

*Хорольський В. П., д-р техн. наук, професор¹**Коренець Ю. М., старший викладач¹**Копайгора О. К., асистент¹**Заїкіна Д. П., асистент¹**Литвиненко А. К., студент¹*

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

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МАКАРОННИХ ВИРОБІВ

UDC 004.032.26.664.8

*Khorolskiy V. P., Grand PhD of Engineering Science,
Professor¹**Korenets Yu. M., Senior Lecturer¹**Kopayhora O. K., Assistant Professor¹**Zaikina D. P., Assistant Professor¹**Litvinenko A. K., Bachelor's Degree student¹*

¹ Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Donetsk National University of Economics and Trade, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail: horolskiy@donnuet.edu.ua.

IDENTIFICATION AND ALGORITHMS OF ADAPTIVE SYSTEMS DIGITAL CONTROL IN PASTA PRODUCTION

Мета. Метою статті є розробка адаптивних алгоритмів керування виробництвом макаронних виробів в умовах невизначеності на основі безлюдних технологій, що базуватимуться на досягненні високого ступеня автоматизації технологічних процесів за рахунок використання робототехнологічних комплексів, Промислового Інтернету-речей (IIoT) та інформаційно-комунікаційних технологій.

Методи. Методичну основу досліджень складають методи: конструювання оптимальних адаптивних регуляторів з обґрунтуванням способів ідентифікації складних технологічних процесів виробництва макаронних виробів; статистичні методи оцінки динамічних параметрів сировини та вимог до якісних характеристик продукту харчування; імітаційні дослідження виконані із залученням методів комп'ютерного моделювання для визначення ефективності роботи робототехнологічних інтенсифікаторів, підвищуючи якість продукції та зменшуючи енерговитрати.

Результати. Теоретично доведено, що ідентифікацію виробництва макаронних виробів з м'ясними додатками здійснюють шляхом визначення режимів роботи керованого процесу та вибором методу адаптації параметрів ПІ, ПІД-регуляторів в системах адаптивного керування процесами виробництва замісу, тіста, операції сушіння макаронних виробів в полі ультразвукових коливань. Це дозволяє підвищити якість керування технологічними процесами шляхом зменшення дисперсії вихідних параметрів і режимів енергоспоживання сушильного агрегату.

Аналітично та експериментально доведено, що розробка технологій смарт-продуктів харчування повинна бути забезпечена інноваційним обладнанням. У зв'язку з цим було розроблено алгоритм виробництва смарт-продуктів харчування, в якому процес проектування продукції, технологій та обладнання виконує ЕОМ за допомогою відповідного програмного забезпечення та технологій імітаційного моделювання. На основі методів автоматизації розроблено систему та алгоритми адаптивного керування окремими ділянками технологічної лінії з виробництва інноваційного продукту харчування з високим рівнем автоматизації та роботизації.

Ключові слова: макаронне виробництво, ідентифікація, адаптація, алгоритми керування, імітаційне моделювання, результати досліджень.

Надійшла до редакції 14.04.2021 р.

© В. П. Хорольський, Ю. М. Коренець,
О. К. Копайгора, Д. П. Заїкіна,
А. К. Литвиненко, 2021

Постановка проблеми. Населення регіонів з високим рівнем техногенного забруднення, діти шкільного віку, працівники з важкими умовами праці, військові ЗСУ потребують особливого харчування високої якості та підвищеної харчової цінності. У зв'язку з цим постає питання з проектування процесів виробництва такої продукції. Перспективним рішенням є побудова виробництва на основі безлюдних технологій, яке можна реалізувати за рахунок використання високого ступеня автоматизації технологічних процесів з використанням робототехнологічних комплексів, Промислового Інтернету-речей (IIoT) та інформаційно-комунікаційних технологій. Такі технології здатні забезпечити виробництво та розподіл якісної та безпечної продукції між споживачами в зонах високого забруднення навколишнього середовища [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні у сфері дослідження різноманітних аспектів розвитку АСУТП харчової промисловості значний внесок мають вчені Національного університету харчових технологій, Харківського державного університету харчування та торгівлі, Одеської національної академії харчових технологій, де особливої уваги заслуговують праці Б. М. Гончаренка, А. П. Ладанюка, А. К. Бабіченка, В. Г. Трегуба, В. І. Ельперіна, О. І. Черевка, Л. В. Кіптелю, В. М. Михайлова [4, 5]. У публікаціях українських дослідників досить фундаментально висвітлено стан і тенденції автоматизованого керування виробництвом хлібобулочних виробів в умовах невизначеності. Водночас, у вітчизняній науці бракує актуальних досліджень розробки сучасних АСУТП з цифровими платформами, промисловим Інтернетом-речей, інтелектуальними системами прийняття рішень розробки SMART-продуктів харчування для територій регіонів з високим рівнем техногенного забруднення.

Метою статті є розробка адаптивних алгоритмів керування виробництвом макаронних виробів в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Сучасні цифрові системи багаторівневого керування виробництва смарт-продуктів харчування для школярів, людей з важкими умовами праці (гірників, металургів та ін.) та воїнів ЗСУ побудовані за об'єктивним принципом: кожний рівень АСКТЛ відповідає певному рівню технологічного об'єкта керування (ТОК), а кожному елементу керування АСКТЛ — один або декілька елементів ТОК відповідного рівня. Такий підхід значно підвищує надійність систем управління процесами виробництва продукції харчування та зменшує інтенсивність мережевих обмінів, оскільки введення-виведення інформації та її обробка максимально локалізуються. Аналіз необхідних характеристик виробництва продукції потрібно розпочати з аналізу структури об'єкта керування та інформаційних характеристик його дільниць. У світі сучасних інформаційних технологій неможливо уявити собі сучасне виробництво без SCADA й MES-систем, інтелектуальних систем та робототехнологічних комплексів.

На рис. 1 наведено складові сучасної автоматизованої системи керування виробництвом макаронної продукції з робочого місця АРМ оператора-технолога.

Нижній рівень цифрового керування (рис. 1) представлений цифровими інтелектуальними датчиками, адаптивними системами керування та вбудованими робототехнологічними системами — інтенсифікаторами та системами обміну інформацією. На цьому рівні активно використовуються контролери (мікропроцесори), які виконують функції автоматичного керування технологічними процесами.

На рис. 2 наведено структуру технологічних операцій та адаптивних систем керування (АСК), робототехнологічних інтенсифікаторів (УРІ) та АСКТЛ з'єднаних між собою інформаційною шиною Profibus DP.

Загальною метою керування є подача сигналів на виконавчі механізми на основі результатів обробки даних про стан технологічних параметрів, одержаних безпосередньо інтелектуальними датчиками за допомогою спеціальних алгоритмів.

Сервери технологічних даних забезпечують обмін інформацією між технологічними апаратами і дільницями та мережею персональних комп'ютерів. Вони підтримують протокол роботи з технологічними пристроями та протокол роботи з мережею персональних комп'ютерів.

