

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПІКАННЯ ХЛІБА НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

*Анотація.* Аналіз сучасного стану автоматизації процесу випікання хліба свідчить про обмеженість існуючих систем керування, зокрема через відсутність ефективного контролю за вологістю середовища в зоні зволоження пекарної камери. Більшість відомих рішень акцентують увагу на регулюванні температури, витрат палива та швидкості поду, залишаючи поза увагою ключові параметри, що безпосередньо впливають на якість продукції. У зв'язку з цим зростає актуальність розроблення адаптивних та оптимізованих систем автоматизованого керування випіканням. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу випікання хлібобулочних виробів шляхом побудови дворівневої системи автоматичного керування. Нижній рівень такої системи забезпечує регулювання основних параметрів середовища, тоді як верхній виконує функції оптимізації тепловологого режиму в зоні зволоження, враховуючи динамічні зміни характеристик тіста та зовнішні збурення. У дослідженні проаналізовано структуру та режими роботи об'єкта керування — хлібопекарської тунельної печі Г4-ПХЗС-25. Здійснено параметризацію процесу, визначено вплив технологічних режимів на якість продукції та техніко-економічні показники, а також сформульовано вимоги до системи автоматичного керування для забезпечення стабільного результату. Результати дослідження формують наукову основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем керування хлібопекарським виробництвом.

*Ключові слова:* автоматизація процесу випікання, тепловологий режим, система керування, оптимізація, параметризація, хлібопекарська піч, енергозбереження, технологічний процес.

**Постановка проблеми.** Харчова промисловість, як соціально значуща галузь, забезпечує продовольчу безпеку і здоров'я населення, що визначає її стратегічне значення. Хлібопекарська промисловість, яка виробляє хліб – продукт першої необхідності, потребує підвищення якості продукції. Цього можна досягти оптимізацією ключових технологічних процесів, особливо випікання, що безпосередньо впливає на якість виробів і енергоспоживання.

У процесі випікання критичним є забезпечення стабільного тепловологого режиму в зоні зволоження пекарної камери, де формуються основні якісні показники хліба. Однак реальні виробничі умови характеризуються постійними змінами та неконтрольованими збуреннями, що призводить до нестабільності тепловологого режиму. Це

негативно впливає на якість продукції, викликає підвищене енергоспоживання та зростання виробничих витрат. Незважаючи на існування численних систем автоматичного керування, більшість з них не враховують комплексно вплив вологості середовища на процес випікання, що є однією з головних причин нестабільності якості. Відсутність ефективного управління тепловологим режимом знижує стабільність і відтворюваність властивостей хліба, а також призводить до неоптимального використання енергетичних ресурсів.

Отже, основною проблемою є відсутність інтелектуальних адаптивних систем автоматичного керування, здатних у реальному часі підтримувати оптимальні параметри температури та вологості в зоні зволоження, що є необхідною умовою підвищення якості продукції при мінімальних витратах енергії. Це зумовлює необхідність розробки дворівневої системи керування, де нижній рівень забезпечує стабілізацію тепловологого режиму, а верхній — оптимізує параметри з урахуванням динамічних змін і зовнішніх збурень для досягнення високих якісних характеристик хліба та енергоефективності виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах зростаючої актуальності автоматизації процесів теплової обробки у хлібопекарській галузі у науково-технічній літературі представлено низку сучасних рішень. Зокрема, Беспалюк Д. С. і Підтиченко О.В. запропонували мікропроцесорну систему керування, яка реалізує автоматизоване регулювання температури на окремих ділянках печі, співвідношення газоповітряної суміші в пальниках, етапів продувки, запалювання, зупинки, а також забезпечує контроль полум'я й інтеграцію з іншими контролерами в єдину систему управління технологічним процесом [1]. Максимчук Ю. С. і Чепюк Л. О. розробили автоматизовану систему управління тунельною піччю на основі мікропроцесорного контролера, що забезпечує автоматичне та дистанційне керування виконавчими механізмами згідно з алгоритмом, сформованим на робочому місці оператора [2]. Компанія Ten24 запропонувала систему автоматичного керування випіканням, що здійснює контроль подачі пари і оптимізує вологість середовища впродовж усього циклу термообробки [3]. Хорольський В. П., Копайгора О. К. та співавтори провели ідентифікацію та моделювання впливу технологічних змінних у виробництві хліба, розробивши інтелектуальну систему керування енергоспоживанням, що оптимізує роботу локальних енергетичних установок на стадіях вистоювання і випікання, з урахуванням вартості електроенергії та якості продукції [4].

