

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА КРУАСАНІВ

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS
OF CROISSANT PRODUCTION

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВмз - 21
Савчук Миколай Вікторович

(підпис)

Керівник:
к. т. н., доцент
Сацук Віктор Олександрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гуменюк П. О.

(підпис)

Луцьк – 2025

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Савчука Миколая Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва круасанів*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Сацук Віктор Олександрович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 27 » 06 2025 року N 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: « 1 » 12 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *технологічний процес виробництва круасанів*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Технічна характеристика об'єкта. Обґрунтування вибору функціональної схеми

автоматизованої системи керування. Обґрунтування вибору технічних засобів

автоматизації. Обґрунтування і опис принципів електричних схем. Програмне

забезпечення системи автоматизації. Розробка стохастичної моделі керування

температурно-вологісним режимом процесу остаточного вистоювання тіста у розстойній

шафі з використанням PID-регулятора та фільтра Калмана. Техніко-економічне

обґрунтування проєкту автоматизації

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 10 слайдів

АНОТАЦІЯ

Савчук М. В. Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва круасанів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, семи розділів, загальних висновків та рекомендацій, переліку використаних джерел та додатків.

У кваліфікаційній роботі виконана модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення круасанів. Застосування передових технологій автоматизації, цифрового моніторингу та інтелектуального управління до традиційно трудомісткого процесу, підвищить ефективність виробництва, стабільність якості та економічні показники за рахунок автоматизації та інтелектуального управління процесами.

Розроблена стохастична модель керування температурно-вологісним режимом процесу остаточного вистоювання тіста у розстойній шафі з використанням PID-регулятора та фільтра Калмана. Отримані результати підтверджують правильність вибору параметрів системи автоматичного керування для камери вистоювання круасанів. Розроблена модель може бути використана як основа для подальшої реалізації алгоритмів у програмованих логічних контролерах або для побудови SCADA-системи моніторингу та регулювання температурно-вологісного режиму в промислових умовах.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 13 слайдів. Обсяг пояснювальної записки становить 64 друковані сторінки.

Ключові слова: виробництво круасанів, технологічні параметри, керування, ADAM-5000.

ANNOTATION

Savchuk M. Automated Control System for the Technological Process of Croissant Production. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Automation and computer-integrated technologies" specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University, Lutsk 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, seven chapters, general conclusions and recommendations, a list of references and appendices.

The thesis presents the modernization of an automated control system for the croissant manufacturing process. The application of advanced automation technologies, digital monitoring, and intelligent control to a traditionally labor-intensive process will increase production efficiency, quality stability, and economic performance through automation and intelligent process control.

A stochastic model for controlling the temperature and humidity conditions during the final proofing of dough in a proofing cabinet using a PID controller and a Kalman filter has been developed. The results confirm the correctness of the choice of parameters for the automatic control system for the croissant proofing chamber. The developed model can be used as a basis for further implementation of algorithms in programmable logic controllers or for building a SCADA system for monitoring and controlling temperature and humidity conditions in industrial environments.

The volume of the graphic part of the master's thesis is 13 slides. The volume of the explanatory note is 64 printed pages.

Keywords: croissant production, technological parameters, control, ADAM-5000.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТА	11
1.1 Опис технологічного процесу	11
1.2 Аналіз технологічного процесу як об’єкта керування.....	14
1.3 Критичний аналіз існуючої системи автоматизації	17
Висновок до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	21
Висновок до розділу 2	23
РОЗДІЛ 3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	24
3.1 Вибір давачів.....	24
3.2 Вибір виконавчих пристроїв.....	29
3.3 Вибір пристроїв управління	33
3.4 Вибір джерел живлення	34
Висновок до розділу 3	36
РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ	37
Висновок до розділу 4.....	39
РОЗДІЛ 5 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ...	40
5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління.....	40
5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера.....	41
Висновок до розділу 5.....	44
РОЗДІЛ 6 СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНО- ВОЛОГІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕСУ ОСТАТОЧНОГО ВИСТОЮВАННЯ	

ТІСТА У РОЗСТОЙНІЙ ШАФІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ТА ФІЛЬТРА КАЛМАНА	45
Висновок до розділу 6	54
РОЗДІЛ 7 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ	
АВТОМАТИЗАЦІЇ	56
Висновок до розділу 7	58
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТКИ	65

ВСТУП

В останні роки виробництво круасанів стає все більш привабливим сегментом хлібопекарської промисловості завдяки низці соціальних, економічних та технологічних факторів.

1. Зростання споживчого попиту. Споживачі асоціюють круасани з високою якістю, європейським майстерністю та насолодою. Їхня універсальність розширює ринкові можливості. Поширення культури кав'ярень ще більше стимулювали споживання свіжих, готових до вживання хлібобулочних виробів.

2. Розширення секторів роздрібної торгівлі. Швидкий розвиток кав'ярень, пекарень, готелів та міні-маркетів збільшив потребу в стабільних високоякісних кондитерських výroбах. Круасани ідеально вписуються в цю ринкову нішу завдяки своїй естетичній привабливості, смаку та універсальності зберігання.

3. Технологічний прогрес у виробництві харчових продуктів. Досягнення в харчовій технології, такі як камери ферментації з контрольованою температурою та автоматизовані печі, дозволяють здійснювати виробництво у великих масштабах, зберігаючи при цьому якість, властиву ручному виробництву. Ці технології роблять виробництво круасанів більш економічно ефективним і масштабованим.

4. Тенденції в галузі здоров'я та якості. Сучасний споживач все частіше вимагає продуктів з високоякісними інгредієнтами. Це спонукає виробників до інновацій у контролі процесів, щоб зберегти смак і текстуру, одночасно забезпечуючи поживну цінність та відповідність стандартам.

Розробка автоматизованої системи керування виробництвом круасанів є актуальною з ряду причин.

1. Процес виробництва круасанів є дуже чутливим до технологічних параметрів. Навіть незначні відхилення можуть істотно вплинути на якість, текстуру та зовнішній вигляд продукту. Тому автоматизація та контроль процесу мають вирішальне значення.

2. Автоматизовані системи керування забезпечують повторюваність технологічних параметрів, що є критично важливим для підтримання однакової якості продукції в усіх партіях.

3. Автоматизація зменшує кількість людських помилок та відходів матеріалів за рахунок оптимізації енергоспоживання, використання інгредієнтів та часу виробництва. Вона дозволяє здійснювати профілактичне обслуговування та ефективне планування операцій, що знижує виробничі витрати.

4. Сучасні системи керування можуть інтегруватися з цифровими виробничими платформами, що дозволяє збирати та аналізувати дані для оптимізації процесів.

5. Розвиток автоматизованого виробництва круасанів відповідає глобальному переходу до інтелектуального виробництва та концепції «цифрової пекарні». Інтеграція датчиків IoT, ПЛК та систем SCADA перетворює традиційне виробництво на інтелектуальний, адаптивний процес.

6. Автоматизація зменшує залежність від ручної праці, вирішуючи проблему нестачі кваліфікованих пекарів та покращуючи стандарти гігієни та безпеки харчових продуктів – особливо актуальний фактор у післяпандемічну епоху.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування не тільки підвищує стабільність якості продукції та ефективність, але й сприяє цифровій трансформації в харчовій промисловості, відповідаючи сучасним стандартам стійкості та якості.

Метою кваліфікаційної роботи є модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення круасанів.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва круасанів.

Предметом дослідження є автоматизована система керування технологічним процесом виробництва круасанів.

Методи дослідження: аналіз існуючих процесів, системний підхід, структурно – функціональний метод.

Практична новизна полягає в застосуванні передових технологій автоматизації, цифрового моніторингу та інтелектуального управління до традиційно ручного та трудомісткого процесу, таким чином в підвищенні ефективності виробництва, стабільності якості та економічних показників за рахунок автоматизації та інтелектуального управління процесами.

Наукова новизна полягає у створенні та застосуванні нових стратегій управління, що описують та оптимізують процес виробництва круасанів, у розробці нових основ для інтелектуального, адаптивного та керованого даними управління складною системою виробництва харчових продуктів.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз технологічного процесу виготовлення круасанів як об'єкта керування;
- 2) розробити функціональну схему автоматизації;
- 3) підібрати сучасні технічні засоби автоматизації;
- 4) розробити схему керування мікропроцесорними модулями;
- 5) розробити програмне забезпечення системи автоматизації;
- 6) розробити модель керування температурно-вологісним режимом процесу остаточного вистоювання тіста у розстойній шафі;
- 7) виконати техніко-економічне обґрунтування проєкту автоматизації.

Апробація результатів дослідження. Результати роботи доповідались та обговорювались на XIII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Actual problems of automation and control». Оpubлікована стаття Савчук М. В., Сацик В. О. Автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення круасанів. *Actual problems of automation and control: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів*. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 69-73.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА

1.1 Опис технологічного процесу

Процес виробництва круасанів – це складний багатоетапний процес, що поєднує механічні операції, біохімічні перетворення та точну термічну обробку. Якість кінцевого продукту – його листкова текстура, шарувата структура та маслянистий аромат – залежить від точності та послідовності кожного технологічного етапу [1].

Процес можна розділити на такі основні етапи [2].

1. Підготовка сировини з метою забезпечення високої якості та стандартизації вихідних матеріалів для стабільної якості продукції.

Вибір борошна: пшеничне борошно із середнім або високим вмістом глютену (11-13 %) забезпечує необхідну еластичність та розтяжність для ламінування.

Жири: несолене масло або спеціальний маргарин для ламінування з визначеною температурою плавлення забезпечує розділення шарів під час випікання.

Інші інгредієнти: цукор, сіль, дріжджі, молоко (або сухе молоко), вода та поліпшувачі (наприклад, аскорбінова кислота, ферменти) використовуються для досягнення бажаної реології тіста та активності бродіння.

Попередня обробка: інгредієнти зважують і кондиціонують до контрольованої температури (зазвичай 18-22 °C для борошна і 10-14 °C для жирів) для забезпечення стабільності процесу.

2. Замішування та вимішування тіста з метою отримання однорідного тіста з оптимальною структурою глютену та здатністю утримувати газ.

Просіяне борошно, розтоплений жир, дріжджова суспензія, сольовий розчин та інші компоненти подаються до тістомісильної машини.

Замішування проводиться у два етапи:

– початкове замішування (1-2 хв) для гомогенізації – швидкість обертання міксеру 60-120 об/хв, мета: швидко змішати інгредієнти, зволожити борошно, уникнути переробки глютену,

– інтенсивне замішування (6-10 хв) для формування глютенної клітковини – швидкість обертання міксеру 120-240 об/хв, мета: сформувати глютену мережу та досягти цільової консистенції/міцності тіста.

Не слід замішувати тісто надто довго, щоб уникнути надмірної еластичності, яка ускладнює ламінування.

Температура тіста в кінці змішування підтримується на рівні 20-22 °С, а вологість – 33-41 %.

Замішане тісто за допомогою автоматичних ваг ділять на рівні шматки вагою 5-7 кг і подають на вистоювання.

3. Ферментація тіста (первинне вистоювання) з метою активування дріжджів та розвитку попередніх ароматів.

Тісто вистоюється у ферментаційній шафі при температурі 24-27 °С та відносній вологості 70-80 % протягом 20-40 хвилин. Протягом цього часу відбувається часткове утворення газу та підкислення, що покращує розтяжність тіста та його аромат.

4. Ламінування (розкатування та складання) з метою формування кількох шарів тіста та жиру і створення характерної листкової текстури. Це найважливіший етап виробництва круасанів, який вимагає точного механічного контролю.

Ферментоване тісто розкатують у прямокутний лист, а шар масла (приблизно одна третина ваги тіста) загортають всередину. Для розкатування використовується тісторозкаточна машина, здатна розкочати пласт тіста товщиною близько 4-6 мм. Оператор складає тісто методом «книжки» або «триразового складання». Розкатане і складене тісто залишають у холодильнику для охолодження до температури 4-6 °С, щоб розслабити глютен і затвердіти

масло. Цей процес повторюють 2-3 рази, щоб отримати 27-81 шар тіста і жиру, що чергуються.

Сучасні моделі тісторозкатувальних машини, як правило, мають кілька стандартних програм для шарування і розкатування тіста. Спеціальна конструкція борошнопосипача і пластикового фартуха, де відбувається розкатування, перешкоджає надмірному утворенню борошняного пилу і скорочує її присутність в повітрі до 38 %.

5. Формування (розкатування та нарізання) з метою надання виробу остаточної форми та розміру.