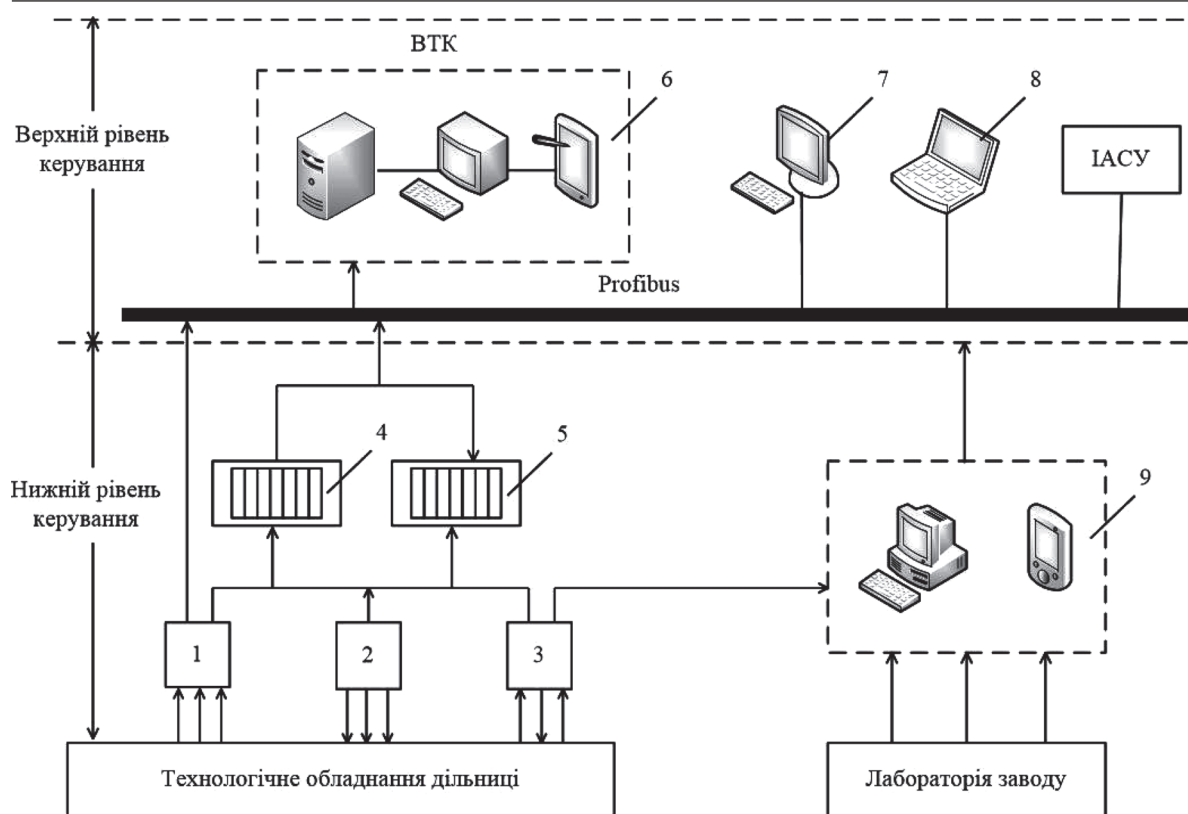


Рисунок 1 — Структура технологічних операцій та адаптивних систем керування заводу з виробництва макаронних виробів:

- 1, 2, 3 — АСУТП дільниць, відповідно, підготовки сировини, замісу, макаронних виробів;
 4, 5 — інформаційні системи вимірювання та контролю основних технологічних величин;
 6 — програмно-обчислювальний комплекс виробничо-технологічного комплексу (ВТК);
 7 — автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора-технолога; 8 — АРМ топ-менеджера;
 IACU — інтелектуальна автоматизована система управління підприємством; АРМ лабораторії заводу

Дані про поточні параметри стану технологічних апаратів виробництва макаронних виробів можуть бути використані:

- для контролю їх станів і керування ними з автоматизованих робочих місць операторів;
- для архівування змін технологічних параметрів за часом;
- для формування сумарних звітних форм з метою надання інформації топ-менеджерам.

У розробленій АСКТЛ виробництва макаронних виробів SCADA-система представлена серверами технологічних даних та автоматизованими робочими місцями (АРМ) операторів. АРМ оператора (технолога) представляє собою програмно-технічний комплекс, що складається з кількох (до 12 одиниць) мікропроцесорів, з'єднаних з міні ЕОМ, та відповідного програмного забезпечення процесів обміну та відображення інформації. Мікропроцесори підключаються до міні ЕОМ за допомогою мультиплексора, який послідовно з'єднує канали передачі інформації між відповідним мікропроцесором та комп'ютером.

На верхньому рівні керування виробничо-технологічним комплексом (ВТК) з виробництва макаронних виробів основу для вирішення задач керування складають інформаційні мережі, що зв'язують Промисловий Інтернет-речей (ІІоТ), пов'язані з постачальниками та споживачами продукції (рис. 1, 8 — АРМ топ-менеджера).

Особливості функцій диспетчерського управління заводу з виробництва макаронних виробів вимагають від проєктантів сучасних АСКТЛ створення спеціальних програмних продуктів для рівня керування виробництвом інноваційної продукції. На цьому рівні важливу роль відіграють функції підтримки прийняття рішень, а також комп'ютерного

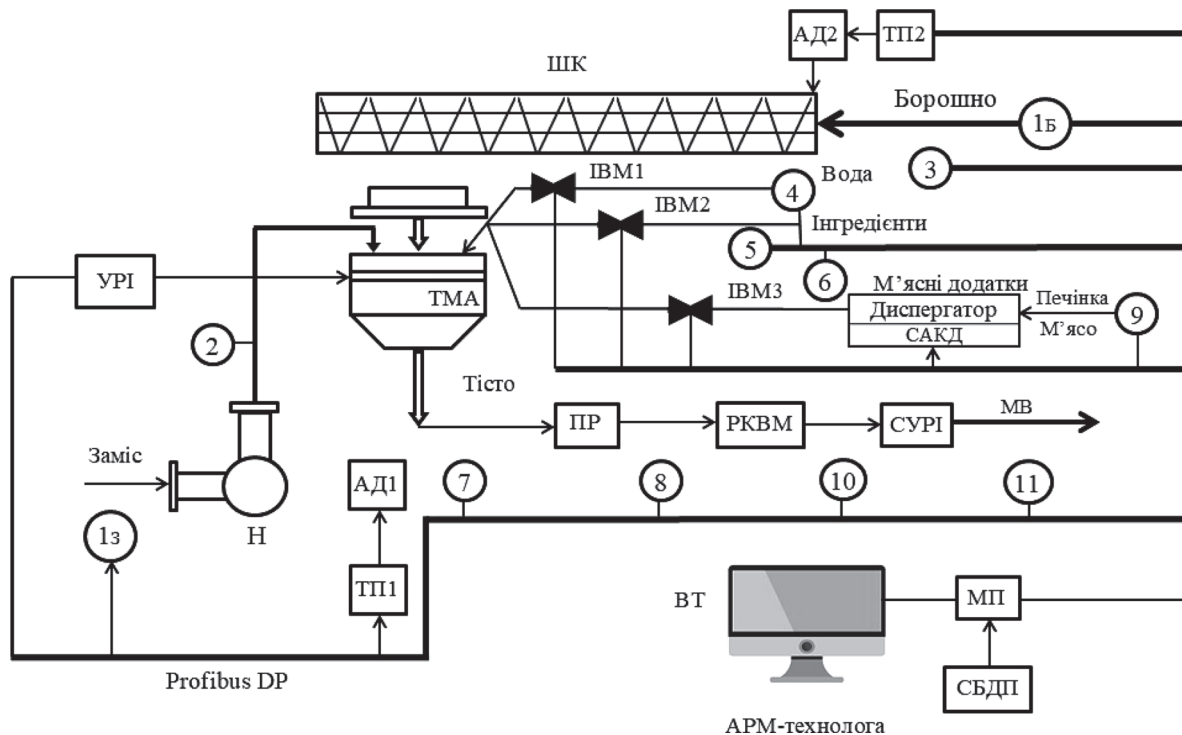


Рисунок 2 — Сучасна автоматизована система керування виробництвом макаронної продукції: УРІ — ультразвуковий робототехнологічний інтенсифікатор; МП — мікропроцесор; СБДП — сервер бази даних підприємства; ВТ — відео-термінал; Н — насос з асинхронним двигуном і тиристорним перетворювачем АД1-ТП1; ШК — шнековий конвеєр з асинхронним двигуном і тиристорним перетворювачем АД2-ТП2; ТМА — тістомісильний апарат; ПР — прес; РКВМ робототехнологічний комплекс виробництва макаронних виробів; СУРІ — сушарка з ультразвуковим робототехнологічним інтенсифікатором; МВ — макаронні вироби; датчики: 13 — рН замісу, 2 — витрат замісу, 1Б — сили борошна, 3 — витрат борошна, 4 — витрат води, 5 — витрат інгредієнтів, 6 — витрат м'ясних продуктів, 7 — рН тіста, 8 — якості (вологості) сирих макаронів; 9 — якості м'ясних додатків, 10 — контроль параметрів макаронних виробів, 11 — контролю якості макаронних виробів; СААКД — система адаптивного керування диспергатором; ІВМ1 — інтелектуальний виконавчий механізм витрат води; ІВМ2 — інтелектуальний виконавчий механізм витрат інгредієнтів; ІВМ3 — інтелектуальний виконавчий механізм витрат диспергованих м'ясних додатків

моделювання макаронних виробів, що відповідатимуть нутрієнтній адекватності та фізіологічним потребам певних контингентів споживачів.