Групою компанії КМБП реалізовано мікропроцесорну систему автоматичного керування, яка підтримує задані температурні режими в пекарній камері, контролює тривалість випікання, а також автоматизує подачу пари для зволоження тістових заготовок [5]. Кирилов К. О. та Левінський В. М. розробили спосіб автоматичного керування випіканням із вимірюванням вологості та температури в зоні зволоження і двох зонах випікання, автономним регулюванням температури через зміну подачі продуктів згоряння та керуванням вологості парою, що забезпечує незалежність контурів регулювання і підвищує стабільність процесу [6]. Паньков Д. В. і Кишенько В. Д. за-

пропонували інтелектуальне керування на основі кваліметричних моделей, включаючи вимірювання технологічних параметрів (температури, вологості, пропеченості м'якуша, геометрії виробу), автоматичну ідентифікацію якості та оптимізацію технологічного режиму шляхом корекції подачі пари, витрат продуктів згоряння і швидкості руху поду [7]. Воїнова С. О. та Сібірченко О. С. розробили метод автоматичного керування із незалежним регулюванням температури в двох зонах пекарної камери та вологості в зоні зволоження через зміну подачі енергоносія і пари, що дозволяє уникнути перехресного впливу між зонами і підвищити точність підтримання параметрів [8].

У контексті підвищення точності, автономності та інтелектуальності систем керування, Павлов А. І. і Бабський О. В. запропонували спосіб регулювання температури в зоні випікання з коригуванням за сумарним впливом ПД-складових відхилень розрідження в топці, що підвищує стабільність температурного режиму [9]. Воїнова С. О., Світий І. М. та інші розробили метод незалежного регулювання температури та вологості із компенсацією взаємного впливу контурів, що зменшує перехресний вплив [10]. Світий І. М. і Миронова О. В. впровадили каскадну структуру керування, що забезпечує регулювання температури камери, готового виробу, витрати пари та розрідження в топці з підвищеною точністю компенсації збурень [11]. Аналогічно, Світий І. М. і Ківалов Ю. Г. запропонували метод інваріантного керування температурними каналами трьох зон печі для усунення взаємного впливу контурів [12]. Мітєва А. В. підкреслила важливість інваріантності каналів регулювання температури та вологості для стабільності режимів при змінах у паровій магістралі [13].

Незважаючи на наявність численних патентованих технічних рішень автоматичного керування випіканням [14–17], у відкритих джерелах обмежена інформація про їх ефективність з точки зору адаптивності, оптимізації та енергоефективності. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення методів автоматизованого керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та змін зовнішніх умов.

Особливу увагу заслуговують дворівневі системи автоматичного керування. Зокрема, Бевз В. І. запропонував ієрархічну структуру, де нижній рівень реалізує регулювання основних параметрів процесу випікання, а верхній – оптимізатор, що формує завдання регуляторам шляхом розв'язання задачі нелінійного програмування з метою мінімізації енергоспоживання без втрати якості [18]. Недостатній рівень керування вологістю в більшості наявних систем негативно впливає на стабільність якості хліба, адже саме тепловологий режим зони зволоження визначає формування структури, об'єму, кірки та аромату виробу. Параметри зволоження враховуються фрагментарно, без цілеспрямованої оптимізації, тоді як основна увага зосереджена на температурі, витратах палива та швидкості конвеєра. Керування вологістю здебільшого відсутнє або має компенсаційний характер, що не гарантує стабільної якості за змін умов. Оптимізацію слід здійснювати не лише за кінцевими показниками якості, а й безпосередньо в координатах тепловологого режиму зони зволоження. Це обґрунтовує необхідність реалізації дворівневої системи керування, де нижній рівень відповідає за стабілізацію параметрів середовища, а верхній — за формування оптимальних задач з урахуванням властивос-

тей тіста, енергетичних збурень та цільових характеристик продукції при мінімальному енергоспоживанні.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є формалізація об'єкта керування процесом тепловологової обробки тістових заготовок у хлібопекарській печі, параметризація впливових технологічних змінних та обґрунтування доцільності впровадження оптимізуючого рівня в структуру системи автоматичного керування.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У дослідженні процес випікання хліба розглядається як багатопараметрична система з вираженою динамікою тепловологого режиму в зоні зволоження (рис. 1). Для побудови моделі об'єкта керування використано метод системного аналізу, а також методики активного й пасивного експерименту, статистичної ідентифікації та інженерного узагальнення. Синтез САР виконано з використанням методів класичної теорії автоматичного керування, включно з оптимальним параметричним налаштуванням регуляторів. Перевірку працездатності алгоритмів здійснено шляхом імітаційного моделювання.

Як показано на Рисунку 1, у процесі випікання відбувається пошарове прогрівання тістової заготовки, що супроводжується комплексом фізичних, біохімічних і колоїдних перетворень. Така структура тепломасообміну ускладнює задачу стабілізації параметрів середовища. Це обумовлює доцільність реалізації дворівневої системи керування: нижній рівень забезпечує підтримання температури та вологості, тоді як верхній рівень формує оптимальні завдання з урахуванням змін технологічних умов і впливу збурень.

