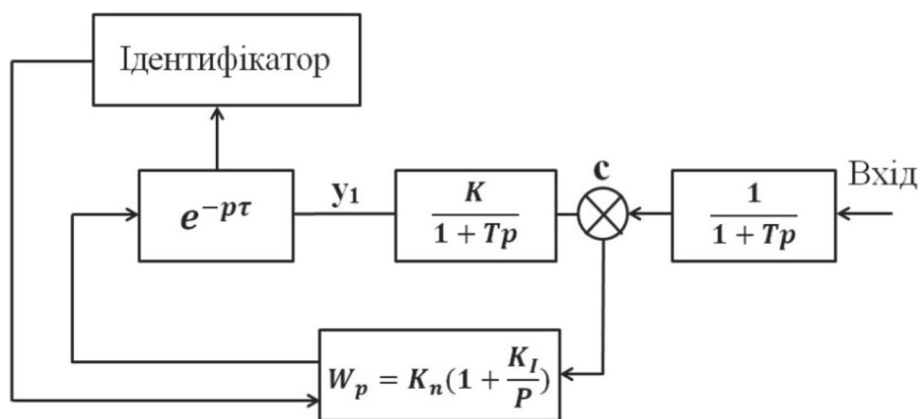


Рисунок 1 — Блок-схема керування об'єктом переробки борошна в хлібобулочні вироби

де $E(t) = Y_z(t) - Y(t)$; $Y(t)$ — вихідна змінна об'єкта керування; $Y_z(t)$ — завдання на регулятор; $U(t)$ — вихідна змінна регулятора; K_n, K_I, K_D налагоджувальні параметри регулятора.

У цій системі активна ідентифікація характеристик виконується шляхом періодичного додавання ідентифікованого впливу ΔU до управлінського впливу $U_{PI}(t), U_{PID}(t)$. Частота подання ідентифікованого впливу визначається динамічними параметрами системи. До моменту надходження наступного ідентифікованого впливу повинен повністю закінчитися перехідний процес від попереднього, не виходячи із зони допустимих відхилень. Щоб менша ймовірність можливих змін параметрів об'єкта, то рідше проводиться ідентифікація. З метою одержання математичних моделей параметрів об'єкта, розглянемо детально рис. 2.

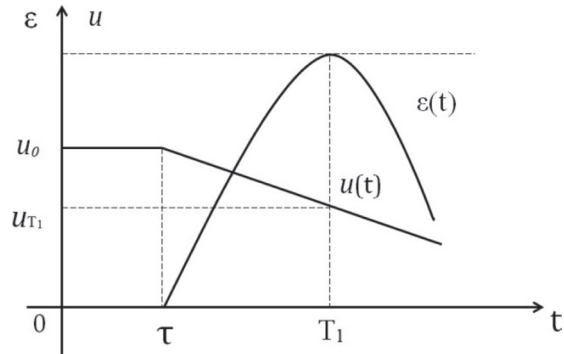


Рисунок 2 — Залежність змінних ϵ, u від часу t

У процесі ідентифікації визначається час, коли досягається максимальне значення функції $Y(t)$. Цей час визначає величину запізнення τ . Позначимо A_1 значення $Y(t)$, яке відповідає цьому часу. Час досягнення максимального значення $Y(t)$ функцією позначимо через T_1 . Одночасно будемо фіксувати значення управлінського впливу в момент часу, який передре моменту T_1 на сталі значення τ .

Використовуючи результати аналізу функцій $Y(t), Y'(t), U(t)$, виконаємо розрахунок параметрів об'єкта за формулою:

$$K_o = \frac{Y_D}{U(T_1 - \tau)}, T = \frac{K_o \Delta U}{A_1}, \quad (3)$$

де ΔU — ідентифікуючий вплив, який додано до управляючого впливу. На основі обчислених параметрів об'єкта стає можливим синтез оптимальної системи управління за критерієм максимального ступеня стійкості. Він має максимальну швидкість дії за аперіодичного характеру перехідного процесу.

Для системи регулювання об'єктом вигляду $W = K_o \exp(-\tau p)(1 + Tp)^{-1}$ з використанням ПІ-регулятора оптимальні за критерієм максимального ступеня стійкості налагоджувальні параметри регулятора будемо визначати за формулою:

$$K_{PI} = A(\alpha\tau - 2)(\tau K_o)^{-1} \quad ; \quad K_I = A[(2(\alpha\tau - 3)(\tau)^{-1} - (\alpha\tau - 2)\lambda_{PI}][\tau K_o]^{-1} \quad ,$$

де

$$\lambda_{PI} = \sqrt{8T^2 + \tau^2} - (4T + \tau)(2T\lambda)^{-1}, \quad A_M = T e^{\lambda_{PI}\tau}, \quad \alpha = \sqrt{8T^2 + \tau^2} (\tau T)^{-1}. \quad (4)$$

Під час використання ПІД-регулятора його оптимальні налагоджувальні параметри розраховують за формулами:

$$K_{PI} = A[(2 - \alpha\tau)\lambda_{PID} + 2(\alpha\tau - 3)\tau^{-1}]K_{OB}^{-1};$$

$$K_I = A[0,5(\alpha\tau - 2)\lambda_{PID}^2 - 2(\alpha\tau - 3)\lambda_{PID}\tau^{-1} + 3(\alpha\tau - 4)\tau^{-2}]K_{OB}^{-1};$$

$$K_D = A(\alpha\tau - 2)K_{OB}^{-1},$$

де

$$\lambda_{PID} = \frac{(12T^2 + \tau^2)^{0,5} - (6T + \tau)}{2\tau T}, \quad A = T \exp \lambda_{PID} \tau, \quad \alpha = (12T^2 + \tau)^{0,5} (\tau T)^{-1}. \quad (5)$$

Розглянемо детально роботу адаптивного керування з активною ідентифікацією. Широке використання мікропроцесорів (МП) на підприємствах харчової промисловос-

ті в розподілених системах керування виробництва продукції відкриває нові можливості щодо розроблення адаптивних алгоритмів керування, а також адаптивних цифрових регуляторів. Вони дають можливість реалізувати більш складну логіку керування технологічним процесом і запам'ятовувати в оперативній пам'яті необхідні проміжні параметри.