Ламіноване тісто розкатують до остаточної товщини 3-4 мм і нарізають на трикутні шматочки. Кожен трикутник щільно згортають від основи до вершини, щоб сформувати характерну форму півмісяця.

6. Остаточне вистоювання (вторинна ферментація) з метою вироблення газу і розширення ламінованих шарів перед випіканням проводиться в камері для вистоювання при температурі 30-35 °C і вологості 75-85 % протягом 60-90 хвилин.

Надмірне вистоювання призводить до витікання масла і деформації; недостатнє вистоювання призводить до щільної текстури і поганого об'єму.

7. Випікання з метою стабілізації структури, формування листової текстури та досягнення характерного кольору і аромату.

Температура випікання 180-200 °C (конвекційні печі) або 220-230 °C (поверхові печі). Час випікання 15-20 хвилин, залежно від розміру.

Під час випікання утворення пари спричиняє розширення тіста, шари масла відокремлюються і пропікають листи тіста, реакції Майяра створюють золотисто-коричневу скоринку та ароматичні сполуки.

8. Охолодження з метою забезпечення перерозподілу внутрішньої вологи та запобіганню конденсації.

Круасани охолоджують при кімнатній температурі (20-25 °C) на решітках з хорошою циркуляцією повітря протягом 20-30 хвилин.

Неправильне охолодження може призвести до розмокання або руйнування шаруватої структури.

9. Охолоджені круасани упаковують у вологонепроникні матеріали, щоб запобігти висиханню та окисленню. Для промислового виробництва продукти можна заморожувати ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) відразу після випікання або вистоювання (технологія «готові до випікання»). Термін придатності варіюється: свіжі круасани можна зберігати 1-2 дні, заморожені напівфабрикати – до 6 місяців.

1.2 Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування

Аналіз технологічного процесу як об'єкта керування передбачає вивчення процесу виробництва круасанів з точки зору теорії керування системами. Мета полягає у визначенні структури процесу, взаємозв'язків між вхідними та вихідними даними, параметрів та динамічних характеристик, щоб забезпечити розробку ефективної автоматизованої системи керування.

Цей аналіз перетворює виробничий процес із суто технологічної послідовності на керовану динамічну систему, де кожну операцію можна контролювати та оптимізувати.

Об'єктом контролю є технологічна підсистема або набір операцій, параметри яких необхідно регулювати для досягнення бажаної якості продукції та ефективності процесу.

У виробництві круасанів такими об'єктами керування можуть бути:

- система замішування та бродіння тіста – контролює температуру тіста, вологість та активність дріжджів,
- процес ламінування – контролює товщину шару, еластичність тіста та консистенцію масла,
- камера для вистоювання – регулює температуру, вологість та час вистоювання,

– пекарська піч – контролює розподіл температури, час випікання та потік повітря.

Кожен з них може розглядатися як окремий контур керування або інтегруватися в єдину систему керування.

Аналіз починається з визначення вхідних, вихідних і збурюючих змінних, що впливають на процес.

Наступним кроком є визначення того, як вхідні змінні впливають на показники якості вихідної продукції. На цьому кроці розробляють структурні схеми, що показують взаємозв'язки між процесами. Цей етап дозволяє представити технологічний процес як систему взаємодіючих підсистем з визначеними причинно-наслідковими зв'язками.

Кожен етап виробництва демонструє як статичну (стаціонарну), так і динамічну (залежну від часу) поведінку.

Статичний аналіз визначає стаціонарні взаємозв'язки між вхідними та вихідними даними (наприклад, постійна температура випікання – бажаний об'єм газу).

Динамічний аналіз вивчає залежні від часу реакції на зміни параметрів, які часто виражаються за допомогою диференціальних рівнянь або передавальних функцій. Наприклад, під час бродіння тіста швидкість утворення CO_2 динамічно залежить від температури та активності дріжджів, що вимагає адаптивного контролю.

На основі характеристик процесу формулюються цілі контролю, які зазвичай включають:

- підтримку критичних параметрів (температура, вологість, час) в оптимальних межах,
- мінімізацію відхилень від бажаних показників якості,
- максимізацію продуктивності при одночасному скороченні витрат енергії та матеріалів.

Критерії якості можуть включати мінімальне відхилення ваги продукту, рівномірний колір скоринки та стабільну структуру шарів.

Після аналізу структури процесу та змінних вибираються відповідні методи контролю. Визначаються точки вимірювання та зворотного зв'язку для розміщення датчиків (наприклад, датчики температури в камерах вистоювання, датчики товщини в ламінаційних машинах).

Таким чином, аналіз технологічного процесу як об'єкта керування є комплексним дослідженням, яке перетворює лінію виробництва круасанів на формалізовану динамічну систему. Він визначає контрольні змінні, залежності та цілі, необхідні для проектування автоматизованої системи керування.

При виробництві круасанів потрібно контролювати параметри, які наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри технологічного процесу виробництва круасанів [3]

№	Параметр	Значення	Відхилення
1	Час попереднього замішування, хв	1,5	± 0,1
2	Час інтенсивного замішування, хв	8	± 2
3	Швидкість попереднього замішування, об/хв	70	± 10
4	Швидкість інтенсивного замішування, об/хв	180	± 10
5	Температура готового тіста, °C	21	± 1
6	Вологість готового тіста, %	37	± 4
7	Вага шматків тіста, кг	6	± 0,5
8	Час первинного вистоювання, хв	30	± 10
9	Температура первинного вистоювання, °C	25	± 1
10	Температура охолодження, °C	+5	± 1
11	Час остаточного вистоювання, хв	75	± 15
12	Температура остаточного вистоювання, °C	32	± 2
13	Температура випікання, °C	190	± 10
14	Час випікання, хв	17	± 2

Керуючи цими параметрами, буде забезпечено ефективне виробництво круасанів з високою якістю продукції.

Система автоматизації повинна забезпечити:

- автоматизоване регулювання і контроль часу попереднього замішування,
- автоматизоване регулювання і контроль часу інтенсивного замішування,
- автоматизований контроль вологості готового тіста,
- автоматизований контроль температури готового тіста,
- автоматизоване регулювання і контроль ваги шматків тіста,
- автоматизоване регулювання і контроль часу первинного вистоювання,
- автоматизоване регулювання і контроль температури первинного вистоювання,
- автоматизоване регулювання і контроль температури охолодження,
- автоматизоване регулювання і контроль часу остаточного вистоювання,
- автоматизоване регулювання і контроль температури остаточного вистоювання,
- автоматизоване регулювання і контроль температури випікання круасанів,
- автоматизоване регулювання і контроль часу випікання круасанів.

1.3 Критичний аналіз існуючої системи автоматизації

Автоматизована система керування виробництвом круасанів, якщо розглядати її як єдине ціле, регулює послідовність взаємозалежних технологічних операцій – від приготування тіста до випікання – для досягнення стабільної якості продукції та ефективності виробництва.

З точки зору теорії управління, система включає:

- об'єкт управління (весь технологічний процес),
- приводи (нагрівання, змішування, конвеєри, зволожувачі тощо),

- датчики та контури зворотного зв'язку, а також
- контролер (наприклад, PLC, SCADA або комп'ютерна система), що реалізує алгоритми управління.

Вхідні параметри – це зовнішні сигнали або задані значення, що подаються до системи керування і визначають її режим роботи.

До вхідних параметрів віднесемо (скорочення відповідають позначенню на структурній схемі):

- рецептуру тіста (співвідношення борошна/води/жиру) – Рецеп.,
- бажану продуктивність (кг/год або одиниць/хв) – для визначення запланованої виробничої потужності і циклу часу - Прод.,
- прийнятний діапазон ваги продукту (як еталонні значення для контурів управління – Вага.

Керуючі параметри – це фізичні величини, які система керування безпосередньо регулює за допомогою виконавчих механізмів для підтримки бажаного стану процесу.

До керуючих параметрів віднесемо:

- час замішування $t_{\text{зам}}$,
- температуру тіста $T_{\text{тіста}}$,
- тривалість вистоювання $t_{\text{вист}}$,
- температуру вистоювання $T_{\text{вист}}$,
- час випікання $t_{\text{випік}}$,
- температуру випікання $T_{\text{випік}}$.

Вихідні параметри – це вимірювані характеристики процесу або кінцевого продукту, які відображають ефективність виконання системою своїх завдань. Вони порівнюються з вхідними (заданими) значеннями для зворотного зв'язку.

До вихідних параметрів віднесемо:

- консистенція тіста (в'язкість, еластичність) – Конс.,
- маса та об'єм продукту – М-V,
- колір скоринки, внутрішня вологість та текстура – Текст.,

– органолептичні параметри (смак, аромат) – Орг.

Параметри збурень – це неконтрольовані або зовнішні фактори, які впливають на процес, але не можуть бути безпосередньо маніпульовані системою управління. АСК повинна компенсувати їх вплив за допомогою зворотного зв'язку або адаптивних алгоритмів.

До збурюючих параметрів віднесемо:

– відмінності в якості сировини (вміст білка в борошні, відсоток жиру в маслі, активність дріжджів) – впливають на структуру тіста, швидкість бродіння та текстуру – Як.,

– потік повітря у виробничому приміщенні – змінює стабільність вистоювання та випікання – Пов.,

– знос обладнання – призводить до відхилень у товщині, температурі або рівномірності випікання – Знос,

– людські та експлуатаційні фактори – Люд.,

– нерегулярне технічне обслуговування – вносить несистематичні відхилення – Обсл.

Структурна схема параметрів системи керування виробництвом круасанів наведена на рисунку 1.1.

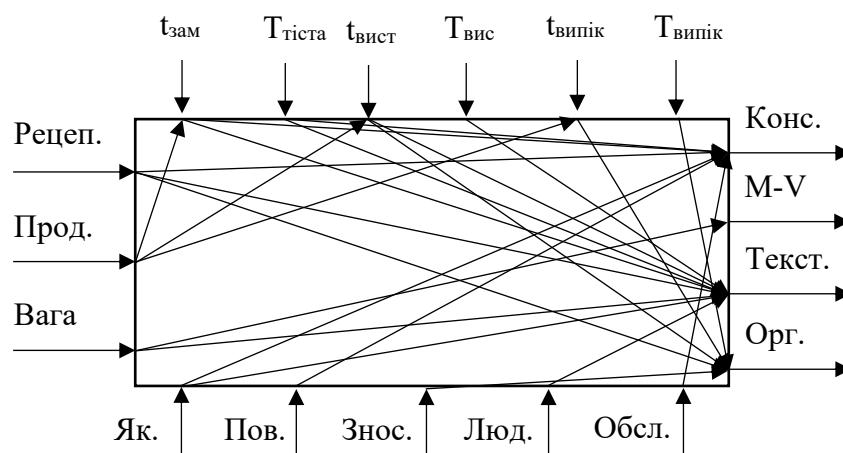


Рисунок 1.1 – Структурна схема параметрів системи керування виробництвом круасанів

Розуміння цих взаємозв'язків є надзвичайно важливим для розробки математичних та контрольних моделей.

Висновок до розділу 1

Технологічний процес виробництва круасанів передбачає точний баланс механічних, термічних та біохімічних операцій. Описано етапи процесу виробництва круасанів. Кожен етап повинен ретельно контролюватися, щоб забезпечити рівномірне формування шарів, розвиток аромату та якість продукту.

Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва.

Визначено параметри технологічного процесу виробництва круасанів, які необхідно контролювати.

Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва круасанів.

Розглянуто вхідні і вихідні параметри, параметри керування та збурення. Визначено, що вхідними параметрами є рецептура тіста, бажана продуктивність і прийнятний діапазон ваги продукту. Вихідними параметрами є консистенція тіста, маса та об'єм продукту, колір скоринки, внутрішня вологість та текстура, органолептичні параметри (смак і аромат). Керуючими параметрами є час замішування, температура тіста, тривалість вистоювання, температура вистоювання, час випікання і температура випікання. Збурюючими факторами є відмінності в якості сировини, потік повітря у виробничому приміщенні, знос обладнання, людські та експлуатаційні фактори, нерегулярне технічне обслуговування. Розроблено структурну схему параметрів системи керування виробництвом круасанів.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА) є ключовим етапом проектування автоматизованої системи керування для виробництва круасанів.

Функціональна схема автоматизації графічно відображає технологічний процес, вимірювальні, приводні та керуючі пристрої, інформаційні та керуючі потоки, а також взаємозв'язки між технологічним обладнанням та системою автоматизації. Вона служить мостом між технологічним проектуванням та електричним/контрольним проектуванням.

Для виробництва круасанів ФСА повинна описувати, як контролюється та регулюється кожен етап процесу, від приготування тіста до випікання.