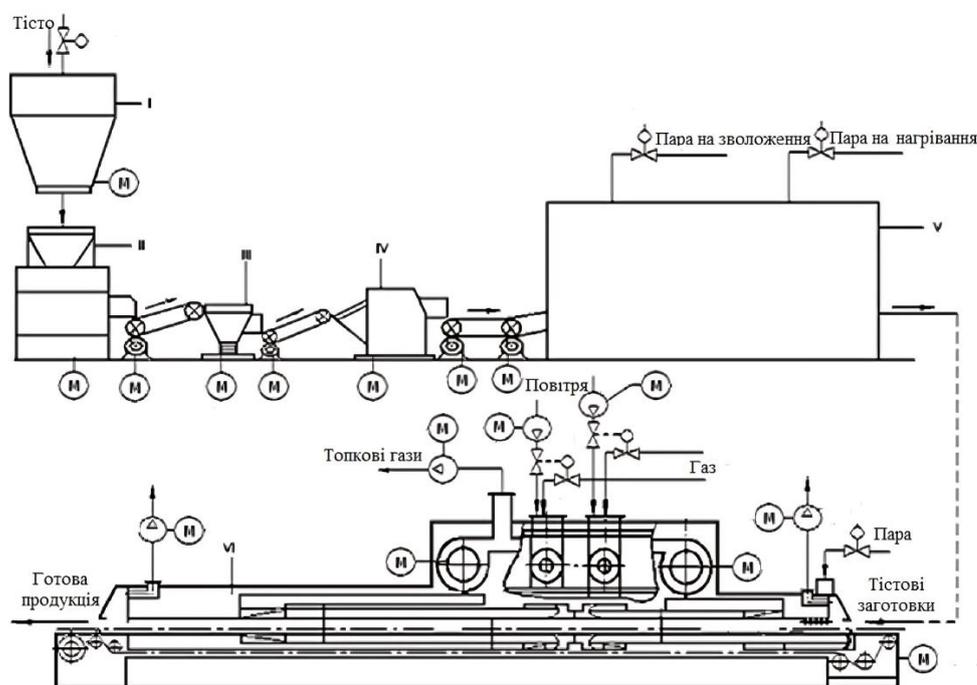


Рисунок 1 – Схема ділянки технологічного процесу випікання хліба

Хлібобулочні вироби випікаються в пекарських камерах за температури 200–280 °С при витраті теплової енергії на рівні 293–544 кДж на 1 кг продукції. Основна частина теплоти (80–85 %) передається заготовці випромінюванням, решта — тепло-

провідністю від поду і конвекцією пароповітряної суміші. Основні етапи термофізичних перетворень включають нагрівання заготівлі до 96–97 °С, що забезпечує її перехід у хліб. Конденсація пари в зоні зволоження пришвидшує прогрів, затримує утворення кірки, сприяє розширенню виробу та формуванню блискучої, щільної поверхні. Для посилення зволоження тістові заготівлі зазвичай обприскують водою перед посадкою, а зона поду повинна бути розігріта до 180–200 °С. У зоні високих температур (270–290 °С) відбувається інтенсивне розширення заготівлі внаслідок переходу летких речовин у парову фазу та формування стабільної структури виробу через клейстеризацію крохмалю й денатурацію білків. Технологічна схема виробництва хліба охоплює послідовну механізовану обробку тіста, починаючи з його подачі з бункера (I) до завершального етапу випікання в пекарській печі (VI). Зокрема, тісто надходить у тістодільну машину (II), де відбувається його порціонування. Далі за допомогою транспортера заготівлі переміщуються до округлювача (III), що надає їм оптимальної форми. Після округлення тістові заготовки спрямовуються до тістоформувальної машини (IV), яка забезпечує остаточну геометрію виробу відповідно до заданого типу продукції. Сформовані заготовки надходять до вистійної шафи (V), де проходять попереднє вистоювання з метою активізації дріжджових процесів, що забезпечує оптимальну пористість м'якуша. Фінальне вистоювання та термічна обробка відбуваються у хлібопекарській печі (VI), де завершуються всі фізико-хімічні трансформації: утворення м'якуша, формування кірки, фіксація об'єму та розвиток аромату. Така схема дозволяє досягти стабільної якості продукції при зниженні ручної праці та забезпеченні контролю технологічних параметрів на кожному етапі. Об'єктом дослідження є піч Г4-ПХЗС-25, пекарна камера якої утворена чотирма послідовно розташованими корпусами-секціями (Рис.2). Вони поєднані системою газоходів, призначених для подачі гріючих газів – теплоносія, що надходить від топкових пристроїв. Кожна секція обладнана пристроєм зволоження пароповітряного середовища, що забезпечує формування необхідного мікроклімату у відповідній зоні. Піч має дві незалежні теплові зони з роздільним регулюванням температури та вологості. Принцип дії полягає в теплопередачі від топків через газоходи до пекарної камери, де переміщується сітчастий конвеєр із тістовими заготівками. Важливою особливістю є рециркуляція відпрацьованих гріючих газів із першої зони до другої, що підвищує теплову ефективність системи.