На рис. 3 показано блок-схему адаптивного алгоритму з активною ідентифікацією. Алгоритм має такі функціональні блоки: фільтр, блок аналізу траєкторії, блок запуску ідентифікатора, блок пошуку максимуму, блок перерахунку коефіцієнтів, ПІ-регулятор.

Розглянемо роботу адаптивного цифрового алгоритму:

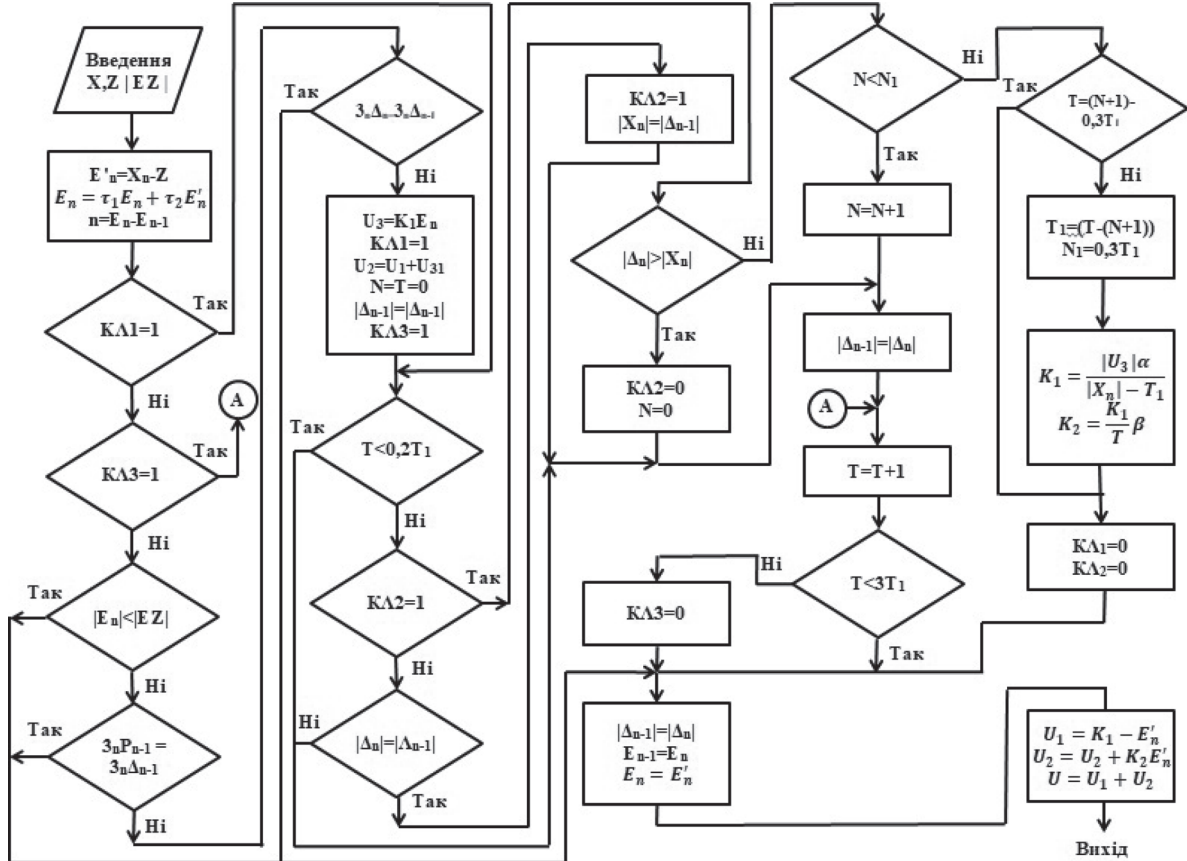


Рисунок 3 — Адаптивний регулятор

1. Введемо значення регульованої величини U_i завдання уз.
2. Визначимо помилки регулювання.
3. Виконаємо первинне згладжування і визначимо відфільтрований вхідний сигнал EF за допомогою рівняння: параметри, які необхідно налагодити.
4. Оцінимо похідну помилку $EPS = Y - \Delta Z$, $EF = TP * EFP + TP1 * EPS$, де $TFiTF_1$ як таку виберемо першу різницю, оскільки ця величина використовується лише для визначення моменту $t_0 = t_y$ переходу фазової траєкторії через вісь E .
5. Зробимо оцінювання положення системи на фазовій площині (E, \dot{E}) . У момент t_0 починається процес ідентифікації, а відповідно на вхід регулятора подається стрибок і відмикається аналіз траєкторії.
6. Через час $0,2 T_1$, де T_1 — оцінка динаміки об'єкта, розпочинається за видозахищений (перешкодозахищений) пошук максимуму величини $E(t)$.
7. У момент досягнення максимуму будемо оцінювати динаміку об'єкта T_1 шляхом перерахунку коефіцієнтів K_p, K_r регулятора. При цьому ключі автоматично переводяться в початкове положення, які керують логікою алгоритму.
8. Виробляється ПІ-керування та запам'ятовується інформація, яка необхідна для наступного такту.

Первинне згладжування, оцінювання похідної і відпрацювання ПІ-керування виконуються в кожному такті роботи алгоритму. Аналіз траєкторії, ідентифікація і перерахунок коефіцієнтів здійснюються відповідно до внутрішньої логіки алгоритму. Розроблений алгоритм адаптації з активною ідентифікацією використано в способах і системах керування технологічними операціями виробництва хліба, а саме стадіями опара — тісто — випікання [2, 3, 4, 5]. Його випробовування в умовах виробництва хлібобулочних виробів підтвердило високу ефективність систем керування процесами підготовки стадій опара — тісто, випікання.

