

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ІНІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2026 р.

« ____ » _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБСМАЖЕННЯ КАРТОПЛЯНИХ ЧІПСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ MITSUBISHI ELECTRIC»

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Іващук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Грищенко В.О.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Шинкар В.І.
(П.І.Б студента)

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Шинкару Владиславу Ігоровичу

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Дослідження та розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом обсмаження картопляних чіпсів із використанням комплексу технічних засобів Mitsubishi Electric»**,

затверджена наказом від 18.11.2024 року №2057«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2026 року

Вихідні дані магістерської кваліфікаційної роботи: завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження, аналізу та моделювання; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз технологічного процесу виробництва картопляних чіпсів.
2. Виконати математичне моделювання об'єкта та вибір технічних засобів.
3. Зробити синтез цифрової системи керування.
4. Розробити проект САК та програмну реалізацію.
5. Провести аналіз економічної ефективності від впровадження.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Грищенко В.О.
(Прізвище та ініціали)

Шинкар В.І.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАРТОПЛЯНИХ ЧІПСІВ	7
1.1. Аналіз технологічного процесу виробництва картопляних чіпсів.	7
1.2. Конструкція та гідродинаміка фритюрниці безперервної дії.....	16
1.3. Аналіз технологічних параметрів процесу обсмажування як об'єктів автоматизації.	22
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	29
2.1. Розробка математичної моделі об'єкта керування.....	29
2.2. Розробка функціональної схеми автоматизації.	36
2.3. Обґрунтування вибору датчиків, виконавчих механізмів та ПЛК.	43
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	47
3.1. Формування моделі розширеного об'єкта.	47
3.2. Синтез закону керування та розрахунок налаштувань цифрового регулятора.	49
3.3. Визначення періоду квантування сигналів цифрової системи керування.	52
3.4. Оцінка показників якості роботи системи (моделювання перехідних процесів).....	54
РОЗДІЛ 4. РОБОЧЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	56
4.1. Розробка принципової електричної схеми керування.....	56
4.2. Розробка алгоритмів керування фритюрницею.	62
4.3. Розробка прикладного програмного забезпечення.....	66
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	71
5.1. Розрахунок капітальних витрат на проектування та обладнання.	71

5.2. Визначення економічної ефективності та терміну окупності системи автоматизації.	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ВСТУП

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена постійним зростанням вимог до якості харчової продукції та необхідністю оптимізації енергетичних витрат на підприємствах харчової промисловості. Процес обсмажування картопляних чіпсів є складним тепломасообмінним процесом, який вимагає прецизійного підтримання температурних режимів по зонах, швидкості руху конвеєра та рівня теплоносія. Відхилення цих параметрів неминуче призводить до погіршення органолептичних властивостей готового продукту, підвищення відсотка браку та нестабільності вологості готових виробів, що детально розглядається в сучасних дослідженнях з технологій харчових виробництв. Впровадження сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, стабілізувати якість продукції та значно знизити витрати енергоресурсів. Використання комплексу технічних засобів від провідного виробника Mitsubishi Electric забезпечує високу надійність, швидкодію та гнучкість масштабування системи, що робить розробку такої автоматизованої системи керування вкрай затребуваним інженерним та науково-практичним завданням.

Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування промислової фритюрниці безперервної дії та покращення якості готової продукції шляхом розробки сучасної комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом обсмажування картопляних чіпсів на базі програмно-апаратних рішень компанії Mitsubishi Electric. Для досягнення поставленої мети необхідно застосувати сучасні методи теорії автоматичного керування, що дозволить синтезувати надійні алгоритми, які б враховували інерційність та нелінійність теплових процесів у промислових апаратах.

Об'єктом дослідження виступає технологічний процес термічної обробки картопляних слайсів у фритюрниці безперервної дії.

Предметом дослідження є математичні моделі, закони та алгоритми керування, а також комплекс технічних та програмних засобів промислової

автоматизації Mitsubishi Electric, необхідних для стабілізації ключових технологічних параметрів процесу.

Для реалізації сформульованої мети в роботі передбачено виконання низки взаємопов'язаних **завдань**, які охоплюють повний інженерний цикл розробки системи. Насамперед передбачається проведення ґрунтового аналізу фритюрниці як об'єкта автоматизації з визначенням основних збурюючих та керуючих впливів. Наступним кроком є розробка математичної моделі тепломасообмінних процесів чистого об'єкта, що дозволить формалізувати його динаміку. Опираючись на отримані характеристики, планується розробити функціональну схему та здійснити обґрунтований вибір комплексу технічних засобів автоматизації, включаючи вимірювальні перетворювачі, виконавчі механізми та програмований логічний контролер. Базуючись на динамічних параметрах обраного обладнання, буде виконано формування моделі розширеного об'єкта, синтез цифрової системи керування, визначення періоду квантування та оцінка показників якості перехідних процесів. Кінцевим етапом дослідження є розробка принципових електричних схем, створення прикладного програмного забезпечення та алгоритмів керування, а також розрахунок економічної ефективності від впровадження розробленої системи на виробництві.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КАРТОПЛЯНИХ ЧІПСІВ

1.1. Аналіз технологічного процесу виробництва картопляних чіпсів.

Виробництво картопляних чіпсів являє собою високотехнологічний, багатостадійний та енергоємний процес, який вимагає прецизійного контролю параметрів на кожному етапі трансформації сировини у готовий харчовий продукт. Забезпечення стабільної якості кінцевої продукції починається з етапу відбору, сортування та зберігання картоплі. Для промислового виробництва придатні виключно спеціалізовані чіпсові сорти картоплі, які характеризуються високим вмістом сухих речовин та мінімальною концентрацією відновлювальних цукрів (табл. 1.1). Масова частка сухих речовин має становити від двадцяти до двадцяти п'яти відсотків, оскільки цей показник прямо пропорційно впливає на вихід готової продукції та визначає структурно-механічні властивості майбутньої пористої матриці чіпса. Рівень відновлювальних цукрів, зокрема глюкози та фруктози, не повинен перевищувати нуль цілих дві десятих відсотка, що є критичною вимогою для запобігання надмірному потемнінню слайсів під час високотемпературної обробки [1-9].

Первинна підготовка сировини на виробництві розпочинається з етапу гідромеханічного транспортування та очищення від забруднень (рис. 1.1). Бульби надходять у приймальні бункери, звідки водними транспортерами подаються на каменевловлювачі та мийні машини барабанного типу. На цьому етапі відбувається інтенсивне видалення ґрунту, піску та органічних домішок за рахунок гідродинамічного тертя бульб одна об одну та об робочі органи обладнання в середовищі безперервно проточної води. Ретельне очищення сировини є критично важливим не лише для забезпечення санітарно-гігієнічних норм харчового виробництва, але й для запобігання передчасному абразивному зношенню робочих поверхонь на наступних технологічних стадіях. Після миття

картопля проходить етап оптичної інспекції, де автоматизовані скануючі системи на базі машинного зору ідентифікують та відбраковують екземпляри з ознаками гниття, механічними пошкодженнями або вираженим зеленим забарвленням, яке свідчить про накопичення токсичного глікоалкалоїду соланіну [1-9].

Таблиця 1.1 – Фізико-хімічні вимоги до картоплі чіпсових сортів

Параметр	Норма	Опис
Вміст сухої речовини	20% – 25%	Визначає вихід готового продукту та хрусткість
Редукуючі цукри	$\leq 0,1\% - 0,2\%$	Запобігає потемнінню (пригорянню) та гіркоті
Вміст крохмалю	14% – 18%	Впливає на поглинання олії (чим більше крохмалю, тим менше олії)
Форма бульби	Округла або коротко-овальна	Забезпечує однакові за розміром та формою скибочки
Глибина вічок	Поверхневі (неглибокі)	Зменшує кількість відходів при механічному чищенні
Діаметр бульби	40 – 70 мм	Оптимальний розмір для пакувальних пакетів
Внутрішні дефекти	Відсутність (пустоти, плями)	Гарантує естетичний вигляд та цілісність скибочки
Стійкість до ударів	Висока	Запобігає утворенню синіх плям при транспортуванні

Зняття шкірки з картопляних бульб у промислових масштабах найчастіше здійснюється механічним абразивним способом. Картопля завантажується у відцентрові машини, внутрішні стінки та обертове дно яких вкриті карборундовим матеріалом різної зернистості. Під дією відцентрових сил бульби інтенсивно притискаються до абразивних поверхонь, внаслідок чого відбувається поступове мікрорізання та стирання поверхневого шару перидерми. Цей процес обов'язково супроводжується безперервною подачею води під тиском, яка миттєво змиває утворену мезгу та запобігає потемнінню очищених бульб внаслідок ферментативного окислення фенольних сполук під дією ферменту поліфенолоксидази. Ступінь очищення ретельно контролюється шляхом налаштування часу перебування сировини в робочій камері, оскільки

надмірна тривалість процесу призводить до невиправданих втрат корисної маси. Після очищення бульби направляються на вторинну інспекцію для ручного або автоматичного доочищення вічок та глибоких дефектів [2, 5].



Рисунок 1.1 – Принципова апаратурно-технологічна схема лінії виробництва картопляних чіпсів

Нарізання очищеної картоплі на тонкі скибочки є однією з найвідповідальніших механічних операцій, від точності якої тотально залежить рівномірність подальшого тепломасообміну у фритюрі. Картопля подається у високошвидкісні роторні різальні машини, де під дією відцентрової сили бульби притискаються до нерухомої кругової різальної головки, оснащеної системою гострих сталевих лез (рис. 1.2). Задана товщина слайсів, яка в класичній технології становить від одного до двох міліметрів, суворо регулюється каліброваним зазором між лезами. Критично важливим технологічним параметром є підтримання ідеальної гостроти різальних кромek, оскільки зношені або тупі леза призводять до масового розриву клітинних стінок на поверхні зрізу. Пошкоджені рослинні клітини вивільняють надмірну кількість вільного внутрішньоклітинного крохмалю і утворюють мікроскопічні структурні нерівності, які під час подальшого обсмажування діють як потужні

капіляри, що експоненціально збільшує небажану абсорбцію олії готовим продуктом [1-9].

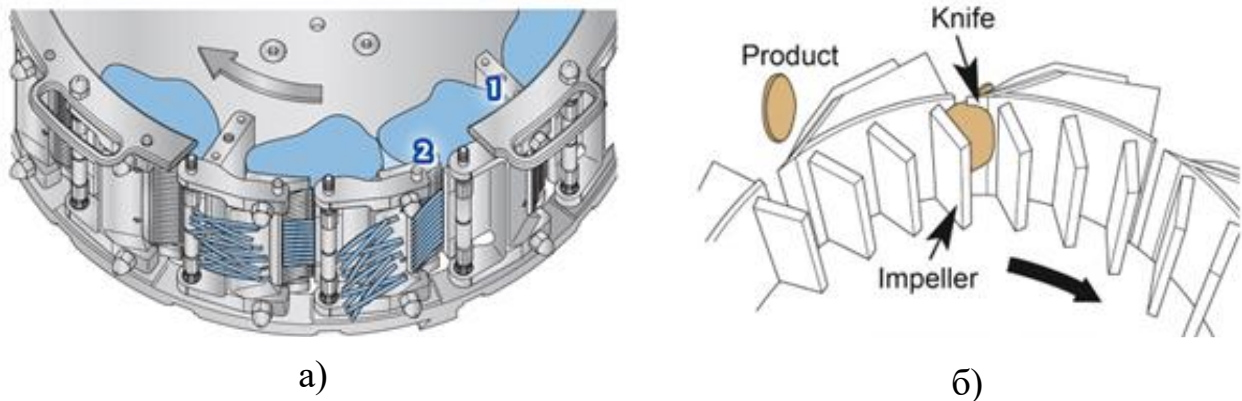


Рисунок 1.2 – Конструкція (а) та принцип дії (б) роторної різальної головки: 1 – імпелер; 2 – леза різальної головки

Відразу після завершення механічного нарізання картопляні слайси піддаються інтенсивному промиванню у проточній воді для повного видалення вільного поверхневого крохмалю, який вивільнився із зруйнованих периферичних клітин. Наявність залишків цього крохмалю є неприпустимою, оскільки під час потрапляння у гарячу фритюрну олію він миттєво клейстеризується, що неминуче призводить до злипання окремих скибочок у монолітні нерівномірно обсмажені грудки та до стрімкого забруднення теплоносія вуглецевими відкладеннями. У багатьох сучасних технологічних схемах етап промивання комбінується або повністю замінюється процесом бланшування у воді з температурою від сімдесяти до вісімдесяти п'яти градусів Цельсія. Термічне бланшування виконує комплекс важливих функцій: воно остаточно інактивує окислювальні ферменти, екстрагує надлишок водорозчинних відновлювальних цукрів, що дозволяє контролювати колір готового продукту, та сприяє попередній частковій клейстеризації крохмалю, що позитивно позначається на формуванні крихкої пористої текстури чіпсів під час смаження [1-9].

Перед транспортуванням підготовлених скибочок безпосередньо у ванну фритюрниці надзвичайно важливо здійснити максимальне видалення вільної

вологи з їхньої поверхні. Ця операція реалізується за допомогою системи високошвидкісних повітряних ножів, які здувають краплі води ламінарним потоком спрямованого повітря під високим тиском, часто у комбінації з вібраційними конвеєрами. Видалення поверхневої вологи має визначальний економічний та технологічний ефект. З теплофізичної точки зору, воно суттєво зменшує теплове навантаження на систему підігріву фритюрниці, заощаджуючи значні обсяги теплової енергії, яка інакше витрачалася б на приховану теплоту пароутворення зайвої води. З хімічної точки зору, мінімізація кількості води, що потрапляє у високотемпературну олію, суттєво уповільнює процеси гідролітичного розщеплення тригліцеридів, тим самим подовжуючи термін корисної експлуатації фритюрного жиру і знижуючи інтенсивність утворення вільних жирних кислот [1-9].

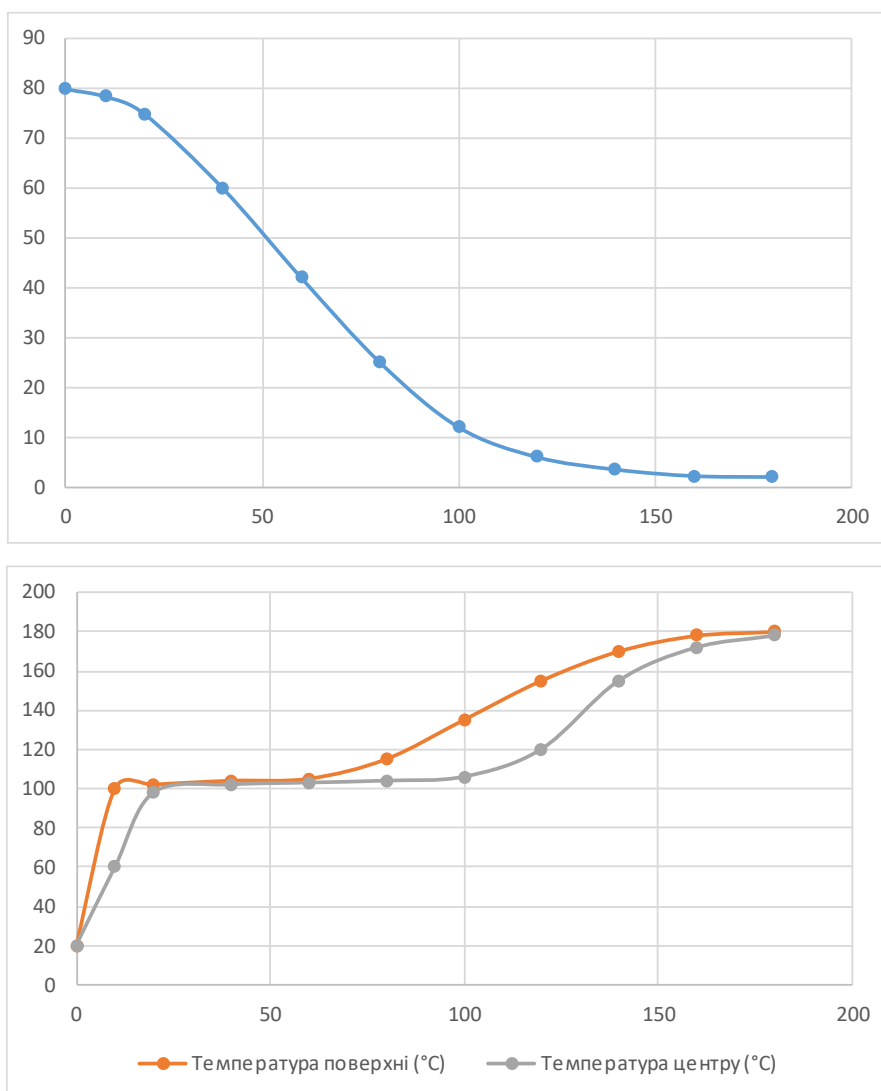


Рисунок 1.3 – Динамічні залежності вологості та температури слайсу в процесі підготовки та обсмажування

Центральним та найбільш складним етапом усього виробничого циклу є процес обсмажування слайсів у фритюрниці безперервної дії, який являє собою інтенсивний комплекс взаємопов'язаних явищ теплоперенесення та масоперенесення. Коли сира скибочка картоплі потрапляє в олію, нагріту до температури від ста сімдесяти до ста дев'яноста градусів Цельсія, на її поверхні миттєво розпочинається бурхливе об'ємне кипіння води. Утворюється суцільна парогазова сорочка, яка відіграє роль динамічного термічного опору між гарячою олією та клітинною тканиною картоплі. Передача теплоти від рідкого теплоносія до продукту здійснюється переважно шляхом конвекції крізь шар пари, а всередині самого слайсу розповсюджується шляхом теплопровідності. Інтенсивне фазове перетворення води на пару створює всередині скибочки значний надлишковий тиск, який механічно виштовхує пару назовні через мікрокапіляри та пори, що утворюються внаслідок термічного руйнування клітинної структури [2, 5].

З позиції фізико-хімічних перетворень, під час обсмажування відбувається глибока та незворотна трансформація всіх компонентів картоплі. Крохмальні гранули за наявності залишкової внутрішньої вологи та дії високої температури спочатку проходять стадію повної клейстеризації, а потім, у міру прогресуючого зневоднення, піддаються частковій термічній деградації та декстринізації. Білкові фракції денатурують, а пектинові речовини, що скріплюють клітини, розпадаються, внаслідок чого клітинні мембрани повністю втрачають свою напівпроникність та структурну цілісність. Повне зникнення тургорного тиску та випаровування води призводить до структурного колапсу рослинних тканин, внаслідок якого формується характерна жорстка, пориста та крихка матриця готового чіпса. Технологічний процес обсмажування вважається завершеним, коли залишкова вологість продукту знижується до регламентованого рівня близько двох відсотків. Саме за такої критичної вологості припиняється інтенсивне пароутворення, і слайси спливають на поверхню олії, перестаючи активно кипіти [1-9] (рис. 1.4).