Під режимом випікання розуміють сукупність параметрів температури, вологості та часу, що задаються для окремих зон камери. У сучасній практиці застосовуються змінні температурно-вологісні режими, що передбачають проходження заготовки через декілька технологічних зон: зволоження, високої температури та охолодження. У зоні зволоження підтримується висока відносна вологість (65–90 %) і відносно низька температура (120–160 °С), що створює умови для конденсації пари на поверхні заготовок, запобігає передчасному утворенню кірки та сприяє рівномірному прогріванню виробу.

Наступним етапом дослідження стало вивчення впливу режимів функціонування обладнання на техніко-економічні показники процесу, зокрема –

на якість готової продукції, витрати енергоносіїв та ресурсну ефективність. Для цього проведено параметризацію технологічної схеми випікання хліба (Рис. 2), що дозволило ідентифікувати критичні зони впливу режимів роботи на стабільність процесу.

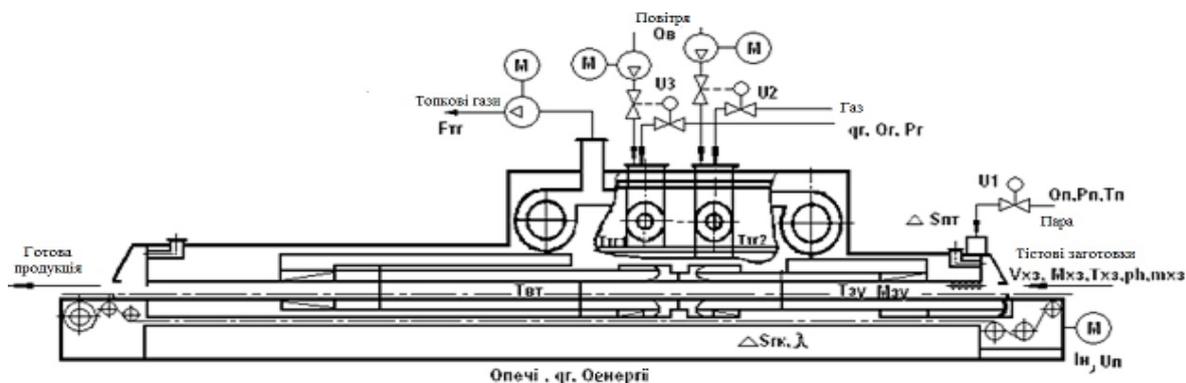


Рисунок 2 – Параметризована схема технологічного процесу випікання хлібу в печі Г4-ПХЗС-25

У рамках дослідження виконано також аналіз чинних регламентів та можливих наслідків їх порушення – зокрема, перегріву у зонах випікання, зниження вологості у зоні зволоження, або нестабільної швидкості руху пода. Побудована модель технологічної схеми дозволяє здійснювати адаптивне управління параметрами процесу та виявляти оптимальні умови для забезпечення високої якості хлібобулочних виробів при мінімізації витрат енергії та зниженні відсотка браку. До технологічного регламенту віднесли вологість  $M_{зy}$  та температуру  $T_{зy}$  у зоні зволоження; температуру у зоні високої температури  $T_{вт}$ ; температуру у зоні зниженої температури  $T_{пт}$ . До експлуатаційного регламенту - струм навантаження транспортера печі  $I_n$  та напругу, підведену до електродвигуна транспортера печі  $U_p$ . До техніко-економічного - продуктивність печі  $Q_{печі}$ ; питомі витрати палива (природного газу)  $q_r$ ; кількість електрики  $Q_{енергії}$ , що витрачається. До екологічного регламенту – концентрацію шкідливих речовин у топкових газах, викиданих трубами печі внаслідок її роботи. На техніко-економічні показники процесу випікання, а також на регламентацію режимів його ведення суттєвий вплив мають вимоги, викладені в правилах експлуатації хлібопекарської печі Г4-ПХЗС-25:

1) Під час експлуатації печі здійснюється безперервний контроль параметрів повноти згоряння палива, температурного режиму гріючих газів і пекарної камери, а також тиску пари в системі. Забезпечення стабільних значень цих параметрів є критичним для підтримання ефективності та безпеки технологічного процесу.

2) Експлуатація печі з порожньою (незавантаженою) пекарною камерою вважається небезпечною через відсутність тепловіддачі від нагрітих трубок до виробів, що може спричинити надмірне підвищення тиску в трубках і ризик їх механічного руйнування. Допускається лише короточасна робота топки за відсутності завантаження. У випадку тривалого незавантаження пекарної камери подача палива в топку має бути припинена [4]. На підставі цих вимог було складено таблицю регламентів (табл. 1).