У системах керування процесами виробництва продуктів харчування широке розповсюдження на криворізьких хлібозаводах та інших підприємствах одержали системи стабілізації параметрів завантаження, густини тіста, витрат води, газу та електрики. Точність таких систем щодо вихідних показників становить 7–10 %, а відповідно не забезпечує заданої якості продукції, яка надходить споживачам. Тому виникає завдання щодо розроблення цифрових адаптивних алгоритмів стабілізації вихідних параметрів об'єкта переробки сировини (борошна) в продукцію з лікувально-профілактичними властивостями.

Ці алгоритми реалізуються за допомогою сучасних мікропроцесорних систем (МП), які працюють як ідентифікатори і забезпечують автоматичне квазіоптимальне налагодження систем. Передавальну функцію системи керування стабілізації регульовального параметра (густини тіста) можна записати у вигляді рівняння:

$$W_{сис\tau\tau}(P) = \frac{W_{pez}(P) * W_{об}(p)}{W_{pez}(P) * W_{об}(P) + 1} \quad (6)$$

При цьому об'єкт регулювання опишемо так:

$$W_{об}(P) = \frac{K_D E^{-p\tau}}{T_P + 1} = \frac{E^{-p\tau}}{\frac{T}{K_0} * p + 1 / K_0} = \frac{E^{-p\tau}}{a_1 p + a_0}, \quad (7)$$

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

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

$$W_{сис\tau\tau}(P) = \frac{(K_{II}(P) + K_I)e^{-\tau p}}{p(a_1 p + a_0) + (K_{II} p + K_I)e^{-\tau p}} \quad (8)$$

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

$$W(p) = \int_0^\infty q(t) e^{-pt} dt = \int_0^\infty q(t) \sum_{i=0}^\infty \frac{(-1)^i}{i!} p^i (t)^i dt = \sum_{i=0}^\infty (-1)^i p^i \int_0^\infty a(t) t^i \frac{1}{i!} dt = \sum_{i=0}^\infty (-1)^i p^i \mu_i \quad (9),$$

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

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^\infty (-1)^i p^i \mu_i [a_i p^2 + a_1 p + (K_{II} p + K_I) \sum_{j=0}^\infty \frac{(-1)^j}{j!} \tau^j p^j] = \\ & = (K_{II} p + K_I) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!} \tau^k p^k. \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\mu_0 a_0 + \mu_0 k_{II} + K_I \mu_1 (-1)^1 + \mu_0 K_1 (-1)^1 \tau = K_{II} + K_I (-1)^1 \tau \quad (11)$$

для першого ступеня p ;

$$\begin{aligned} \mu_0 a_1 + (-1)^1 \mu_1 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} + \mu_0 K_{II} (-1)^1 \tau + K_I \mu_2 + \mu_1 \tau K_I + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 = \\ = (-1)^1 \tau K_{II} + \frac{k_I}{2} \tau^2 \end{aligned} \quad (12)$$

для другого ступеня p ;

$$\begin{aligned} (-1)^2 \mu_1 a_1 + (-1)^2 \mu_2 a_0 + (-1)^1 \mu_1 K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 + (-1)^2 K_I \mu_3 + (-1)^2 \mu_2 \tau K_I + \\ + (-1)^2 \mu_2 K_I (-1) \tau + (-1)^1 \mu_1 K_I \frac{1}{2} \tau^2 + \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 = \frac{1}{2} K_I \tau^2 + \frac{1}{6} K_I (-1)^3 \tau^3 \end{aligned} \quad (13)$$

для третього ступеня p .

Обчислюємо рівняння (13) стосовно a_1 і дістаємо:

$$a_0 = \mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} \quad (14)$$

Розраховуючи рівняння (14) стосовно a_1 і підставив замість a_0 його значення та одержимо квадратичне рівняння вигляду:

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{\mu_1}{\mu_0} (\mu_1 K_{II} K_I + K_I \tau + \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0}) + K_{II} \tau + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} - \\ - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I - \frac{K_{II}}{\mu_0} \tau + \frac{1}{2\mu_0} K_I \tau^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Підставляючи a_0 і a_1 в рівняння (15), отримуємо кубічне рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0^2} K_{II} \tau + 2\mu_1 K_{II} \tau - \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau + \mu_2 K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I \tau - \mu_2 K_I \tau - \\ - \frac{1}{2} \mu_1 K_{II} \tau^2 + \frac{1\mu_1}{2\mu_0} K_I \tau^2 + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 + \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 + \frac{1}{6} K_I \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_I + \\ + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \mu_1 \mu_2 \tau^3 + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} K_I + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} + \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I + \\ + \mu_1 \mu_2 K_{II} K_I + \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} + \mu_0 K_{II} + \mu_3 K_I = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

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

У системі як блока ідентифікації використано МП, який виконує такі функції:

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

$$\mu_i = \sum_{j=0}^N q(t_j) t_j^i \frac{1}{i!} (t_j - t_{j-1}). \quad (17)$$

4. Обчислює рівняння (16) методом Бісекції.

5. Визначає τ^* , a_0^* , a_1^* .

6. Перераховує K_0 , T .

7. За методом максимального ступеня стійкості коригує коефіцієнти K_{II} і K_I . Блок-схему обчислення кореня τ^* у рівнянні (16), за умови, що корінь знаходиться в межах $\tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max}$, а потрібна точність визначається числом δ , подано на рис. 4. У розробленій схемі керування виробництвом опари, якість опари та борошна контролюється цифровими датчиками 5, 6. Ці сигнали із цифрових датчиків 1, 2, 5, 6 надходять на пристрій введення МП-7.