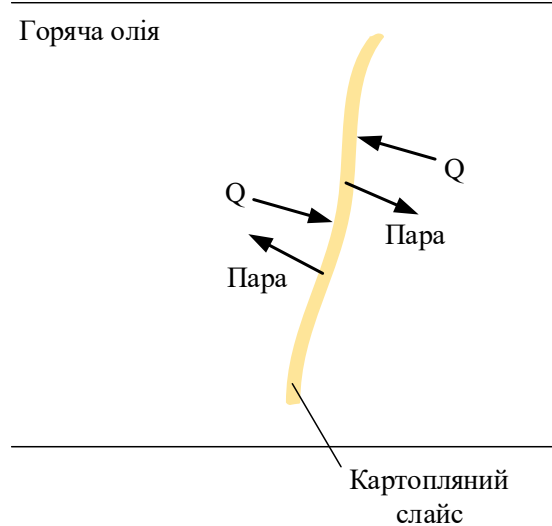


Рисунок 1.4 – Механізм тепломасообміну в картопляному слайсі під час обсмажування: Q – тепловий потік від олії

Динаміка поглинання фритюрної олії продуктом є одним із найскладніших аспектів термодинаміки процесу, який безпосередньо впливає на харчову цінність чіпсів. Всупереч інтуїтивному уявленню, переважна більшість фритюрного жиру проникає в структуру чіпса не під час його безпосереднього перебування в гарячій ванні, а в момент вилучення з неї та на початковому етапі охолодження. Поки картопляний слайс знаходиться в середовищі гарячої олії, потужний зустрічний потік водяної пари фізично перешкоджає глибокому проникненню в'язкої рідини в мікропори. Однак, як тільки продукт витягується вивантажувальним конвеєром з ванни, пароутворення різко припиняється. Водяна пара, що залишилася у внутрішніх капілярах матриці, конденсується в міру зниження температури продукту, створюючи значний капілярний вакуум. Цей перепад тиску миттєво затягує поверхневу плівку олії глибоко в пористу структуру чіпса. Тому сучасні автоматизовані лінії обов'язково оснащуються спеціальними механізмами для максимально швидкого видалення надлишків олії з поверхні гарячих чіпсів за допомогою інтенсивного обдування гарячим повітрям або застосування височастотної вібрації стрічки ще до моменту повного охолодження продукту [2, 5].

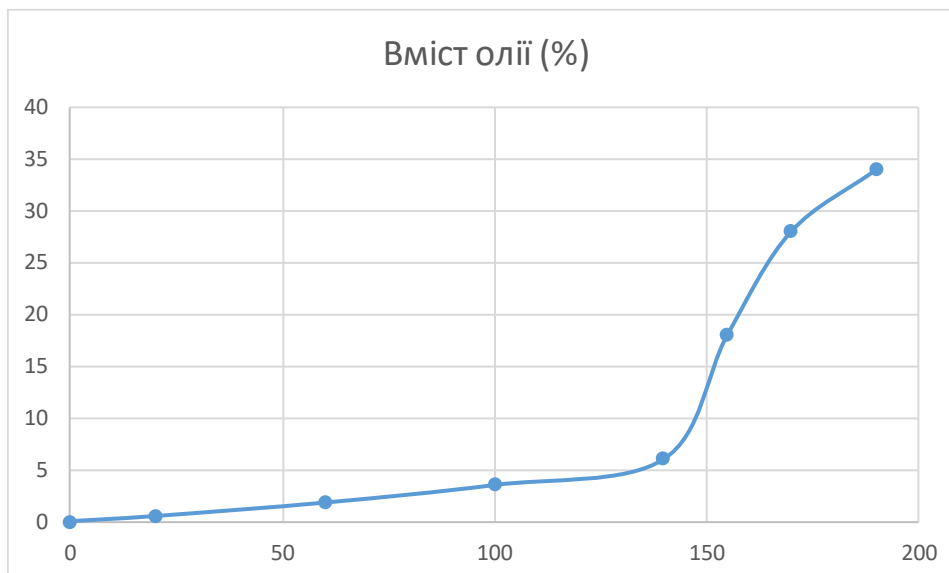


Рисунок 1.5 – Динаміка абсорбції олії залежно від фази обсмажування та охолодження

Формування специфічного кольору та унікального смако-ароматичного профілю чіпсів під час обсмажування зумовлено насамперед протіканням реакції Майяра та, меншою мірою, процесами високотемпературної карамелізації цукрів. Реакція Майяра є складним комплексом каскадних неферментативних хімічних взаємодій між вільними амінокислотами, зокрема аспарагіном, та відновлювальними цукрами за умов високих температур та низької вологості середовища. Ця реакція призводить до утворення меланоїдинів високомолекулярних полімерних сполук, які надають готовому продукту характерного привабливого золотистого кольору. Крім того, в результаті деградації за стрікером та інших супутніх вторинних реакцій синтезуються сотні летких ароматичних сполук, таких як піразини, фурани, тіофени та альдегіди, що у своїй сукупності формують впізнаваний запах смаженої картоплі. Проте реакція Майяра має і вкрай негативний аспект: за надмірно високих температур та тривалої експозиції вона призводить до утворення акриламідів — токсичної та потенційно канцерогенної речовини. З огляду на це, прецизійна оптимізація температурного профілю фритюрниці, де температура теплоносія повинна плавно знижуватися до кінця процесу, є критично важливою вимогою для забезпечення харчової безпеки [1-9].

Деградація самого фритюрного жиру є неминучим і деструктивним супутнім явищем процесу безперервного обсмажування. Під постійним агресивним впливом високих температур, води, що інтенсивно виділяється з картоплі, та кисню атмосферного повітря рослинна олія піддається процесам гідролізу, термоокислення та полімеризації. Гідролітичне розщеплення тригліцеридів за участю води призводить до утворення вільних жирних кислот, що суттєво знижує точку димлення олії, провокує піноутворення та погіршує органолептичні властивості готових чіпсів. Окислення киснем повітря викликає накопичення гідропероксидів, кетонів та альдегідів, які є безпосередньою причиною згіркнення продукту. Термічна полімеризація проявляється у збільшенні кінематичної в'язкості теплоносія та утворенні стійких темних вуглецевих відкладень на теплообмінних поверхнях обладнання, що погіршує теплопередачу. Для підтримання фізико-хімічних показників олії на технологічно прийнятному рівні, системи керування сучасних фритюрниць забезпечують безперервну циркуляцію теплоносія через зовнішні механічні фільтри, які затримують дрібні вуглецеві частинки картоплі, та здійснюють постійне автоматизоване підживлення системи свіжою олією. Коефіцієнт оновлення олії є критично важливим технологічним параметром, який гарантує, що концентрація продуктів термічної деградації не перевищить допустимих санітарних норм протягом усього циклу роботи лінії [2, 7].

На завершальному етапі апаратурно-технологічного циклу обсмажені та частково знежирені чіпси проходять стадію інтенсивного охолодження на відкритих сітчастих конвеєрах. Під час навколишнього охолодження температура продукту опускається нижче температури склування зневодненої крохмальної матриці, завдяки чому чіпси переходять із пластичного стану у крихкий, набуваючи своєї остаточної структурної жорсткості. Після досягнення температури, близької до температури навколишнього середовища, продукт подається у спеціальні обертові барабани для рівномірного нанесення сухих смако-ароматичних добавок. У цих барабанах суміш дрібнодисперсної солі, спецій та інкапсульованих ароматизаторів дозується і розподіляється по поверхні слайсів. Надійна адгезія добавок забезпечується наявністю тонкої

плівки залишкової поверхневої олії на чіпсах. Кінцевою технологічною операцією є фасування готової продукції за допомогою мультиголовкових дозаторів у герметичні пакети, виготовлені з багатошарової металізованої полімерної плівки. Пакування обов'язково здійснюється у середовищі інертного газу, найчастіше харчового азоту, що дозволяє витіснити кисень з упаковки. Створення безкисневого середовища та використання світлонепроникної бар'єрної плівки надійно запобігає окисному псуванню залишкових жирів, зберігає хрустку текстуру за рахунок недопущення сорбції вологи з повітря та гарантує збереження всіх споживчих властивостей картопляних чіпсів протягом усього заявленого гарантійного терміну зберігання [1-9].

1.2. Конструкція та гідродинаміка фритюрниці безперервної дії.

Промислова фритюрниця безперервної дії є базовим технологічним апаратом у лініях виробництва картопляних чіпсів, що конструктивно являє собою складну тепломасообмінну установку, призначену для високотемпературної обробки сировини в середовищі рідкого теплоносія (рис. 1.6). Апаратне оформлення цього процесу базується на використанні неглибокої прямокутної ванни, виготовленої з високоякісної харчової нержавіючої сталі, яка має високу корозійну стійкість до агресивного впливу вільних жирних кислот при високих температурах. Геометрія робочої ванни проектується з урахуванням мінімізації загального об'єму фритюрної олії, що знаходиться в системі, оскільки це безпосередньо впливає на швидкість її оновлення (коефіцієнт оборотності) та, відповідно, на збереження фізико-хімічних показників якості теплоносія. Дно ванни зазвичай має спеціальний V-подібний або U-подібний профіль із нахилом у бік зон вивантаження, що забезпечує ефективне накопичення та безперервне відведення важких вуглецевих осадів і залишків картопляної мезги, запобігаючи їхньому подальшому обвугленню та погіршенню смакових якостей продукту. Зовнішні поверхні ванни ретельно теплоізолюються сучасними матеріалами на основі базальтового волокна або піноскла для мінімізації втрат теплової енергії в

навколишнє середовище та забезпечення безпечних умов праці обслуговуючого персоналу [1-9].

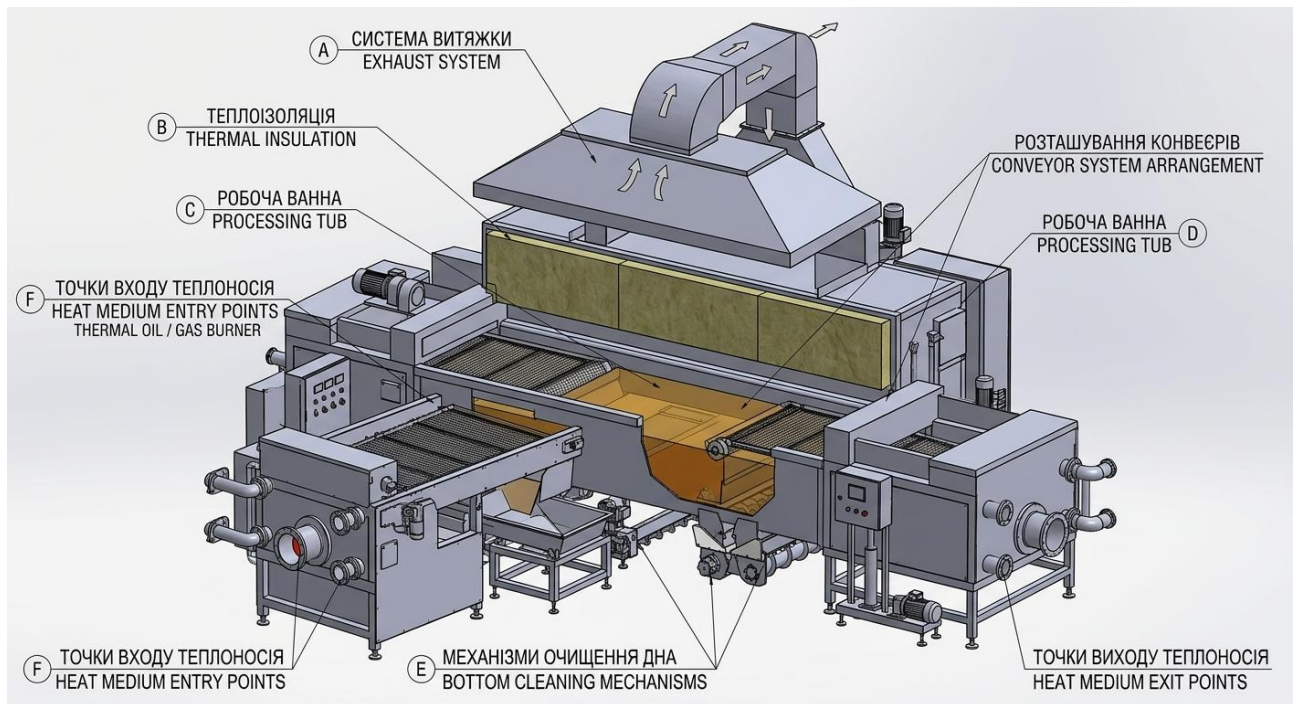


Рисунок 1.6 – Основні конструктивні елементи промислової фритюрниці безперервної дії

Транспортування картопляних слайсів крізь шар киплячої олії здійснюється за допомогою складної системи стрічкових конвеєрів, яка є критично важливою для забезпечення однакового часу перебування кожної скибочки в зоні термічної обробки. Традиційна конструкція включає два основні сітчасті конвеєри: нижній (транспортуючий) та верхній (притискний). Необхідність використання верхнього притискного конвеєра зумовлена фізикою процесу обсмажування: внаслідок інтенсивного випаровування вологи густина картопляних слайсів стрімко зменшується, і під дією виштовхувальної сили Архімеда вони неминуче спливають на поверхню олії (рис. 1.7). Якщо дозволити продукту вільно плавати, частина слайсу опиниться над рівнем теплоносія, що призведе до нерівномірного обсмажування, утворення світлих плям та невідповідності кінцевої вологості заданим нормативам. Притискний конвеєр примусово утримує продукт у зануреному стані на заданій глибині протягом усього технологічного циклу. Обидва конвеєри оснащуються індивідуальними частотно-регульованими електроприводами, що дозволяє змінювати швидкість

їхнього руху, тим самим регулюючи час експозиції продукту у фритюрі від декількох секунд до кількох хвилин залежно від сорту картоплі, товщини нарізки та необхідного ступеня зневоднення. Крім того, на вході у фритюрницю часто встановлюються спеціальні лопатеві ворухителі (роторні бітери), які забезпечують первинний розподіл сировини по всій ширині ванни та запобігають злипанню слайсів у перші секунди контакту з гарячою олією [1-9].

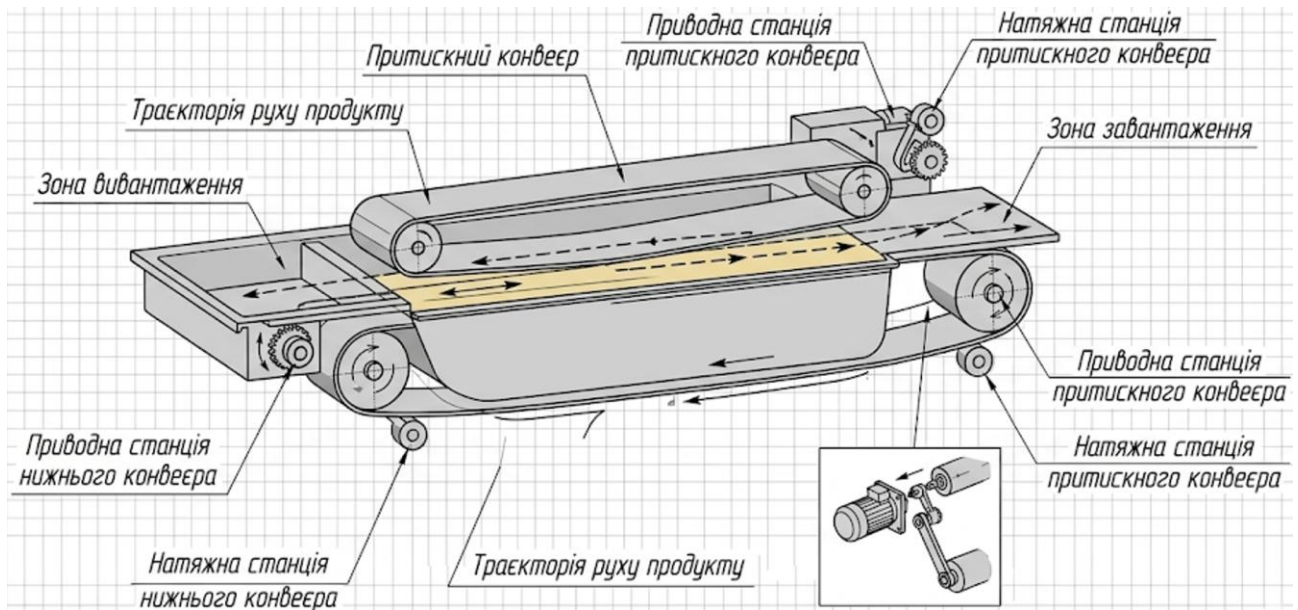


Рисунок 1.7 – Кінематична схема конвеєрної системи фритюрниці

Система циркуляції та нагрівання теплоносія є енергетичним ядром фритюрниці, від роботи якого залежить стабільність температурних режимів. У сучасних високопродуктивних лініях здебільшого використовується схема із зовнішнім теплообмінником, яка має значні переваги над системами з внутрішнім газовим або електричним нагріванням. Олія з робочої ванни безперервно відкачується високотемпературними відцентровими насосами, які спеціально сконструйовані для роботи з в'язкими рідинами при температурах до двохсот градусів Цельсія та оснащені системами охолодження торцевих ущільнень. Далі потік спрямовується через багатоступеневу систему фільтрації, яка включає сітчасті фільтри грубого очищення для вловлювання великих фрагментів картоплі та паперові або центрифужні фільтри тонкого очищення для видалення мікроскопічного вуглецевого пилу. Очищена олія подається у зовнішній теплообмінник (найчастіше трубчастого або пластинчастого типу), де

вона нагрівається до заданої температури за рахунок теплообміну з димовими газами, високотемпературною органічною рідиною (термальною олією) або гострою парою високого тиску. Використання зовнішнього теплообмінника дозволяє значно збільшити площу поверхні теплопередачі, що, у свою чергу, знижує питому теплову напруженість на поверхні нагрівальних елементів (рис. 1.8). Це критично важливо для запобігання локальному перегріву та термічній деструкції фритюрної олії на межі розділу фаз, яка неминуче виникає при прямому вогневому нагріванні дна ванни [2, 7].

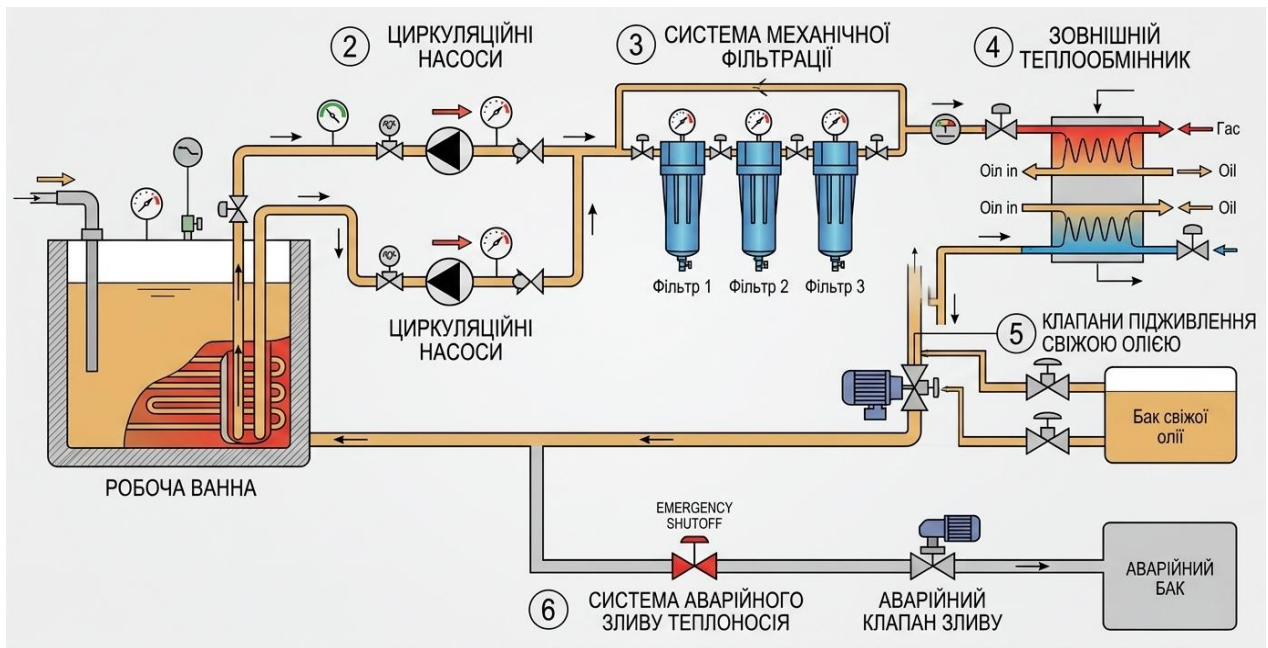


Рисунок 1.8 – Гідравлічна принципова схема циркуляції теплоносія

Гідродинаміка потоків теплоносія всередині робочої ванни фритюрниці характеризується високою складністю та багатофазністю, оскільки вона формується під впливом примусової циркуляції олії, руху конвеєрних стрічок та інтенсивного виділення водяної пари з продукту. З метою забезпечення максимального градієнта температур на початковому етапі обсмажування, де відбувається найбільше поглинання теплоти на випаровування вологи, подача гарячої олії після теплообмінника найчастіше здійснюється багатозонно за принципом прямого, рідше – протитоку або перехресного струму. Прямоточна схема, при якій максимальний потік гарячої олії подається безпосередньо в зону завантаження сирого продукту, дозволяє миттєво компенсувати теплове навантаження і запобігти різкому падінню температури теплоносія, що могло б

привести до надмірного вбирання жиру картоплею. Розподільні колектори з системою каліброваних сопел формують ламінарний або слабо турбулентний профіль швидкості потоку по всій ширині ванни. Забезпечення рівномірності гідродинамічного профілю є надзвичайно важливим, оскільки наявність застійних зон або каналування потоку призводить до різної інтенсивності теплообміну в різних ділянках ванни, що є прямою причиною нестабільності кольору та вологості випущеної партії чіпсів [1-9].