Ключові напрямки при розробці функціональної схеми автоматизації наступні.

1. Чітке визначення меж контролю та структури процесу. Лінія виробництва круасанів повинна бути розділена на технологічні вузли (наприклад, підготовка тіста, вистоювання, ламінування, випічка). В межах кожного вузла потрібно визначити об'єкти контролю (міксери, печі, конвеєри тощо). Потрібно визначити, які параметри контролюються локально (наприклад, швидкість двигуна в міксері), а які – централізовано (наприклад, управління рецептами). При цьому кожна підсистема повинна бути представлена як функціональна одиниця з власними датчиками, виконавчими механізмами та контурами управління, але всі вони повинні бути інтегровані в одну ієрархічну структуру управління.

2. Точна ідентифікація вимірюваних і контрольованих параметрів. Потрібно встановити датчики для вимірювання температури у міксері, камері вистоювання, у печі; для вимірювання вологості тіста; для вимірювання швидкості двигуна міксера при замішуванні тіста; датчики ваги для

порціонування або поділу тіста. Для кожного датчика потрібно вказати тип сигналу (аналоговий 4-20 мА, цифровий, RTD тощо), діапазон вимірювання та зв'язок з контуром управління.

3. Правильне розміщення приводів і елементів управління. Потрібно чітко показати всі виконавчі механізми та їхні керуючі сигнали: електричні приводи (змішувачі, конвеєр), електромагнітні клапани (дозування компонент тіста), нагрівальні елементи (випічка, печі).

4. Логічна структура контурів управління. Для кожної керованої змінної потрібно визначити елемент вимірювання (датчик), контролер (модуль ПЛК), привід, сигнал зворотного зв'язку. З'єднання замкнутого контуру потрібно позначити лініями зворотного зв'язку.

5. Представлення систем безпеки та блокування. Виробництво круасанів передбачає використання тепла, рухомого обладнання та вологи – все це вимагає дотримання заходів безпеки. Потрібно встановити схеми аварійної зупинки, захист від перегріву та перевантаження, лінії сигналізації та сповіщення про несправності.

6. Стандартизація та використання символів. Потрібно дотримуватись прийнятих стандартів, щоб ФСА була зрозумілою для інженерів, технологів та програмістів. Зазвичай використовуються ДСТУ Б А.2.4-16:2008 [4] і ДСТУ ISO 14617:2018 [5]. Кожен елемент (датчик, привід, контролер) повинен мати унікальний тег, що відповідає списку входів/виходів.

До тістомісильної машини 1 подаються борошно, добавки та рідкі компоненти згідно конкретно використовуваної рецептури. Контроль швидкості попереднього та інтенсивного змішування виконує датчик швидкості SE 1-1. Кількість компонент регулюється відповідно NS 1-5, 1-7, 1-9. При замішуванні тіста відбувається контроль і регулювання вологості ME 2-1 і температури TE 3-1. Конвеєром, що запускається NS 3-3 тісто передається на ваги 2 і зважується на вагах WE 4-1. Зважені шматки тіста конвеєром, що запускається NS 4-3, поступають у відлежувач 3, де вимірюється температура TE 5-1 і час KS 6-1. Після відлежування

тіста NS 5-3 включає двигун і конвеєр передає тісто в тісторозкаточну машину 4 на ламінування, при цьому фіксується температура TE 7-1. В процесі ламінування розкатане тісто поступає в холодильник, де охолоджується до заданої температури, що контролюється TE 8-1, реверсом повертається у тісторозкаточну машину, процедура повторюється задану програмою тісторозкаточної машини кількість разів. Після холодильника конвеєром, що запускається NS 8-5, тісто поступає на формувальну машину 6, потім конвеєром, що запускається NS 8-9, заготовки поступають у тістозакаточну машину 7. Сформовані круасани конвеєром, що запускається NS 8-13, поступають у розстойну шафу 8, де вимірюється час вистоювання KS 9-1, вологість ME 10-1 і температура TE 11-1. Після вистоювання круасани у стелажах подаються у піч 9 на випікання. В печі вимірюється температура TE 12-1, яка регулюється NS 13-3 та час KS 13-1. Після випікання круасани поступають на охолодження до кімнатної температури.

Висновок до розділу 2

При розробці функціональної схеми автоматизації процесу виробництва круасанів особливу увагу приділено визначенню об'єктів управління та меж системи (структура всієї виробничої лінії); визначенню всіх вимірюваних та контрольованих параметрів (температура, вологість, швидкість тощо); забезпеченню чіткого представлення контурів управління та зворотних зв'язків; включенню систем безпеки, блокування та сигналізації; використанню стандартизованих символів; представленню каналів зв'язку та елементів збору даних. Добре розроблена функціональна схема автоматизації стає основним планом для розробки алгоритмів управління, програм ПЛК та систем візуалізації, які забезпечать високу якість, стабільність та ефективність виробництва круасанів.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для автоматизованого керування технологічним процесом виготовлення круасанів необхідно підібрати засоби автоматизації.

До технічних засобів автоматизації відносять датчики, виконавчі механізми і контролери.

Вибір датчиків, приводів та модулів контролера повинен поєднувати технічну придатність, надійність процесу та гнучкість інтеграції – три основні критерії вибору обладнання для автоматизації в харчовій промисловості.

3.1 Вибір датчиків

Датчики підбираються для забезпечення безперервного контролю ключових технологічних параметрів, що визначають якість тіста та однорідність продукції. Їх вибір повинен гарантувати точність, стабільність та сумісність з вхідними модулями контролера.

Датчик часу.

Для вимірювання часу попереднього та інтенсивного замішування, вистоювання і випікання підійде багатофункціональне електронне реле часу для монтажу на DIN-рейку Siemens SIRIUS-3RP15 25-1AP30 [6].

Діапазон часу широкий, серія підтримує дуже короткі (секунди) і дуже довгі (години) діапазони, тому інтервали замішування (1-10 хв), вистоювання (від десятків хвилин до ~1-2 год) і випікання (хвилини) легко покриваються.

Таймери призначені для заводських умов (широкий діапазон температур навколишнього середовища, стійкість до вібрацій).

Пристрій має релейні виходи, які можна підключити безпосередньо до цифрових вхідних модулів ADAM або використовувати для керування реле/контакторними котушками, що керуються через релейні виходи ADAM.

Технічні характеристики реле часу Siemens SIRIUS-3RP15 25-1AP30 наведено в додатку А.1.

Датчик швидкості.

Для контролю швидкості попереднього та інтенсивного змішування в процесі виробництва круасанів обрано імпульсний поворотний енкодер Baumer BDK 16.24K1001/AM12 [7].

Енкодер забезпечує 1024 імпульси на оберт, забезпечуючи точне вимірювання швидкості та положення обертання валу міксера. Така роздільна здатність дозволяє системі управління точно розрізняти етапи низької швидкості (60-120 об/хв) та високої швидкості (120-240 об/хв), необхідні для замішування тіста для круасанів. Серія Baumer BDK 16 призначена для промислових умов, має герметичний корпус (IP65), який захищає датчик від борошняного пилу, вологи та перепадів температури, типових для виробничих приміщень пекарень. Підходить для швидкості обертання до 6000 об/хв, що легко покриває діапазон робочих швидкостей промислових тістомішалок, забезпечуючи стабільні показання без втрати сигналу. Ця модель гарантує надійний та точний зворотний зв'язок щодо швидкості, що є необхідним для підтримання стабільної якості тіста на автоматизованій лінії з виробництва круасанів.

Технічні характеристики поворотного енкодера Baumer BDK 16.24K1001/AM12 наведено в додатку А.2.

Датчик температури.

Для етапів з низькою/середньою температурою – контроль температури готового тіста після замішування, температури первинного і остаточного вистоювання, температури охолодження при ламінуванні – обрано харчовий термометр опору IFM Electronic TCC501 в гігієнічній конструкції [8].

Він забезпечує точне вимірювання температури тіста після замішування, вистоювання і ламінування. Гігієнічна, вбудована конструкція дозволяє прямий контакт з продуктами харчування без ризику забруднення. Широкий діапазон

температур і захист від миття (IP69K) ідеально підходять для санітарних умов пекарні.

Технічні характеристики термометра опору IFM Electronic TCC501 наведено в додатку А.3.

Для випікання при високій температурі обрано термопару OMEGA типу K TJ36-CASS-116U-6 [9].

Підходить для високотемпературних печей (180-230 °C) з швидкою тепловою реакцією. Кожух з нержавіючої сталі стійкий до окислення та термічного шоку. Сигнал типу К безпосередньо сумісний з модулем входу термопар ADAM-5018. Має тривалий термін служби при безперервних циклах нагрівання/охолодження.

Технічні характеристики термопар OMEGA типу K TJ36-CASS-116U-6 наведено в додатку А.4.

Поєднання датчиків RTD (для етапів з низькою/середньою температурою) і термопар (для випікання при високій температурі) забезпечує оптимальну точність у всьому діапазоні процесу. Конструкція з нержавіючої сталі та гігієнічний дизайн забезпечують довговічність, корозійну стійкість і відповідність стандартам безпеки харчових продуктів (EHEDG, FDA, IP67/IP69K).

Датчик ваги.

Для контролю ваги шматків тіста в автоматизованому процесі виробництва круасанів вибрано тензометричний тензодатчик (одноточковий) HBM PW15AH C3 від Hottinger Brüel & Kjær (Німеччина) [10].

Точність класу C3 забезпечує точність зважування $\pm 0,02$ % FS, що є достатнім для контролю порцій тіста, які зазвичай використовуються у виробництві круасанів. Висока лінійність і повторюваність забезпечують стабільне порціонування, мінімізуючи відходи матеріалу та підтримуючи рівномірну масу продукту.

Виготовлений з герметично закритої нержавіючої сталі, стійкої до вологи, борошняного пилу та миючих засобів, що є необхідним для дотримання гігієнічних стандартів у хлібопекарській промисловості. Клас захисту IP69K забезпечує безпечну роботу під час миття під високим тиском конвеєрів для зважування або бункерів для порціонування.

Одноточковий дизайн дозволяє встановлювати прилад безпосередньо під платформою для зважування (бункером або сегментом конвеєра), забезпечуючи рівномірне вимірювання навантаження без складних багатоелементних конструкцій. Компактний форм-фактор робить його ідеальним для вбудованих станцій різання тіста та зважування.

Стандартний вихід тензодатчика (мВ/В) легко підключається до модуля входу тензодатчика ADAM-3016 або ADAM-6016 або до будь-якого аналогового підсилювача входу, що підтримує мостові датчики. Дозволяє передавати дані про вагу в режимі реального часу до системи ADAM-5000 для логіки контролю порцій.

Призначений для безперервної промислової експлуатації та швидкого реагування (< 10 мс), підходить для швидкорухливого обладнання для поділу тіста.

Технічні характеристики тензодатчика HBM PW15AH C3 від Hottinger Brüel & Kjaer наведено в додатку А.5.

Датчик вологості.

Вимірювання вмісту вологи в готовому тісті є ключовим завданням контролю якості, яке забезпечує належну консистенцію, текстуру та властивості тіста під час випікання. Для використання в автоматизованій системі контролю виробництва круасанів обрано ємнісний (діелектричний) датчик вологості для сипучих матеріалів і паст Michell Instruments IMD 300 [11].

IMD 300 вимірює діелектричну проникність тістової маси, яка змінюється відповідно до вмісту рідких компонент. На відміну від ручного відбору проб або методів сушіння в печі, прилад забезпечує безперервне вимірювання вологості в

режимі реального часу. Ідеально підходить для високовологих, в'язких матеріалів, таких як тісто для хліба або круасанів. Розроблений спеціально для переробки харчових продуктів і контролю сипучих матеріалів, включаючи зерно, борошно, тісто і пасти. Може бути встановлений безпосередньо на стінці міксера або жолобі для транспортування тіста, забезпечуючи зворотний зв'язок щодо вологості відразу після замішування. Забезпечує підтримку готового тіста на заданому рівні гідратації (наприклад, 33-41%), що є критично важливим для ламінування і випікання.

Аналоговий вихід датчика 4-20 мА безпосередньо інтегрується з аналоговими вхідними модулями ADAM-5017 для моніторингу процесу в режимі реального часу та контролю дозування води в замкнутому циклі. Крім того, комунікація Modbus RTU дозволяє цифрову інтеграцію з системою ADAM-5000/TCP.

Корпус із нержавіючої сталі IP67 та вбудований наконечник датчика забезпечують легке очищення та стійкість до борошняного пилу, залишків тіста та вологи. Повністю безпечні для харчових продуктів матеріали (AISI 316, ущільнення з PTFE) відповідають типовим гігієнічним вимогам до хлібопекарської продукції (відповідність HACCP/ENEDG).