Використання стандартного моделювання суттєво покращує проєктантам створення програмного забезпечення (ПЗ), а технологам та управлінцям такий підхід дозволяє проєктувати автоматизацію та роботизацію на цеховому рівні на базі SCADA- й MES-систем.

Для диспетчерського керування на рівні управління виробництвом продукції використовуються MES-системи.

При проєктуванні АСКТЛ виробництва макаронних виробів нами використано технології розподіленої міжмережевої архітектури для корпоративних систем DNA в середовищі MS Windows. Комплексування продуктів для керування технологічними процесами створюють нам нові можливості щодо розробки інформаційних автоматизованих систем керування та забезпечують перерозподіл функцій між ними. Тому при проєктуванні АСКТЛ виробництва нами використанні моделі COM DCOM ActiveX, технології JAVA, універсальний інтерфейс зв'язку з зовнішніми пристроями OPC, мови стандарту IEC 61131-3, мови, які описані на основі Visual Basic for Applications (VBA) та ПІОТ.

У проєкті нами також було застосовано багатоваріантність, а саме, розподіл функцій між станціями КТ-900 (блоки 4, 5), установленими на кожній із технологічних ділянок (підготовки борошна, замісу, тіста, підготовки та диспергування м'ясних додатків та ін-

ших інгредієнтів (технологічні дільниці 1, 2, 3) за допомогою робототехнологічних комплексів та формування функціональних навантажень на технологічну операцію — сушіння макаронних виробів, підключення зовнішніх засобів оброблення даних (електронних таблиць, БД, БП, БЗ, БОД та ін.), статистична обробка даних, контроль техніко-економічних показників (ТЕП).

У розробленій АСКТЛ заводу з виробництва макаронних виробів використано ІАСУ та ІІТ, які аналізують якісні параметри нутрієнтних характеристик продуктів харчування, одержаних з лабораторії заводу (блок 9), а також без проблем дозволяють одержати інформацію з операційних станцій КТ-900 (блоки 4, 5) та впевнитись у дотриманні технології. Головний технолог заводу може також за допомогою ОРС-інтерфейсу змінити завдання щодо продуктивності виробництва та кількісних параметрів інноваційної продукції.

Новації в SCADA-системах забезпечують значне зниження трудомісткості при роботі та обслуговуванні операторських станцій, збільшення швидкості обміну даних в системах керування за рахунок ІІТ. Інтеграція систем керування верхнім та нижнім рівнями в межах заводу в нашому проекті забезпечується засобами інтегрованих програмних систем (наборів) та комунікацій.

ІАСУ дозволяє виконувати за допомогою програмних продуктів не лише аналіз нутрієнтної адекватності, але й корегувати рецептуру інгредієнтів, оцінюючи фізико-технологічних властивостей (ФТВ) сировини та її собівартість. Такий підхід до створення БЗ дозволяє особі, приймаючій рішення (ОПР), чітко спланувати режими роботи локальних адаптивних систем керування окремими технологічними дільницями та оперативно контролювати вихідні параметри Y1, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6 на всіх стадіях виробництва: підготовка сировини → заміс → тісто → диспергування м'ясних інгредієнтів → формування макаронних виробів → сушіння → готовий продукт → зберігання. Ці стадії, керовані локальними адаптивними цифровими системами АСК1, АСК2, АСК3, АСК4 та управлінськими впливами U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, забезпечують оптимізацію виробництва та якості кінцевої продукції (рис. 2).

Тож відзначимо новизну розробленої системи, яка полягає у формуванні загальної оцінки кожної стадії технологічного процесу та роботи дільниці виробництва щодо адекватності заданим показникам нутрієнтної збалансованості продукції та сировини [6].

На рис. 1 наведено структуру АСКТЛ виробництва макаронних виробів для школярів, гірників, металургів, воїнів ЗСУ. Із наведеної структури слідує наступне: процес виробництва макаронних виробів відноситься до дискретних, нестационарних процесів, тому засоби локальної автоматики можуть забезпечити лише нижній рівень керування функціонуванням робототехнологічних систем та систем завантаження технологічних апаратів.

У нашому випадку, для прийняття більш складних рішень, необхідно проектувати багаторівневі системи керування. Особливістю керування дискретними об'єктами (технологічними дільницями виробництва) є визначення характеру задач, що вирішують управлінські міні ЕОМ. При цьому управління дискретними процесами зведено до управління часом тієї чи іншої операції. Отже, необхідно використовувати значну кількість обчислювальних функцій та достатньо потужні операційні можливості ЕОМ.

Моделі дискретних об'єктів виробництва макаронних виробів є нелінійними. Для нашого випадку керування процесом диспергування частинок м'ясних продуктів у тісто за допомогою робототехнологічного комплексу були одержані такі вихідні дані: якщо ЕОМ використовувати для прямого цифрового керування, то якісні показники параметрів нутрієнтної адекватності покращуються на 15 % у порівнянні з керуванням оператором.

Тому важливим напрямом нашого дослідження є ідентифікація та синтез адаптивних систем керування зі змінною структурою.

На прикладі найбільш складних і енергоємних процесів виробництва продукції на дільницях заміс → тісто → сушіння розглянемо методи побудови локальних адаптивних систем виробництва макаронних виробів, оптимальних за критерієм максимальної ступені стійкості [4].

Завданням керування виробничими дільницями заміс $\rightarrow$ тісто є максимізація продуктивності технологічних апаратів шляхом підтримання заданої густини та рівня рН тіста в сливі тістомісильного апарату.

Сучасні способи регулювання процесів замкнених циклів заміс $\rightarrow$ тісто $\rightarrow$ сушка макаронних виробів у робототехнологічних комплексах включають три основні управлінські впливи: витрати борошна Q_M і витрати води W_B^M , W_B^K відповідно в апараті замісу та тістомісильному апараті. Найбільш розповсюдженими в практиці керування комплексом заміс $\rightarrow$ тісто $\rightarrow$ сирі макаронні вироби проєктанти використовують канал керування: зміна витрат води та інгредієнтів в процесі — зміна густини тіста в сливі. Передавальна функція об'єкта цього каналу описується рівнянням виду:

$$W(p) = (k - T_p)(p^2 + a_2p + a_1)^{-1}, \quad (1)$$

де k — статичний коефіцієнт підсилення; T , a_1 , a_2 — динамічні параметри об'єктів.

На рис. 3 наведено графік перехідного процесу, як реакції на одноступеневий нормований вплив ультразвукового сигналу на гетерогенне середовище, а саме, перехідні характеристики циклу борошно $\rightarrow$ тісто за визначеним каналом керування. Передавальна функція (1) повністю віддзеркалює фізику процесу приготування замісу та прісного тіста, а його динамічний параметр T визначає величину провалу перехідної функції тістомісильної машини та показує різницю перехідних процесів від періодичних.

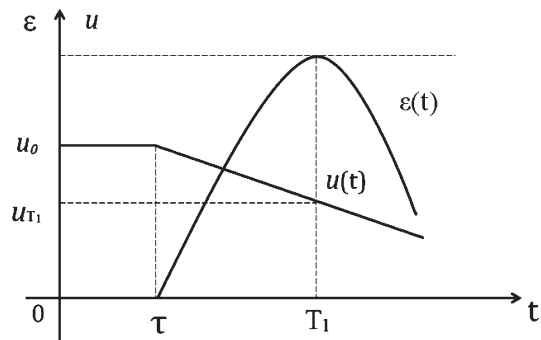


Рисунок 3 — Аналітичний графік перехідного процесу циклу борошно $\rightarrow$ тісто

Рішення задачі синтезу оптимальної системи керування процесом виробництва тіста будемо шукати в межах теорії безпошукових систем за критерієм максимального ступеня стійкості, в лінійних ПІ-законах виду:

$$U(t) = U_{\Pi}(t) + U_I(t) = K_1 E(t) + \int_0^t K_2 E(t) dt, \quad (2)$$

де $E(t)$ — відфільтрований сигнал; K_1 , K_2 — коефіцієнти при пропорційній $U_{\Pi}(t)$ складовій та інтегровальній $U_I(t)$ складовій відповідно ПІ-закону регулювання $U(t)$.