Таблиця 1.2 – Ключові гідродинамічні та теплофізичні параметри процесу обсмажування

Параметр	Символ / Формула	Типове значення (діапазон)	Одиниця виміру
Середня швидкість потоку олії	v	0.15...0.45	м/с
Число Рейнольдса (режим течії)	$Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu}$	2.000...10.000 (перехідний/турбулентний)	—
Число Прандтля (властивості олії)	$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$	40...60 (при 170...180 °C)	—
Коефіцієнт тепловіддачі	α	250...600	Вт/(м ² ·К)
Температура обсмажування	T	165–185	°C
Питома витрата олії	M_{oil}	300...350	кг/т готової продукції

Значний вплив на гідродинамічну картину створює процес пароутворення, який перетворює однофазний потік рідкої олії на складну двофазну систему "рідина-газ" (рис. 1.9). Водяна пара, що бурхливо виділяється з картопляних слайсів у вигляді бульбашок різного діаметру, суттєво змінює локальну густину та ефективну кінематичну в'язкість середовища. Рух парових бульбашок вгору під дією підйімальної сили генерує інтенсивну мікротурбулентність у примежовому шарі навколо кожної скибочки, що значно інтенсифікує конвективний теплообмін, підвищуючи значення критерію Нуссельта (Nu). Однак надмірна турбулізація потоку в зоні завантаження може призвести до механічного пошкодження делікатних сирих слайсів та їхнього

заплутування у ланках конвеєрної сітки. У міру просування продукту до зони вивантаження інтенсивність пароутворення експоненціально знижується, потік стає більш ламінарним, а гідродинамічний опір системи зменшується. Система керування повинна враховувати цю динаміку, підтримуючи такий рівень олії та швидкість циркуляції, щоб забезпечити безперервне змивання продукту свіжими порціями теплоносія без утворення зон локального кипіння самої олії [2, 5, 7].

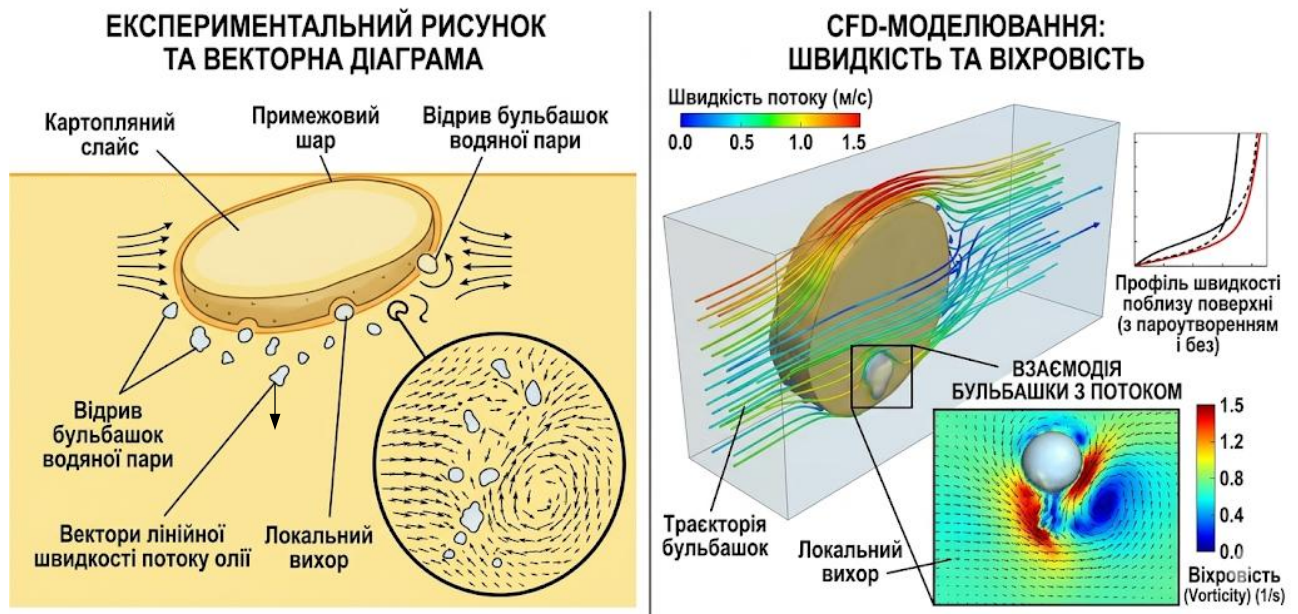


Рисунок 1.9 – Вплив пароутворення на локальну гідродинаміку примежового шару

Для відведення колосальних обсягів водяної пари, що утворюється під час процесу, а також летких продуктів деградації олії та специфічних запахів, над робочою ванною встановлюється герметичний витяжний зонт. Аеродинаміка простору під зонтом також відіграє вагомую роль у загальній ефективності установки. Витяжна система оснащується потужними витяжними вентиляторами та краплевловлювачами (демістерами), які відокремлюють краплі олії від парогазової суміші і повертають їх назад у ванну, що суттєво знижує незворотні втрати теплоносія. Важливим конструктивним завданням є запобігання конденсації вологи на внутрішніх поверхнях витяжного зонта і її зворотного потрапляння у киплячу олію, оскільки краплі води викликають небезпечне розбризкування жиру та прискорюють його гідроліз. Для цього стінки зонта теплоізолюються, а в деяких випадках додатково підігріваються.

Крім того, підтримання незначного розрідження під зонтом запобігає витоку пари у виробниче приміщення і створює своєрідну парову подушку безпосередньо над дзеркалом олії, яка обмежує доступ атмосферного кисню до гарячого теплоносія, тим самим значно уповільнюючи процеси його окислення [1-9].

Таким чином, конструкція та гідродинамічні характеристики промислової фритюрниці формують складний об'єкт керування з розподіленими параметрами, значною інерційністю та нелінійною динамікою. Розуміння гідравлічних процесів циркуляції теплоносія, механіки транспортування продукту та теплофізики двофазних потоків є фундаментальною базою для подальшої розробки адекватної математичної моделі даного апарата. Синтез комп'ютерно-інтегрованої системи керування вимагає врахування впливу гідродинамічних збурень на температурний профіль об'єкта, що обумовлює необхідність застосування надійних промислових контролерів та прецизійних датчиків для безперервного моніторингу швидкості стрічок, витрати олії в циркуляційних контурах та температур по зонах нагрівання [2].

1.3. Аналіз технологічних параметрів процесу обсмажування як об'єктів автоматизації.

Процес обсмажування картопляних чіпсів у промисловій фритюрниці безперервної дії з позиції теорії автоматичного керування являє собою складний багатовимірний об'єкт із розподіленими в просторі та часі параметрами, значним часом транспортного запізнення та суттєвою нелінійністю динамічних характеристик (рис. 1.10). Для забезпечення випуску продукції стабільно високої якості та оптимізації витрат енергоресурсів необхідно здійснювати безперервний моніторинг та прецизійне регулювання низки технологічних змінних. Розробка ефективної комп'ютерно-інтегрованої системи керування на базі програмованих логічних контролерів вимагає ґрунтовного розуміння фізичної природи об'єкта, ідентифікації ключових керованих величин та визначення характеру впливу керуючих і збурюючих впливів на перебіг тепломасообмінних процесів. Головними параметрами, що підлягають жорсткій автоматичній стабілізації, є

профіль температури олії по зонах фритюрниці, швидкість руху транспортуючих конвеєрів та рівень рідкого теплоносія в робочій ванні [1-9].

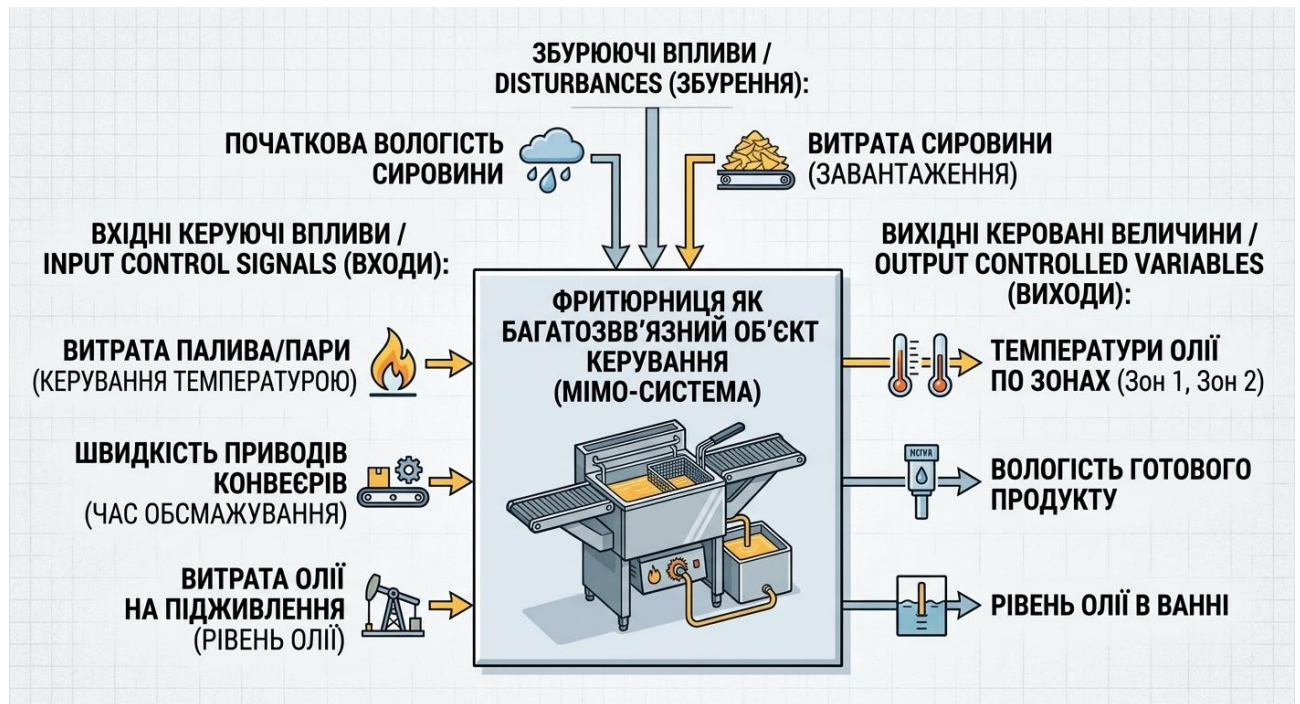


Рисунок 1.10 – Структурна схема фритюрниці як багатозв'язного об'єкта керування

Найважливішим технологічним параметром, який безпосередньо визначає кінетику фізико-хімічних перетворень у продукті та інтенсивність деградації самого теплоносія, є температурний режим фритюрної олії (табл. 1.3). Через значну довжину робочої ванни та нерівномірність теплового навантаження вздовж неї, промислові фритюрниці умовно поділяються на декілька температурних зон (найчастіше від трьох до п'яти), кожна з яких вимагає індивідуального контуру регулювання. У першій зоні, куди надходить сирий і вологий продукт, відбувається колосальне поглинання теплової енергії, необхідної для подолання прихованої теплоти пароутворення води. Відповідно, ця зона характеризується найбільшим градієнтом температур та найвищим ризиком різкого просідання температури теплоносія. Якщо система автоматики не здатна миттєво компенсувати це теплове збурення шляхом збільшення подачі теплоносія із зовнішнього теплообмінника, температура олії впаде нижче критичної позначки, що призведе до порушення механізму пароутворення. Як

наслідок, гідродинамічний бар'єр зустрічної пари послабшає, і продукт абсорбує надмірну кількість жиру ще на початковій стадії, що є незворотним дефектом [2].

Таблиця 1.3 – Регламентовані значення температур по зонах фритюрниці та допустимі відхилення

Назва технологічної зони	Номінальна температура, °C	Допустиме відхилення, $\pm$ °C	Функціональне призначення зони
Зона завантаження (Вхідна секція)	185	1.5...2.0	Компенсація падіння температури при контакті з холодною сировиною, швидке випаровування поверхневої вологи.
Основна зона (Зона активного обсмажування)	175	1.0	Інтенсивна теплопередача, формування структури чіпсів та витіснення внутрішньої вологи.
Зона вивантаження (Фінішна секція)	160	0.5...1.0	Фінальне висушування без пригорання, стабілізація кольору та підготовка до видалення надлишків олії.

На наступних етапах просування слайсів вздовж ванни, у середніх та кінцевих зонах, інтенсивність випаровування вологи експоненціально знижується, а теплофізичні властивості продукту суттєво змінюються. У цих зонах ключовим завданням системи автоматичного керування є підтримання такого температурного профілю, який би забезпечив оптимальний перебіг реакції Майяра без ризику термічного обуглювання тонких країв чіпсів (рис. 1.11). Занадто висока температура у вивантажувальній зоні призводить до інтенсивного потемніння продукту, появи гіркого присмаку та, що найнебезпечніше, до експоненціального зростання концентрації канцерогенного акриламідю. Навпаки, занижена температура не дозволить досягти необхідної кінцевої вологості на рівні двох відсотків та не забезпечить формування хрусткої текстури. Отже, прецизійне каскадне регулювання температур по зонах із використанням сучасних алгоритмів керування є критичною умовою отримання якісного продукту та збереження ресурсу фритюрної олії [1-9].

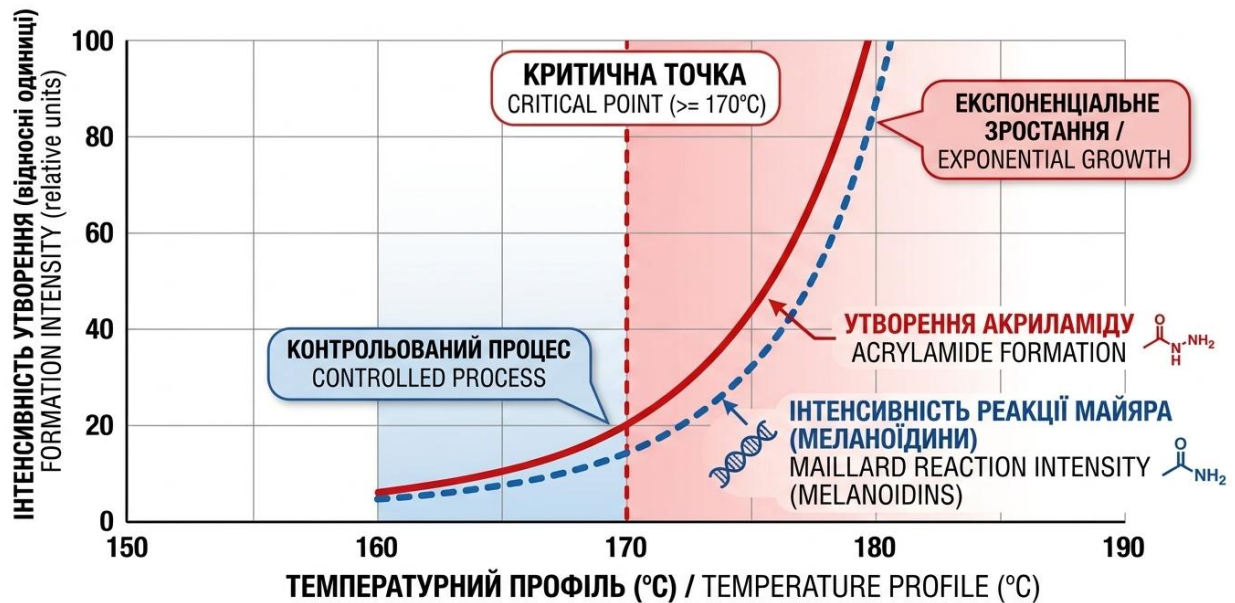


Рисунок 1.11 – Графік залежності інтенсивності реакції Майяра та утворення акриламідів від температурного профілю

Другим за значущістю керуючим впливом, що підлягає автоматизації, є швидкість руху транспортуючих конвеєрних стрічок. Цей кінематичний параметр безпосередньо визначає час перебування продукту в зоні термічної обробки (час експозиції). Оскільки фізична довжина робочої ванни є незмінною конструктивною величиною, єдиним способом адаптації процесу до змінних характеристик сировини (таких як сорт картоплі, початкова вологість або товщина нарізки) є зміна швидкості приводів. Збільшення швидкості конвеєра скорочує час обсмажування, що може призвести до недосмажування продукту, підвищеної залишкової вологості та "гумової" текстури. Зменшення швидкості, навпаки, збільшує час експозиції, пересушує продукт і призводить до втрати маси та погіршення кольорових характеристик. Керування електроприводами конвеєрів повинно здійснюватися за допомогою надійних перетворювачів частоти, інтегрованих у загальну промислову мережу підприємства, що дозволяє синхронізувати швидкості подавального, занурювального та вивантажувального транспортерів [2, 5, 7].

З позиції теорії автоматичного керування, швидкість конвеєра та температура теплоносія є глибоко взаємопов'язаними параметрами, що формують так звану перехресну взаємодію в багатозв'язній системі. Підвищення

вологості вхідної сировини діє як потужне неконтрольоване збурення (рис. 1.12). Для компенсації цього збурення система керування має два шляхи: або підвищити температуру теплоносія, що може негативно вплинути на якість олії та викликати утворення канцерогенів, або пропорційно знизити швидкість конвеєра, збільшивши час випаровування вологи. Вибір оптимальної стратегії керування в таких умовах покладається на програмно-апаратний комплекс логічного контролера, який повинен розраховувати оптимальне співвідношення цих параметрів на основі закладених математичних моделей процесу та обмежень, продиктованих технологічним регламентом [1-9].