IMD 300 дозволяє автоматично регулювати кількість рідини на етапі змішування за допомогою зворотного зв'язку. Зменшує варіативність між партіями, покращує текстуру тіста та забезпечує стабільний об'єм і листковість круасанів. Усуває затримки, пов'язані з ручним відбором проб, що дозволяє постійно оптимізувати дозування води в рецептурі змішування.

Технічні характеристики датчика вологості Michell Instruments IMD 300 наведено в додатку А.6.

Усі вибрані датчики є стандартними промисловими типами, вихідні сигнали яких сумісні з аналоговими (0-10 В/4-20 мА) або цифровими входами модулів ADAM-5000.

Вони забезпечують високу точність, швидку реакцію та захист від миття (IP65-IP67) – що є необхідним для середовищ виробництва харчових продуктів.

Їх комбінація дозволяє системі контролювати теплові, часові, механічні та масові параметри, формуючи повну інформаційну базу для управління процесом.

3.2 Вибір виконавчих пристроїв

Електромагнітні клапани.

Вибір електромагнітних клапанів для автоматизованого дозування у виробництві круасанів повинен враховувати тип середовища (сипуче або рідке), гігієнічні вимоги, параметри потоку та сумісність системи управління (управління сигналом 24 В постійного струму або 230 В змінного струму).

Для дозування сипучих матеріалів (борошно) вибрано електромагнітний клапан ASCO Numatics серія 355B [12]. Він призначений для роботи з сипучими порошками – широко використовується в системах дозування борошна, пневматичного транспортування та розвантаження силосів. Забезпечує швидку реакцію для точних циклів дозування (відкриття/закриття < 50 мс). Може бути інтегрований у пневматичні бункери для дозування борошна для контролю коротких імпульсів тиску повітря для точного випуску потоку. Довговічний, пилонепроникний і стійкий до абразивного впливу борошна. Сумісний з харчовими повітряними системами при використанні ущільнень Viton.

Клапани ASCO 355 ідеально підходять для дозування борошна, забезпечуючи швидку пневматичну роботу та надійність. Технічні характеристики електромагнітного клапана ASCO Numatics серія 355B наведено в додатку Б.1.

Для рідких компонентів (розплавлений жир, дріжджова суспензія, сольовий розчин) вибрано 2/2-ходовий електромагнітний клапан з сервоприводом Burkert Type 6213 EV [13]. Він витримує гарячий розплавлений

жир (до 130 °C) без погіршення якості ущільнення. Забезпечує точне, швидке та повторюване дозування води, молока, олії та інших рідких інгредієнтів. Легко керується за допомогою цифрових виходів контролера. Компактна конструкція з нержавіючої сталі гарантує відповідність стандартам безпеки харчових продуктів та санітарним нормам. Швидкий час перемикання (десятки мілісекунд) забезпечує точне дозування, зменшуючи втрати сировини.

Клапани Burkert Type 6213 EV забезпечують точне, гігієнічне та термостійке дозування рідких інгредієнтів, сумісне з вимогами харчової промисловості та системами управління. Технічні характеристики електромагнітного клапана Burkert Type 6213 EV наведено в додатку Б.2.

Електричні приводи для двигунів.

При виборі електродвигунів для змішувача та конвеєрів в автоматизованій системі виробництва круасанів необхідно звернути увагу на: тип навантаження (вимоги до крутного моменту та швидкості), метод управління (змінна швидкість, плавний пуск, реверс), гігієнічний дизайн (відповідність вимогам харчової промисловості) та інтеграцію з автоматизованою системою управління.

Обрано інтегрований двигун з частотним перетворювачем SEW-EURODRIVE Movimot® MM15D-0.75-3-00 [14]. Привід Movimot забезпечує плавне регулювання швидкості та крутного моменту. Регульована швидкість забезпечує синхронізацію між виходом міксера, розкатувачем тіста та конвеєром для ламінування. Конфігурація мотор-редуктора забезпечує високий пусковий крутний момент. Призначений для безперервної промислової експлуатації. Клас захисту IP65 забезпечує безпечне очищення; гладкі поверхні відповідають вимогам харчової промисловості щодо миття. Вбудований частотний перетворювач зменшує споживання енергії та забезпечує плавний пуск/зупинку, що мінімізує механічний знос.

Привід Movimot підходить для двигунів конвеєрів, забезпечуючи енергоефективну, гігієнічну роботу з регульованою швидкістю. Технічні

характеристики двигуна з частотним перетворювачем SEW-EURODRIVE Movimot® MM15D-0.75-3-00 наведено в додатку Б.3.

Реле напруги.

При виборі реле напруги для роботи з обраними приводами двигунів (SEW-EURODRIVE Movimot) слід враховувати ряд факторів.

Трифазна здатність – оскільки двигуни змішувача і конвеєрів зазвичай працюють від трифазного живлення, реле напруги повинно контролювати всі три фази і виявляти перенапругу, недостатню напругу, втрату фази/зміну полярності фази, дисбаланс фаз. Ці функції підтримують моделі ABB і Phoenix.

Регульовані пороги та налаштування затримки – щоб уникнути небажаних спрацьовувань, необхідні регульовані пороги спрацьовування / відключення та час фільтрації/затримки. Моделі ABB і Phoenix підтримують конфігурацію таких параметрів.

Монтаж на DIN-рейку або панель – для інтеграції в панель управління, простоти заміни та стандартного монтажу перевагу слід надавати DIN-рейці або модульним формам. Названі моделі є DIN-рейковими або модульними типами.

Сумісність з логікою управління/інтеграція – контакти реле (нормально відкриті/нормально закриті) можуть бути підключені до логіки захисту або безпеки, або до PLC/ADAM I/O для сигналів тривоги. Зазначені реле використовують стандартні контакти реле для такої інтеграції.

Промислова надійність та сертифікація – промислові бренди (ABB, Phoenix Contact) створені для роботи в умовах вібрації, температурних коливань та тривалої експлуатації. Зазвичай вони відповідають стандартам IEC/UL/CE для релейних пристроїв.

Для роботи з приводами двигунів SEW-EURODRIVE Movimot обрано реле контролю Phoenix Contact EMD-BL-3V-400 [15]. Phoenix Contact забезпечує гнучку конфігурацію та високу надійність.

Технічні характеристики реле контролю Phoenix Contact EMD-BL-3V-400 наведено в додатку Б.4.

Пускачі.

Незважаючи на те, що система використовує вбудований інвертор/привід (Movimot®), який вже має функцію регулювання швидкості та керування, рекомендується використовувати спеціальний пускач, або відповідний пристрій захисту двигуна.

Двигун і привід все одно потребують захисту від перевантаження, втрати фази, термічного навантаження, короткого замикання тощо. Пускач забезпечує такий захист. Потрібні засоби для безпечного вимкнення живлення, ізоляції двигуна для технічного обслуговування та дотримання стандартів безпеки (наприклад, ІЕС 60947-4-1 для пускачів). Пускач дозволяє інтегрувати аварійні зупинки, сигнали про несправності та логіку ввімкнення/вимкнення у систему управління. Навіть інтегровані приводи можуть потребувати пристрою захисту, щоб живлення, електропроводка та двигун були захищені відповідно до нормативних вимог. Тому включення пускача двигуна є виправданим для безпечної та відповідної вимогам експлуатації приводів змішувача/конвеєра.

Обрано пускач двигуна моделі Siemens 3RV2021-1BA10 [16]. Він забезпечує хороший захист і має розміри, придатні для малих/середніх двигунів. Siemens – це відомий промисловий бренд; хороша доступність запчастин, документації та підтримки. Він дозволяє інтегрувати контакт пускача в логіку управління (через допоміжні контакти), щоб можна було контролювати «пускач увімкнено», «несправність» тощо через систему автоматизації.

Технічні характеристики пускача Siemens 3RV2021-1BA10 наведено в додатку Б.5.

Вибрані приводи поєднують точність, керованість та довговічність при безперервній роботі. Вони повністю сумісні з цифровими та аналоговими виходами модульних контролерів і підтримують як ручний, так і автоматичний режими керування.

3.3 Вибір пристроїв управління

Для автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва круасанів обрано контролер ADAM-5000. Серія ADAM-5000 (виробник Advantech) – це модульна розподілена система управління, призначена для промислової автоматизації. Вона працює з модулями вводу-виводу, підтримує стандартні протоколи зв'язку (Modbus RTU/TCP) і може функціонувати як віддалена станція вводу-виводу або незалежний контролер. ADAM-5000 дозволяє гнучко конфігурувати аналогові, цифрові та термоелементні модулі залежно від кількості датчиків і виконавчих механізмів. Ідеально підходить для поступової автоматизації різних етапів (змішування, вистоювання, випікання). Модулі можна додавати або замінювати без перепідключення всієї системи, що спрощує обслуговування та оновлення. Серія контролерів ADAM-5000 забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, модульністю та надійністю для лінії з виробництва круасанів. Вона підтримує як управління в режимі реального часу (для міксерів, камер для вистоювання, печей), так і збір даних (для аналізу та оптимізації процесів), що відповідає принципам цифровізації Industry 4.0.

Розроблювана система керування має такі вхідні і вихідні сигнали:

- вхідних аналогових сигналів – 10;
- вхідних дискретних сигналів – 3;
- вихідних аналогових сигналів – 0;
- вихідних дискретних сигналів – 14.

За кількістю вхідних і вихідних аналогових та дискретних сигналів підібрано такі типи модулів контролера ADAM-5000:

- модуль аналогового вводу ADAM-5017 – 2 шт. [17];
- модуль дискретного вводу ADAM-5051 – 1 шт. [18];
- модуль дискретного виводу ADAM-5056 – 1 шт. [19];
- програмований РС сумісний контролер ADAM-5510 – 1 шт. [20].

Їх технічні характеристики наведено в додатках В.1-В.4.

3.4 Вибір джерел живлення

Розрахуємо енергоспоживання 24 В постійного струму для обраних пристроїв автоматизації: енкодер 1, IFM TCC501 \times 5, Omega K-type \times 1 (пасивний термоелемент), тензодатчик HBM \times 1, Michell IMD (вологість) \times 2, клапани ASCO 355B \times 2, Burkert 6213 \times 1, реле Phoenix EMD-BL-3V-400 \times 11, пускачі Siemens 3RV2021 \times 11, ADAM-5017 \times 2, ADAM-5051 \times 1, ADAM-5056 \times 1, контролер ADAM-5510 \times 1.

Припущення щодо постійного струму на пристрій (24 В постійного струму).

Часове реле Siemens SIRIUS 3RP15 – 3 шт. – 40 мА кожне (типове споживання електронного таймера в варіантах 24 В постійного струму) \rightarrow 120 мА.

Енкодер Baumer BDK – 1 шт. – 30 мА \rightarrow 30 мА (інкрементальні енкодери зазвичай 20-50 мА).

Передавачі температури IFM TCC501 – 5 шт. – 10 мА кожен (виробник заявляє 10 мА при 24 В) \rightarrow 50 мА.

Термопарний датчик Omega типу К – 1 шт. – 0 мА (пасивний датчик; не потребує живлення постійним струмом) \rightarrow 0 мА.

Тензодатчик HBM PW15AH – 1 шт. – 30 мА (струм збудження моста/підсилювача – вважається невеликим; збудження забезпечує модуль ADAM) \rightarrow 30 мА.

Датчики вологості Michell IMD 300 – 2 шт. – 100 мА кожен, передбачувані для вбудованої електроніки датчика/перетворювача петлі (4-20 мА + електроніка) \rightarrow 200 мА.

Клапани ASCO 355B (пневматичний клапан для сипучих матеріалів/борошна) – 2 шт. – 200 мА кожен у стабільному стані \rightarrow 400 мА.

Клапан Burkert Type 6213 EV (розплавлений жир) – 1 шт. – 200 мА стабільне утримання (консервативне; технічні характеристики показують пусковий/утримуючий струм; викорисаємо 200 мА, щоб охопити практичні варіанти котушок) → 200 мА.

Реле контролю Phoenix Contact EMD-BL-3V-400 – 11 шт. – 50 мА кожне → 550 мА (невелика електроніка реле контролю/передня панель).

Пускачі Siemens 3RV2021-1BA10 (пускачі захисту двигуна / контактори) – 11 шт. – котушка 100 мА кожна (припускається варіант котушки 24 В постійного струму → 1 100 мА (1,10 А).

Аналогові модулі вводу ADAM-5017 – 2 шт. – 50 мА кожен → 100 мА.