Коефіцієнти K_1 і K_2 будемо визначати в процесі активної ідентифікації шляхом подачі на вхід нормованого стрибкоподібного впливу виду:

$$U_{\text{зад}}(t) = KE(t_0). \quad (3)$$

На рис. 4 представлено адаптивну систему керування дільницею приготування замісу. В керовану частину локальної адаптивної САР (7) введено параметри модуля допустимого значення регульованої величини y і завдання z , а також параметри модуля допустимого значення неузгодження (E_z). Алгоритм дії регулятора наступний:

1) визначається помилка регулювання:

$$E'_n = y_n - z; \quad (4)$$

2) проводиться згладжування й визначається відфільтрований сигнал неузгодження за виразом:

$$E_n = \tau_1 E_{n-1} + \tau_2 E'_n, \quad (5)$$

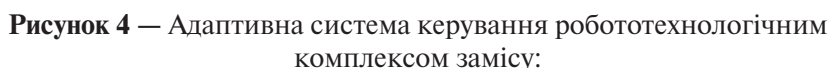
де τ_1 і τ_2 — налагоджувальні параметри фільтра.

3) в якості фільтра використовується фільтр першого порядку вигляду:

$$W(p) = (\tau p + 1)^{-1}, \quad (6)$$

де $\tau_1 = \tau(\tau + 1)^{-1}$; τ — постійна фільтру, коли $\tau_2 = \tau(\tau + 1)^{-1}$;

4) оцінюємо положення системи на фазовій площині (E , E'). Для цього будемо використовувати розраховане значення першої різниці ΔP , як оцінки похідної помилки неузгодження;


$$|E_n| = |EZ|, \quad (7)$$

При виконанні умови (7) на вхід об'єкту 3М АТЗ (змішувач апарату тісто-заміс) подається стрибок у вигляді зміни продуктивності стадії замісу. Через час $0,2T_1$ починається захищений пошук максимуму величини $|E'(t)| = A$. При досягненні максимуму $|E'(t)| = \max$ визначається динаміка об'єкту T_1 та перераховуються налагоджені коефіцієнти ПП—закону регулювання й запам'ятовується інформація, що необхідна для проведення наступного такту. Мікропроцесорна система МП, яка виконує закони ПІ, ПІД-регулювання одержує сигнали від блоків ДВБ (датчика витрат борошна) та датчиків 1, 3, 4, 5, 6. МП формує вплив керування виду:

Цей сигнал з виходу блоків АД (асинхронний двигун), ТП (тиристорний перетворювач) надходить на давальник ДВБ та на об'єкт регулювання і в подальшому за рахунок МП контролюються швидкість подавання борошна в чан та витрати води (ВМ2), а також швидкість регулювання перемішування замісу. Особливістю цієї системи є те, що введення блоків адаптації підвищує перешкодозахищеність щодо визначення коефіцієнтів K_1 та K_2 та запобігає виробітку регулятором помилкових керувань, підвищуючи якість формування перехідного процесу.

97

Д5 — інтелектуальні датчики контролю технологічних параметрів; АД — адаптивні системи керування технологічними процесами.

Перейдемо до синтезу адаптивної системи регулювання процесом підготовки та виробництва тіста (рис. 2), яка стійка до параметричних збурень, і яка є оптимальною до якості формування процесу. Підберемо компоненти b_j ($j = \overline{1, m}$) керування виду:

$$U(t) = \sum_{j=1}^m b_j y^{(i-1)}, \quad 0 < m \leq n. \quad (9)$$

Таким чином, щоб для системи, яку ми проєктуємо забезпечувалася максимальна ступінь I_k стійкості:

$$I_k = \max(-\operatorname{Re} \lambda_{op}(b_j)) > 0, \quad (j = \overline{1, m}) \quad (10)$$

де $\operatorname{Re} \lambda_{op}$ — дійсна частина крайнього правого кореня характеристичного рівняння системи:

$$D(\lambda, b) = \{T_0 \tau_0 \lambda^2 + (T_0 + \tau_0) \lambda + 1\} \lambda + K_0 K_n \lambda + K_{\Pi} K_I, \quad (11)$$

а оптимальне значення K_{Π} та K_I будемо визначати з рівнянь виду:

$$K_{\Pi} = (T_0 + \tau_0)^2 (3K_0 T_0 \tau_0)^{-1} - K_0^{-1}; \quad (12)$$

$$K_I = (T_0 + \tau_0)^2 (27K_0 T_0^2 \tau_0^2)^{-1}. \quad (13)$$

В цій системі керування виробництвом макаронних виробів, рис. 2, перешкодозахищеність досягається шляхом порівняння величини $T_{\text{пер}}(t)$ з величиною

$$0,2 \cdot (t_Y^{\text{ctap}} + t_Y^{\text{нов}}).$$

Якщо $T_{\text{пер}}(t) < 0,2 \cdot (t_Y^{\text{ctap}} + t_Y^{\text{нов}})$, то перерахунок коефіцієнтів K_{Π} , K_I виконується: $K_{\Pi}(t) = K_{\Pi}(0)$, $K_I(t) = K_I(0)$. Якщо ж в процесі ідентифікації

$$T_{\text{пер}}(t) \geq 1,5 \cdot (t_Y^{\text{ctap}} + t_Y^{\text{нов}}),$$

то процес ідентифікації завершується, а адаптація не виконується. При цьому розпочинається новий, наступний етап ідентифікації, пов'язаний з надходженням на переробку замісу та м'ясних додатків з іншими характеристиками якості та нутрієнтної адекватності [6].

Порівняльний імітаційний аналіз якості роботи лінійних і цифрових адаптивних систем керування процесом виробництва прісного тіста та макаронів проведено для умови роботи системи, яка описана диференціальним рівнянням виду:

$$T(t)y(t) + y(t) = K(t), \quad (t - \tau(t)) \quad (14)$$

де $T(t)$, $K(t)$ і $\tau(t)$ — ступенева функція часу; $y(t)$ — вхідна координата об'єкту.

При лінійному ПІ-законі регулювання:

$$U(t) = U_{\text{Л}}(t) = K_{\text{ПЛ}} * (\epsilon_{\text{Л}}(t) + K_{\text{ІЛ}} \int_0^t \epsilon_{\text{Л}}(t) dt_1), \quad (15)$$

а при адаптивному АПІ-керуванні:

$$U(t) = U_{\text{А}}(t) = K_{\text{ПА}}(t) * (\epsilon_{\text{А}}(t) + \int_0^t K_{\text{ІА}}(t) \epsilon_{\text{А}}(t_1) dt_1), \quad (16)$$

де

$$\epsilon_{\text{Л}}(t) = Z(t) - X_{\text{Л}}(t) | U(t) = U_{\text{Л}}(t); \quad \epsilon_{\text{А}}(t) = Z(t) - X_{\text{А}}(t) | U(t) = U_{\text{А}}(t);$$

$$2\dot{Z}(t) + Z(t) = q(t); \quad q(t) — \text{ступенева функція.}$$

Наведемо результати імітаційного моделювання об'єкту (рис. 5), яке проводиться для п'яти випадків зміни параметрів робототехнологічного інтенсифікатора (потужності ультразвукових сигналів). У кожному із них планувалось, що в початковий момент часу $K(0) = 0,2$ й $T(0) = \tau(0) = 1,0$. Значення $K_{\text{ПЛ}}$, $K_{\text{ІЛ}}$ при лінійному ПІ-керуванні обрані за критерієм максимального ступеня для початкового моменту часу. Цими значеннями відповідно є $K_{\text{ПЛ}} = 1,84$, $K_{\text{ІЛ}} = 1,0$. Розглянемо наступні випадки моделювання:

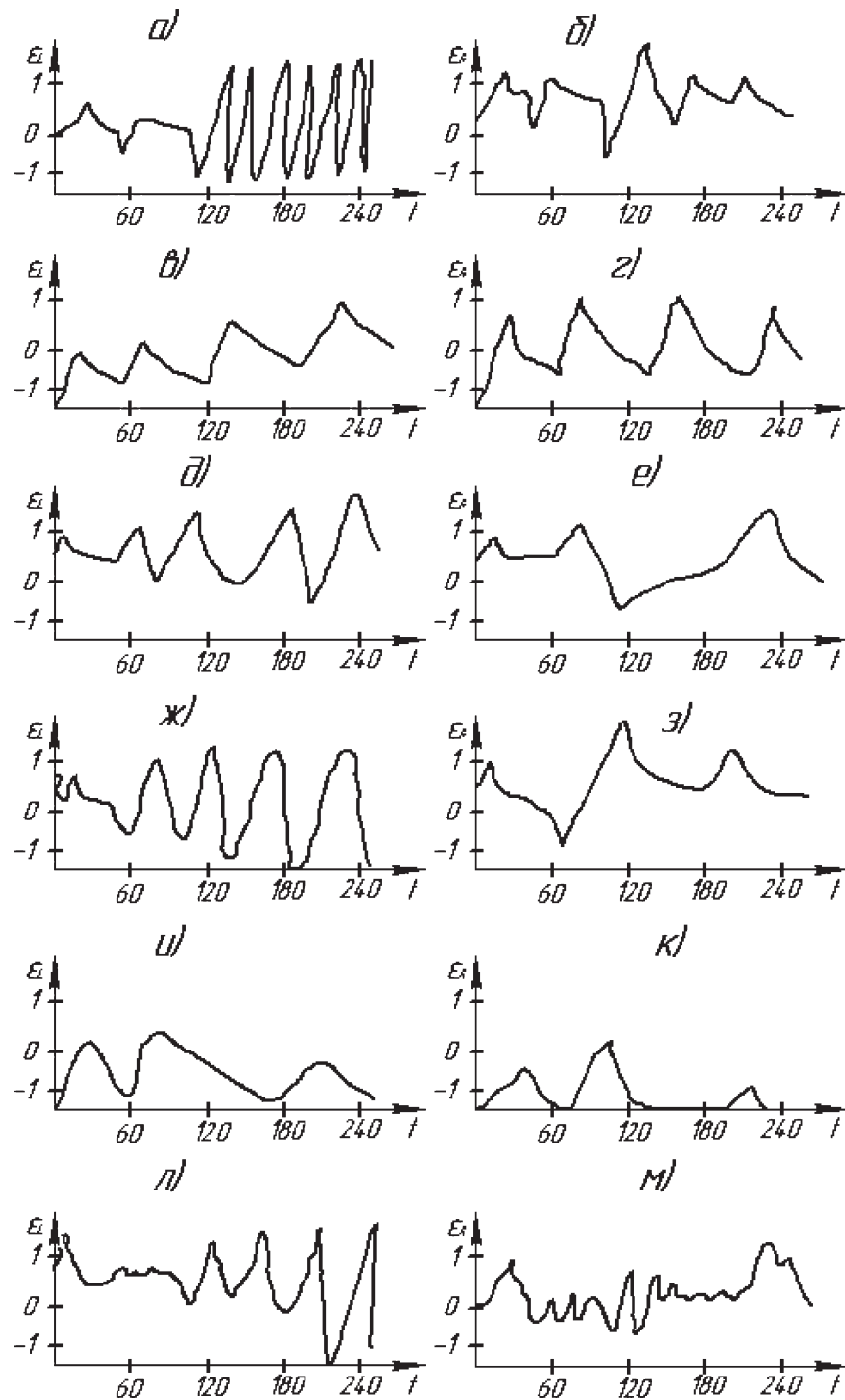


Рисунок 5 — Результати комп'ютерного моделювання

$$g(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0 \\ 1, & \text{при } 240 \geq t > 0 \\ 2, & \text{при } t > 240 \end{cases}, \quad K(t) = \begin{cases} 0,2, & \text{при } 0 < t \leq 45 \\ 0,4, & \text{при } 45 \leq t \leq 105 \\ 1,2, & \text{при } 105 \leq t \leq 60 \\ 2,4, & \text{при } t > 60 \end{cases}, \quad (17)$$

$$T(t) = \tau(t) - 1, t > 0.$$

Процес керування робототехнологічним інтенсифікатором в цьому випадку наведено на рис. 5 а (процес $E_{\Delta}(t)$) та рис. 5 б (процес $E_A(t)$).

Розглянемо випадок 2:

$$q(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0 \\ 1, & \text{при } 240 \geq t > 0 \\ 2, & \text{при } t > 240 \end{cases}, \quad K(t) = \begin{cases} 0,2, & \text{при } 60 \geq t > 0 \\ \frac{0,2}{3}, & \text{при } 150 \geq t > 60 \\ \frac{0,2}{9}, & \text{при } t > 150 \end{cases} \quad (18)$$

На рис. 6 в, г наведено процеси керування робототехнологічним інтенсифікатором для ПІ та АПІ законів відповідно, випадок 3:

$$q(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0 \\ 1, & \text{при } 60 \geq t > 0 \\ 1,75, & \text{при } 210 \geq t > 60 \\ 2,75, & \text{при } t > 210 \end{cases}, \quad T(t) = \tau(t), K(t) = 0,2 \begin{cases} 1, & \text{при } 60 \geq t > 0 \\ 4, & \text{при } t > 60 \\ t \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Процеси $\epsilon_L(t)$ і $\epsilon_A(t)$ для цього випадку наведені на рис. 5 д, е відповідно.

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0 \\ 1, & \text{при } 0 < t \leq 180 \\ 2, & \text{при } t > 180 \end{cases}, \quad K(t) = \begin{cases} 0,2, & \text{при } 0 \leq t < 60 \\ 0,6, & \text{при } t > 60 \end{cases}, \\ T(t) = \tau(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq t < 60 \\ 2, & \text{при } t > 60 \end{cases} \quad (20)$$

Процеси $\epsilon_L(t)\epsilon_L(t)$ і $\epsilon_A(t)\epsilon_A(t)$ для цього випадку наведені на рис. 5 ж, з. Вони відповідають процесам керування ділянкою сушіння сирих макаронних виробів в полі ударних впливів ультразвукових коливань на макаронні вироби, при цьому:

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0 \\ 1, & \text{при } 0 < t \leq 30 \\ 1,75, & \text{при } 430 < t \leq 90 \\ 2,75, & \text{при } t > 90 \end{cases}, \quad K(t) = \begin{cases} 0,2, & \text{при } 0 \leq t \leq 30 \\ \frac{0,2}{3}, & \text{при } t > 30 \end{cases}, \\ T(t) = \tau(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t < 30 \\ 0,5, & \text{при } t > 30 \end{cases} \quad (21)$$

Процеси ϵ_L і ϵ_A для цього випадку наведені на рис. 5. и, к відповідно.

Доведемо можливість роботи алгоритмів адаптивного керування при наявності шумів для найбільш цікавого випадку 4, коли до вихідного сигналу Y_A адаптивно додається експоненціально корельований шум.

Процеси керування для цього випадку наведені на рис. 5 л, н відповідно. При лінійному законі ПІ-керування варіації параметрів в кожному із п'яти випадків призводила або до нестійкості (на рисунках ці випадки відповідають нелінійному режиму роботи виконуючих механізмів). При адаптивному АПІ-керуванні кожна зміна параметрів об'єкта визиває автоматичне перенастроювання лінійної частини регулятора. Після такого налагодження зміну вхідного впливу відслідковує МП за алгоритмом детально розглянутому у [7–9].

При цьому це явище виконується в початковий момент часу при нульових початкових умовах в АПІ-керуванні, коли $K(0) = 0,2$ й $T(0) = \tau(0) = 1,0$. Процеси керування, одержані моделюванням системи керування процесом виробництва тіста на ЕОМ. Дослідження адаптивної системи регулювання процесу виробництва тіста показали, що вона дозволяє знизити дисперсію коливань густини тіста та його рН в середньому на 7 % і на 12–15 % відповідно за рахунок контролю вмісту інгредієнтів та врахування зміни сталості статичних і динамічних властивостей об'єкта регулювання і формування оптимальних аперіодичних перехідних процесів.