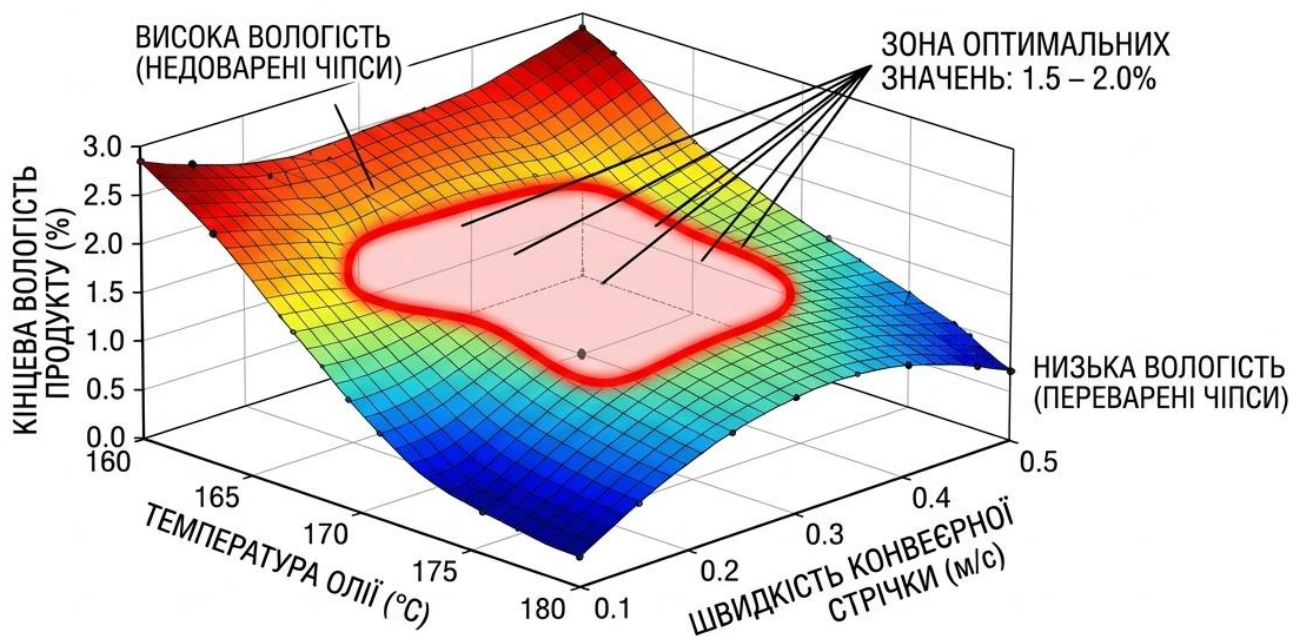


Рисунок 1.12 – Поверхня відгуку: вплив швидкості конвеєра та температури олії на кінцеву вологість чіпсів

Не менш важливим параметром, який потребує жорсткої стабілізації, є рівень рідкого теплоносія в робочій ванні фритюрниці. Гідродинамічний рівень олії визначає загальний об'єм теплоносія в системі і, як наслідок, її загальну теплову інерційність. Зниження рівня олії призводить до зменшення теплоємності системи, що робить її більш вразливою до температурних коливань при зміні обсягів подачі сировини (виникає ефект автоколивань температури). Крім того, при критичному зниженні рівня олії оголюються ланки притискного конвеєра, що призводить до порушення занурення продукту та його

нерівномірного обсмажування в середовищі киснево-парової суміші. З іншого боку, надмірне підвищення рівня олії збільшує гідростатичний тиск у системі, створює загрозу переливання гарячого теплоносія через борти ванни під час бурхливого спінювання, що є грубим порушенням правил техніки безпеки та пожежної безпеки на виробництві [2-5].

З хімічної точки зору, підтримання стабільно мінімально необхідного рівня олії є ключем до збереження її якості (рис. 1.13). Об'єм олії у ванні визначає такий критичний показник, як коефіцієнт оборотності або час повного оновлення жиру. Під час процесу обсмажування частина олії безповоротно виноситься разом із готовим продуктом (абсорбція). Для компенсації цих втрат та підтримання заданого рівня система автоматики безперервно дозує свіжу олію з видаткових ємностей. Якщо загальний об'єм олії у ванні є надмірно великим, відсоток її оновлення буде низьким, що призведе до швидкого накопичення продуктів термічного розпаду, вільних жирних кислот та полімерів, скорочуючи життєвий цикл теплоносія. Відповідно, завданням контуру автоматичного регулювання рівня є підтримання точного балансу між масою олії, що виноситься продуктом, та масою олії, що додається на підживлення, з урахуванням температурного розширення рідини [1-9].

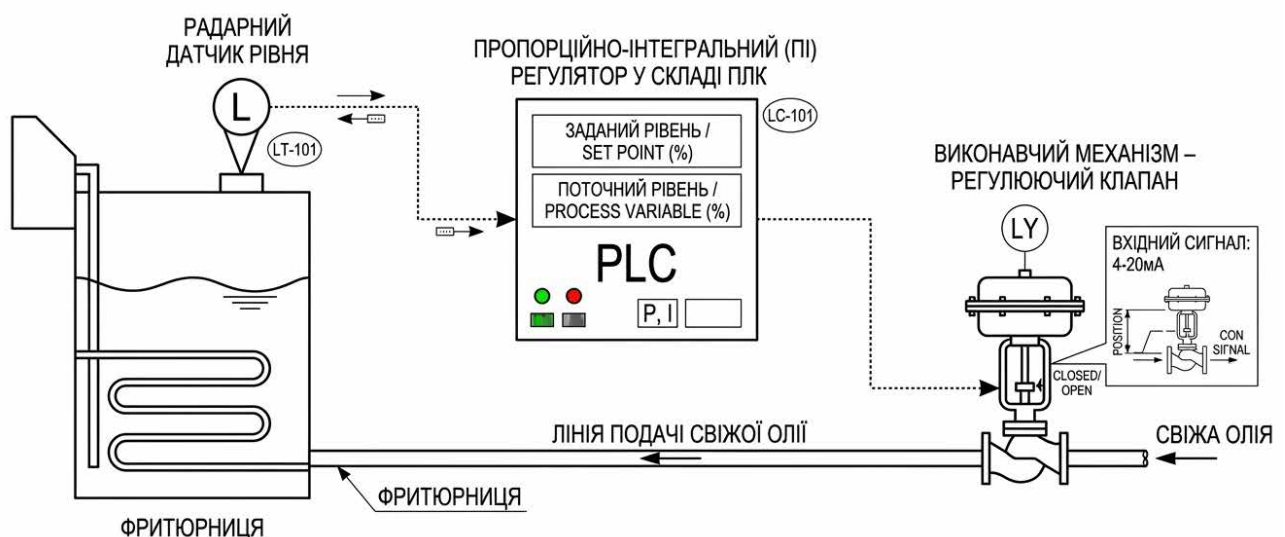


Рисунок 1.13 – Функціональна схема контуру автоматичного регулювання рівня олії у фритюрниці

Комплексний аналіз технологічних параметрів фритюрниці переконливо доводить, що даний апарат є надзвичайно складним об'єктом для автоматизації. Температура, швидкість транспортування та рівень олії не є ізольованими величинами; зміна будь-якого з цих параметрів неминуче викликає каскадну зміну інших. Збільшення швидкості конвеєра для підвищення продуктивності лінії миттєво збільшує обсяг вологи, що вноситься у ванну, що призводить до падіння температури та збільшення витрати олії на абсорбцію, що, в свою чергу, викликає спрацювання контуру регулювання рівня і подачу порції холодної свіжої олії, що ще більше знижує загальну температуру. Такий високий ступінь взаємовпливу параметрів унеможлиблює використання розрізнених локальних регуляторів і вимагає застосування високопродуктивних програмованих логічних контролерів (MELSEC від компанії Mitsubishi Electric). Використання сучасних ПЛК дозволяє реалізувати складні алгоритми керування з прогнозуванням, декупелюванням (компенсацією перехресних зв'язків) та адаптивним підлаштуванням коефіцієнтів, що гарантує стабільність технологічного процесу та незмінно високу якість вироблених картопляних чіпсів [2].

РОЗДІЛ 2.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

2.1. Розробка математичної моделі об'єкта керування.

Розробка адекватної математичної моделі чистого об'єкта керування є фундаментальним етапом синтезу комп'ютерно-інтегрованої системи, який дозволяє формалізувати складні динамічні властивості промислової фритюрниці та обґрунтовано підійти до налаштування регуляторів на базі програмованих логічних контролерів. Процес термічної обробки картопляних слайсів у фритюрі належить до класу складних багатофазних процесів із розподіленими параметрами, де одночасно протікають інтенсивні явища теплопереносу та масопереносу, що супроводжуються фазовими перетвореннями води та структурними змінами полімерної матриці крохмалю. Для всебічного розуміння фізики процесу необхідно спочатку розглянути мікроскопічну модель тепломасообміну на рівні окремого картопляного слайсу, яка базується на фундаментальних диференціальних рівняннях у частинних похідних. Теплообмін усередині твердої фази картопляного слайсу описується нестационарним диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є, яке враховує внутрішні стоки теплоти, пов'язані з ендотермічним процесом випаровування вологи (рис. 2.1). У загальному вигляді це рівняння записується як:

$$\rho_c \cdot c_c \cdot \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_c \cdot \nabla T(x,y,z,t)) - Q_v, \quad (2.1)$$

де $T(x, y, z, t)$ – просторово-часовий розподіл температури в слайсі;

ρ_c – густина продукту (слайсу картоплі);

c_c – питому теплоємність продукту (слайсу картоплі);

λ_c – ефективний коефіцієнт теплопровідності;

Q_v – об'ємна потужність внутрішніх стоків теплоти, витраченої на фазовий перехід води у пару.

Рівняння масообміну, що описує міграцію вологи з внутрішніх шарів до поверхні (рис. 2.2), базується на другому законі Фіка для нестационарної дифузії і набуває вигляду:

$$\frac{\partial M(x,y,z,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff} \cdot \nabla M(x,y,z,t)), \quad (2.2)$$

де $M(x, y, z, t)$ – локальна вологість матеріалу;

D_{eff} – ефективний коефіцієнт дифузії вологи.

Ефективний коефіцієнт дифузії вологи є нелінійним параметром і залежить від локальної температури та поточної вологості структури [1-9].

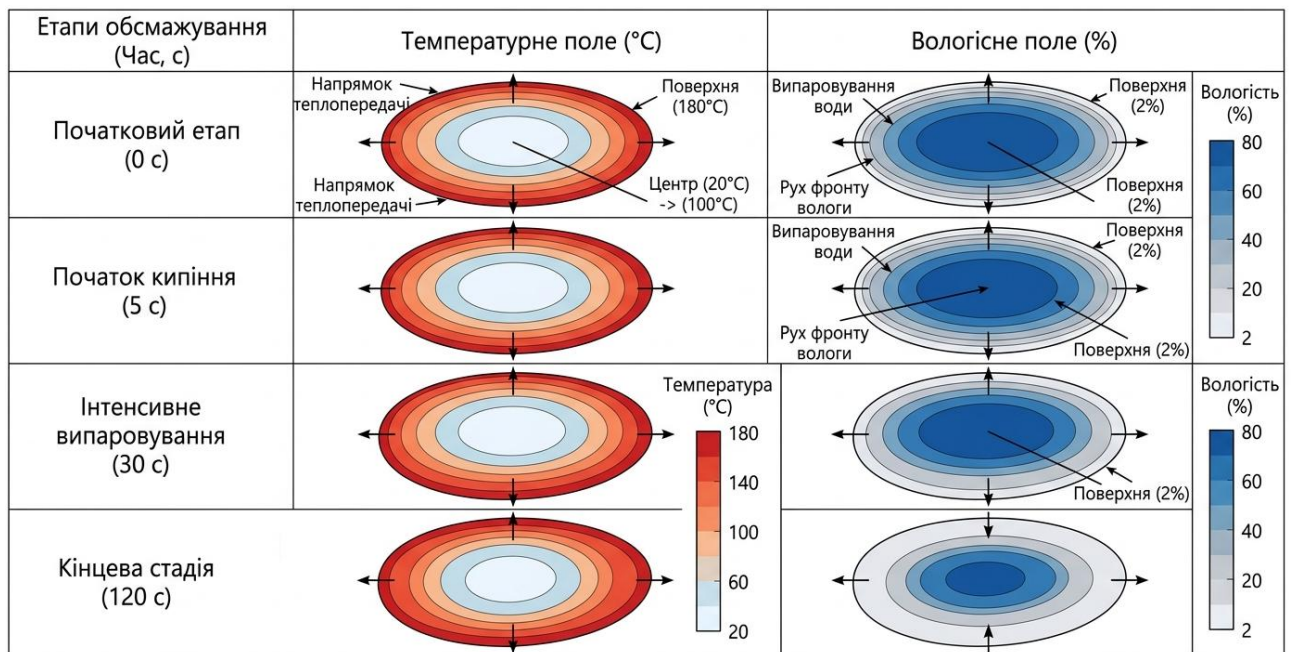


Рисунок 2.1 – Розподіл температурного та вологісного полів усередині картопляного слайсу під час обсмажування

Граничні умови для наведеної системи диференціальних рівнянь визначаються конвективним тепломасообміном на межі розділу фаз "поверхня картоплі – кипляча олія". Тепловий потік на поверхні слайсу описується законом Ньютона-Ріхмана та дорівнює:

$$q = \alpha (T_{oil} - T_{surf}), \quad (2.3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі;

T_{oil} – температура теплоносія;

T_{surf} – температура поверхні продукту.

Для забезпечення якісного обсмажування картопляних слайсів необхідно точно підтримувати цілий ряд технологічних параметрів, що виступають граничними та початковими умовами в наведеній моделі (табл. 2.1). До таких параметрів належить початкова температура олії на вході в апарат, яка має становити від 180 до 190 °С для миттєвого формування парової подушки, профіль температур по зонах для керування реакцією Майяра, а також час експозиції (залежить від швидкості конвеєра), який повинен забезпечити зниження інтегральної середньої вологості слайсу від вісімдесяти відсотків до цільових значень на рівні півтора-двох відсотків [2]. Забезпечення цих параметрів гарантує повну клейстеризацію крохмалю, формування мікропористої структури без надмірної абсорбції фритюрного жиру та оптимальний золотистий колір без утворення канцерогенних сполук.

Таблиця 2.1 – Теплофізичні параметри картопляного слайсу та фритюрної олії для математичного моделювання

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Картопля (сир)	Картопля (обсмажена)	Фритюрна олія (180°C)
Густина	ρ	кг/м ³	1050...1100	450...600	800...840
Питома теплоємність	c_p	кДж/(кг·К)	3.45...3.70	1.80...2.20	2.15...2.35
Теплопровідність	λ	Вт/(м·К)	0.52...0.58	0.12...0.18	0.13...0.15
Ефективний коефіцієнт дифузії води	D_{eff}	м ² /с	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$8.5 \cdot 10^{-9}$	—
Кінематична в'язкість	ν	м ² /с	—	—	$3.2 \cdot 10^{-6}$
Динамічна в'язкість	μ	Па·с	—	—	$2.6 \cdot 10^{-3}$

Незважаючи на високу точність та фізичну адекватність мікроскопічної моделі з розподіленими параметрами, її пряме використання для синтезу алгоритмів керування в промислових програмованих логічних контролерах є неможливим через надзвичайну обчислювальну складність та нескінченновимірність відповідних передатних функцій. Для цілей теорії автоматичного керування необхідний перехід від загальної мікроскопічної

моделі до макроскопічних моделей із зосередженими параметрами, що описують динаміку усереднених показників усього апарата. Цей перехід здійснюється шляхом просторового інтегрування диференціальних рівнянь по всьому об'єму робочої ванни фритюрниці (метод зосереджених ємностей). У результаті такого спрощення складна система рівнянь у частинних похідних трансформується у набір звичайних диференціальних рівнянь, які пов'язують макроскопічні вхідні впливи (витрату електричної енергії, швидкість руху конвеєра) з вихідними керованими координатами (усередненою температурою олії по зонах, середньою кінцевою вологістю випущеної партії чіпсів) (рис. 2.2). Такий підхід дозволяє отримати лінеаризовані передатні функції, що є основою для подальшого розрахунку налаштувань ПД-регуляторів [10-12].

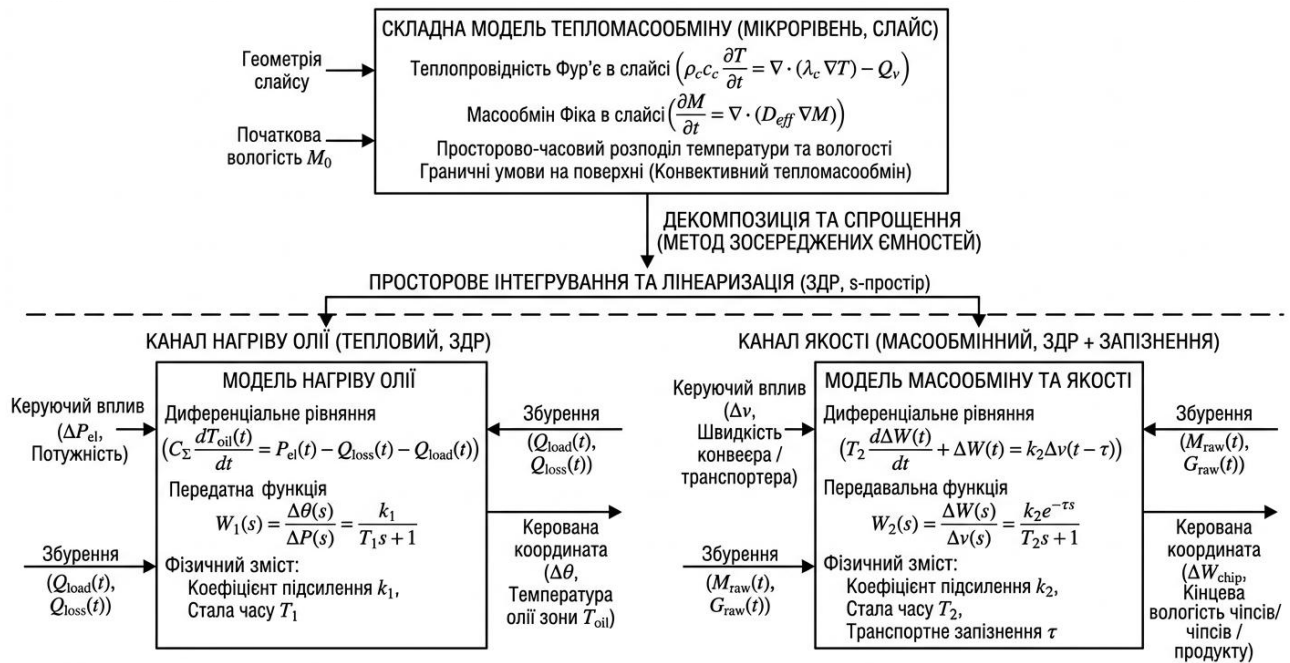


Рисунок 2.2 – Структурна схема декомпозиції складної моделі тепломасообміну на макроскопічні канали керування

Процес ідентифікації об'єкта та отримання передатної функції фритюрниці за каналом впливу витрати електричної енергії на температуру фритюрної олії базується на складанні рівняння динамічного теплового балансу для робочої ванни. Приймаючи допущення про ідеальне перемішування теплоносія в межах однієї температурної зони, швидкість зміни внутрішньої ентальпії системи визначається різницею між підведеною електричною потужністю та сумою всіх

теплових втрат. Звичайне диференціальне рівняння теплового балансу записується як:

$$C_{\Sigma} \cdot \frac{T_{oil}(t)}{dt} = P_{el}(t) - Q_{loss}(t) - Q_{load}(t), \quad (2.4)$$

де C_{Σ} – сумарна теплоємність зони (включає масу олії та металоконструкцій);

$T_{oil}(t)$ – поточна температура теплоносія;

$P_{el}(t)$ – підведена корисна електрична потужність;

$Q_{loss}(t)$ – втрати теплоти в навколишнє середовище через теплоізоляцію;

$Q_{load}(t)$ – теплове навантаження від продукту, що обсмажується.

Переходячи до відхилень змінних від їхніх стаціонарних номінальних значень (позначаючи відхилення символом Δ) та виконуючи лінеаризацію нелінійних доданків у малому околі робочої точки, отримуємо диференціальне рівняння першого порядку:

$$T_1 \cdot \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) = k_1 \cdot \Delta P(t). \quad (2.5)$$

Застосувавши до цього лінійного рівняння пряме перетворення Лапласа за нульових початкових умов, одержуємо шукану передатну функцію чистого об'єкта за тепловим каналом у вигляді аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_1(s) = \frac{\Delta\theta(s)}{\Delta P(s)} = \frac{k_1}{T_1 \cdot s + 1}, \quad (2.6)$$

де s – комплексна змінна Лапласа.