На рис. 5 показано блок-схему керування виробництвом опари [5].

Мікропроцесор, виконуючи вищезазначені функції алгоритму керування, переналагоджує коефіцієнти K_{II} і K_I , ПІ-регулятора, який керує системою завантаження тістомісильної машини (блоки 4, 8, 9, 10).

Об'єкт керування за каналом «витрати води в лінію переробка борошна — густина тіста» опишемо рівнянням другого порядку з запізненням:

$$W_{об}(p) = \frac{e^{-p\tau}}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (18)$$

Тоді

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i p^i \mu_i [a_2 p^3 + a_1 p^2 + a_0 p + (K_{II} p + K_I)] * \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j!} \tau^j p^j = \\ & = (K_{II} p + K_I) * \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \tau^k p^k \end{aligned} \quad (19)$$

Використовуючи метод, наведений вище, за однакових ступенів одержимо систему рівнянь вигляду:

$$\mu_0 a_0 + \mu_0 K_{II} - \mu_0 K_{II} \tau - \mu_1 K_I = K_{II} - K_I \tau; \quad (20)$$

$$\mu_0 a_1 - \mu_1 a_1 - \mu_1 K_{II} - \mu_0 K_{II} \tau + \mu_2 K_I + \mu_1 K_I \tau + \frac{1}{2} K_I \tau^2 = -\tau K_{II} + \frac{1}{2} K_I \tau^2; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \mu_0 a_2 - \mu_1 a_1 - \mu_2 a_2 + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 + \mu_1 K_{II} \tau + \mu_2 K_{II} - \frac{1}{6} \mu_0 K_I \tau^3 - \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^3 - \\ & - \frac{1}{2} \mu_1 K_I \tau^2 - \mu_2 K_I \tau - \mu_3 K_I = \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \frac{1}{6} K_I \tau^3 \end{aligned} \quad (22)$$

Обчислюючи ці рівняння і підставляючи значення a_0 , a_1 , a_2 , одержимо рівняння четвертого ступеня:

$$a_0 = \frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I \tau}{\mu_0} - K_{II} - K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} a_1 = \mu_1 \left(\frac{K_{II}}{\mu_1} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_I \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right) + \frac{\mu_1}{\mu_0} K_{II} + K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I - \\ - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \tau \frac{K_{II}}{\mu_0} + \frac{1}{2} \mu_0 K_I \tau^2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} a_2 = \frac{\mu_1}{\mu_0} \left[\mu_1 \left(\frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_{II} \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right) + K_{II} \tau - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \right. \\ \left. - \tau \frac{K_{II}}{\mu_0} + \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^2 \right] + \frac{\mu_2}{\mu_0} \left[\frac{K_{II}}{\mu_0} - \frac{K_I}{\mu_0} \tau - K_{II} + K_{II} \tau - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \right] - \frac{1}{2} K_I \tau^2 - \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau - \\ - \frac{\mu_2}{\mu_0} K_{II} + \frac{1}{6} K_{II} \tau^3 + \frac{1}{2} \frac{\mu_1}{\mu_0} K_I \tau^2 + \frac{\mu_2}{\mu_0} K_I \tau + \frac{\mu_3}{\mu_0} K_{II} - \frac{1}{2} \mu_0 K_{II} \tau^3 - \frac{1}{6} K_I \tau^3 \end{aligned} \quad (25)$$