У технологічних підсистемах переробки борошна в макаронні вироби важливу роль відіграють локальні системи керування стадіями різання, підготовки й сушки. Ефективність роботи ділянок досягається шляхом вибору оптимального керованого впливу за каналами:

а) «витрати тіста» у ванну диспергатора — вміст м'ясних інгредієнтів»;

б) «струм збудження системи ультразвукового генератора $\mu = K N_{grad} H$ — вміст м'ясних інгредієнтів»;

и) «швидкість обертання барабану шнекового давача $V_{нав}$ — продуктивність макаронних виробів»;

г) «швидкість диспергування — довжина ударних впливів імпульсного ультразвукового поля на тісто УР1».

Таким чином, декілька каналів керування в різних типах технологічних ліній з виробництва макаронних виробів, з точки зору використання сильного борошна і нутрієнтних властивостей м'ясного фаршу, дозволяють спроектувати такі адаптивні системи керування з робототехнологічними інтенсифікаторами диспергування інгредієнтів у тісто, при яких вміст вологи $\alpha_B^3 \rightarrow \min$. Тоді керований вплив сформуємо в вигляді ПІ-закону керування:

$$U(t) = K_{\Pi}(t)\epsilon(t) + K_I(t) \int_0^t \epsilon(t) dt, \quad (22)$$

де $\epsilon(t)$ — помилка, $\epsilon(t) = q(t) - Y(t)$; $q(t)$ — завдання;

$K_{\Pi}(t)$ і $K_I(t)$ — шматочно-постійні коефіцієнти, які визначені в результаті ідентифікації за законом:

$$K_{\Pi}(t) = \begin{cases} K_{\Pi}(0), \text{ при } t < t_{\gamma} \\ \frac{\tilde{K}_{\Pi} K_{\Pi}(0) \epsilon(0)}{|\dot{y}(t_{\gamma})| t_{\gamma}}, \text{ при } t \gg t_{\gamma} \end{cases}, \quad K_I(t) = \begin{cases} K_I(0), \text{ при } t < t_{\gamma} \\ \frac{\tilde{K}_I K_I(t)}{t_{\gamma}}, \text{ при } t > t_{\gamma} \end{cases}, \quad (23)$$

де $\tilde{K}_{\Pi}$, $\tilde{K}_I$, K_{Π} , K_I постійні, а t_{γ} визначається із умови $\ddot{y}(t_{\gamma}) = 0$.

Як і в попередніх випадках будемо використовувати метод активної ідентифікації, при якому налагоджувальні в законі (24) перераховуються за формулами (22) і (23) і залишаються постійними до нового моменту ідентифікації. Коефіцієнти пропорційності $\tilde{K}_{\Pi}$, $\tilde{K}_I$, K_{Π} , K_I визначаються таким чином, щоб при постійних параметрах об'єкту налагоджувальні чинники $\tilde{K}_{\Pi}(t)$, $\tilde{K}_I(t)$ забезпечували мінімізацію втрат вологи макаронними виробами $\alpha_{xb}^0 \rightarrow \min$.

Оцінимо якість системи керування процесом виробництва макаронних виробів по каналу «витрати тіста у ванну тістомісильного апарату ультразвукового диспергатора — вміст м'ясних інгредієнтів ультразвукового робототехнологічного диспергатора». Для цього об'єкт опишемо характерним рівнянням виду:

$$D(p) = e^p (T_c p + 1) p + K_{\Pi} p + K_I = 0. \quad (24)$$

Після цього визначимо оптимальні коефіцієнти ПІ-закону керування. Після відомих перетворень отримуємо:

$$I_{оп} = \frac{4T_c + 1 - \sqrt{8T_c^2 + 1}}{2T}, \quad (25)$$

$$K_{пог} = e^{-I_{оп}} (T_c I_{оп}^2 - (2T + 1) I_{оп} + 1), \quad (26)$$

$$K_{I_{оп}} = e^{-I_{оп}} I_{оп} (T_c I_{оп} - 1) + K_{пог} * I_{оп}, \quad (27)$$

Визначимо значення оцінок $K_{Пад}$, $K_{Іад}$ для виразів (16), (22). При цьому величину $y(t)$ будемо визначати на основі фільтра виду:

$$\tau_1 \dot{x}(t) + x(t) = y_{\Phi}(t); \quad \tau = 0, 1. \quad (28)$$

При ступневому керованому впливу $U(t)$ і $\tau = 1$ маємо при $t \geq 1$:

$$y(t) = \tilde{K}_{\Pi} \frac{K_{\Pi}(0) \epsilon(0)}{T_0 - \tau} \left(e^{-\frac{t-1}{T_c}} - e^{-\frac{t-1}{\tau}} \right), \quad (29)$$

$$\ddot{y}(t) = \tilde{K}_I \frac{K_{\Pi}(0) \epsilon(0)}{T_0 - \tau} \left(-\frac{1}{T_c} e^{-\frac{t-1}{T_c}} + \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t-1}{\tau}} \right). \quad (30)$$

Із умови $\ddot{y}(t_y) = 0$:

$$t_y = 1 + \frac{0,1T_c}{T_c - 0,1} (l_n T_c - l_n 0,1). \quad (31)$$

Із виразів (28), (29), (30), (31) одержимо оцінку коефіцієнтів:

$$K_{\text{Пад}} = \frac{\bar{K}_n(T_c - 0,1)}{K_1 t_y (e^{-\frac{t_y+1}{T_c}} - e^{-\frac{t_y+1}{0,1}})}, \quad (32)$$

$$K_{\text{Іад}} = \frac{K_1 K_{\text{Пад}}}{t_y}. \quad (33)$$

При побудові сучасних АСУТП виробництва макаронної продукції і побудови інтелектуальних систем управління SMART-продуктами харчування для школярів, робітників підземних професій, воїнів ЗСУ важливими адаптивними системами керування є: стабілізуючі системи рівня вологості в макаронах; густини тіста на виході тістомісильних апаратів та макаронних виробів з додатками подрібненого м'яса або печінки.

Такі системи будемо описувати передавальними функціями виду:

$$W(p) = \frac{K}{\prod_{i=0}^n (T_i p + 1)}, \quad (34)$$

де K — змінний коефіцієнт передачі об'єкта за одиницю параметру, що регулюється; Π — порядок системи; T_i — динамічні коефіцієнти.

Стабілізуючі системи реалізують ПІ-закони регулювання. Оскільки в об'єкті змінюється лише один параметр, то сутність роботи алгоритму адаптації полягає у наступному:

— визначається момент часу t_0 , при якому $\epsilon(t)$ досягає максимуму. При цьому, цей момент повинен бути більшим від деякого значення DL . Значення DL будемо визначати експериментально, наприклад у два рази менше допуску, яке задається у вигляді відхилення;

— через заданий час D , який складає приблизно 20 % від часу перехідного процесу об'єкта регулювання, вимірюється значення помилки і проводиться корекція коефіцієнта регулятора за формулою:

$$K_p^{\text{нов}} = K_p^{\text{стар}} \frac{\epsilon(t_0)}{\epsilon(t_0) - \epsilon(t_0 + DT)} K\bar{K}, \quad (35)$$

де $K_p^{\text{стар}}$ — коефіцієнт регулятора в момент часу t_0 ; $K\bar{K}$ — постійний коефіцієнт, який забезпечує налаштування алгоритму щодо критерію максимального ступеня стійкості.

На рис. 6 наведено алгоритм керування процесами стабілізації нутрієнтного складу макаронних виробів з додаванням подрібненої яловичої печінки. Ця система виконана на основі робототехнологічного комплексу, до якого вбудовано інтелектуальні датчики контролю параметрів якості тіста та печінки, датчики рН-параметрів, візуалізації, програмні продукти виконання керування рухом виконавчих інтелектуальних механізмів (BM1, BM2), див. рис. 2.

Алгоритм працює таким чином:

1. Розраховується програмне значення завдання за формулою:

$$yz = yzp + \Delta yz, \quad (36)$$

де yz — значення завдання в даний момент часу; yzp — значення завдання на попередньому кроці; Δyz — лінійна зміна завдання на час Δt .

2. Визначається похибка неузгодження EPS .

3. Виконується фільтрація похибки за формулою:

$$EF = TF * EFP + TF1 * EPS, \quad (37)$$

де EF — відфільтрована похибка; EFP — відфільтрована похибка на попередньому кроці; TF і $TF1$ — коефіцієнти фільтрації, $TF + TF1 = 1$.