Регламенти ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання

Найменування параметрів	Номинальне значення	Допустимі відхилення від номіналу		
		Тривалі ( $t \rightarrow \infty$ )		Короткочасні ( $0 < t < \infty$ )
		величина	величина	час, з
Вологість середовища, у зоні зволоження печі $M_{зв}$ , %	85	0.5	10	900
Температура середовища у зоні зволоження печі $T_{зв}$ , °C	140	1	30	900
Температура середовища у зоні випічки високої температури ТВТ, °C	280	2	40	900

При недотриманні регламенту хлібні заготовки зазнають змін, що стосуються як зовнішнього вигляду, так і смакових якостей випіканого виробу. Ці зміни, викликані виходом регульованих параметрів під час випікання за зону неважливих відхилень, зведено в Табл. 2.

Таблиця 2

Таблиця змін наслідків виходу регламентних значень за допустимі зони

Найменування параметра	Номинальне значення	Наслідки перевищення допустимого значення	Наслідки зниження нижче допустимого значення
Вологість середовища у зоні зволоження, $M_{зв}$ , %	85	Деформація тістової заготовки (ТЗ), розриви кірки, порушення структури м'якуша	Передчасне утворення кірки, обмеження розширення ТЗ, зниження пористості готового виробу
Температура середовища у зоні зволоження, $T_{зв}$ , °C	140	Надмірно швидке збільшення об'єму ТЗ, розриви кірки, вихід м'якуша за межі виробу	Недостатнє підняття ТЗ, деформація, зростання ризику дефектів у зоні високої температури
Температура у зоні високої температури, ТВТ, °C	280	Прискорене утворення кірки, надмірна її товщина, деформація виробу	Нерівномірне забарвлення кірки, сирий м'якуш у центральній частині ТЗ

Усі зазначені вище наслідки виходу регламенту за зазначені межі призводять, до випуску бракованої продукції, що за собою веде економічні та енергетичні збитки, ускладнення торгово-економічних і конкурентних відносин з ринком виробника. Зазвичай, поточні значення нормативних параметрів завжди відхиляються від номінальних

внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами та можуть бути згруповані за деякими ознаками. До сировинних параметрів віднесли вологість хлібних заготовок  $M_{хз}$ , їх об'єм  $V_{хз}$ , температуру  $T_{хз}$ , кислотність  $ph_{хз}$ , масу  $m_{хз}$ . До енергетичних - витрату пари, що підводиться в зону зволоження печі  $Q_{п}$ , її тиск  $P_{п}$ , температуру  $T_{п}$ , витрату газу, що підводиться до двох топок печі  $Q_{г}$ , його тиск  $P_{г}$ ; питому теплоту згоряння газу в топці  $q_{г}$ , витрату повітря, що підводиться до топок печі  $Q_{ст}$ . До механічних - зміну поперечного перерізу гріючого каналу внаслідок відкладення сажі та золи  $\Delta S_{гк}$ , зміну поперечного перерізу в трубі, що підводить пару в зону зволоження  $\Delta S_{пт}$ , зміну коефіцієнта теплопередачі пода і гріючих каналів  $\Delta \lambda$ , керуючий вплив  $u_1$  - положення регулюючого органу подачі пари в зону зволоження, керуючий вплив  $u_2$  - положення регулюючого органу подачі газу в першу топку, керуючий вплив  $u_3$  - положення регулюючого органу подачі газу в другу топку печі.

Ефективність регулювання в процесі випікання хліба істотно залежить від стабільності умов ведення технологічного процесу. Через динамічні збурення змінюються оптимальні значення керованих параметрів, що зумовлює дрейф критеріїв якості продукції. У зв'язку з цим доцільним є вдосконалення системи керування шляхом введення функції оптимізації, яка дозволить адаптивно коригувати режими випікання. Ключовими для забезпечення високої якості хлібобулочних виробів є параметри зони зволоження пекарної камери – вологість і температура. Саме в цій зоні формуються основні структурні характеристики м'якуша та кірки. Зволоження сповільнює утворення твердої кірки, сприяє рівномірному розширенню тістової заготовки, зменшує інтенсивність випаровування на початковому етапі, що позитивно впливає на зовнішній вигляд і пористість готового виробу. Конденсація пари на поверхні забезпечує стабілізацію форми за рахунок теплової енергії.

Дослідження показують, що процес випікання умовно поділяється на два періоди – розширення (змінного об'єму) та стабілізації (постійного об'єму), після якого можливе незначне зменшення об'єму виробу внаслідок усадки кірки під час зневоднення. З огляду на це, підтримання стабільного тепловологісного режиму в зоні зволоження має пріоритетне значення, тоді як у зоні високих температур достатньо температурного контролю. Раціональним підходом до підвищення ефективності керування є реалізація дворівневої системи: на першому рівні забезпечується регулювання базових параметрів (температури, вологості, тиску), а на другому – здійснюється оптимізація тепловологісного режиму в зоні зволоження з урахуванням змінних умов процесу та зовнішніх збурень. Це дозволяє забезпечити стабільну якість готової продукції при підвищенні енергоефективності виробництва.