Фізичний зміст параметрів отриманої передатної функції $W_1(s)$ є ключовим для розуміння динаміки процесу нагрівання. Коефіцієнт підсилення об'єкта k_1 характеризує його статичну чутливість і показує, на скільки градусів зміниться усталене значення температури олії при стрибкоподібній зміні підведеної електричної потужності на один кіловат. Значення цього коефіцієнта обернено пропорційне загальному термічному опору системи, тому використання ефективної теплоізоляції апарата призводить до збільшення коефіцієнта підсилення. Стала часу T_1 відображає теплову інерційність фритюрниці і дорівнює часу, за який температура олії досягає 63.2 % від свого нового усталеного значення після прикладання ступінчастого впливу. З фізичної точки зору, стала часу прямо пропорційна загальній акумулюючій теплоємності

системи (величезній масі фритюрної олії) та обернено пропорційна інтенсивності тепловіддачі. Значна маса теплоносія у промислових лініях зумовлює дуже великі значення сталої часу (часто десятки хвилин), що робить тепловий канал керування надзвичайно інерційним та вимагає застосування ПІД-регуляторів із великими значеннями часу інтегрування [10-12].

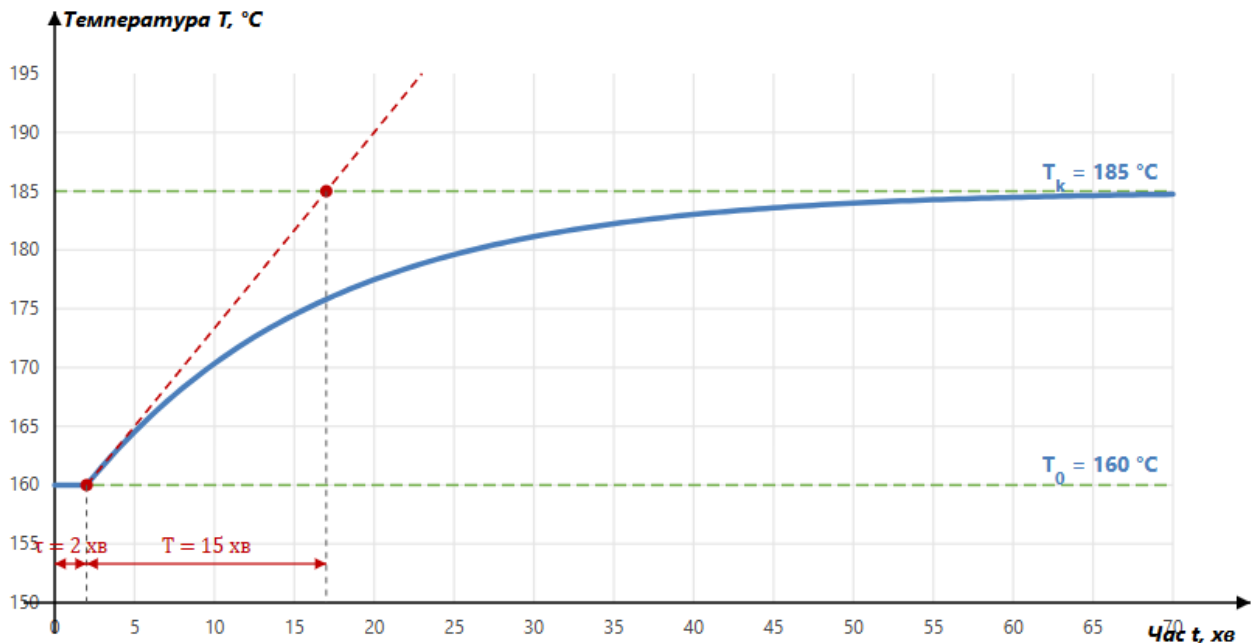


Рисунок 2.3 – Крива розгону фритюрниці за каналом температури олії при стрибкоподібній зміні потужності

Другим, не менш важливим каналом керування є вплив швидкості руху конвеєрної стрічки на кінцеву якість картопляних чіпсів, яка формалізується через показник їхньої залишкової вологості на виході з апарата. Динаміка масообміну в цьому випадку тісно пов'язана з часом перебування (експозиції) картопляного слайсу в зоні термічної обробки, який розраховується як відношення довжини робочої зони фритюрниці L до лінійної швидкості руху конвеєра v . Зміна швидкості стрічки викликає зміну кінцевої вологості не миттєво, а з певним неминучим транспортним запізненням, яке зумовлене часом фізичного переміщення продукту від точки завантаження до вимірювального датчика вологості на розвантажувальному конвеєрі (рис. 2.4).

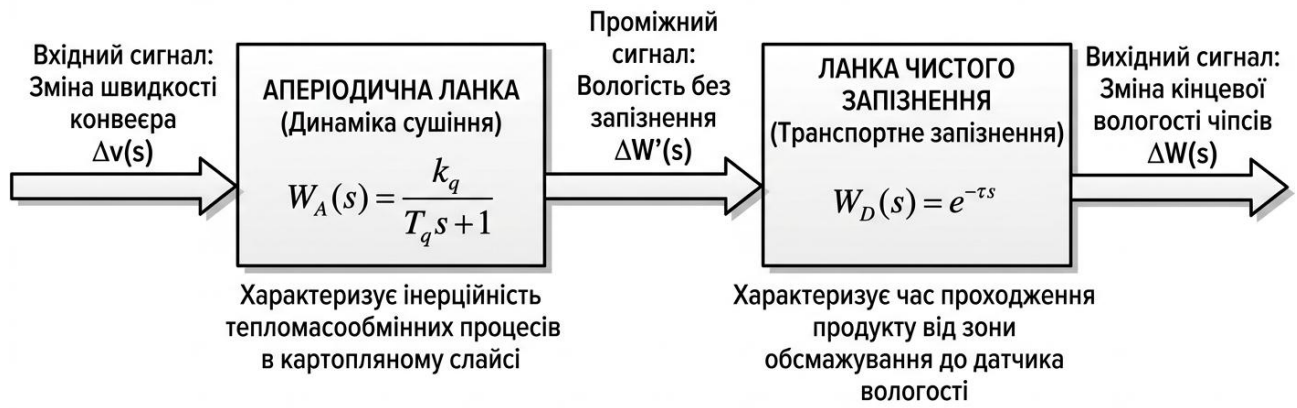


Рисунок 2.4 – Структурна схема математичної моделі процесу обсмажування із чистим запізненням за каналом якості: $\Delta v(s)$ – зміна швидкості транспортеру; $\Delta W(s)$ – зміна вологості; k_q – коефіцієнт підсилення; T_q – стала часу сушіння; τ – час транспортного запізнення

З огляду на усереднену кінетику сушіння рослинної тканини у першому наближенні, макроскопічне диференціальне рівняння масообміну для відхилень параметрів набуває вигляду:

$$T_2 \cdot \frac{d\Delta W(t)}{dt} + \Delta W(t) = k_2 \cdot \Delta v(t - \tau), \quad (2.7)$$

де $\Delta W(t)$ – відхилення кінцевої залишкової вологості чіпсів від регламентованої норми;

$\Delta v(t)$ – лінійна швидкість конвеєра;

τ – чисте транспортне запізнення об'єкта [10-12].

Здійснивши перехід до простору зображень за Лапласом, отримуємо передатну функцію фритюрниці за каналом масообміну та якості, яка являє собою аперіодичну ланку першого порядку, послідовно з'єднану з ланкою чистого запізнення:

$$W_2(s) = \frac{\Delta W(s)}{\Delta v(s)} = \frac{k_2 \cdot e^{-\tau \cdot s}}{T_2 \cdot s + 1}. \quad (2.8)$$

Наявність експоненціального множника, що відображає запізнення τ , суттєво ускладнює подальший синтез класичної автоматичної системи регулювання та обмежує гранично допустимий коефіцієнт підсилення регулятора за умовою стійкості.

Параметри передатної функції за каналом якості також мають чітко виражений фізичний зміст, що відображає інтегральну кінетику дегідратації картоплі. Коефіцієнт підсилення k_2 виступає статичним показником масообміну і вказує на зміну відсотка залишкової вологості чіпсів при одиничній зміні лінійної швидкості конвеєра в усталеному режимі. Оскільки збільшення швидкості скорочує час обсмажування і, відповідно, не дозволяє волозі повністю випаруватися, цей коефіцієнт завжди має додатне значення в системі координат відхилень (швидше транспортується – вологіший продукт отримується). Стала часу T_2 характеризує інерційність процесів внутрішньої вологопровідності та дифузії в межах усієї маси продукту, тобто описує тривалість перехідного процесу стабілізації вологості на виході при різкій зміні швидкості стрічки. Значення транспортного запізнення τ безпосередньо залежить від фізичної довжини робочої ванни фритюрниці та поточного діапазону робочих швидкостей (v_0), тобто $\tau \approx \frac{L}{v_0}$. Ця залежність робить параметр запізнення нестационарним, що значно ускладнює налаштування класичного ПД-регулятора і вимагає застосування в ПЛК спеціалізованих алгоритмів керування, таких як предиктор Сміта або алгоритми нечіткої логіки, для забезпечення необхідних показників якості керування високодинамічним технологічним процесом [10-14].

2.2. Розробка функціональної схеми автоматизації.

Наступним етапом проектування комп'ютерно-інтегрованої системи керування фритюрниці безперервної дії є розробка функціональної схеми автоматизації (ФСА), яка визначає склад технічних засобів, структуру взаємозв'язків між технологічним обладнанням та засобами автоматизації, а також обсяг контролю та регулювання параметрів. Архітектура системи будується за ієрархічним принципом, де нижній рівень представлений первинними вимірювальними перетворювачами та виконавчими механізмами, середній рівень базується на високопродуктивному програмованому логічному контролері (ПЛК), а верхній рівень забезпечує людино-машинний інтерфейс

(HMI) для оперативного моніторингу та корекції уставок. Враховуючи високу інерційність та багатозв'язність об'єкта, функціональна схема передбачає децентралізоване регулювання ключових змінних із можливістю координації їхніх значень через програмне забезпечення контролера (рис. 2.5). Основним завданням автоматизації є стабілізація теплового та масообмінного режимів для забезпечення нормативної вологості та вмісту жиру в готовому продукті при мінімізації енерговитрат та термічної деградації олії (табл. 2.2).

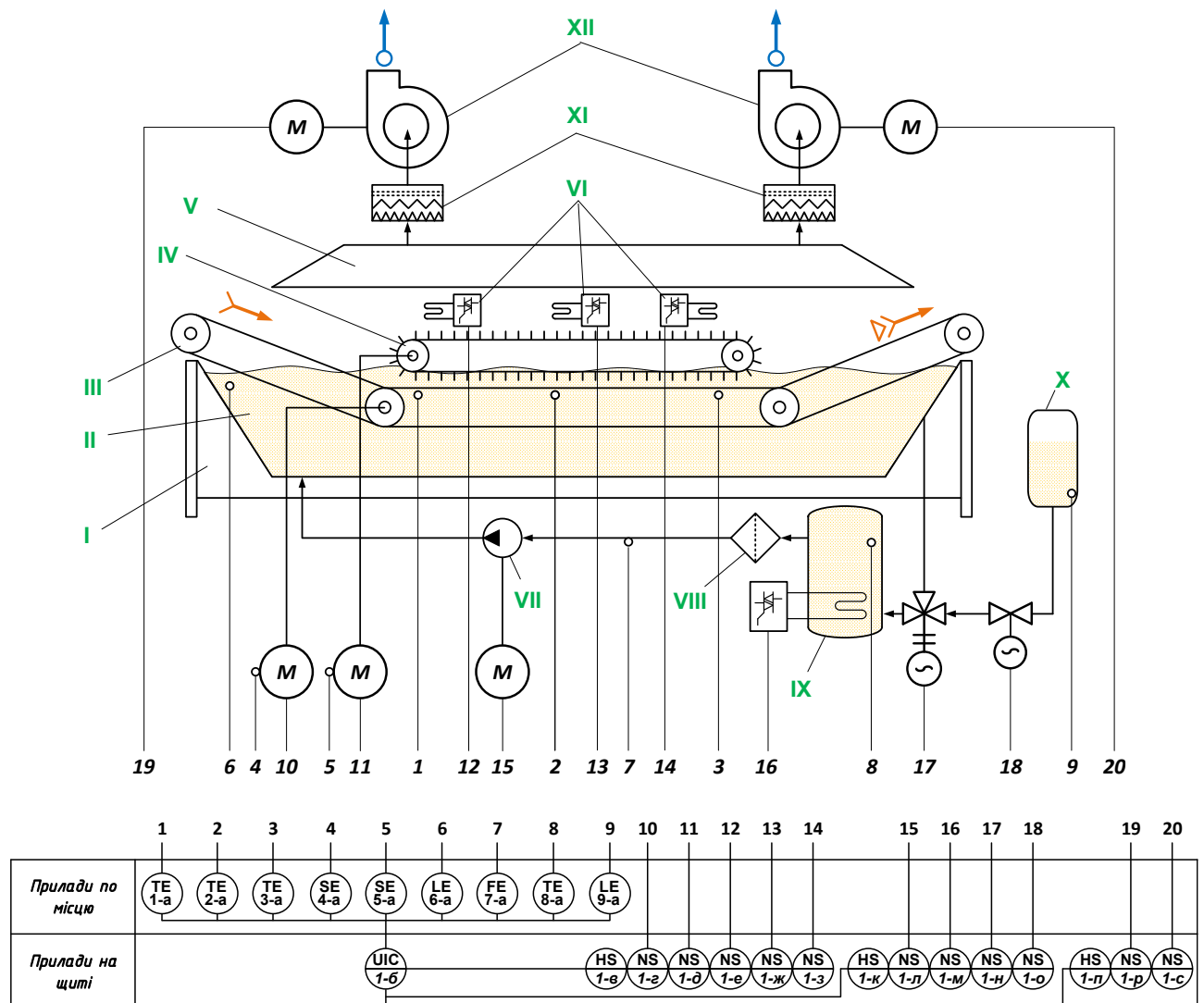


Рисунок 2.5 – Функціональна схема автоматизації фритюрниці безперервної дії: I – Корпус фритюрниці безперервної дії; II – Робоча ванна з олією; III – Нижній конвеєр; IV – Притисний конвеєр; V – Купол витяжної вентиляції; VI – ТЕНи для окремих зон; VII – Циркуляційний насос; VIII – Фільтр олії; IX – Бак додаткового підігріву олії; X – Бак свіжої олії; XI – Олійні фільтри; XII – Витяжні вентилятори

**Таблиця 2.2 – Перелік точок контролю та регулювання в системі
автоматизації**

Позиційне позначення	Найменування параметра та місце контролю	Діапазон вимірювання	Опис функцій
1	2	3	4
TE-1	Температура теплоносія (олії) у першій зоні (зоні завантаження сировини)	0–250 °C	Автоматичне регулювання теплової потужності для компенсації початкового температурного шоку. Сигналізація відхилень від уставки (185-190 °C). Блокування (аварійне відключення нагрівачів при досягненні 210 °C для запобігання спалаху олії).
TE-2	Температура теплоносія (олії) в основній (середній) зоні обсмажування	0–250 °C	Автоматичне каскадне регулювання для стабілізації процесу випаровування вологи. Сигналізація виходу температури за межі регламентного коридору.
TE-3	Температура теплоносія (олії) у третій зоні (зоні вивантаження)	0–250 °C	Автоматичне регулювання для доведення вологості та мінімізації реакції Майяра (утворення акриламід). Сигналізація граничних відхилень.
SE-4	Лінійна швидкість руху нижнього (транспортуючого) сітчастого конвеєра	0–5 м/хв	Автоматичне регулювання частотним приводом для зміни часу експозиції продукту (від 1,5 до 3 хвилин). Сигналізація обриву стрічки або перевантаження двигуна. Блокування (зупинка подавального транспортера сировини при зупинці головного конвеєра).
SE-5	Лінійна швидкість руху верхнього (притискного) сітчастого конвеєра	0–5 м/хв	Автоматичне регулювання із жорсткою синхронізацією швидкості відносно нижнього конвеєра для запобігання деформації слайсів. Сигналізація неузгодженості швидкостей.

1	2	3	4
LE-6	Рівень рідкого теплоносія (олії) у робочій ванні (безконтактний радарний або ультразвуковий датчик)	0–500 мм	Автоматичне регулювання шляхом подачі керуючого впливу на клапан підживлення свіжою олією для компенсації втрат на абсорбцію. Сигналізація верхнього та нижнього робочих рівнів. Блокування (негайна зупинка циркуляційних насосів та ТЕНів при падінні рівня нижче критичного).
FE-7	Витрата фритюрної олії в контурі зовнішньої циркуляції та фільтрації	0–15 м³/год	Автоматичне регулювання продуктивності циркуляційного насоса для забезпечення необхідного коефіцієнта оборотності та турбулентності потоку. Сигналізація критичного зниження витрати через засмічення фільтрів грубого очищення.
TE-8	Температура теплоносія (олії) у баку додаткового підігріву олії	0–250 °C	Автоматичне регулювання теплової потужності нагрівача для підтримання температури олії на заданому рівні в проміжному баку після додавання свіжої олії.
LE-9	Рівень рідкого теплоносія (олії) у баку свіжої олії (безконтактний радарний або ультразвуковий датчик)	0–500 мм	Сигналізація верхнього та нижнього рівня свіжої олії. Блокування (негайна зупинка циркуляційних насосів та ТЕНів при падінні рівня нижче критичного).

Обґрунтування кількості та призначення контурів регулювання температури базується на необхідності створення специфічного температурного профілю вздовж усієї довжини ванни. З огляду на гідродинамічні особливості апарата, функціональна схема передбачає виділення трьох незалежних зон теплового впливу, кожна з яких оснащується індивідуальним контуром регулювання. Перший контур (зона завантаження) забезпечує компенсацію

різкого охолодження олії при контакті з вологою сировиною, що вимагає підтримки максимальної теплової потужності (датчик температури ТЕ-1, ТЕН NS-12). Другий контур (середня зона) стабілізує температуру на етапі інтенсивного випаровування внутрішньої вологи (датчик температури ТЕ-2, ТЕН NS-13), а третій контур (зона вивантаження) з високою точністю доводить продукт до заданої кондиції (датчик температури ТЕ-3, ТЕН NS-14), запобігаючи перегріву. Використання трьох контурів дозволяє реалізувати гнучке керування тепловим потоком, де закон регулювання для кожного каналу описується ПІД-алгоритмом у формі передатної функції регулятора:

$$W_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (2.9)$$

де K_p , T_i та T_d – параметрами налаштування ПІД регулятора.

Контур регулювання рівня теплоносія має критичне значення як для якості продукту, так і для безпеки експлуатації установки. Функціональна схема передбачає використання безконтактного (радарного або ультразвукового) датчика рівня (LE-6, LE-9), що передає сигнал на ПЛК. Призначення цього контуру полягає у підтримці постійного об'єму олії, що гарантує стабільну теплову інерційність та повне занурення продукту притискним конвеєром. Система автоматично керує клапаном підживлення на лінії подачі свіжої олії із зовнішнього резервуара (NS-18). Крім статичного регулювання, цей контур виконує функції захисту: при досягненні нижнього аварійного рівня олії, ПЛК негайно вимикає нагрівальні елементи та зупиняє циркуляційний насос (NS-15), запобігаючи "сухому" ходу та виникненню пожежонебезпечних ситуацій. Математично цей процес описується інтегруючою ланкою, що вимагає від регулятора наявності диференціальної складової для компенсації коливань рівня при бурхливому кипінні.