4. Визначається оцінка похідної похибки DE .

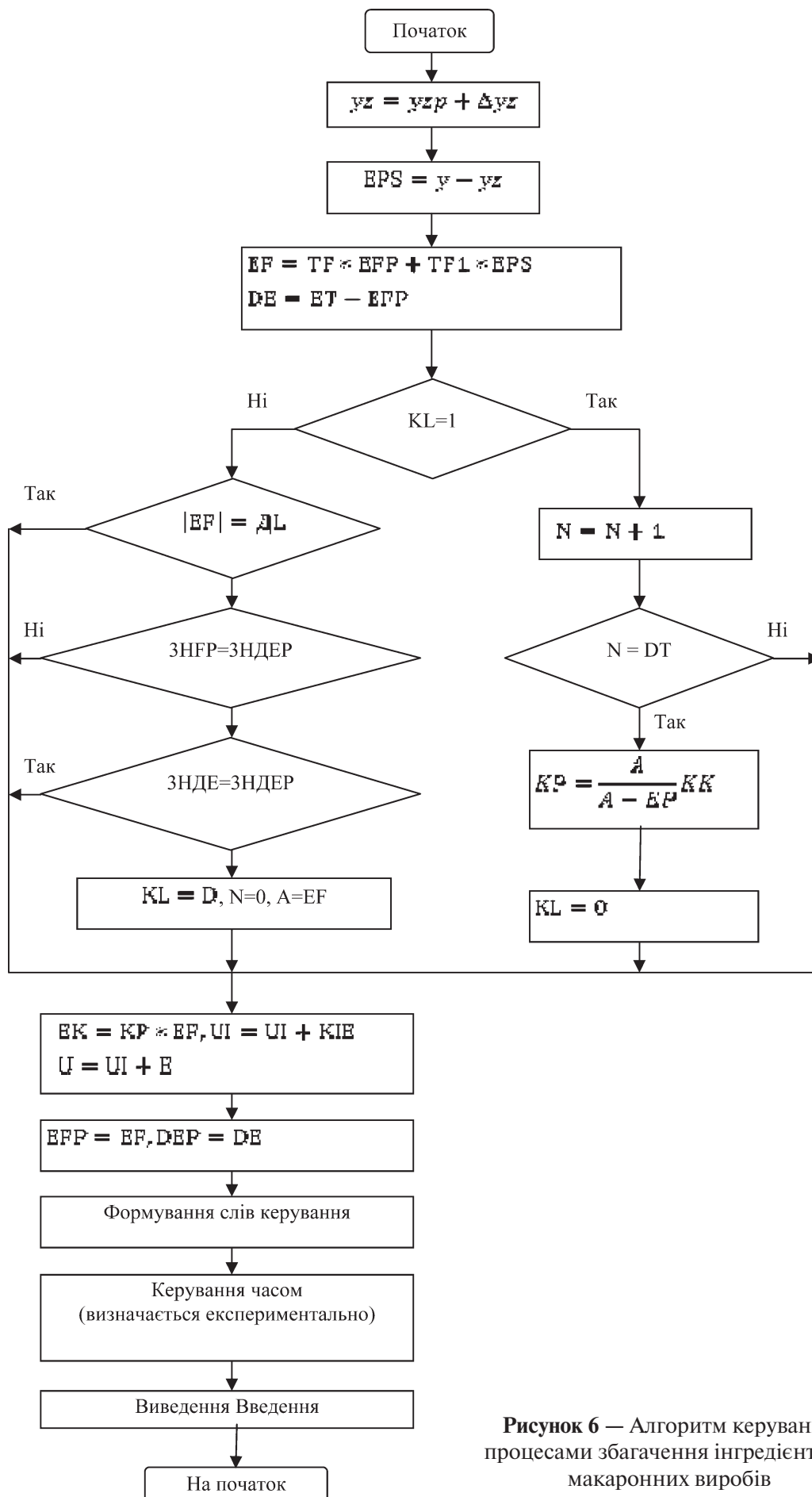


Рисунок 6 — Алгоритм керування процесами збагачення інгредієнтами макаронних виробів

5. За умови $KL = 0$ виконується оцінка положення системи на фазовій площині.
6. При переході фазової траєкторії через вісь ϵ та похибки більше ніж DL , розпочинається ідентифікація — запам'ятовується значення похибки $A_0 = EF$ і включається таймер. Алгоритм переключається в положення $K_i = 1$.
7. Через час DT коригується коефіцієнт K_p . Алгоритм переключається у початкове положення $K_i = 0$.
8. Відпрацьовується ПІ-керування, що дорівнює U_p , U_2 і т. д. Поточне значення похибки і похідної похибки запам'ятовується.
9. Формуються слова керування для виконуючих пристроїв, в якості яких можуть виступати електромагнітні клапани витрат води, тиристорні перетворюючі частоти, магнітні клапани шнекових давальників борошна, керовані ударні впливи ультразвукових коливань на тісто та м'ясні інгредієнти.

Випробування розроблених вище алгоритмів з типовими локальними системами адаптивної стабілізації рівня нутрієнтної адекватності, густини тіста та рН макаронних виробів, процесів сушіння проведені в умовах навчальної лабораторії ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського.

На рис. 7 наведено графіки зміни в часі стабілізуючих параметрів у САК робототехнологічного інтенсифікатора процесу кавітаційного диспергування печінки в тісто: а) з лінійним ПІ-законом; б) з включеним алгоритмом адаптації.

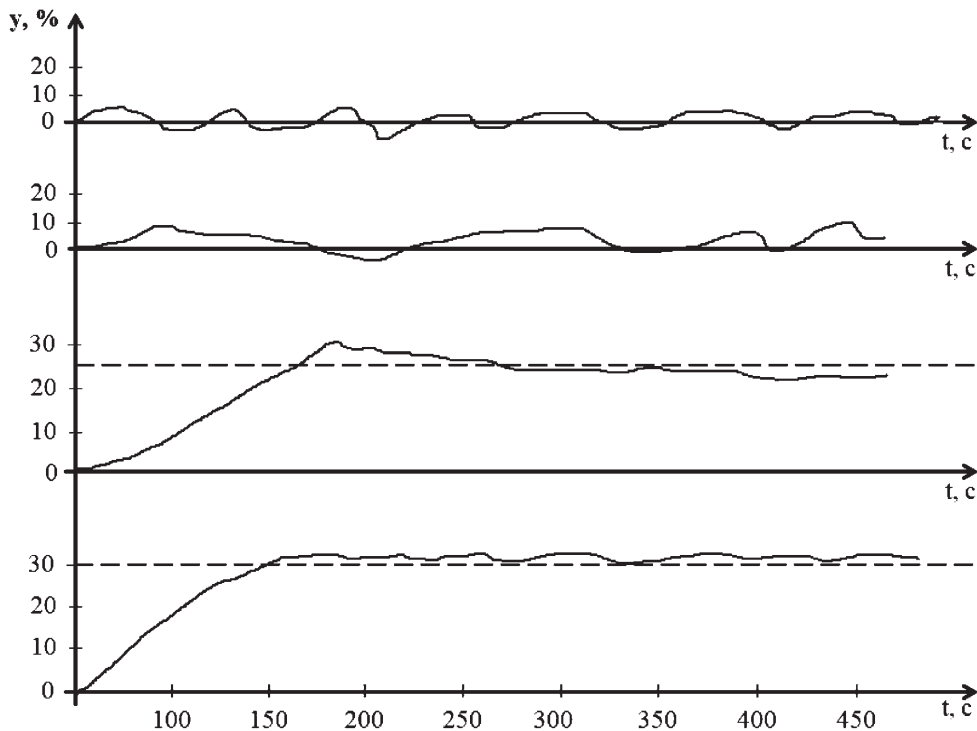


Рисунок 7 — Графіки зміни в часі параметрів макаронних виробів

На цьому ж рисунку наведено загальний вигляд перехідного процесу у тій же системі керування щодо зміни величини завдання контрольованого параметру на 10 %: в) з лінійним ПІ-законом; г) з алгоритмом адаптації.

При цьому відзначимо, що дисперсія регульованого параметра рН зменшилася у 2 рази, а тривалість перехідних процесів у 3,5–4 рази.