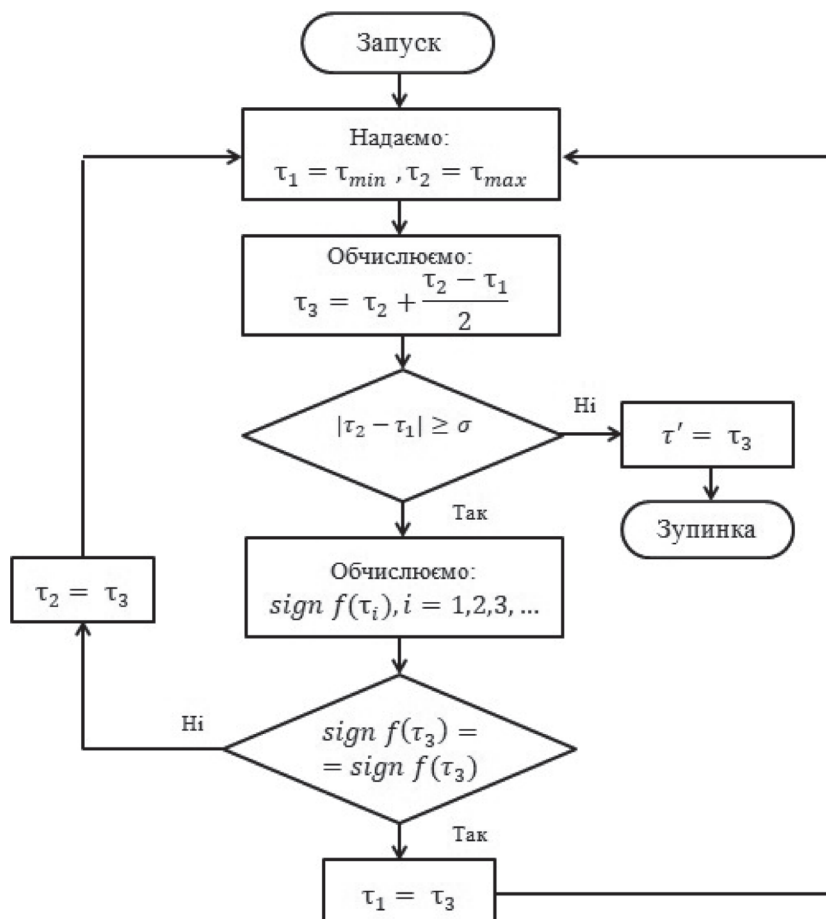


Рисунок 4 — Блок-схема розрахунку кореня
Шнековий давальник

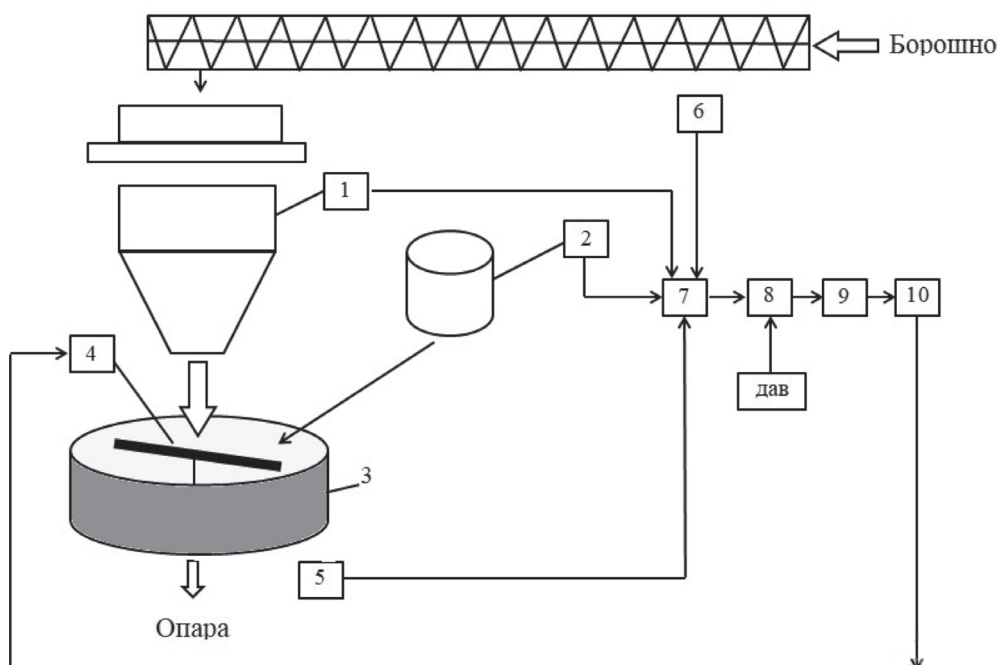


Рисунок 5 — Блок схема керування процесом виробництва опари:
1 — автоборошновимірювальний пристрій; 2 — автоматичний водовимірювальний пристрій; 3 — тістомісильна машина; 4 — двигун мішалки; 5 — датчик якості опари; 6 — датчик якості борошна; 7 — МП; блоки 8, 9, 10 — система завантаження тістомісильної машини 3.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\mu_1}{\mu_2} K_{II} \left(\frac{\mu_4 \mu_0}{\mu_1} - \frac{\mu_2^2}{\mu_1} - \mu_2 \mu_1 - 2\mu_3 - \frac{\mu_1^3}{\mu_0} \right) + \mu_1 \frac{\mu_1}{\mu_0^2} K * [(2\mu_0 - 1 - \mu_0^2)] + \\
 & + \frac{K_{II}}{\mu_0} [(-\mu_3 - \mu_1^3) + \frac{1}{\mu_0}] + \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_0} K_I \tau \left(\frac{1}{\mu_0} (1 + \frac{\mu_1^2}{\mu_2}) - 4 + \mu_0 + \frac{\mu_3}{\mu_1 \mu_2} \right) + \frac{K_{II} \tau}{\mu_0^2 (\mu_1^2 - \mu_2 \mu_0)} + \\
 & + \frac{\tau^2}{2\mu_0 (\mu_2 K_{II} - \frac{\mu_1^2}{\mu_0} K_I + \mu_1 K)} + \frac{\mu_1}{6 K_I \tau^3} * \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_0} - 1 \right) + \frac{1}{6} K_{II} \tau^3 (1 - \mu_0) - \frac{\tau^4}{24} (\mu_0 - K_U) = 0. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Рівняння (26) також будемо обчислювати методом Бісекції, а визначений корінь τ_2^* буде відповідати значенню часу запізнення τ . Підставляючи τ_2^* у рівняння (20), (21), (22) одержимо параметри a_0, a_1, a_2 .

Блок-схему адаптивної цифрової системи керування тістомісильного відділення (технологічні апарати 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) подано на рис. 6.

Ця система працює в циклі з робототехнологічним комплексом виробництва тістових напівфабрикатів 8 та робототехнічної системи заморожування 9 хліба 10. Якість бо-