Керування швидкістю транспортуючих конвеєрів виділяється в окрему підсистему синхронізованого електропривода (SE-4, SE-5). Функціональна схема включає два частотні перетворювачі, які керують двигунами нижнього та верхнього конвеєрів. Обґрунтування цього контуру полягає у необхідності прецизійного регулювання часу перебування продукту в зоні обсмажування, що

є головним інструментом впливу на кінцеву вологість при стабільному температурному режимі. ПЛК забезпечує жорстку синхронізацію швидкостей обох стрічок для запобігання пошкодженню картопляних слайсів та їх застряганню.

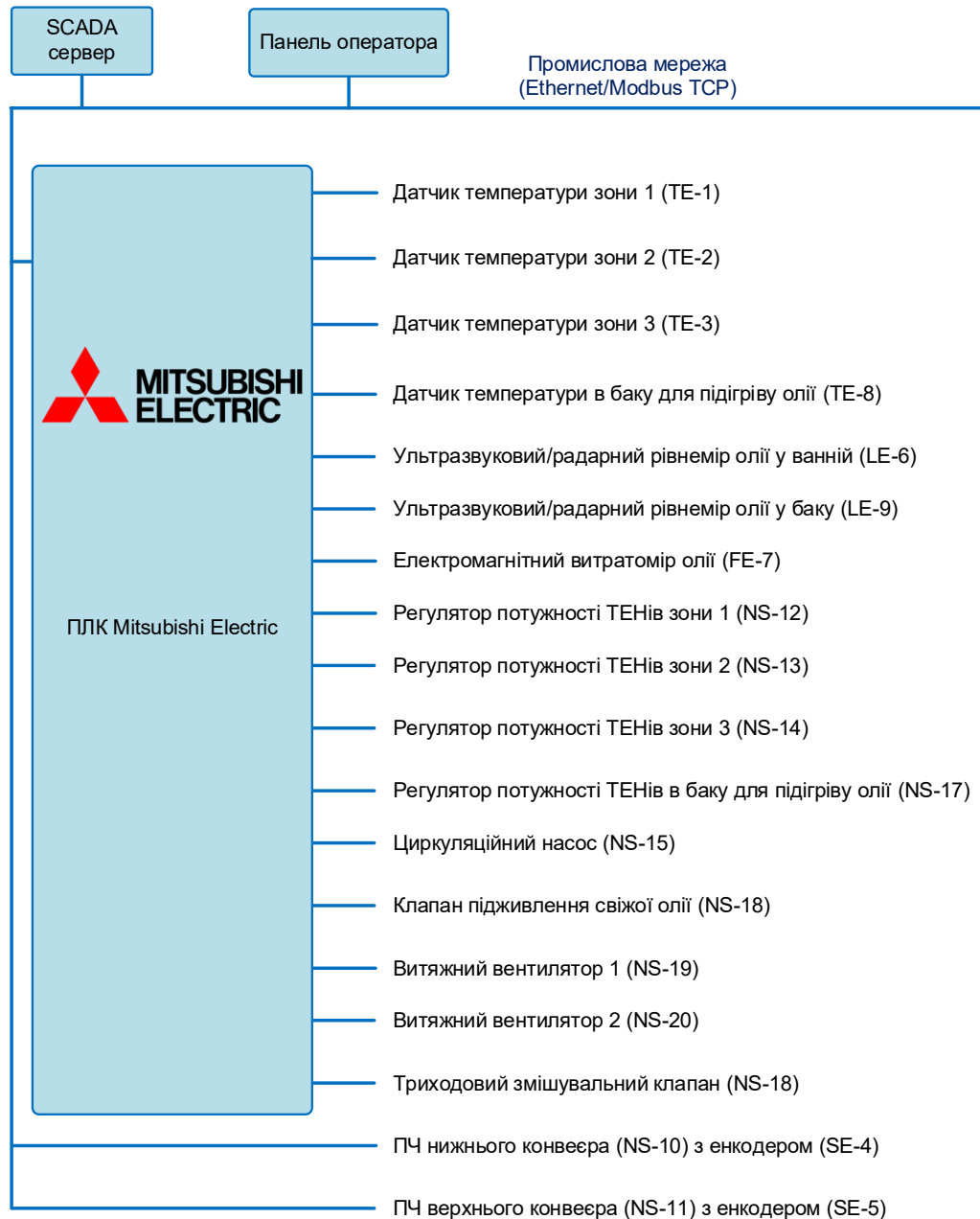


Рисунок 2.6 – Структура інтеграції ПЛК Mitsubishi MELSEC у систему керування фритюрницею

У системі реалізується зворотний зв'язок за швидкістю через вбудовані енкодери (SE-4, SE-5). Такий підхід дозволяє інтегрувати контур швидкості у загальну стратегію керування якістю, де швидкість конвеєра може автоматично

коригуватися залежно від сигналів датчика вологості на виході або результатів лабораторного аналізу сировини, що вводиться оператором через панель керування [10-14].

Завершальним елементом функціональної схеми є інтеграція допоміжних контурів, таких як автоматичне керування системою витяжки та фільтрації олії. Система моніторингу завантаження двигунів витяжних вентиляторів (NS-19, NS-20) дозволяє підтримувати оптимальне розрідження під зонтом, що впливає на швидкість видалення пари та інтенсивність окислення жиру. Усі контури регулювання об'єднані загальною логікою блокувань та сигналізації, що реалізована програмно (рис. 2.7). Використання розробленої функціональної схеми автоматизації дозволяє перейти від ручного керування до повної автоматизації технологічного циклу, де втручання оператора зводиться до вибору рецептури та загального нагляду за роботою обладнання.

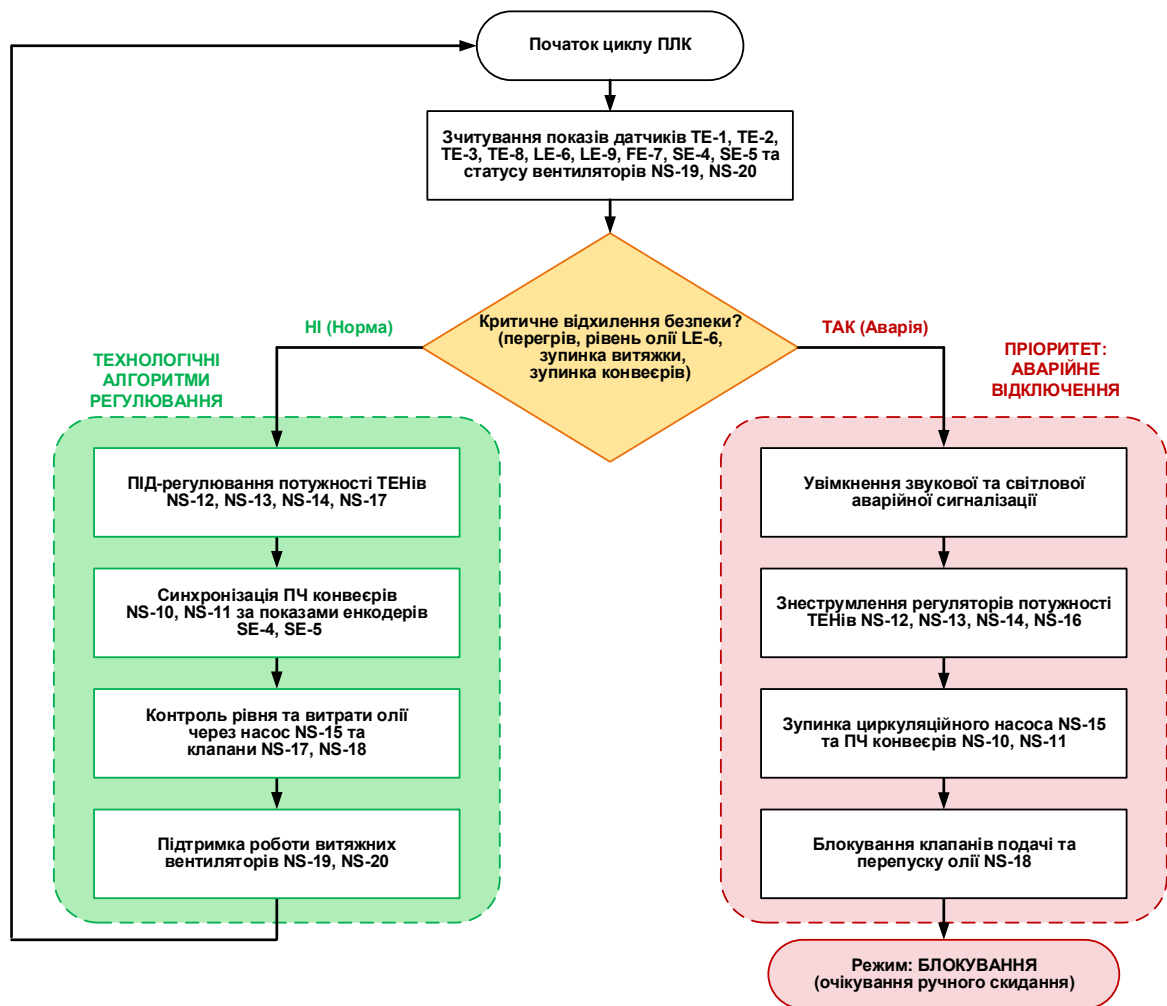


Рисунок 2.7 – Алгоритм функціонування системи захисту та аварійних блокувань

2.3. Обґрунтування вибору датчиків, виконавчих механізмів та ПЛК.

Для реалізації високонадійної системи автоматичного керування технологічним процесом обсмажування базовим елементом обчислювальної логіки було обрано програмований логічний контролер серії MELSEC iQ-F від компанії Mitsubishi Electric, а саме модель FX5U-32M. Вибір даного мікропроцесорного пристрою обґрунтований його високою продуктивністю, оскільки системна шина забезпечує виконання базових логічних інструкцій за 34 нс, що є критично важливим для швидкоплинних процесів термообробки та синхронізації конвеєрних стрічок. Базовий модуль контролера оснащений вбудованим портом Ethernet, що дозволяє без додаткових апаратних витрат інтегрувати систему з панеллю оператора GOT2000 та сервером SCADA для збору даних і диспетчеризації [13-14]. З метою забезпечення точного збору аналогової інформації та формування керуючих впливів апаратна база ПЛК розширена спеціалізованими модулями: модулем для прямого підключення термоопорів FX5-4AD-PT-ADP, універсальним модулем аналогового вводу струмових сигналів FX5-4AD-ADP та модулем аналогового виводу FX5-4DA-ADP (рис. 2.8).

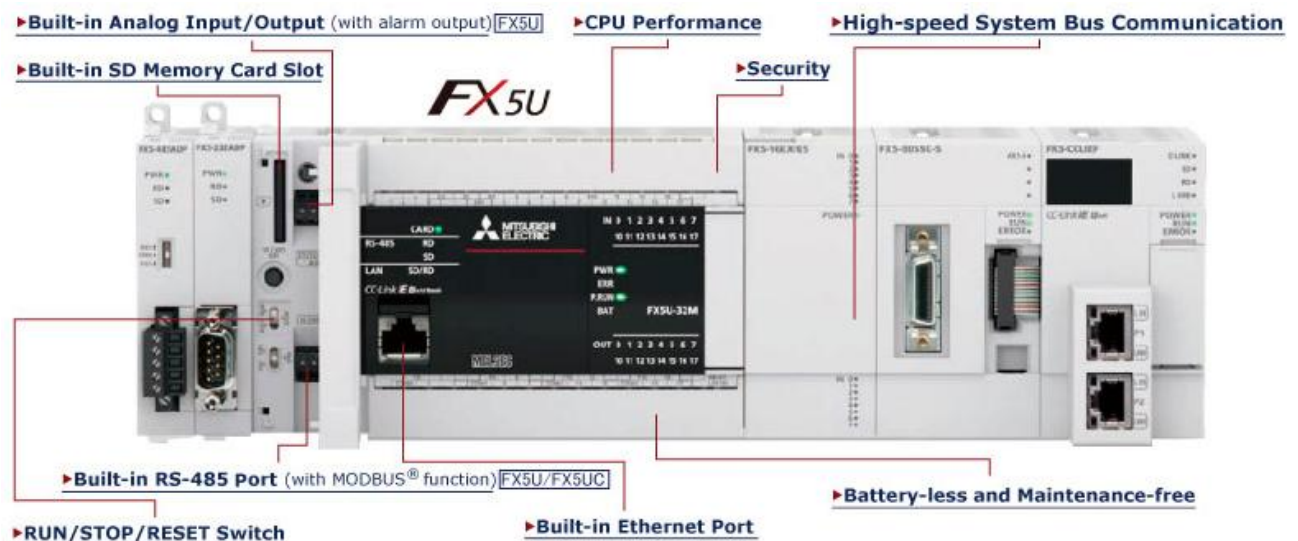


Рисунок 2.8 – Структурна схема підключення модулів розширення до базового блоку контролера FX5U-32M

Контроль температурних режимів у трьох робочих зонах фритюрниці (TE-1, TE-2, TE-3) та в баку додаткового підігріву олії (TE-8) реалізується за

допомогою платинових термоперетворювачів опору РТ-100. Вибір цих датчиків зумовлений їхньою високою лінійністю та стабільністю вимірювань у діапазоні робочих температур фритюрниці. Для побудови математичної моделі системи керування динамічні властивості термоперетворювача опору в захисній арматурі апроксимуються аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням. У операторній формі передатна функція датчиків температури має вигляд

$$W_s(s) = \frac{K_s}{T_s(s)+1} e^{-\tau s}, \quad (2.10)$$

де K_s – коефіцієнт передачі датчика;

T_s – постійна часу, що характеризує теплову інерційність захисного чохла та чутливого елемента;

τ – час чистого транспортного запізнення.

Для розрахунків прийнято нормований коефіцієнт передачі для всіх трьох зон $K_s = 1$. Враховуючи різну інтенсивність циркуляції теплоносія, постійні часу для кожної зони відрізняються: для першої зони (ТЕ-1) постійна часу $T_{s1} = 15$ с, для другої зони (ТЕ-2) $T_{s2} = 14$ с, а для третьої зони (ТЕ-3), де потік стабілізується, $T_{s1} = 16$ с. Транспортне запізнення для всіх датчиків прийнято на рівні $\tau = 2$ с (табл. 2.3).

Для забезпечення точного керування лінійною швидкістю руху нижнього та верхнього конвеєрів (NS-10 та NS-11) обрано частотні перетворювачі серії FREQROL FR-A800 компанії Mitsubishi Electric. Ці інвертори підтримують алгоритми сенсорного векторного керування, що гарантує високий пусковий момент та стабільність швидкості стрічки навіть при змінному навантаженні продуктом [3-4]. Для організації замкненого контуру керування швидкістю було обрано інкрементальні оптичні енкодери Omron E6B2-CWZ6C (позиції SE-4 та SE-5), які забезпечують роздільну здатність 1000 імпульсів на оберт і дозволяють нівелювати вплив механічних люфтів у редукторах (рис. 2.9). Динамічна модель перетворювача частоти як елемента системи автоматичного керування описується передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_v(s) = \frac{K_v}{T_v(s)+1}, \quad (2.11)$$

де K_v – коефіцієнт передачі перетворювача;

T_v – електромагнітна постійна часу інвертора.

Таблиця 2.3 – Метрологічні та динамічні характеристики датчиків температури РТ-100 для кожної зони обсмажування

Позиція за схемою	Призначення	Тип чутливого елемента	Робочий діапазон вимірювання	Клас точності (ДСТУ EN 60751)	Коефіцієнт передачі, K_s	Постійна часу, T_s , с	Транспортне запізнення, τ , с
ТЕ-1	Контроль температури олії (Зона обсмажування 1)	РТ-100	0...250 °C	Клас А	1	15	2
ТЕ-2	Контроль температури олії (Зона обсмажування 2)	РТ-100	0...250 °C	Клас А	1	14	2
ТЕ-3	Контроль температури олії (Зона обсмажування 3)	РТ-100	0...250 °C	Клас А	1	16	2
ТЕ-8	Контроль температури олії (Бак додаткового підігріву)	РТ-100	0...250 °C	Клас А	1	15	2

Для розрахунків прийнято, що коефіцієнт передачі для обох приводів становить $K_v = 5$ (відношення вихідної частоти до напруги керування, Гц/В). Електромагнітна постійна часу для ПЧ нижнього конвеєра (NS-10) становить $T_{v1} = 0.02$ с, а для ПЧ верхнього конвеєра (NS-11) з урахуванням специфіки налаштувань фільтрації сигналу завдання $T_{v2} = 0.025$ с.

Виконавча підсистема теплового контуру базується на використанні твердотільних симісторних регуляторів потужності Maxwell MS3-VD3825C (NS-12, NS-13, NS-14, NS-17). Вони керуються аналоговими сигналами від модуля ПЛК, що дозволяє реалізувати плавне ПД-регулювання теплової потужності ТЕНів без виникнення комутаційних перешкод. Контроль гідродинамічних параметрів теплоносія здійснюється за допомогою радарних безконтактних рівнемірів JBRD-800DGWGY 1100 (LE-6, LE-9) та електромагнітного витратоміра LD EMFM EDF3000 (FE-7). Логіка управління допоміжним обладнанням реалізується через релейні виходи контролера, які комутують циркуляційний насос і витяжні вентилятори (ПМЛ-4100), клапан підживлення Belimo V3BW3 (NS-18) та триходовий змішувальний клапан

Tameson V3K8T. Інтеграція зазначеної компонентної бази в єдину мережу забезпечує необхідну швидкодію та точність підтримки технологічних параметрів згідно з регламентом (рис. 2.10).