Висновки. Беручи до уваги пріоритети державної політики та з урахуванням пандемічної ситуації 2020–2021 рр., сьогодні виникла гостра необхідності забезпечення споживачів регіонів з техногенним навантаженням, особливо школярів, гірників, металургів, воїнів ЗСУ, високоякісною харчовою продукцією, що відповідає світовим стандартам нутриціології. Аналітично та експериментально доведено, що розробка технологій смарт-продуктів харчування повинна бути забезпечена інноваційним обладнанням.

Для цього нами було розроблено алгоритм виробництва смарт-продуктів харчування, в якому процес проектування продукції, технологій та обладнання виконує ЕОМ за допомогою ПЗ та технологій імітаційного моделювання. На основі методів автоматизації розроблено систему та алгоритми адаптивного керування окремими дільницями технологічної лінії з виробництва інноваційного продукту харчування з високим рівнем автоматизації та роботизації.

Також розроблено розподілену АСКТЛ виробництва макаронних виробів з нутрієнтно збалансованими характеристиками, в якій за рахунок систем багаторівневого розподіленого керування та адаптивних систем мікропроцесорного керування дисперсія регульованого рН-параметра зменшилася на 15–18 %.

Список літератури

1. Khorolskyi, V., Bavyko, A., Yermak, S., Riabykina, K., Khorolskyi, K. (2018). *Innovative functional food products for the mining industry. Journal of Hygienic Engineering and Design*, vol. 24, pp. 55–62.
2. Хорольський В. П. та ін. Цифрові системи інтелектуального управління підприємствами промислового комплексу регіону: монографія. Кривий Ріг. 2020. 561 с.
3. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів: монографія / В. П. Хорольський та ін. Кривий Ріг: видавець ФОП Чернявський Д. О., 2019. 204 с. ISBN 978-617-7784-12-7.
4. Гончаренко Б. М., Ладанюк А. П. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: підручник. Київ : НУХТ, 2014. 530 с. ISBN 978-966-612-163-2.
5. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах : навч. посібн. Київ: Ліра-К, 2011. 552 с. ISBN 978-966-2174-13-7.
6. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К., Заїкіна Д. П., Кузьменко А. О., Невідін В. І. Інформаційна система керування виробництвом харчових смарт-продуктів з технологіями заморожування. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2020. № 2 (41). С. 79–88. doi: 10.33274/2079-4827-2020-41-2-79-88.
7. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К., Заїкіна Д. П., Литвиненко А. К. Автоматизована система нечіткого керування процесами виробництва та заморожування ремісничого хліба. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2021. № 1 (293), С. 227–233. doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-227-233.
8. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К., Заїкіна Д. П., Невідін В. І. Автоматизовані системи керування виробництвом заморожуваних продуктів харчування. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. № 6 (291), С. 199–206. doi: 10.31891/2307-5732-2020-291-6-199-206.
9. Хорольський В. П., Коренець Ю. М., Копайгора О. К. Методи ідентифікації та алгоритми адаптивних систем прямого цифрового керування виробництвом продуктів харчування. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2020. №1 (40). С. 32–45. doi: 10.33274/2079-4827-2020-40-1-32-45.

References

1. Khorolskyi, V., Bavyko, A., Yermak, S., Riabykina, K., Khorolskyi, K. (2018). *Innovative functional food products for the mining industry. Journal of Hygienic Engineering and Design*, vol. 24, pp. 55–62.
2. Horolskiy, V. P. et al. (2020). *Tsifrovi systemy intelektualnogo upravlinnya pidpryemstvami promyslovogo kompleksu regionu* [Digital systems of intellectual management of enterprises of the industrial complex of the region], Kryvyi Rih, Chernyavskyi D. O. Publ., 561 p. ISBN 978-617-7784-30-1.
3. Horolskiy, V. P. et al. (2019). *Intelektualni sistemi upravlinnya virobnitstvom hlibobulochnih virobiv* [Intelligent control systems for the production of bakery products]. Kryvyi Rih, Chernyavskyi D. O. Publ., 204 p. ISBN 978-617-7784-12-7.

4. Goncharenko, B. M., Ladanyuk, A. P. (2014). *Avtomatizatsiya virobnichih protsesiv harchovih tehnologiy* [Automation of food production processes]. Kyiv, NUFT. 530 p. ISBN 978-966-612-163-2.
5. Pupena, O. M., Elperin, I. V., Lutska, N. M., Ladanyuk, A. P. (2011) *Promislovi mer ezhi ta integratsiyni tehnologiyi v avtomatizovanih sistemah* [Industrial networks and integration technologies in automated systems]. Kyiv, Lira-K Publ., 552 p. ISBN 978-966-2174-13-7.
6. Horolskiy, V. P., Korenets, Yu. M., Kopaygora, O. K., Zaikina, D. P., Kuzmenko, A. O., Nevidin, V. I. (2020). *Informatsiyna sistema keruvannya virobnitstvom harchovih smart-produktiv z tehnologiyami zamorozhuvannya* [Smart food production management information system with freezing technologies], *Obladnannya ta tehnologiyi kharchovih vyrobnytstv* [Food production equipment and technologies], no. 2 (41), pp. 79–88. doi: 10.33274/2079-4827-2020-41-2-79-88.
7. Horolskiy, V. P., Korenets, Yu. M., Kopaygora, O. K., Zaikina, D. P., Litvinenko, A. K. (2021). *Avtomatizovana sistema nechitkogo keruvannya protsesami virobnitstva ta zamorozhuvannya remisnichogo hliba* [Automated fuzzy control system for the production and freezing of artisan bread], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauki* [Bulletin of Khmelnytsky National University. Engineering sciences], no. 1 (293), pp. 227–233. doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-227-233.
8. Horolskiy, V. P., Korenets, Yu. M., Kopaygora, O. K., Zaikina, D. P., Litvinenko, A. K. (2020). *Avtomatizovana sistema nechitkogo keruvannya protsesami virobnitstva ta zamorozhuvannya remisnichogo hliba* [Automated control systems for the production of frozen food]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauki* [Bulletin of Khmelnytsky National University. Engineering sciences], no. 6 (291), pp. 199–206. doi: 10.31891/2307-5732-2020-291-6-199-206.
9. Horolskiy, V. P., Korenets, Yu. M., Kopaygora, O. K. (2020). *Metody identyfikatsiyi ta alhorytmy adaptivnykh system pryamogo tsyfrovogo keruvannya vyrobnytstvom produktiv kharchuvannya* [Methods of identification and algorithms of adaptive systems of direct digital control of food production], *Obladnannya ta tehnologiyi kharchovih vyrobnytstv* [Food production equipment and technologies], no. 1 (40), pp. 32–45. doi: 10.33274/2079-4827-2020-40-1-32-45.

Objective. The purpose of the article is to develop adaptive algorithms for managing the production of pasta in conditions of uncertainty based on deserted technologies, which will be based on achieving a high degree of automation of technological processes through the use of robotic systems, the Industrial Internet of Things (IIoT) and information and communication technologies.

Methods. The methodological basis of the research consists of the following methods: design of optimal adaptive regulators with substantiation of methods for identifying complex technological processes of pasta production; statistical methods for assessing the dynamic parameters of raw materials and requirements for the quality characteristics of food products; simulation studies were carried out using computer modeling methods to determine the efficiency of robotic intensifiers, increasing product quality and reducing energy consumption.

Results. It is theoretically proved that the identification of the production of pasta with meat applications is carried out by determining the operating modes of the controlled process and choosing the method of adapting the parameters of PI, PID-controllers in systems for adaptive control of the processes of kneading, dough, and drying pasta in the field of ultrasonic vibrations. This makes it possible to improve the quality of control of technological processes by reducing the dispersion of the output parameters and power consumption modes of the drying unit.

It has been analytically and experimentally proven that the development of smart-food technologies should be supported by innovative equipment. In this regard, an algorithm for the production of smart food was developed, in which the process of designing products, technologies and equipment is performed by a computer using appropriate software and simulation technologies. On the basis of automation methods, a system and algorithms for adaptive control of individual sections of a technological line for the production of an innovative food product with a high level of automation and robotization have been developed.

Key words: pasta production, identification, adaptation, control algorithms, simulation, research results.