Дискретний модуль вводу ADAM-5051 – 1 шт. – 30 мА → 30 мА.

Модуль дискретного виходу ADAM-5056 – 1 шт. – 100 мА (електроніка модуля; виходи окремо керують навантаженнями) → 100 мА.

Контролер ADAM-5510 – 1 шт. – 300 мА (типове енергоспоживання вбудованого контролера/модулів зв'язку) → 300 мА.

Сума проміжних підсумків (постійні струми постійного струму): загальний постійний струм $\approx 3,53$ А при 24 В постійного струму. Це дорівнює $\approx 84,7$ Вт безперервно ($24 \text{ В} \times 3,53 \text{ А}$).

Потрібно вибирати джерело живлення з запасом потужності. Клапани і контактори часто споживають короткочасно більший струм при включенні (пусковий струм), ніж їх постійний струм «утримання». Простий розрахунок (як наведений вище) ігнорує ці короткі піки. Потрібно передбачити 25-50 % запасу потужності, щоб джерело живлення не перегрівалося, мало довший термін експлуатації та дозволяло додавати майбутні датчики/модулі.

Отже, додамо запас до розрахунку: $3,53 \text{ А} \times 1,3$ (30 % запас) = 4,59 А.

Оберемо блок живлення Mean Well DRP-240-24 [21]. Це хороший блок на DIN-рейці 10 А, широко доступний і економічно вигідний. Є надійним вибором для багатьох систем.

Технічні характеристики блоку живлення Mean Well DRP-240-24 наведено в додатку В.5.

Специфікація засобів автоматизації наведена в додатку Г.

Висновок до розділу 3

Вибрані пристрої автоматизації утворюють технічно обґрунтовану та функціонально збалансовану систему для автоматизації виробництва круасанів. Датчики забезпечують комплексний моніторинг технологічних параметрів. Приводи забезпечують точне виконання контрольних дій. Модулі контролера ADAM-5000 об'єднують всі компоненти в єдину інтелектуальну мережу управління, що забезпечує зворотний зв'язок у режимі реального часу, роботу на основі рецептів і високу стабільність якості продукції. Таке поєднання забезпечує прозорість, відтворюваність і ефективність процесів, що є основними цілями сучасних систем автоматизації хлібопекарського виробництва.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ І ОПИС ПРИНЦИПОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ

Автоматизована система керування процесом виробництва круасанів забезпечує безперервний моніторинг і регулювання технологічних параметрів, таких як швидкість замішування тіста, температура, вологість, вага, час вистоювання та умови випікання. У системі використовуємо розподілені модулі вводу-виводу (серія ADAM-5000), підключені до програмованого контролера ADAM-5510, утворюючи модульну, масштабовану структуру управління. Електричні схеми розроблені для забезпечення надійного збору даних, точного управління та безпечної роботи виконавчих механізмів.

Для збору безперервних аналогових даних від датчиків, що вимірюють швидкість, температуру, вагу та вологість, використовуються два 8-канальні аналогові вхідні модулі ADAM-5017. Кожен датчик видає стандартний аналоговий сигнал (зазвичай 4-20 мА), який передається на вхідні канали модуля. Тип підключення: двопровідне підключення для датчиків струмового контуру.

На перший модуль ADAM-5017 підключаємо датчики швидкості SE 1-1, вологості ME 2-1, ME 10-1, ваги WE 4-1, температури TE 3-1, TE 5-1, TE 7-1, TE 8-1, на входи Vin0, Vin1, Vin2, Vin3, Vin4, Vin5, Vin6, Vin7 відповідно.

На другий модуль ADAM-5017 підключаємо датчики температури TE 11-1, TE 12-1 на входи Vin0, Vin1, відповідно.

Усі датчики підключені екранованими кабелями для мінімізації електромагнітних перешкод від приводів і контакторних ланцюгів. Екрани кабелів заземлені в одній точці для уникнення заземлювальних петель.

Модулі ADAM-5017 підключені через внутрішню системну шину до програмованого контролера ADAM-5510, який виконує перетворення сигналу, фільтрацію та подальші дії з управління.

Для реєстрації дискретних сигналів від таймерів використовується 16-канальний модуль дискретних входів ADAM-5051. Тип підключення: однопровідне підключення із загальним заземленням. Датчики KS 6-1, KS 9-1, KS 13-1 підключаються на входи Vin0, Vin1, Vin2 відповідно.

Ці схеми забезпечують правильне розпізнавання сигналів для всіх подій часу та стану в технологічному процесі.

Для формування керуючих дискретних сигналів до приводів, таких як електромагнітні клапани, контактори та пускачі, використовуємо 16-ти канальний модуль дискретного виходу ADAM-5056.

Підключаємо пускачі NS 1-3, NS 1-5, NS 1-7, NS 1-9, NS 3-3, NS 4-3, NS 6-3, NS 8-3, NS 8-5, NS 8-7, NS 8-9, NS 8-11, NS 8-13, NS 13-3 на дискретні виходи з DO0 по DO13 відповідно.

Кожен вихідний канал оснащений індуктивним діодом для придушення навантаження, щоб запобігти стрибкам напруги, спричиненим знеструмленням котушки. Виходи захищені окремими запобіжниками (0,5-2 А), розташованими на клемній колодці біля модуля ADAM-5056.

Уся система керування працює від промислового блоку живлення 24 В постійного струму Mean Well DRP-240-24. Блок живлення забезпечує живлення всіх контролерів, модулів, датчиків та виконавчих механізмів. Блок живлення має вбудований захист від перевантаження та короткого замикання, а також підтримує режим POWER BOOST для обробки пускових струмів електромагнітних клапанів та котушок реле.

Розподіл живлення здійснюється через систему клем на DIN-рейці з окремими шинами для аналогових та цифрових схем для зменшення перешкод.

Модулі ADAM (5017, 5051, 5056) та контролер ADAM-5510 взаємодіють через шину RS-485, використовуючи протокол Modbus/RTU. Це забезпечує надійний обмін даними між модулями та контролером на відстані до 1200 м; електричну ізоляцію між ланцюгами високої та низької потужності; спрощене розширення (додаткові модулі можна підключати паралельно до шини).

Для моніторингу та налаштування параметрів контролер має можливість підключатись через Ethernet до контрольного ПК з програмним забезпеченням SCADA.

Контури аварійної зупинки та блокування реалізовані з використанням відмовостійкої логіки – відмінність від параметрів процесу або активація кнопки аварійної зупинки відключає живлення двигунів та нагрівачів.

Висновок до розділу 4

Описані основні електричні схеми, які забезпечують безперервне та точне вимірювання технологічних параметрів, надійне управління виконавчими механізмами, електричну ізоляцію між схемами управління та живлення, безпеку операторів та обладнання, масштабованість та адаптивність системи.

Таким чином, обрана структура та принципи підключення утворюють повну, ефективну та безпечну систему автоматизації виробництва круасанів.

РОЗДІЛ 5

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розробка алгоритму функціонування системи управління

Алгоритм починається з вмикання двигуна 1-3 і перевірки швидкості змішування в тістомісильній машині. Якщо швидкість відповідає заданій, відкриваються клапани 1-5, 1-7 подачі сипучих компонентів і клапан 1-9 подачі рідких компонентів, інакше – подається світлова сигналізація.

Вимірюється вологість тіста датчиком ME 2-1, якщо вологість недостатня, відкривається клапан подачі рідких компонент 1-9, інакше переходиться до наступного кроку.

Вимірюється температура тіста датчиком TE 3-1, якщо температура відповідає заданій, вмикається двигун конвеєра 3-4.

Вимірюється вага шматків тіста датчиком WE 4-1, якщо вага відповідає заданій, вмикається двигун конвеєра 4-4, інакше – подається світлова сигналізація.

Вимірюється температура у відлежувачі тіста датчиком TE 5-1, якщо температура відповідає заданій, вимірюється час відлежування датчиком KS 6-1. Після спрацювання датчика вмикається двигун конвеєра 6-4.

Вимірюється температура тіста при ламінуванні датчиком TE 7-1, якщо температура відповідає заданій, вмикається двигун холодильника 8-4, інакше – вимикається двигун 6-4, подається сигналізація і вмикається блокування системи.

Вимірюється температура в холодильнику датчиком TE 8-1, якщо температура відповідає заданій, вмикається двигун конвеєра 8-6, інакше – вимикається двигун 8-4.

Вмикається двигун формувальної машини 8-8. Вмикається двигун конвеєра 8-10. Вмикається двигун тістозакатувальної машини 8-12. Вмикається двигун конвеєра 8-14.

Вимірюється час вистоювання тіста датчиком KS 9-1, вимірюється вологість у розстойній шафі датчиком ME 10-1, температура у розстойній шафі датчиком TE 11-1. Після спрацювання датчиків вмикаються нагрівальні тени печі пускачем 13-3.

Вимірюється температура випікання датчиком TE 12-1, якщо температура відповідає заданій, вимірюється час випікання датчиком KS 13-1, інакше – подається сигналізація і вмикається блокування системи.

Після спрацювання датчика KS 13-1 вимикаються нагрівальні тени печі.

Блок-схема алгоритму побудована згідно ДСТУ ISO 5807:2016 [22].

5.2 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера

Середовище розробки програми для контролера AdamView.

Для зчитування інформації з аналогових датчиків використовуємо блок аналогового вводу AI, з датчиків з дискретним вхідним сигналом блок дискретного вводу DI. Алгоритм дій описуємо в блоці SCR на Basic Script. Виконавчими механізмами і регулюючими органами керуємо з допомогою блоку дискретного виводу DO.

До AI0 підключаємо датчик виміру швидкості SE 1-1. Далі описуємо програму в блоці BasicScript (лістинг 5.1).

Лістинг 5.1 – Програма зчитування інформації з датчика швидкості

```

Sub SCR1()
  set SE = GetTag("TASK1", "AI0")
  if SE < SEзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0

```

```
end if
End Sub
```

кінець лістингу 5.1

З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR1 з дискретним блоком DO0, перший вихід блоку SCR1 з дискретним блоком DO1, другий вихід блоку SCR1 з дискретним блоком DO2.

До AI1 підключаємо датчик виміру вологості ME 2-1. До AI2 підключаємо датчик виміру вологості ME 10-1. Далі описуємо програму в блоці BasicScript (лістинг 5.2).

Лістинг 5.2 – Програма зчитування інформації з датчиків вологості

```
Sub SCR2()
  set ME = GetTag("TASK1", "AI1")
  if ME < MEзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0
  end if
End Sub
Sub SCR3()
  set ME = GetTag("TASK1", "AI2")
  if ME < MEзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0
  end if
End Sub
```

кінець лістингу 5.2

З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR2 з дискретним блоком DO3.
З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR3 з дискретним блоком DO4.

До AI3 підключаємо датчик виміру ваги WE 4-1. Далі описуємо програму в блоці BasicScript (лістинг 5.3).

Лістинг 5.3 – Програма зчитування інформації з датчика ваги

```
Sub SCR4()
set WE = GetTag("TASK1", "AI3")
  if WE < WEзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0
  end if
End Sub
```

кінець лістингу 5.3

З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR4 з дискретним блоком DO5.

До AI4 підключаємо датчик виміру температури TE 3-1. Далі описуємо програму в блоці BasicScript (лістинг 5.4).

Лістинг 5.4 – Програма зчитування інформації з датчиків температури

```
Sub SCR5()
set TE = GetTag("TASK1", "AI4")
  if TE < TEзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0
  end if
```

End Sub

кінець лістингу 5.4

З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR5 з дискретним блоком DO6.

Для наступних датчиків температури з аналогічними зв'язками виконуємо такі ж дії, замінюючи номери блоків AI та DO і умови спрацювання.

До DI0 підключаємо датчик виміру часу KS 6-1. Далі описуємо програму в блоці BasicScript (лістинг 5.5).

Лістинг 5.5 – Програма зчитування інформації з датчиків часу

```
Sub SCR10()
  set KS = GetTag("TASK1", " DI0")
  if KS < KSзад
    outputi 0,1
  else
    outputi 0,0
  end if
End Sub
```

кінець лістингу 5.5

З'єднуємо нульовий вихід блоку SCR10 з дискретним блоком DO11.

Для наступних датчиків часу з аналогічними зв'язками виконуємо такі ж дії, замінюючи номери блоків DI та DO і умови спрацювання.

Висновок до розділу 5

Розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва круасанів. Побудовано блок-схему алгоритму. Розроблено програму роботи контролера у середовищі ADAMView.