З метою стабілізації вологісного режиму в зоні зволоження пекарної камери запропоновано використати ПІ-регулятор, який описується рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де  $u(t)$  – регулюючий вплив (відкриття клапану подачі пари);  $e(t) = M_{\text{зад}}(t) - M_{\text{факт}}(t)$  – відхилення вологості;  $K_p, K_i$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії;  $M_{\text{зад}}(t), M_{\text{факт}}(t)$  – відповідно задана та фактична вологість.

Адаптивність забезпечується залежністю коефіцієнтів регулятора від температури технологічної зони:

$$K_p = f(T_{\text{зон}}), \quad K_i = g(T_{\text{зон}}), \quad (2)$$

Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію параметрів регулятора до змін технологічного середовища без необхідності втручання оператора. Залежність коефіцієнтів пропорційної та інтегральної дії від температури у зоні обробки дозволяє компенсувати вплив внутрішніх і зовнішніх збурень у режимі реального часу, що істотно підвищує точність підтримання заданих умов. З огляду на це, описана структура регулятора може розглядатися як фундаментальна основа для побудови ієрархічної системи автоматичного керування, в якій нижній рівень виконує функції стабілізації, а верхній реалізує оптимізаційні алгоритми з урахуванням змінних властивостей об'єкта та багатокритеріальних вимог до якості кінцевого продукту.

Для ілюстрації функціонування запропонованої регуляторної структури було реалізовано імітаційну модель процесу стабілізації вологості в зоні зволоження. На рисунку 4 наведено характер перехідного процесу за дії ПІ-регулятора, що забезпечує вихід поточного значення вологості на задане з урахуванням інерційних властивостей об'єкта керування. Модель демонструє ефективність запропонованого підходу: при початковому відхиленні на рівні 10% від номінального значення система досягає стабільного режиму менш ніж за 60 секунд, без перерегулювання або коливань, що свідчить про адекватність обраних параметрів регулятора.

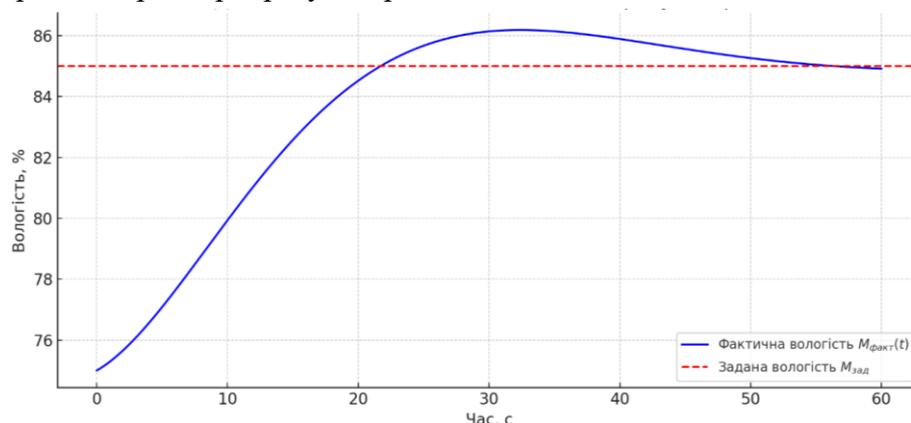


Рисунок 4 – Динаміка стабілізації вологості у зоні зволоження за дії ПІ-регулятора

**Висновки.** У роботі проведено системний аналіз процесу автоматизації випікання хліба на прикладі тунельної печі Г4-ПХЗС-25, зосереджено увагу на параметризації тепловологого режиму, що є ключовим для забезпечення стабільної якості хлібобулочних виробів. Визначено, що недостатній контроль вологості у зоні зволоження є однією з основних причин нестабільності якості та підвищеного енергоспоживання. Запропоновано дворівневу систему автоматичного керування, де нижній рівень забезпечує стабілізацію базових технологічних параметрів, а верхній – адаптивну оптимізацію теплово-