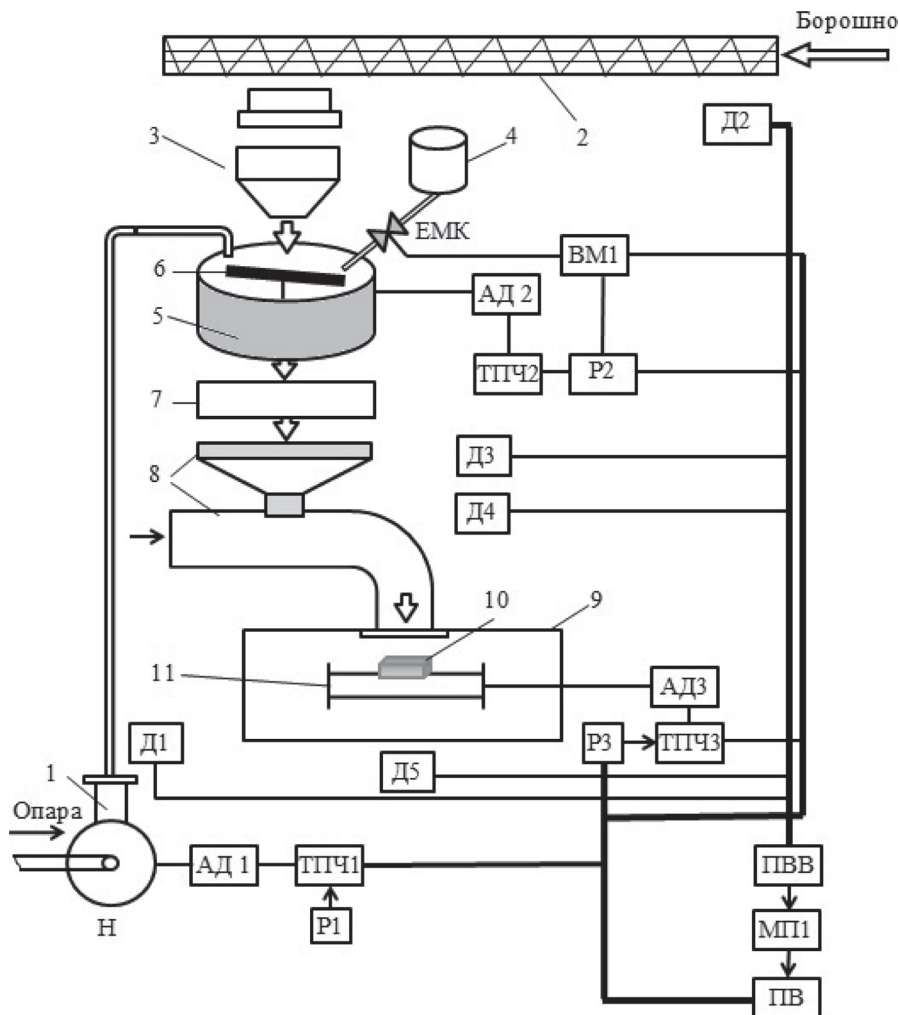


Рисунок 6 — Адаптивна цифрова система керування тістомісильним відділенням:

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

рошна 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 у подальшому розраховує коефіцієнти a_0, a_1, a_2 , а також чинники K_0, T . За методом максимального ступеня стійкості МП розраховує також коефіцієнти K_n і K_r ПІ-регуляторів Р1, Р2. Регулятор Р1 відпрацьовує сигнал керування, який за допомогою тристороннього перетворювача ТПЧ1 і двигуна АД1 змінює продуктивність агрегата 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 комплексу дає можливість збільшити продуктивність стадії випікання хліба на 6–7% [5]. За останні п'ять років у процесі виконання портфеля замовлень ОПР та топменеджери хлібозаводів, які працюють на стадії заморожування хліба, стикаються з високими вимогами споживачів до їх продукції. В цьому випадку виникає необхідність розроблення цифрових алгоритмів управління процесом виробництва заморожених 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 такими каналами: а) сила борошна та якість інгредієнтів і закваски [5]; б) відсотковий вміст густини тіста та його запах у зливні тістомісильної машини; в) питома вага борошна і питома вага опари в стадіях виробництва тіста. Динаміку цих агрегатів опишемо лінійним диференціальним рівнянням вигляду:

$$\sum_{i=0}^n a_i y^i(t) = x(t - \tau), \quad (27)$$

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

$$a_{i \min} \leq a_i \leq a_{i \max}, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{\max}. \quad (28)$$

За сигналами $x(t)$ та $y(t)$, які можна вимірювати, необхідно визначити поточні значення параметрів a_i, 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 такий спосіб пасивної ідентифікації. Вхідний і вихідний сигнали об'єкта пропускають через ряд лінійних фільтрів $N = n + 2$ порядку $K \gg N$ з передавальними функціями $W_i(p)$.

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

$$L^{-1}[W_L(p)] \neq \sum_{J=1}^N C_J L^{-2}[W_J(p)], \quad i \neq j. \quad (29)$$

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

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & \dot{y}_1(t), & \dots, & y_1^{(n-1)}(t) \\ y_2(t), & \dot{y}_2(t), & \dots, & y_2^{(n-2)}(t) \\ \dots & \dots & \dots, & \dots \\ y_{n+2}^1(t), & y_{n+2}^2(t), & \dots, & y_{n+2}^{(n+2)}(t) \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\text{де} \quad \bar{X}(t - \theta) = (x_1(t - \theta), \dots, x_N(t - \theta)), \quad (31)$$

$$y'(t) = L^{-1}[p^i W_i(p)y(p)], \quad 0 < \theta < \tau_{\max};$$

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

тут $x(p)$, $y(p)$ — зображення за Лапласом вхідного і вихідного сигналів об'єкта, який будемо описувати рівнянням вигляду (27). Доведемо, що одержані таким чином сигнали підкорюються системі тотожностей.

$$\sum_{i=0}^n a_i y_i^{(i)}(t) = x_i(t - \theta), \quad j = 1, \dots, N \quad (32)$$

за умови, що

$$\theta = \tau. \quad (33)$$

Дійсно, якщо в рівнянні (27) перейти 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 (33) значення:

$$a_i w_j(p) * p^i y(p) = w_j(p) X(p) e^{-\theta p}. \quad (34)$$

Якщо перейти у виразі (34) у частотну область і врахувати вираз (31), одержимо систему рівностей (32). 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

$$\begin{aligned} \bar{b}(t, \theta) &= (b_0(t, \theta), \dots, b_n(t, \theta)); \\ \bar{c}(t, \theta) &= (c_1(t, \theta), \dots, c_n(t, \theta)), \end{aligned} \quad (35)$$