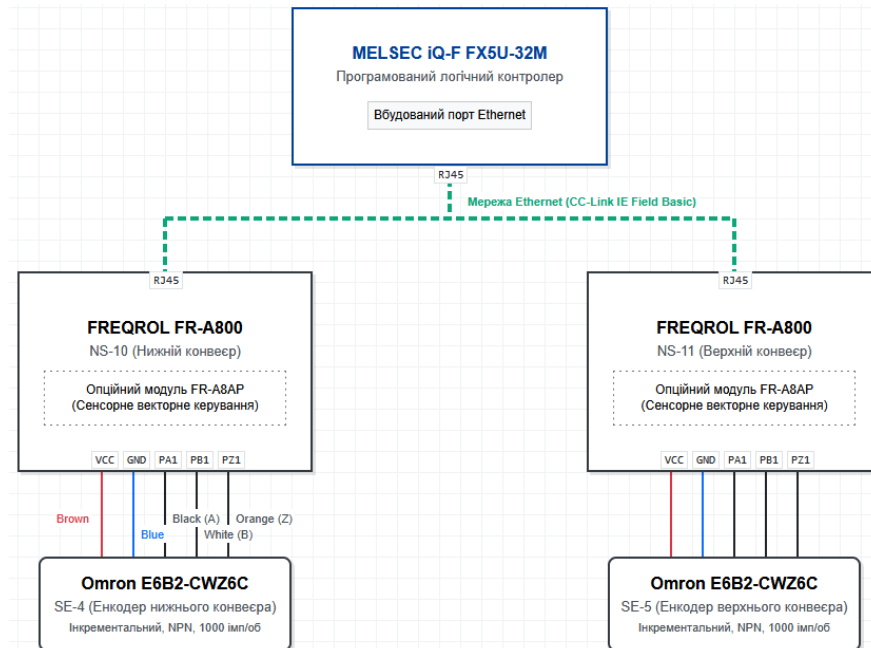


Рисунок 2.9 – Схема підключення енкодерів Omron до частотних перетворювачів FREQROL FR-A800 та інтерфейсу зв'язку з ПЛК

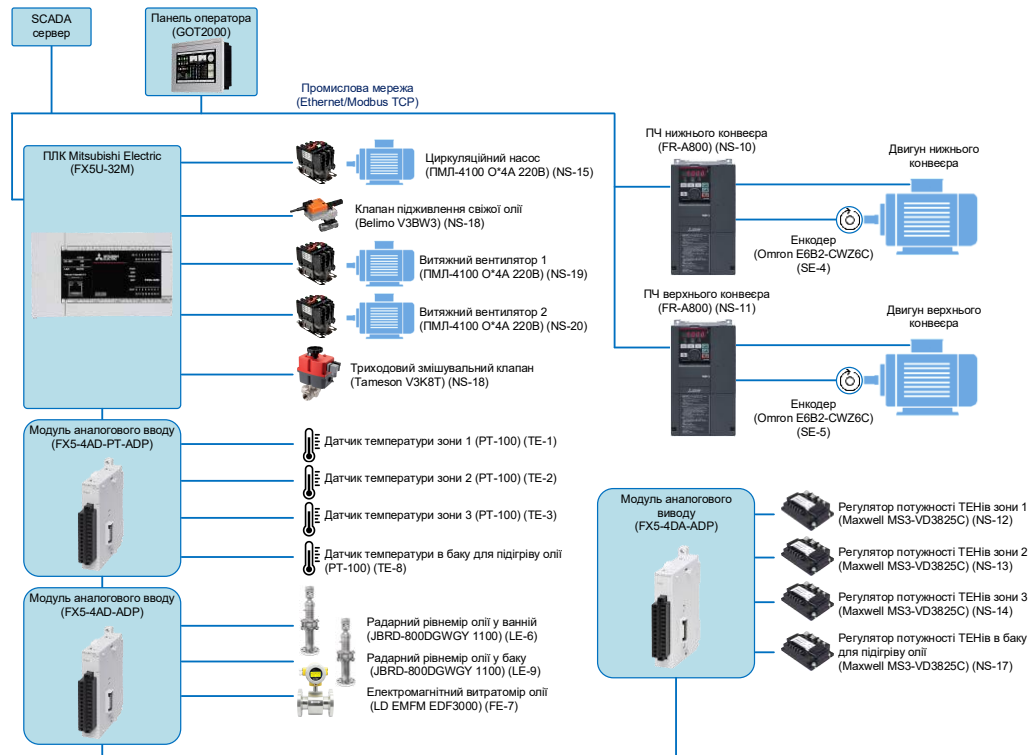


Рисунок 2.10 – Структурна схема підключень САК фритюрницею

РОЗДІЛ 3.

СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Формування моделі розширеного об'єкта.

Синтез цифрової системи керування процесом обсмажування картоплі фрі потребує побудови адекватної математичної моделі системи, яка б комплексно враховувала динаміку самого теплового об'єкта та характеристики задіяних засобів автоматизації. Основними керованими координатами в системі є температура олії у трьох робочих зонах фритюрниці та швидкість руху двох конвеєрних стрічок (згідно структурної та функціональної схем).

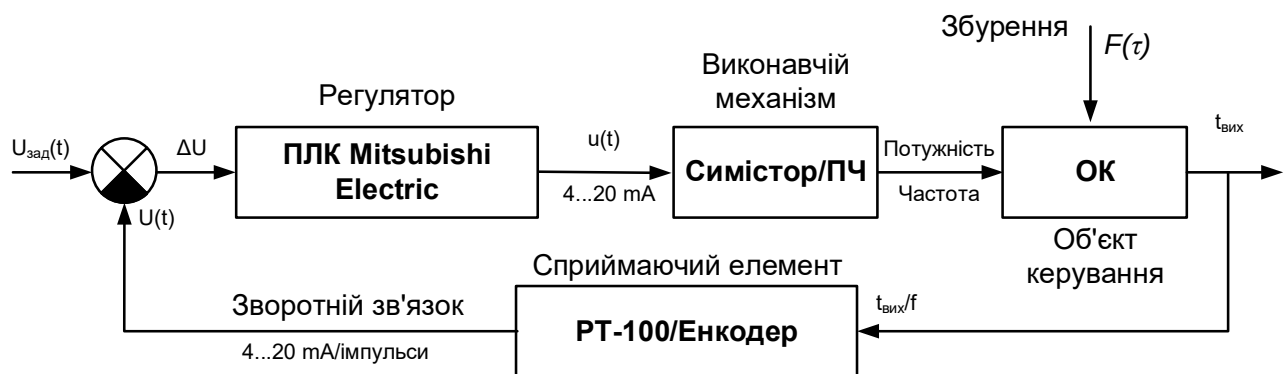


Рисунок 3.1 – Функціональна схема САК фритюрницею

Для підсистеми стабілізації температури першою ланкою розширеного об'єкта є виконавчий механізм симісторний регулятор потужності ТЕНів Maxwell MS-1VD2238. Враховуючи, що для вхідного сигналу 4...20 мА та напруги навантаження 380 В комутація напівпровідникових ключів відбувається практично миттєво порівняно з тепловою інерцією системи, електромагнітною постійною часу можна знехтувати. Відповідно, передатна функція регулятора апроксимується безінерційною ланкою з чистим транспортним запізненням: $K=23.75$; запізнення дорівнює $\tau=0.01$ с.

Наступною ланкою є безпосередньо тепловий об'єкт, динамічні властивості якого описуються передатною функцією за аналогією з (2.10) з коефіцієнтом підсилення $K=15.45$, постійною часу $T=900$ с, та транспортним запізненням $\tau=120$ с, яке зумовлене інерційністю розповсюдження тепла.

Завершальною ланкою виступає датчик температури РТ-100 з параметрами: нормований коефіцієнт передачі вимірювального каналу становить $K=1$; час транспортного запізнення для всіх точок контролю дорівнює $\tau=2$ с.

Загальна передатна функція розширеного об'єкта керування температурою W_z дорівнює добутку передатних функцій виконавчого пристрою, об'єкта та датчика. Загальний коефіцієнт підсилення розраховується як $K_z=K_v \cdot K_o \cdot K_d=23.75 \cdot 15.45 \cdot 1 = 366.9375$. Сумарний час чистого транспортного запізнення визначається як алгебраїчна сума запізнень усіх ланок $\tau_s=\tau_v+\tau_o+\tau_d=0.01+120+2=122.01$ с. Враховуючи специфіку гідродинаміки потоку олії, постійні часу вимірювальних перетворювачів відрізняються для кожної зони. Для першої зони обсмажування (датчик ТЕ-1), де постійна часу термоперетворювача становить $T_{TE1}=15$ с, результуюча математична модель має вигляд:

$$W_{z1} = \frac{366.94}{(900s+1)(15s+1)} e^{-122s}. \quad (3.1)$$

Аналогічним чином формуються математичні моделі для другої (ТЕ-2) та третьої (ТЕ-3) робочих зон, які характеризуються ідентичними загальними теплофізичними параметрами, але відрізняються інерційністю відгуку датчиків на локальні зміни температури: $T_{TE1}=14$ с та $T_{TE1}=16$ с відповідно. Передатні функції розширених об'єктів для цих зон записуються наступними рівняннями:

$$W_{z2} = \frac{366.94}{(900s+1)(14s+1)} e^{-122s}; \quad (3.2)$$

$$W_{z5} = \frac{366.94}{(900s+1)(16s+1)} e^{-122s}. \quad (3.3)$$

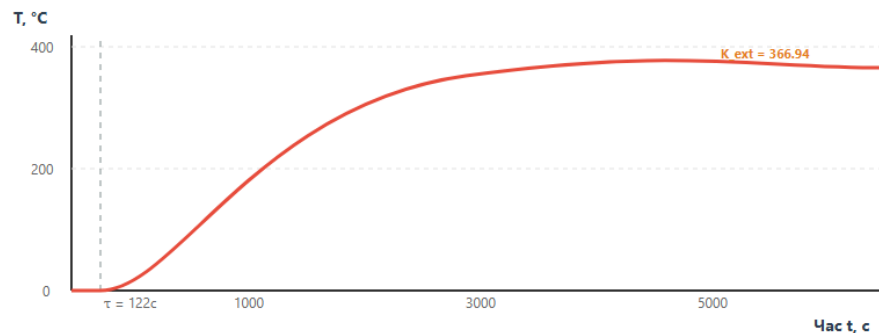
Окремо запишемо математичний опис конвеєрів, як системи транспортування, динаміка яких повністю визначається характеристиками перетворювачів частоти FREQROL FR-A800 та механічною інерцією приводів. Передатні функції цих контурів формуються як аперіодичні ланки першого порядку без транспортного запізнення, з відомим коефіцієнтом передачі $K_{VFD}=5$ Гц/В, що відображає відношення вихідної частоти до напруги керування. Для приводу нижнього конвеєра (NS-10), що має (електромагнітну) постійну часу $T_{VFD1}=0.02$ с, передатна функція має вигляд:

$$W_{VFD1} = \frac{5}{0.025s+1}. \quad (3.4)$$

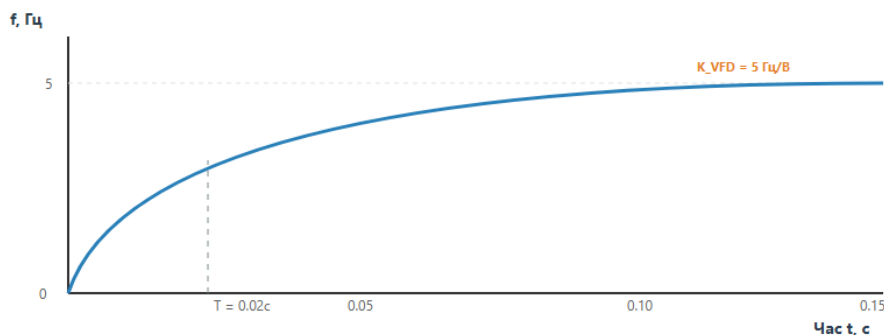
Для приводу верхнього конвеєра (NS-11), враховуючи налаштування внутрішньої фільтрації сигналу завдання, постійна часу становить $T_{VFD2}=0.025$ с, відповідно модель набуває вигляду:

$$W_{VFD1} = \frac{5}{0.025s+1}. \quad (3.5)$$

Отримані аналітичні вирази комплексно описують поведінку всіх керованих вузлів фритюрниці і є вихідними даними для процедури цифрового синтезу алгоритмів керування.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Перехідні характеристики по контуру температури олії (а) та швидкості нижнього конвеєра (б)

3.2. Синтез закону керування та розрахунок налаштувань цифрового регулятора.

Для забезпечення високої точності підтримки температурних режимів та швидкості руху конвеєрних стрічок необхідний аналітичний розрахунок параметрів налаштування цифрових регуляторів. Оскільки математичні моделі розширених об'єктів для теплових зон фритюрниці описуються передатними

функціями високого порядку зі значним транспортним запізненням, для визначення коефіцієнтів ПД-регулятора доцільно використати модифікований метод розімкненого контуру Циглера-Нікольса. З метою спрощення інженерних розрахунків, інерційність датчика температури апроксимується шляхом її додавання до загального часу чистого транспортного запізнення, що дозволяє звести модель до еквівалентної аперіодичної ланки першого порядку з ефективним запізненням. Ефективне запізнення визначається як сума базового запізнення системи та постійної часу термоперетворювача:

$$\tau_{eff} = \tau_s + \tau_{TE}. \quad (3.6)$$

Відповідно до емпіричних правил налаштування для такого класу об'єктів, розрахунок пропорційного коефіцієнта K_p , часу інтегрування T_i та часу диференціювання T_d здійснюється за наступними класичними залежностями:

$$K_p = \frac{1.2T_0}{K_Z\tau_{eff}}; T_i = 2\tau_{eff}; T_d = 0.5\tau_{eff}. \quad (3.7)$$

Використовуючи отримані раніше математичні моделі, проведемо обчислення параметрів регулювання для кожної з трьох зон обсмажування та запишемо до табл. 3.1. Невисокі значення пропорційного коефіцієнта пояснюються значним загальним коефіцієнтом підсилення розширеного об'єкта, що компенсується високою потужністю виконавчих механізмів.

Для електромеханічної підсистеми керування конвеєрами, яка описується аперіодичними ланками першого порядку без транспортного запізнення, застосування диференціальної складової не є доцільним. Тому для частотних перетворювачів FREQROL FR-A800 синтезуються ПІ-регулятори швидкості з використанням методу технічного оптимуму (модульного оптимуму). Для компенсації домінуючої постійної часу об'єкта, час інтегрування регулятора T_i прирівнюється до електромагнітної постійної часу приводу T_{VFD} . Пропорційний коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$K_p = \frac{T_i}{2K_{VFD}T_\mu}; \quad (3.8)$$

де T_μ – некомпенсована мала постійна часу контуру, яка враховує затримки перетворення сигналів у ПЛК та мережі (приймається на рівні 0.005 с).

Розраховані коефіцієнти підлягають внесенню у відповідні регістри даних ПЛК MELSEC FX5U-32M для забезпечення стійкої роботи системи в автоматичному режимі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти ПД та ПІ-регуляторів для всіх контурів системи керування

Назва контуру регулювання	Позиція обладнання	Тип регулятора	Пропорційний коефіцієнт, K_p	Час інтегрування, T_i , с	Час диференціювання, T_d , с
Температура олії (Зона 1)	TE-1, NS-12	ПД	0.0215	274.02	68.5
Температура олії (Зона 2)	TE-2, NS-13	ПД	0.0216	272.02	68.0
Температура олії (Зона 3)	TE-3, NS-14	ПД	0.0213	276.02	69.0
Швидкість нижнього конвеєра	NS-10, SE-4	ПІ	0.4000	0.02	—
Швидкість верхнього конвеєра	NS-11, SE-5	ПІ	0.5000	0.025	—

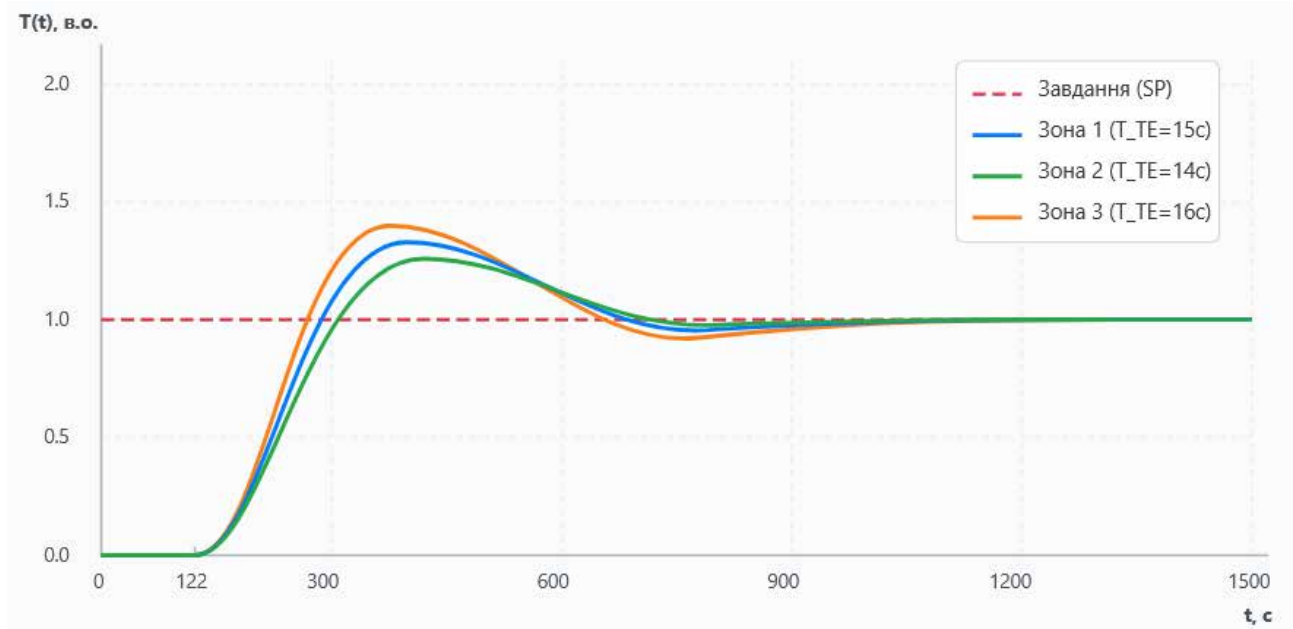


Рисунок 3.3 – Перехідні процеси у контурах стабілізації температури зон фритюрниці при застосуванні розрахованих параметрів ПД-регулятора

На графіках (рис. 3.3) чітко простежується однакове чисте транспортне запізнення (122.01 с), незначні відмінності в перерегулюванні та формі кривих

(розщеплення графіків) зумовлені різними постійними часу датчиків температури (14, 15 та 16 с відповідно) та максимальне перерегулювання становить близько 20 %, що відповідає методу налаштування Циглера-Нікольса, а час регулювання близько 1200...1400 секунд.

3.3. Визначення періоду квантування сигналів цифрової системи керування.

Для забезпечення плавності перехідних процесів та мінімізації фазових спотворень період дискретизації T_0 зазвичай обирають у 5...15 разів меншим за найменшу значущу постійну часу розширеного об'єкта керування або в 4...10 разів меншим за величину чистого транспортного запізнення (рис. 3.4). Оскільки розроблювана система керування фритюрницею є багатовимірною і включає підсистеми з кардинально різною динамікою (повільні теплові процеси та швидкі електромеханічні), визначення періоду квантування необхідно проводити диференційовано для кожного типу контурів, реалізуючи так звану багатотактову систему керування.

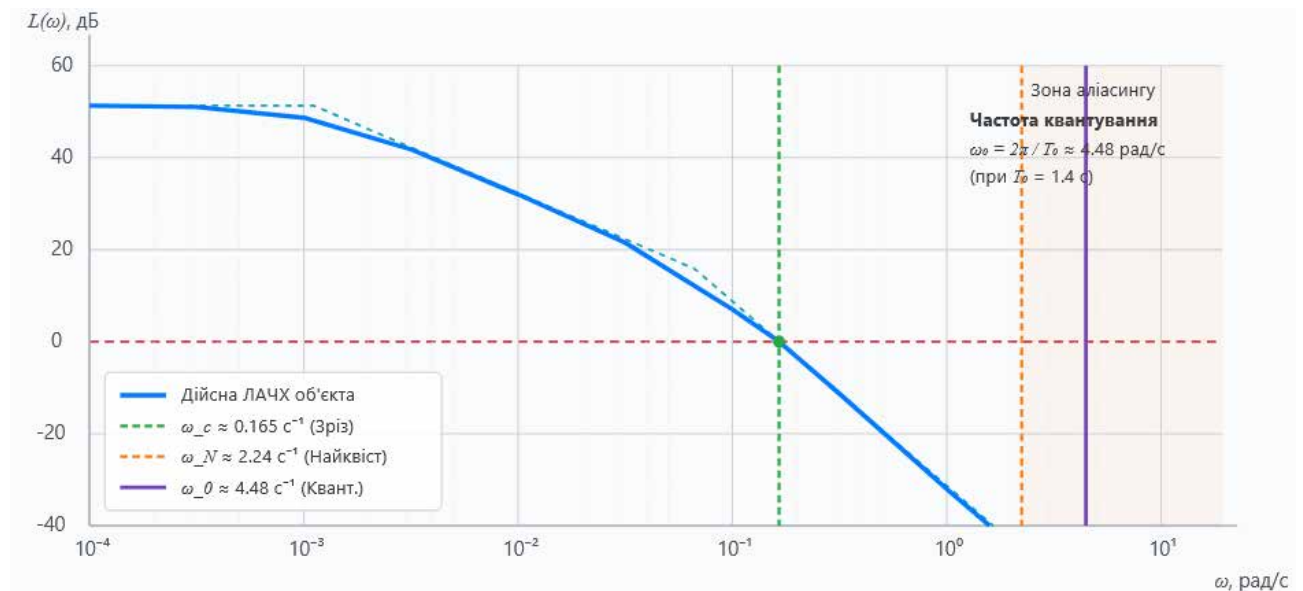


Рисунок 3.4 –Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика об'єкта (Зона 1) та частоти дискретизації

Для підсистеми стабілізації температури олії динаміка визначається тепловою інерцією апарату з постійною часу $T_0 = 900$ с, сумарним

транспортним запізненням $\tau_s = 122$ с та найменшою постійною часу вимірювального перетворювача $T_{TE2} = 14$ с. Для розрахунку за найшвидшою ланкою теплового контуру (інерційності датчика), рекомендований період квантування має задовольняти умові: $T_0 \leq \frac{T_{TE2}}{10}$. Підставляючи отримані дані, значення $T_0 = 1.4$ с (рис. 3.5). Враховуючи також значне транспортне запізнення, дискретизація з кроком, більшим за 1...2 секунди, може призвести до зниження точності інтегрування похибки в ПІД-алгоритмі. Тому для всіх трьох контурів регулювання температури оптимальним та технічно обґрунтованим періодом квантування є $T_0 = 1$ с. Це значення гарантує високу якість керування і не створює надмірного навантаження на процесорний модуль ПЛК MELSEC FX5U під час виконання команд обробки аналогових сигналів та математичного апарату ПІД-регулятора.