логого режиму з урахуванням динамічних змін технологічних властивостей тіста і зовнішніх збурень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Беспалюк Д. С., Підтиченко О. В. Автоматизована система управління піччю для випікання хлібобулочних виробів [Електронний ресурс] // Екологічна безпека та раціональне природокористування: зб. матеріалів Всеукр. наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, Житомир, 16 лютого 2023 р. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/388.pdf>
2. Максимчук Ю. С., Чепюк Л. О. Автоматизована система управління піччю для випікання хлібобулочних виробів [Електронний ресурс] // Екологічна безпека та раціональне природокористування: зб. матеріалів Всеукр. наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, Житомир, 23 травня 2018 р. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/05/186-1.pdf>
3. Тунельні печі в хлібопекарській промисловості [Електронний ресурс] // Офіційний сайт компанії TEN24. – Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tunnelnye-pechi-v-khlebopekarskoj-promyshlennosti-chast-1/>
4. Хорольський В. П., Копайгора О. К., Гавришкевич Ю. С., Бойченко А. О. Система оптимального управління енергоспоживанням виробництва хліба [Електронний ресурс] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 1 (281). – С. 269–278. – Режим доступу: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/44-3.pdf>
5. Піч хлібопекарська [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Калинівського машинобудівного заводу. – Режим доступу: <https://www.kmbp.com.ua/produktsiya/rishennia-dlia-khlebopekarskoj-promyslovosti/pechi-khlebopekarski>
6. Кирилов К. О., Левінський В. М. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 79307 У Україна. МПК А21В1/00. № u201207355 ; заявл. 18.06.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
7. Паньков Д. В., Кишенько В. Д. Спосіб інтелектуального керування процесом випічки подового хліба на основі кваліметричних моделей : пат. № 103533 У Україна. МПК А21В1/00, А21D8/06. № u201504955 ; заявл. 21.05.2015 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.
8. Воїнова С. О., Сібірченко О. С. Спосіб автоматичного управління випічкою хліба : пат. № 92208 У Україна. МПК А21В1/00. № u201400534 ; заявл. 20.01.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.
9. Павлов А. І., Бабський О. В. Спосіб автоматичного управління процесом випічки хліба : пат. № 75652 У Україна. МПК А21В1/00. № u201206097 ; заявл. 21.05.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.
10. Воїнова С. О., Світий І. М., Рябоконт М. О. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хлібобулочних виробів : пат. № 72564 У Україна. МПК А21В1/00. № u201200467 ; заявл. 16.01.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.
11. Світий І. М., Миронова О. В. Спосіб автоматичного управління піччю для виробництва хлібопекарних та кондитерських виробів : пат. № 62992 У Україна. МПК А21В1/00. № u201101939 ; заявл. 18.02.2011 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

12. Світий І. М., Ківалов Ю. Г. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 50471 У Україна. МПК А21В1/00. № u200913008 ; заявл. 14.12.2009 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.
13. Мітєва А. В. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 34308 У Україна. МПК А21В1/00. № u200802052 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
14. Хорольський В. П., Ключєв Д. Ю., Коржов С. М. Інтелектуальна система управління та моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання хлібобулочних заводів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 55–62.
15. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / В. П. Хорольський, Ю. М. Кореноць, А. В. Возняк [та ін.] ; за ред. В. П. Хорольського. – Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д. О., 2019. – 204 с.
16. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підручник / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, І. В. Ельперін, В. Д. Цюцюра. – К. : Аграрна освіта, 2001. – 224 с.
17. Шаруда С. С., Кишенько В. Д. Інтелектуальна система сценарного управління хлібопекарським виробництвом // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 5/3 (47). – С. 66–70.
18. Бєвз В. І. Автоматическая оптимизация процесса выпечки хлебобулочных изделий в современных хлебобулочных печах тоннельного типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Бєвз Владимир Ильич ; Одесская академия пищевой промышленности. – Одесса, 1980. – 185 с.

#### REFERENCES

1. Bєspaliuk D. S., Pidtychenko O. V. Avtomatyzovana systema upravlinnia pichchiu dlia vypikannya khlibobulochnykh vyrobiv [Elektronnyi resurs] // Ekolohichna bezpeka ta ratsionalne pryrodokorystuvannya: zb. materialiv Vseukr. nauk. konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh uchenykh, Zhytomyr, 16 liutoho 2023 r. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/388.pdf>
  2. Maksymchuk Yu. S., Chepiuk L. O. Avtomatyzovana systema upravlinnia pichchiu dlia vypikannya khlibobulochnykh vyrobiv [Elektronnyi resurs] // Ekolohichna bezpeka ta ratsionalne pryrodokorystuvannya: zb. materialiv Vseukr. nauk. konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh uchenykh, Zhytomyr, 23 travnia 2018 r. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/05/186-1.pdf>
  3. Tunelni pechi v khlibopekarskii promyslovosti [Elektronnyi resurs] // Ofitsiyni sait kompanii TEN24. – Rezhym dostupu: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tunnelnye-pechi-v-khlibopekarskoj-promyshlennosti-chast-1/>
  4. Khorolskyi V. P., Kopaihora O. K., Havryshkevych Yu. S., Boichenko A. O. Systema optymalnoho upravlinnia enerhospozhyvanniam vyrobnytstva khliba [Elektronnyi resurs] // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2020. – № 1 (281). – С. 269–278. – Rezhym dostupu: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/44-3.pdf>
  5. Pich khlibopekarska [Elektronnyi resurs] // Ofitsiyni sait Kalynivskoho mashyno-
- ISSN 1562-9945 (Print) 55  
ISSN 2707-7977 (Online)

budivnoho zavodu. – Rezhym dostupu: <https://www.kmbp.com.ua/produktsiya/rishennia-dlia-khlibopekarskoi-promyslovosti/pechi-khlibopekarski>

6. Kyrylov K. O., Levynskyi V. M. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 79307 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201207355 ; zaiavl. 18.06.2012 ; opubl. 25.04.2013, Biul. № 8.