РОЗДІЛ 6

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНО- ВОЛОГІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОЦЕСУ ОСТАТОЧНОГО ВИСТОЮВАННЯ ТІСТА У РОЗСТОЙНІЙ ШАФІ З ВИКОРИСТАННЯМ PID-РЕГУЛЯТОРА ТА ФІЛЬТРА КАЛМАНА

Моделювання процесів керування мікрокліматичними параметрами у харчових технологіях є ключовим елементом для забезпечення стабільності, якості та відтворюваності виробництва. Особливо це стосується етапу остаточного вистоювання тіста, де температура та відносна вологість безпосередньо впливають на активність дріжджів, формування структури тіста й органолептичні властивості готового виробу. Використання математичних моделей дає змогу не лише підтримувати оптимальні умови в реальному часі, а й досліджувати поведінку системи за наявності збурень або шумів у вимірюваннях.

Стохастичне моделювання процесу вистоювання дозволяє враховувати випадкові впливи зовнішнього середовища, інерційність об'єкта та неточності датчиків, що робить систему керування більш наближеною до реальних умов експлуатації [23]. Поєднання PID-регулятора з фільтром Калмана створює ефективну гібридну структуру, у якій класичний закон керування доповнюється механізмом оптимальної оцінки стану. Такий підхід забезпечує стійкість регулювання навіть за значних випадкових коливань параметрів процесу.

Основною метою імітаційного моделювання є дослідження стійкості та ефективності системи автоматизованого керування температурою та вологістю під час остаточного вистоювання тіста в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації.

Моделювання виконано для двох незалежних контурів керування (температура та вологість). Процес симулювався протягом 4500 секунд (75 хвилин) з кроком інтегрування $dt = 1с$.

Цільові параметри становлять $32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для температури вистоювання та $80,0\%$ для відносної вологості. Система розпочала роботу з початковими значеннями $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $65,0\%$, що спричинило початкові похибки $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ за температурою та 15% за вологістю.

Коефіцієнти PID-регулятора встановлено як $K_p = 1,2$; $K_i = 0,05$; $K_d = 0,8$. Стохастичні збурення описуються стандартними відхиленнями $\sigma_T = 1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ для температури та $\sigma_H = 1,8\%$ для вологості. Інерційність об'єкта характеризується параметрами $\alpha_T = 0,2$ для температурного контуру і $\alpha_H = 0,25$ для вологісного.

Високий рівень інерційності, поєднаний зі значним рівнем похибок вимірювань, створює складне середовище для стабільного керування, що вимагає використання не лише коефіцієнтів PID (особливо K_d), але й інтегрованого механізму фільтрації.

Застосування стохастичного підходу є важливим для моделювання реальних технологічних процесів. У реальній розстойній шафі неможливо забезпечити ідеально передбачуване середовище. Натомість, система постійно піддається дії випадкових збурень, таких як нерегулярні зміни теплообміну з навколишнім середовищем, коливання тиску або напруги живлення нагрівачів та зволожувачів.

Головним аргументом на користь стохастичного моделювання є необхідність врахування похибок датчиків. В моделі задані стандартні відхилення похибок $\sigma_T = 1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\sigma_H = 1,8\%$. Якщо PID-регулятор, який використовує диференціальну складову ($K_d=0,8$), отримуватиме безпосередньо зашумлені вимірювання, це призведе до:

- генерації високочастотних керуючих сигналів, які будуть посилювати похибки (ефект посилення диференціальною складовою),
- надмірного зносу виконавчих механізмів (нагрівачів, зволожувачів),
- нестабільності системи, оскільки регулятор реагуватиме на похибку, а не на фактичну динаміку процесу.

Таким чином, стохастичний підхід дозволяє перевірити стійкість і точність системи керування в реалістичних умовах, перевіряючи її здатність відділяти корисний сигнал стану від випадкового шуму.

Для випадкових похибок процесу (w_k) та вимірювань (v_k), що використовуються у рівняннях фільтра Калмана, прийнято припущення про нормальний (Гауссівський) розподіл.

Це припущення ґрунтується на центральній граничній теоремі. У більшості фізичних систем похибки вимірювань та випадкові збурення процесу є результатом сукупної дії великої кількості незалежних, дрібних випадкових факторів. Згідно з центральною граничною теоремою, сума таких незалежних випадкових величин прямує до нормального розподілу, незалежно від розподілу окремих складових.

Фільтр Калмана використовується як оптимальний рекурсивний оцінювач стану системи. Його основна функція полягає в тому, щоб забезпечити найкращу можливу оцінку фактичного стану системи (який включає, наприклад, температуру та швидкість її зміни) шляхом інтеграції двох джерел інформації: прогнозу на основі динамічної моделі системи та поточного зашумленого вимірювання [24].

Фільтр Калмана описується двома фазами – прогноз та корекція. Прогноз, це визначення стану системи на наступному кроці на основі попереднього оціненого стану та керуючого впливу. Корекція – оновлення прогнозу шляхом зважування його з поточним вимірюванням (z_k) за допомогою коефіцієнта Калмана (K_k), який мінімізує похибку.

Інтеграція фільтра Калмана у контур керування дозволяє PID-регулятору приймати рішення на основі оптимально оціненого, чистого стану, а не безпосередньо зашумленого сигналу. Це спосіб ефективно використати диференціальну складову ($K_d = 0,8$) для підвищення швидкодії системи, одночасно гарантуючи стійкість і довговічність виконавчих механізмів.

В моделі реалізовано двоконтурну систему керування, де кожен технологічний параметр (температура та вологість) керується окремим PID-регулятором, який отримує на вхід очищений сигнал від відповідного фільтра Калмана.

PID-регулятор формує керуючий сигнал $u(t)$ відповідно до класичного закону керування (формула 6.1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t r(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (6.1)$$

де e – похибка між цільовим та оціненим значенням стану.

Значення диференціальної складової ($K_d = 0,8$) забезпечує швидку реакцію на зміни та допомагає швидко загасити перехідний процес. Однак, високий K_d вимагає надзвичайно чистого вхідного сигналу, що забезпечується фільтром Калмана. Відносно низький інтегральний коефіцієнт ($K_i = 0,05$) свідчить про обережне інтегрування, що запобігає класичному перерегулюванню, але водночас гарантує усунення статичної похибки у стаціонарному режимі.

Симуляційний скрипт реалізовано мовою Python з використанням стандартних бібліотек: NumPy (для числових обчислень та генерації випадкових величин, що імітують похибки), Matplotlib (для візуалізації результатів) та FilterPy (для реалізації алгоритму фільтра Калмана).

Програмна архітектура включає наступні функціональні модулі:

- створення та параметризація фільтра Калмана матрицями F , H , Q , R , B для кожного контуру: `initialize_kalman_filter()`,
- обчислення керуючого сигналу: `compute_control_pid()`,
- основний цикл симуляції: `simulate_proofing()`,
- модулі постобробки та оцінки ефективності: `plot_results()` та `print_statistics()`.

Вихідні параметри та вхідні умови моделювання наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні параметри та вхідні умови моделювання

Параметр	Одиниці виміру	Температурний контур	Вологісний контур	Значимість
Цільове значення	°C / %	32,0	80,0	Технологічні вимоги вистоювання
Початкове значення	°C / %	25,0	65,0	Початкова похибка 7 °C та 15 %
Коефіцієнт K_p	-	1,2	1,2	Пропорційна дія
Коефіцієнт K_i	-	0,05	0,05	Інтегральна дія (усунення статистичної похибки)
Коефіцієнт K_d	-	0,8	0,8	Диференціальна дія (швидкість реакції)
Інерційність (α)	-	0,2	0,25	Характеристика об'єкта керування
Стандартне відхилення шуму (σ)	°C / %	1,2	1,8	Характеристика вимірювального каналу (матриця R для фільтра Калмана)

Моделювання виконується як дискретний процес, що повторюється для кожного кроку часу (1 с).

1. Ініціалізація. На старті моделі ініціалізуються всі параметри, коефіцієнти PID та два окремі екземпляри Фільтра Калмана для температури і вологості.

2. Моделювання фактичного стану. Обчислюється фактичний стан системи на поточному кроці, враховуючи фізичну інерційність та випадкові збурення процесу (w_k).

3. Формування зашумленого вимірювання. До фактичного стану додається змодельована випадкова похибка вимірювань (v_k), що дає сигнал, який отримує сенсор.

4. Оцінка стану фільтра Калмана. Фільтр Калмана виконує прогноз стану, а потім корекцію цього прогнозу, використовуючи зашумлене вимірювання. Результатом є оптимально оцінене значення стану.

5. Розрахунок керування PID. PID-регулятор обчислює необхідний керуючий вплив, базуючись на похибці між цільовим значенням та чистим оціненим станом, отриманим від фільтра Калмана.

6. Обмеження сигналу. Керуючий сигнал обмежується в межах допустимих фізичних значень (наприклад, ± 5 умовних одиниць потужності).

7. Збереження. Результати зберігаються для подальшого аналізу та візуалізації.

Візуалізація результатів є комплексною і включає чотири графіки, що дозволяють візуально оцінити ефективність фільтрації та керування – рисунок 6.1-6.2.

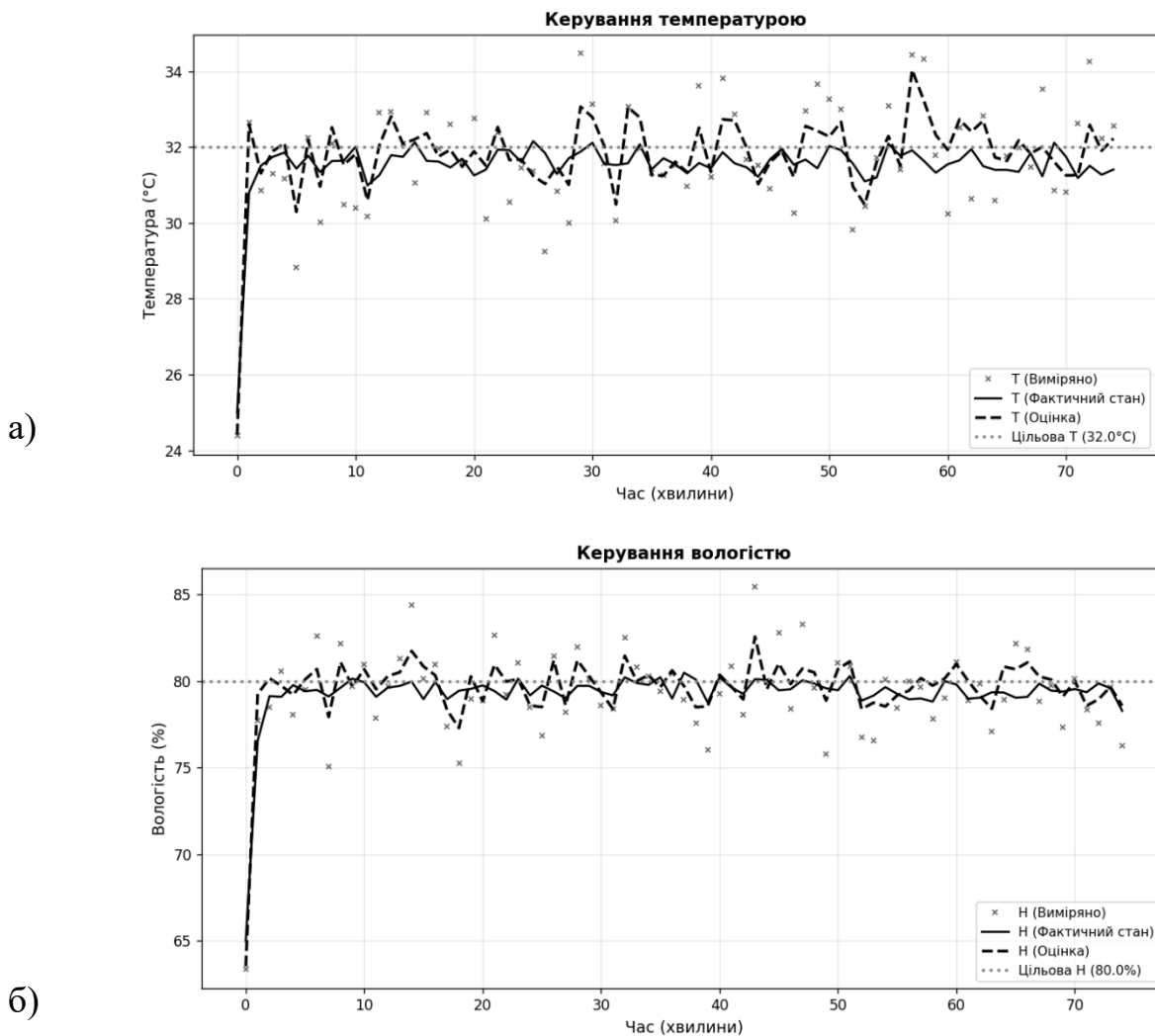


Рисунок 6.1 – Стохастична модель керування:

а) керування температурою, б) керування вологістю

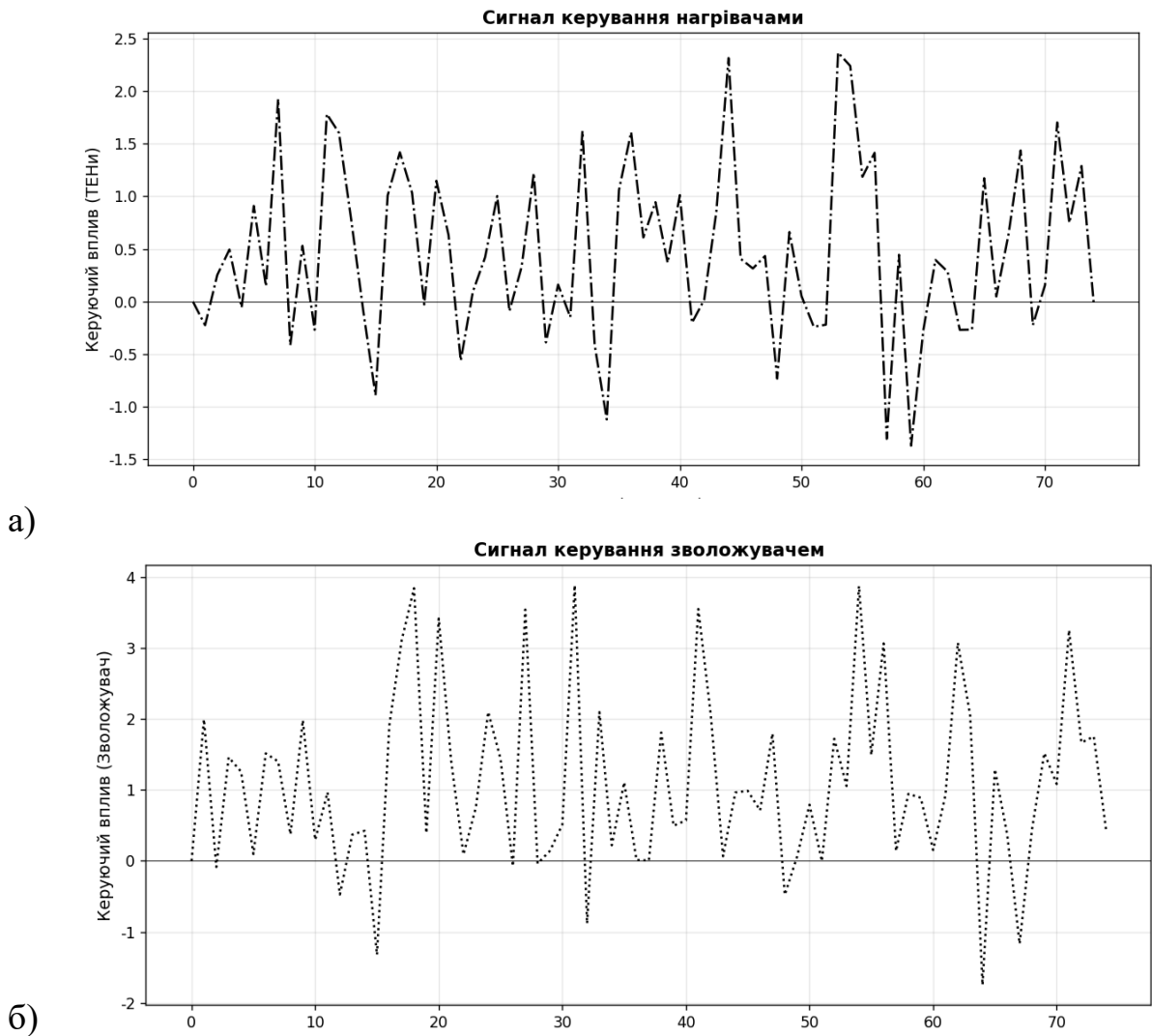


Рисунок 6.2 – Стохастична модель керування: а) сигнал керування нагрівачами, б) сигнал керування зволожувачем

Керування температурою.

На графіку керування температурою спостерігається швидке підвищення температури від початкового рівня приблизно $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до цільового значення $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом перших п'яти хвилин. Після досягнення робочої зони система стабілізується, а коливання температури не перевищують $\pm 1\text{-}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що свідчить про правильне налаштування PID-регулятора та відсутність перерегулювання. Вимірні дані, позначені хрестиками, мають помітний шум, проте оцінка фільтра Калмана, показана пунктирною лінією, ефективно його згладжує. Фактична

температура, відображена суцільною лінією, залишається близькою до цільової, підтверджуючи стабільну роботу системи керування.

Перехідний процес відбувається плавно: початкова температура становить близько 25 °С, а досягнення 95 % від цільового значення відбувається приблизно за 240 с (4 хв). Після цього температура утримується в межах 31,0-33,5 °С. Середня похибка у процесі регулювання становить близько 0,8 °С, а максимальна, що спостерігається на початку роботи, сягає приблизно 7 °С. Після стабілізації коливання не перевищують $\pm 1,5$ °С, що повністю відповідає технологічному допуску ± 2 °С.

Фільтр Калмана відіграє важливу роль у забезпеченні точності: він ефективно усуває вимірювальні шуми з дисперсією близько 1,2 °С, а різниця між реальною температурою та оцінкою фільтра не перевищує 0,3-0,4 °С. Середньоквадратична похибка оцінки становить приблизно 0,04 °С². Загалом контур температури демонструє швидке досягнення цілі, стійке регулювання та мінімальну залишкову похибку. Перерегулювання відсутнє, а перехідний процес має згасаючий характер, що свідчить про якісну роботу регулятора.

Керування вологістю.

На графіку керування вологістю видно, що початкове значення становить близько 65 %, після чого система швидко реагує і протягом трьох – п'яти хвилин виходить на цільовий рівень 80 %. Перехідний процес відбувається плавно і коротше, ніж у температурному контурі, що свідчить про більшу швидкодію системи регулювання вологості. Після встановлення робочого режиму параметр стабілізується, а відхилення залишаються незначними – у межах $\pm 2-3$ %, тобто система підтримує необхідний мікроклімат без істотних коливань.

Фільтр Калмана ефективно усуває шум вимірювань, який має середньоквадратичне відхилення приблизно 1,8 %. Різниця між фактичними значеннями вологості та оцінкою фільтра не перевищує 0,5 %, що забезпечує високу точність. Середньоквадратична похибка оцінки становить біля 0,06 %².

Під час переходу з початкового стану на робочу точку система проходить від 65 % до 80 % вологості приблизно за 180 с (три хвилини), після чого утримує показники в діапазоні 78-82 %. Середня похибка становить близько 1,1 %, а максимальна, зафіксована на старті процесу, сягає близько 15 %. Після стабілізації відхилення не перевищують ± 2 %, що значно менше за допустимий технологічний діапазон ± 5 % для камери вистоювання.

Таким чином, контур вологості характеризується швидким реагуванням, високою стабільністю та стійкістю до шумів. Система точно підтримує задану вологість на рівні 80 %, що свідчить про ефективну роботу PID-регулятора.

Сигнал керування нагрівачами.

Сигнал керування температурою має виражений коливальний характер, що є типовим для роботи PID-регулятора, який постійно підлаштовується до незначних збурень і шумів у системі. На початку моделювання регулятор різко збільшує потужність нагріву до приблизно +2 умовних одиниць, щоб компенсувати початкову похибку близько 7 °С. Надалі амплітуда коливань зменшується, і після п'ятої хвилини система переходить у стійкий режим підтримання теплового балансу.

Діапазон керуючого сигналу становить від -1,5 до +2 умовних одиниць, що свідчить про помірну активність системи без перевищення граничних рівнів і без різких стрибків. Частота коливань становить приблизно 0,01 Гц, тобто один цикл відбувається орієнтовно за 100 секунд. Короткочасні піки, які спостерігаються на графіку, зумовлені реакцією регулятора на випадкові шуми вимірювань.

У підсумку регулятор нагріву працює стабільно, не досягає насичення навіть при максимальних відхиленнях сигналу та не спричиняє нестійкості процесу. Система демонструє енергоефективність, оскільки більшу частину часу керуючий сигнал утримується в межах ± 1 умовної одиниці, що свідчить про збалансовану роботу температурного контуру.

Сигнал керування зволожувачем.

На початку моделювання сигнал керування зволоженням має велику амплітуду, що досягає приблизно ± 3 умовних одиниць. Це свідчить про швидку реакцію PID-регулятора, який активно підвищує подачу зволоження для компенсації початкової нестачі вологості близько 15 %. Найбільший імпульс становить приблизно +3,5 умовних одиниць і спостерігається у перші секунди після запуску системи.

Після досягнення цільового рівня вологості інтенсивність сигналу зменшується, і амплітуда коливань поступово знижується до $\pm 0,5-1,0$ умовної одиниці. Згодом керуючий вплив стабілізується поблизу нуля, що свідчить про перехід системи в стаціонарний режим, коли регулятор лише періодично вносить невеликі корекції для підтримання стабільного рівня вологості.

Частота коливань сигналу становить приблизно 0,015 Гц, тобто один цикл триває близько 70 секунд, що означає швидшу реакцію системи зволоження порівняно з температурним контуром. Така динаміка є типовою для процесів, де зволожувач має меншу інерційність і швидше реагує на зміни в системі.

Загалом контур зволоження демонструє високу початкову активність, швидке згасання коливань і стабільну роботу після встановлення цільових параметрів. PID-регулятор працює ефективно, не допускає перенасичення та забезпечує плавне керування зволожувачем без різких змін або реверсивних стрибків.

Текст скрипту моделі приведений в Додатку Д.

Висновок до розділу 6

Стохастична модель підтверджує ефективність роботи системи автоматизованого регулювання температури та вологості під час процесу остаточного вистоювання тіста. Обидва контури (температурний і вологісний) швидко виходять на стабільний режим протягом трьох – чотирьох хвилин, а

відхилення параметрів не перевищують нормативних меж: ± 2 °C для температури та ± 5 % для вологості. Робота PID-регуляторів і фільтрів Калмана є узгодженою, що забезпечує високу точність, стійкість і відсутність коливань, здатних вивести систему з робочого діапазону. Характер керуючих сигналів свідчить про енергоефективність моделі та відсутність насичення виконавчих механізмів.

Модель демонструє надійне стабілізування температури на рівні 32 °C і вологості на рівні 80 %. Фільтр Калмана ефективно згладжує вимірювальні шуми, забезпечуючи точні оцінки стану системи навіть за наявності стохастичних збурень. PID-регулятори працюють стабільно, не перевищуючи граничних значень сигналів керування, що гарантує безпечну експлуатацію обладнання.

Отримані результати підтверджують правильність вибору параметрів системи автоматичного керування для камери вистоювання круасанів. Розроблена модель може бути використана як основа для подальшої реалізації алгоритмів у програмованих логічних контролерах або для побудови SCADA-системи моніторингу та регулювання температурно-вологісного режиму в промислових умовах.

РОЗДІЛ 7
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ
АВТОМАТИЗАЦІЇ

Визначимо вартість контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації (КВПіЗ) для автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів [6-21] (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1 – Розрахунок вартості КВПіЗ для автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів

№ з/п	Назва приладу	Тип	Кількість	Вартість одиниці, грн.	Загальна вартість, грн.
1	Енкодер	Baumer BDK 16.24K 1001/AM12	1	32613	32613
2	Датчик вологи	Michell Instruments IMD 300	2	367600	735200
3	Датчик температури	TCC501	5	22725	113625
4	Датчик температури	OMEGA типу K TJ36-CASS-116U-6	1	6503	6503
5	Тензодатчик	HBM PW15AH C3	1	21763	21763
6	Реле часу	SIEMENS 3RP1525-1AP30	3	4572	13716
7	Двигун з частотним перетворювачем	SEW-EURODRIVE Movimot® MM15D-0.75-3-00	11	33527	368797
8	Клапан електромагнітний	ASCO Numatics серія 355B	2	1900	3800
9	Клапан електромагнітний	Burkert Type 6213 EV	1	7840	7840
10	Пускач	Siemens 3RV2021-1BA10	14	2177	30478
11	Реле	Phoenix Contact EMD-BL-3V-400	11	4056	44616
12	Мікроконтролер	ADAM-5017	2	9050	18100
13	Мікроконтролер	ADAM-5051	1	3570	3570
14	Мікроконтролер	ADAM-5056	1	3570	3570
15	Мікроконтролер	ADAM-5510	1	16720	16720
16	Блок живлення	Mean Well DRP-240-24	1	4090	4090
Всього:					1425001

Згідно таблиці 7.1, вартість КВПіЗ становить:

$$V_{\text{КВПІЗ}} = 1425001 \text{ грн.}$$

При оцінці загальної вартості обладнання для автоматизації базова вартість контрольно-вимірювальних приладів та компонентів автоматизації (контролерів, датчиків, виконавчих механізмів, модулів) приймається за 100 %. Потім додаються додаткові витрати на транспортування, закупівлю, монтаж та введення в експлуатацію [25-26].