Які будемо визначати із співвідношень:

$$b^{-T}(t, \theta) = Y^{-1}(t), \quad G^{-T}(t - \theta), \quad (36)$$

де

$$\bar{G}(t - \theta) = (X_1(t - \theta), \dots, X_{n+1}(t - \theta)); \quad (37)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t), & y_1'(t), & \dots, & y_1^{(m)}(t) \\ y_i(t), & y_i^i(t), & \dots, & y_i^n(t) \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ y_n(t), & y_{n+1}^i(t), & \dots, & y_{n+1}^n(t) \end{bmatrix}; \quad (38)$$

$$c^{-T}(t, \theta) = b^{-T}(t, \theta) - X^{-T}(t - \theta). \quad (39)$$

За виконання умови (29) $\text{rank } Y(t) \geq n + 1$, а тому $Y^{-1}(t)$ існує. Як впливає з виразів (36)–(39) $(n + 1)$ компонента вектора $\bar{c}(t, \theta)$ тотожність, яка дорівнює нулю, а в той же час $(n + 2)$ компонента в загальному випадку відрізняється від нуля. Як слідує з порівнянь виразів (32) і (36) у момент, коли виконується умова (38) $c_{n+2}(t, \theta)$ компоненти вектора $\bar{c}(t, \theta)$ обнуляються. При цьому виконується умова:

$$b_j(t_1, \theta) = a_j, \quad j = 0, \dots, n. \quad (40)$$

Тому оцінки поточних значень параметрів об'єкта можливо одержати із співвідношень (36). Запропонований алгоритм можливо реалізувати на базі МП. Розглянемо приклад використання алгоритму керування в системі автоматичного регулювання процесом заморожування напівфабрикатів хліба [7]. Блок-схему такої системи показано на рис. 6. 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 у МП1.

При цьому за інформацією датчика Д3 виконується реалізація контура адаптивного регулювання, шляхом зміни подавання води в тістомісильну машину. Алгоритм керування працює так. Нехай $T_{кв}$ — інтервал квантування, який визначає дискретність введення і виведення усіх сигналів у МП. Тоді сигнали із датчиків Д2, Д3, Д4, Д5, $x_i^j(t)$, $y_i^j(t)$ вводять у МП у дискретні моменти $kT_{кв}$, $k = 0, 1, 2, \dots, N$. Величина запізнення апроксимується виразом $l * T_{кв}$, де l — набуває цілочислового значення з діапазону:

$$0 \leq l \leq m, \quad (41)$$

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

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

$$\bar{y}_{n+2}(kT_{кв}) = (y_{n+2}(kT_{кв}), y'_{n+2}(kT_{кв}), \dots, y_{n+2}^{(n)}(kT_{кв})) ; \quad (42)$$

$$\bar{x}_e(kT_{кв}) = (x_1(k-e)kT_{кв}, \dots, x_{n-2}(k-l)kT_{кв}),$$

де l — змінюється в межах (41).

У процесі ідентифікації обчислюється вектор $(n+2)$ компоненти вектора $\overline{b(kT_{кв})}$ є дискретними аналогами виразів (36) та (37)

$$\bar{b}(kT_{кв}) = Y^{-1}(kT_{кв})F * e^{-T}(kT_{кв}) ; \quad (43)$$

$$\bar{b}_N(kT_{кв}) = \bar{y}_{n+2}(kT_{кв}) \cdot \bar{b}((kT_{кв}), l) - \bar{x}_e((k-l)T_{кв}) \quad (44)$$

за різних l у межах (41). Потім обчислюється l^* , за якого функція $I(l) = |\bar{b}_N(kT_{кв}, l)|$ досягає максимуму. Запізнення і динамічні параметри оцінюють за формулами:

$$\tau^* = lT_{кв} ; \quad (45)$$

$$\hat{a}_l = b_i(kT_{кв}, l), i = 0, \dots, N . \quad (46)$$

Після реалізації описаного вище алгоритму МП через буферну пам'ять і ПВ впливає на регулятор Р3 та виконавчий механізм холодильної установки 9 конвеєра 11, змінюючи його швидкість за допомогою ТПЧ3 та АД3.

На рис. 7. наведено результати порівняльного дослідження цифрового ПІД-закону керування (крива 1) і регулятора, який реалізує адаптивний алгоритм (крива 2), яке виконане із застосуванням програмного забезпечення, розробленого в середовищі MATLAB.

Із аналізу кривих 1 та 2 випливає, що для САР з адаптивним законом керування час відпрацювання сигналу задавача впливу значно менше (крива 2), ніж у системі з ПІД-цифрового керування (крива 1). При цьому зазначимо, що дисперсія регульовального параметра знизилась у 2,1 разів, а час перехідного процесу зменшився на 25 % порівняно з ПІД-цифровим керуванням.

Висновки. Теоретично доведено, що ідентифікація процесів виробництва хліба здійснюється шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та розмірності його стану, на підставі чого за допомогою методів оптимізації немінімальнофазових об'єктів харчової промисловості визначаються структура та параметри моделі процесу, що дає змогу побудувати алгоритми адаптації, які пристосовуються до змін параметрів об'єкта. Розроблено адаптивні системи оптимального керування процесами виробництва хлібобулочних виробів, що дозволяє підвищити якість керування цими процесами в разі зміни їх параметрів і режимів роботи, збуреного середовища та цілей керування. Розроблені алгоритми реалізовані за допомогою сучасних мікропроцесорних систем, які працюють як ідентифікатори і забезпечують автоматично квазіоптимальне налагодження систем керування технологічними стадіями виробництва продуктів харчування. Встановлено, що оптимальні показники якості регулювання під час виробництва хліба досягаються