7. Pankov D. V., Kyshenko V. D. Sposib intelektualnogo keruvannia protsesom vypichky podovoho khliba na osnovi kvalimetrychnykh modelei : pat. № 103533 U Ukraina. MPK A21B1/00, A21D8/06. № u201504955 ; zaiavl. 21.05.2015 ; opubl. 25.12.2015, Biul. № 24.

8. Voinova S. O., Sibirchenko O. S. Sposib avtomatychnoho upravlinnia vypichkoiu khliba : pat. № 92208 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201400534 ; zaiavl. 20.01.2014 ; opubl. 11.08.2014, Biul. № 15.

9. Pavlov A. I., Babskyi O. V. Sposib avtomatychnoho upravlinnia protsesom vypichky khliba : pat. № 75652 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201206097 ; zaiavl. 21.05.2012 ; opubl. 10.12.2012, Biul. № 23.

10. Voinova S. O., Svityi I. M., Riabokon M. O. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khlibobulochnykh vyrobiv : pat. № 72564 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201200467 ; zaiavl. 16.01.2012 ; opubl. 27.08.2012, Biul. № 16.

11. Svityi I. M., Myronova O. V. Sposib avtomatychnoho upravlinnia pichchiu dlia vyrobnytstva khlibopekarnykh ta kondyterskykh vyrobiv : pat. № 62992 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201101939 ; zaiavl. 18.02.2011 ; opubl. 26.09.2011, Biul. № 18.

12. Svityi I. M., Kivalov Yu. H. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 50471 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u200913008 ; zaiavl. 14.12.2009 ; opubl. 10.06.2010, Biul. № 11.

13. Mitieva A. V. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 34308 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u200802052 ; zaiavl. 18.02.2008 ; opubl. 11.08.2008, Biul. № 15.

14. Khorolskyi V. P., Kliuiev D. Yu., Korzhov S. M. Intelektualna systema upravlinnia ta monitorynhu robochykh kharakterystyk tekhnolohichnoho obladnannia khlibobulochnykh zavodiv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2016. – № 6. – S. 55–62.

15. Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv / V. P. Khorolskyi, Yu. M. Korenots, A. V. Vozniak [ta in.] ; za red. V. P. Khorolskoho. – Kryvyi Rih : FOP Cherniavskyi D. O., 2019. – 204 s.

16. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti : pid-ruchnyk / A. P. Ladaniuk, V. H. Trehub, I. V. Elperin, V. D. Tsiutsiura. – K. : Ahrarna osvita, 2001. – 224 s.

17. Sharuda S. S., Kyshenko V. D. Intelektualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom // Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2010. – № 5/3 (47). – S. 66–70.

18. Bevz V. I. Avtomatyzatsiia optymyzatsiia protsesa vyrechky khlebobulochnykh yzdelyi v sovremennykh khlebobulochnykh pechakh tunnelnoho typu : dys. ... kand. tekhn.

***A systemic approach to bread baking automation based  
on control object parameterization***

*Current studies on the automation of bread baking processes reveal significant limitations in existing control systems, particularly due to the insufficient consideration of humidity regulation in the steam zone of the baking chamber. While modern systems tend to focus on temperature control, fuel consumption, and conveyor speed, they often overlook the key role of moisture in ensuring high-quality end products. Numerous technical and scientific works propose temperature and process control solutions; however, few provide integrated approaches addressing the heat and humidity balance. There is also limited information available on the practical performance of such systems, especially in terms of adaptability and energy efficiency. The need for intelligent, adaptive, and energy-saving systems remains largely unmet in industrial bakery environments.*

*This study aims to enhance the effectiveness of the bread baking process by designing a two-level automatic control system. The lower level ensures stable regulation of environmental parameters, while the upper level focuses on optimizing the heat and humidity conditions in the steam zone, accounting for dynamic dough properties and external disturbances.*

*The paper presents a detailed analysis of the G4-PKhZS-25 tunnel baking oven as the control object. The process is viewed as a complex, multi-parameter system where consistent thermal and humidity conditions are critical. Through system analysis and experimental identification, key influencing parameters are defined and formalized. The proposed two-level structure includes a feedback-based bottom level for stabilization and a model-based top level for optimization. The study develops a parameterized model of the baking process, identifying the critical zones of technological influence. It highlights the influence of steam moisture and temperature on crust formation, dough expansion, and product porosity. Engineering models and simulation approaches are used to validate the proposed control strategy. Emphasis is placed on the stability of quality indicators and energy consumption under varying process conditions.*

*The research concludes that traditional single-layer control systems are insufficient for achieving the desired stability and quality in bread production. The study proposes a two-level control framework where the lower level ensures baseline environmental control and the upper level applies adaptive optimization to maintain optimal heat and humidity conditions in the steam zone. The approach contributes to consistent product quality, energy savings, and reduced defect rates. It also lays the groundwork for future development of intelligent control systems in industrial bakery applications.*

**Колосовський Артем Іванович** - аспірант, Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4162-629X>

**Kolosovskyi Artem** - Postgraduate Student, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4162-629X>