Витрати на закупівлю та транспортування включають упаковку, доставку, митне оформлення, логістику та обробку закупівель (замовлення, документація) і становлять 5-10 %.

Витрати на встановлення (монтаж) охоплюють фізичну установку пристроїв: монтаж датчиків, прокладання кабелів, складання шаф управління, підключення модулів, налагодження ланцюгів живлення. Для складних ліній з багатьма датчиками та клапанами вони становлять 12-15 %.

Витрати на введення в експлуатацію та налагодження включають калібрування, налаштування параметрів, налагодження зв'язку, тестування логіки управління та функціональну перевірку всієї системи. Для систем з розширеними алгоритмами управління або мережевою інтеграцією слід розраховувати на 4-5 %.

Прийmemo, що автоматизована система керування процесом виробництва круасанів – це середньомасштабна лінія автоматизації виробництва харчових продуктів з розподіленими датчиками, клапанами та модулями контролерів. У цьому випадку прийнятний відсоток від вартості обладнання становить:

- на закупівлю та транспортування – 8 %,
- на встановлення (монтаж та підключення) – 12 %,
- на введення в експлуатацію та налагодження – 4 %.

Отже, транспортно-закупівельні витрати:

$$V_{\text{Т-З}} = 1425001 * 0,08 = 114000 \text{ грн.}$$

Монтажні витрати:

$$V_{\text{М}} = 1425001 * 0,12 = 171000 \text{ грн.}$$

Витрати на введення в експлуатацію та налагодження:

$$V_H = 1425001 * 0,04 = 57000 \text{ грн.}$$

Тоді загальне значення капітальних витрат становить:

$$V_K = V_{\text{КВПІЗ}} + V_{\text{Т-З}} + V_M + V_H = 1425001 + 114000 + 171000 + 57000 = 1767001 \text{ грн.}$$

Таким чином, загальні витрати для запуску автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів становлять 1 767 001 грн.

Висновок до розділу 7

Визначено складові загальних витрат для запуску автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів. Виконано техніко-економічне обґрунтування проекту автоматизації. Розраховані загальні витрати для запуску автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів становлять 1 767 001 грн.

ВИСНОВКИ

Головною метою кваліфікаційної роботи є модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення круасанів.

Для досягнення мети описано етапи процесу виробництва круасанів. Кожен етап повинен ретельно контролюватися, щоб забезпечити рівномірне формування шарів, розвиток аромату та якість продукту.

Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва.

Визначено параметри технологічного процесу виробництва круасанів, які необхідно контролювати. Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва круасанів.

При розгляді як єдиної інтегрованої системи, автоматизована система керування виробництвом круасанів функціонує як структура управління із замкнутим контуром, яка отримує вхідні задані значення (бажані параметри якості та виробництва), регулює контрольні змінні (виконавчі механізми процесу), контролює вихідні дані (якість продукції та процесу) та компенсує порушення (варіативність сировини та навколишнього середовища). Така система забезпечує стабільне, високоякісне та енергоефективне виробництво круасанів в динамічних умовах експлуатації – ключова особливість сучасного інтелектуального виробництва та харчових технологій Індустрії 4.0.

При розробці функціональної схеми автоматизації процесу виробництва круасанів особливу увагу приділено визначенню об'єктів управління та меж системи (структура всієї виробничої лінії); визначенню всіх вимірюваних та контрольованих параметрів (температура, вологість, швидкість тощо); забезпеченню чіткого представлення контурів управління та зворотних зв'язків; включенню систем безпеки, блокування та сигналізації; використанню

стандартизованих символів; представленню каналів зв'язку та елементів збору даних.

Добре розроблена функціональна схема автоматизації стає основним планом для розробки алгоритмів управління, програм ПЛК та систем візуалізації, які забезпечать високу якість, стабільність та ефективність виробництва круасанів.

Вибрані пристрої автоматизації утворюють технічно обґрунтовану та функціонально збалансовану систему для автоматизації виробництва круасанів. Датчики забезпечують комплексний моніторинг технологічних параметрів. Приводи забезпечують точне виконання контрольних дій. Модулі контролера ADAM-5000 об'єднують всі компоненти в єдину інтелектуальну мережу управління, що забезпечує зворотний зв'язок у режимі реального часу, роботу на основі рецептів і високу стабільність якості продукції. Таке поєднання забезпечує прозорість, відтворюваність і ефективність процесів, що є основними цілями сучасних систем автоматизації хлібопекарського виробництва.

Описані основні електричні схеми, які забезпечують безперервне та точне вимірювання технологічних параметрів, надійне управління виконавчими механізмами, електричну ізоляцію між схемами управління та живлення, безпеку операторів та обладнання, масштабованість та адаптивність системи. Таким чином, обрана структура та принципи підключення утворюють повну, ефективну та безпечну систему автоматизації виробництва круасанів.

Розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва круасанів. Побудовано блок-схему алгоритму. Розроблено програму роботи контролера у середовищі ADAMView.

Розроблена стохастична модель керування температурно-вологісним режимом процесу остаточного вистоювання тіста у розстойній шафі з використанням PID-регулятора та фільтра Калмана. Отримані результати підтверджують правильність вибору параметрів системи автоматичного керування для камери вистоювання круасанів. Розроблена модель може бути

використана як основа для подальшої реалізації алгоритмів у програмованих логічних контролерах або для побудови SCADA-системи моніторингу та регулювання температурно-вологісного режиму в промислових умовах.

Визначено складові загальних витрат для запуску автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів. Виконано техніко-економічне обґрунтування проєкту автоматизації. Розраховані загальні витрати для запуску автоматизованої системи керування процесом виробництва круасанів становлять 1 767 001 грн.

Таким чином, мета кваліфікаційної роботи досягнута. Застосування передових технологій автоматизації, цифрового моніторингу та інтелектуального управління підвищить ефективність виробництва, стабільність якості та економічні показники.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 8709:2017 Вироби хлібобулочні листкові. Загальні технічні умови: [Чинний від 01.01.2018 р.]. Київ: Держспоживстандарт України, 2017.
2. Технологія виготовлення борошняних кондитерських виробів: підруч. для проф.-техн. навч. закладів. Київ: Вікторія, 2022. 400 с.
3. Сидорчук Ю. П. Приготування напівфабрикатів для борошняних кондитерських виробів: навчальний посібник. Володимирець: Вище професійне училище № 29, 2022. 87 с.
4. ДСТУ Б А.2.4-16:2008 Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах: [Чинний від 01.10.2010]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008.
5. ДСТУ ISO 14617:2018 Графічні умовні позначки для схем. (ISO 14617:2002, IDT). [Чинний від 01.01.2019 р.]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
6. Реле часу SIEMENS 3RP1525-1AP30. URL: <https://uk.platinum-international.store/product/control-system-plcs/timers/siemens-3rp1525-1ap30-timing-relay-2/> (дата звернення 15.09.2025).
7. Incremental encoders BDK. URL: <https://www.baumer.com/int/en/p/28031> (дата звернення 15.09.2025).
8. Передавач температури TCC501. URL: <https://www.ifm.com/ua/uk/product/TCC501> (дата звернення 15.09.2025)
9. TJ36-CASS-116U-6. OMEGA. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/tj36-cass-116u-6..html> (дата звернення 15.09.2025).
10. Платформний датчик ваги PW15AH/PH. URL: <https://anwit.com.ua/products/transducer/load-cells/single-point/pw15iah-ph/> (дата звернення 16.09.2025).
11. Michell Instruments MDM300-IS Intrinsically Safe Hygrometer. URL: <https://www.instrumart.com/products/46038/michell-instruments-mdm300-is->

intrinsically-safe-hygrometer?srsltid=AfmBOoo3au7eIzC-SGWDOeg-i3qtFgvmwqoxI0UzJhVeZ89i0IngsKQT (дата звернення 16.09.2024).

12. EMERSON – ASCO 355 series G 1/4, G 1/8 Sub Base. URL: <https://uk.rs-online.com/web/p/manifold-bases-sub-bases-end-bases/2783921> (дата звернення 16.09.2025).

13. Сервокеруючий 2/2 ходовий мембранний клапан Burkert 6213-EV-A13,0BBMSGM84-6-012/DC-10. URL: <https://etrade-group.com/ua/p720747130-encoder-sick-dfs60b.html> (дата звернення 16.09.2025).

14. Компактна інструкція з експлуатації – Movimot® MM15D-0.75-3-00. URL: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/27792471.pdf> (дата звернення 16.09.2025).

15. 2903526 EMD-BL-3V-400-PT: Реле контролю напруги, Pheonix Contact. URL: <https://simat.com.ua/product-2903526?srsltid=AfmBOoqQZ3otBs5vumwjIxS92tIosE32VdY5tVNTLeXBfaEXUJfW-9Nh> (дата звернення: 20.09.2025).

16. 3RV2021-1BA10. URL: https://prongroup.com.ua/shop/3rv2021-1ba10/?srsltid=AfmBOorSRSTmEXpE6-BqhtMgEZ-L7z5hasn_G4wz3pMy4T7TOTGgmgcz (дата звернення: 20.09.2025).

17. Програмований логічний контролер ADAM-5017. URL: https://www.sea.com.ua/ua/promyshlennye-kompyutery/programmiruemye-logiceskie-kontrollery/adam-5017-2/?srsltid=AfmBOorSQxm4yZD_HT9SBsS_dd7Wt-dP0Ejvm6reQCLZoq4-gAl8z76N (дата звернення 20.10.2025).

18. Програмований логічний контролер ADAM-5051. URL: <https://www.sea.com.ua/ua/promyshlennye-kompyutery/programmiruemye-logiceskie-kontrollery/adam-5051s-2/?srsltid=AfmBOoprcrCjCbCLsVHiLuSQbllz6rCRQGmtDbNA-xM26WqMdrPT1oHO> (дата звернення 20.10.2025).

19. ADAM-5056-AE. URL: <https://ipc2u.ua/products/adam-5056-ae> (дата звернення: 11.10.2025).

20. Програмований логічний контролер ADAM-5510. URL: <https://www.proxis.ua/uk/product/programmable-controller-Advantech-ADAM-5510/> (дата звернення 20.10.2024).
21. DRP-240-24 Блок живлення на Din-рейку Mean Well 240 Вт, 24 В, 10 А. URL: <https://meanwell.kiev.ua/ua/p9108829-drp-240-blok.html> (дата звернення 20.10.2025).
22. ДСТУ ISO 5807:2016 (ISO 5807:1985, IDT). Оброблення інформації. Символи та угоди щодо документації стосовно даних, програм та системних блок-схем, схем мережевих програм та схем системних ресурсів: [Чинний від 10.10.2016]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
23. Barry L. Nelson, Linda Pe. Foundations and Methods of Stochastic Simulation: A First Course. URL: <https://www.jacobaguirre.com/Foundations%20of%20Stochastic%20Simulation.pdf> (дата звернення 10.11.2025).
24. Kalman Filtering Under Information Theoretic Criteria. URL: https://www.researchgate.net/publication/373232631_Kalman_Filtering_Under_Information_Theoretic_Criteria (дата звернення 10.11.2025).
25. Engineering Economy. URL: https://staff.emu.edu.tr/gokhanizbirak/Documents/courses/ieng420/lecture-notes/spring-2021/Engineering-Economy.pdf?utm_source (дата звернення 20.11.2025)
26. Визначення економічної ефективності заходів у галузі автоматики, телемеханіки та інформаційних технологій. Методичні вказівки до виконання розрахунків у дипломних проектах / укладачі: М. Д. Жердєв, Ю. М. Юрченко, Н. В. Гриценко Ю. В. Мирошніченко. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2022. 42 с.
27. Савчук М. В., Сацик В. О. Автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення круасанів. *Actual problems of automation and control*: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів. Випуск № 13. Луцьк: ЛНТУ, 2025. С. 69-73.