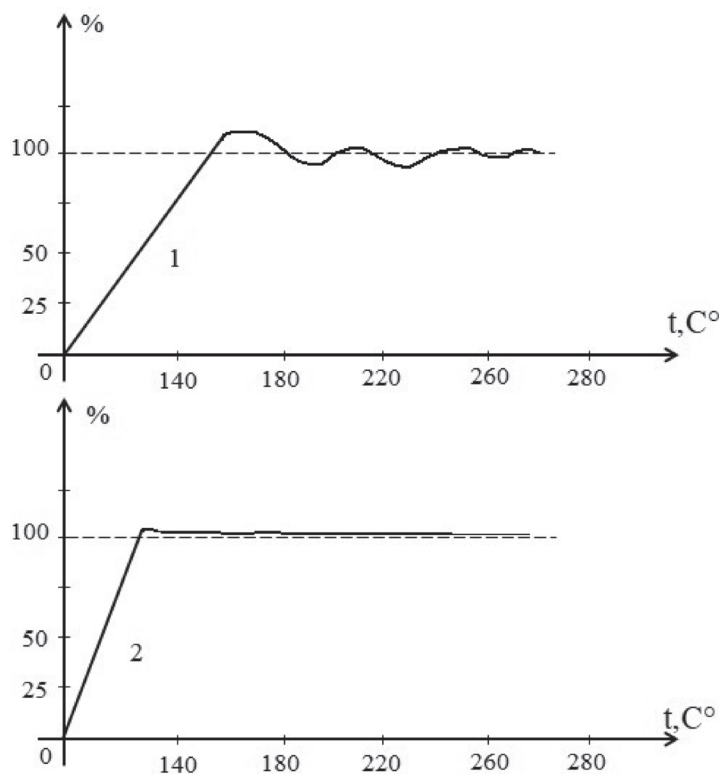


Рисунок 7 — Графіки зміни в часі параметра якості тіста:
1 — ПІД-регулятор; 2 — ПІД-адаптивний регулятор

за допомогою адаптивних цифрових регуляторів, а саме: при використанні адаптивних цифрових регуляторів у системі керування стадіями виробництва заморожених сортів хліба, дисперсія регульовального параметра знизилась у 2,1 разів, а час перехідного процесу зменшиться на 25 % порівняно з ПІД-регулюванням.

Список літератури

1. Гончаренко Б. М., Ладанюк А. П. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій : підручник. К. : НУХТ, 2014. 530 с.
2. Мирончук В. Г., Гулій І. С., Пушанко М. М., Орлов Л. О., Українець А. І. та ін. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця : Нова книга, 2007. 640 с.
3. Швед С. М., Ельперін І. В. Системний аналіз технологічного процесу виробництва хлібобулочних виробів. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2012. № 613 (60). С. 44–46.
4. Хроменков В. М. Технологическое оборудование хлебозаводов и макаронных фабрик. СПб : ГЦОРД, 2004. 496 с.
5. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Возняк А. В., Омельченко О. В., Заїкіна Д. П., Копайгора О. К., Шеїна А. В. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / за редакцією професора В. П. Хорольського. Кривий Ріг : Чернявський Д. О. 2019, 204 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник в 5-ти т., 2-е изд, перераб. и доп. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. М. : МГТУ, 2004. 540 с.
7. Хорольський В. П., Копайгора О. К., Гавришкевич Ю. С., Бойченко А. О. Система оптимального управління енергоспоживанням виробництва хліба. *Вісник ХНУ. Технічні науки*, 2020. №1, С. 239–248.

References

1. Honcharenko B. M., Ladanyuk A. P. *Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv kharchovykh tekhnolohiy* [Automation of food production processes]. Kyev, NUKHT Publ., 2014. 530 p.

2. Myronchuk V. H., Hulyi I. S., Pushanko M. M., Orlov L. O., Ukrayinets A. I. & oth. (2007). *Obladnannya pidpryemstv pererobnoyi ta kharchovoyi* [Equipment of processing and food industry enterprises]. Vinnytsya, Nova knyha Publ., 640 p.

3. Shved S. M., Iperin I. V. (2012). *Systemnyy analiz tekhnolohichnoho protsesu vyrobnytstva khllobulochnykh vyrobiv. Skhidno-yevropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies], no. 613 (60), pp. 44–46.

4. Khromenkov V. M. (2004). *Tekhnologicheskoye oborudovaniye khlebzavodov i makaronnykh fabrik* [Technological equipment for bakeries and pasta factories]. St. Petersburg, GTSORD, 496 p.

5. Khorolskyi V. P., Korenets Yu. M., Vozniak A. V., Omelchenko O. V., Zaikina D. P., Kopaihora O. K., Sheina A. V. (2019). *Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khllobulochnykh vyrobiv* [Intelligent control systems for the production of bakery products]. Kryvyy Rih, Chernyavskyy D. O. Publ., 204 p.

6. Pupkov K. A., Ehupov N. D. (eds). (2004). *Sintez regulyat'rov sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Synthesis of regulators of automatic control systems]. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of the classical and modern theory of automatic control]. Vol. 3. Moscow, MGTU Publ., 540 p.

7. Khorolskyi V. P., Kopaihora O. K., Havryshkevych Iu. S., Boichenko A. O. (2020). *Systema optymalnoho upravlinnia enerhospozhyvanniam vyrobnytstva khliba* [System of optimal energy management of bread production]. *Visnyk KHNU. Tekhnichni nauky* [Bulletin of KhNU. Technical sciences], no. 1, pp. 239–248.

Objective. *The purpose of the article is to develop methods of identification and algorithms of adaptive control of complex dynamic objects of food production with therapeutic and prophylactic properties for regions with technogenic load*

Methods. *Methods of theory of system identification (for selection and justification of structure of mathematical model of control object) were used in the research, as well as methods of analytical design of optimal adaptive regulators and substantiation of principles of identification of objects using the method of maximum degree of stability, as well as development of algorithms for optimal control of food production, methods of nonlinear dynamics to determine the characteristics of controlled processes, methods Modeling and simulation using software developed in the MATLAB environment to determine the effectiveness of the proposed ways to manage the production of bakery products.*

Results. *It is theoretically proved that the identification of bread production processes is carried out by determining the modes of operation of the controlled process and the dimension of its state, on the basis of which using the methods of optimization of non-minimal-phase objects of the food industry determines the structure and parameters of the process model, which allows to build adaptation algorithms that adapt to changes object parameters. 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.*

Key words: *identification, control algorithms, adaptation, adaptive systems, production management, bakery products.*