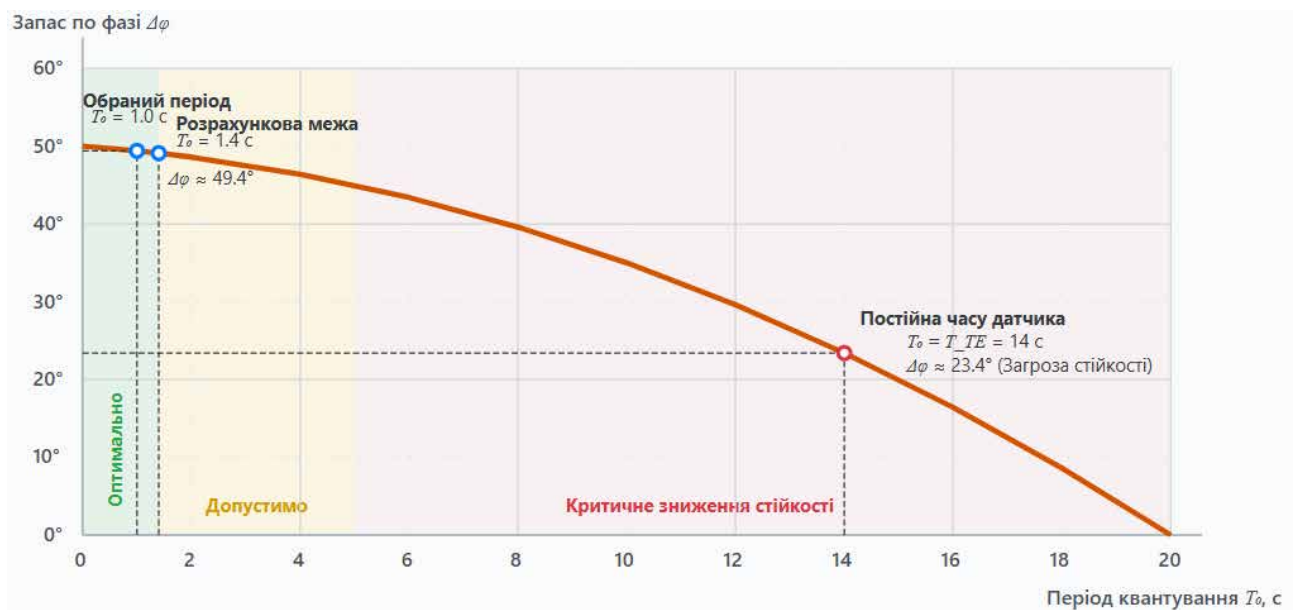


Рисунок 3.5 – Залежність запasu стійкості по фазі теплового контуру від обраного періоду квантування

На відміну від теплових процесів, електромеханічна підсистема транспортування продукту, що базується на частотних перетворювачах FREQROL FR-A800, характеризується високою швидкодією. Найменша електромагнітна постійна часу приводу нижнього конвеєра становить $T_{VFD1} = 0.02$ с. Для забезпечення стійкої роботи цифрового ПІ-регулятора швидкості та адекватної реакції на динамічні збурення (зміну маси продукту на стрічці),

період квантування швидкісного контуру повинен обчислюватися за аналогічним співвідношенням $T_0 \leq \frac{T_{VFD1}}{10}$, що дорівнює $T_0 = 0.002$ с. Апаратні можливості обраного контролера MELSEC iQ-F FX5U-32M дозволяють реалізовувати високошвидкісні циклічні переривання з кроком від 1 мс, що робить можливим застосування розрахованого періоду. Отже, для контурів керування швидкістю конвеєрів приймається період квантування $T_0 = 0.002$ с, що забезпечить формування плавного завдання напруги для інверторів і мінімізує похибки квантування за рівнем та часом у мережі обміну даними.

3.4. Оцінка показників якості роботи системи (моделювання перехідних процесів).

Для підтвердження працездатності синтезованої системи керування температурою олії в першій зоні (ТЕ-1) необхідно провести аналіз її стійкості та оцінити якість перехідних процесів. Дослідження здійснюється для замкненого контуру, який включає розширений об'єкт керування та налаштований ПІД-регулятор.

Для розрахунку використовуємо передатну функцію розширеного об'єкта першої зони (3.1) та передатну функцію ідеального ПІД-регулятора з розрахованими параметрами (табл. 3.1). Характеристичне рівняння замкненої неперервної системи визначається знаменником її передатної функції:

$$1 + W_{PID}(s)W_{z1}(s) = 0. \quad (3.9)$$

Оскільки керування здійснюється за допомогою цифрового ПЛК, систему необхідно розглядати як імпульсну. Здійснивши Z-перетворення з періодом дискретизації $T_0 = 1$ с, отримаємо дискретну передатну функцію розімкненого контуру $W_{open}(z)$ та характеристичне рівняння замкненої системи у вигляді полінома відносно змінної z :

$$D(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0. \quad (3.10)$$

Аналіз стійкості за критерієм Джурі дозволяє визначити стійкість цифрової системи без безпосереднього обчислення коренів характеристичного рівняння. Для стійкості імпульсної системи необхідно і достатньо, щоб усі корені

її характеристичного рівняння знаходилися всередині кола одиничного радіуса на комплексній Z -площині ($|z_i| < 1$). Необхідні умови стійкості за Джурі: $D(1) > 0$; $(-1)^n D(-1) > 0$; $|a_0| < a_n$.

Оскільки розрахунок параметрів ПД-регулятора здійснювався за модифікованим методом з урахуванням ефективного запізнення, синтезована система має гарантовані запаси стійкості по амплітуді та фазі. Усі полюси замкненої системи лежать строго всередині одиничного кола (рис. 3.6).

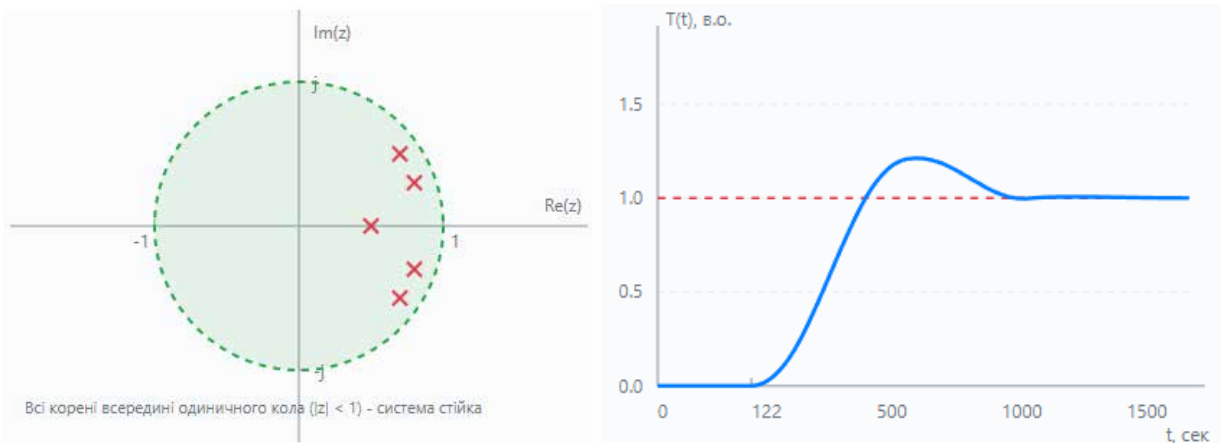


Рисунок 3.6 – Аналіз стійкості та перехідний процес контуру температури олії (Зона 1)

Розташування коренів характеристичного рівняння замкненої імпульсної системи поза межами одиничного кола гарантує виконання критерію Джурі. Реакція системи на одиничний керівний вплив дає чисте транспортне запізнення (122.01 с), після якого система виходить на заданий режим з перерегулюванням близько 20 %, що є характерним і допустимим для налаштувань за методом Циглера-Нікольса у промислових теплових об'єктах та час регулювання складає орієнтовно 1200...1400 секунд.

РОЗДІЛ 4.

РОБОЧЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

4.1. Розробка принципової електричної схеми керування.

Розробка принципової електричної схеми керування базується на використанні програмованого логічного контролера лінійки Mitsubishi Electric FX5U-32MR/DS (позиційне позначення D1.1), який виконує роль центрального обчислювального та координуючого пристрою системи (рис. 4.1-2).

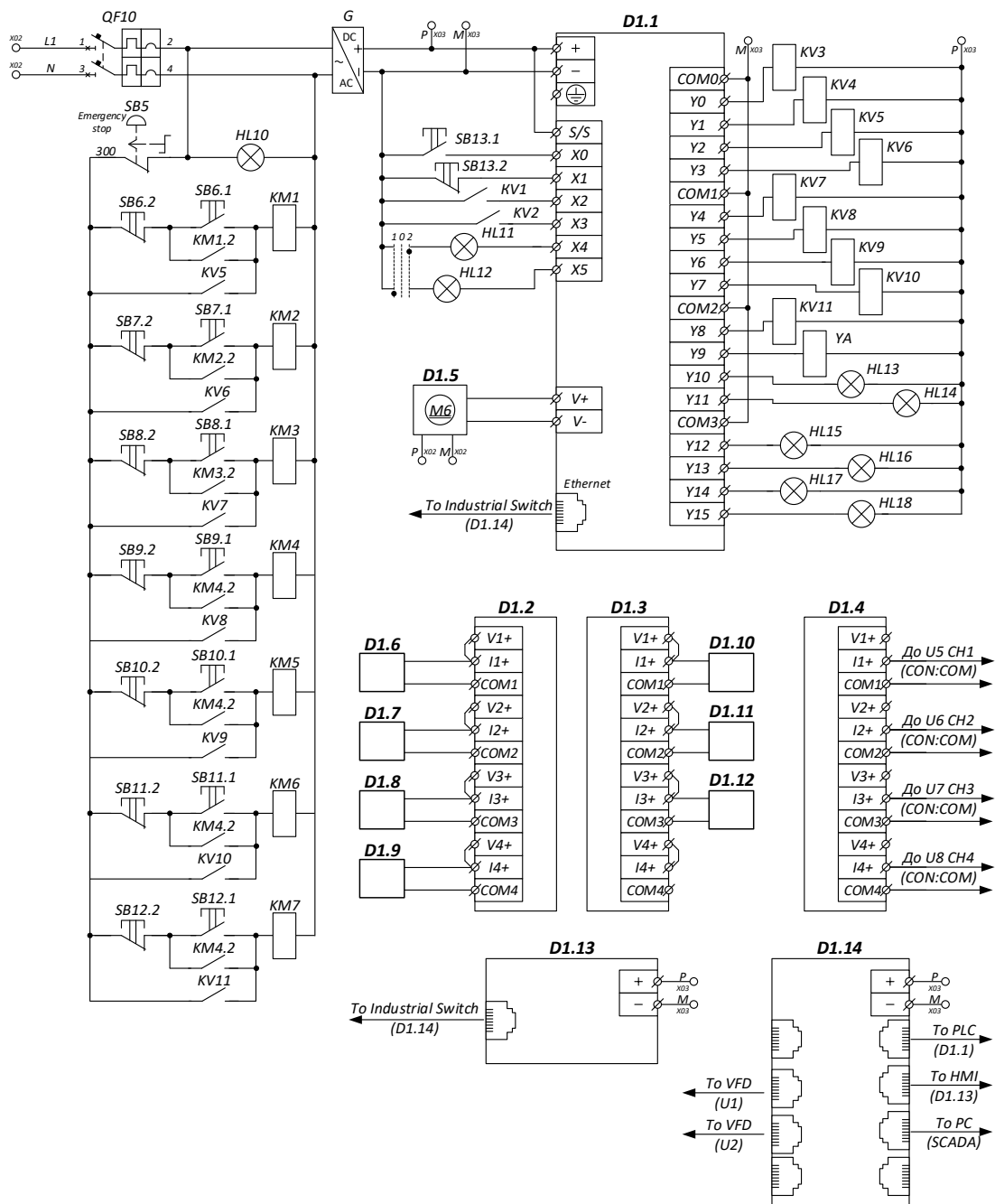


Рисунок 4.1 – Принципова електрична схема керування

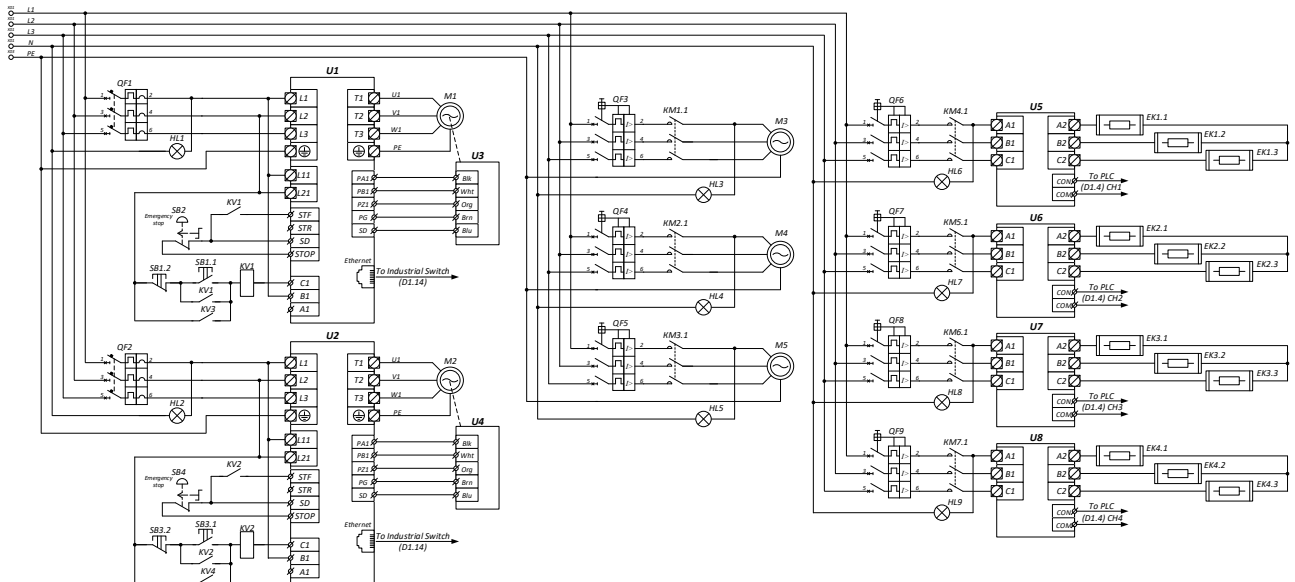


Рисунок 4.2 – Принципова електрична схема силова

Для захисту кіл живлення передбачено використання спеціалізованих автоматичних вимикачів, зокрема GV2ME01 (QF10) для ланцюга керування (рис. 4.3). Живлення базового модуля ПЛК та ланцюгів формування дискретних сигналів здійснюється від джерела постійного струму з напругою 24 В, що забезпечує належний рівень електробезпеки та стійкість до промислових завод.



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд GV2ME01

До дискретних входів базового модуля контролера підключено апаратуру, що формує команди оперативного персоналу та сигнали стану, зокрема здвоєні кнопки "Старт/Стоп" типу TB5-AL8425 (SB1, SB3, SB6-SB13) та пости аварійної зупинки XAL-D174 (SB2, SB4). Дискретні виходи ПЛК комутують котушки проміжних реле серії PTF11A LY3 з напругою керування 24 В (KV3-KV11) та 220 В (KV1-KV2). Використання цих реле забезпечує необхідну гальванічну розв'язку мікропроцесорної частини від силових кіл та посилення потужності для надійної комутації електромагнітних пускачів ПМЛ-4100 0*4А 220В (KM1-KM7). Зазначені пускачі відповідають за прямий пуск електродвигуна циркуляційного насоса (М3) та витяжних вентиляторів (М4, М5), а релейні кола додатково керують клапаном Belimo V3BW3 (YA) (рис. 4.4). Для візуалізації стану технологічного процесу на панелі шафи застосовуються сигнальні арматури зеленого кольору AD16-16DS (HL11-HL18) у колах постійного струму та червоні лампи A22-RLF-RT (HL1-HL10) у колах змінного струму.



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд Belimo V3BW3

Для високоточного контролю температурних параметрів процесу до внутрішньої шини ПЛК підключено модуль аналогового вводу FX5-4AD-PT-ADP (D1.2) (рис. 4.5).

Контроль гідродинамічних параметрів забезпечується за допомогою модуля аналогового вводу загального призначення FX5-4AD-ADP (D1.3) (рис. 4.6).



Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд модуля аналогового вводу FX5-4AD-PT-ADP

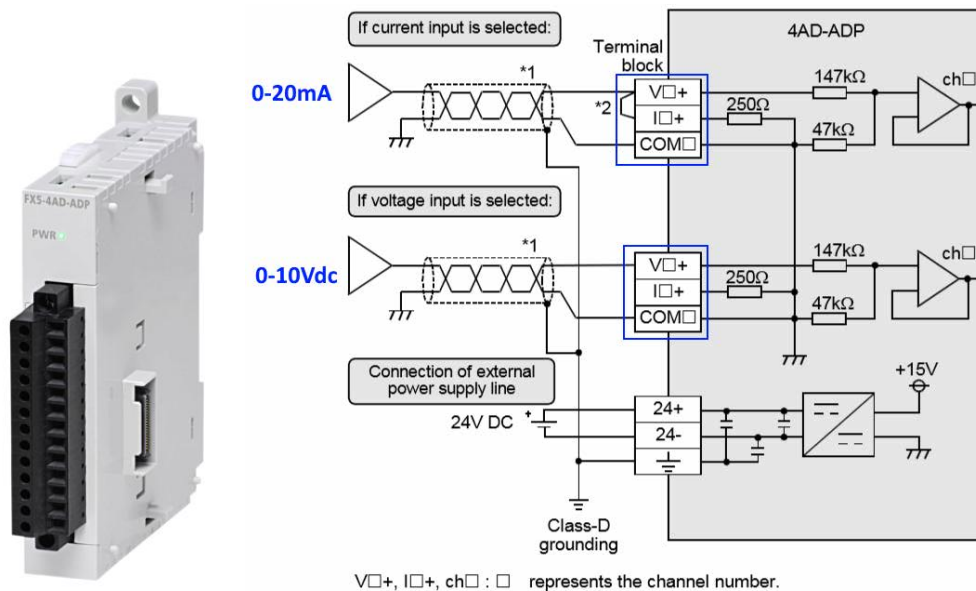


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд та схема підключення модуля аналогового вводу FX5-4AD-ADP

До його вхідних каналів підведено уніфіковані сигнали від двох радарних рівнемірів JBRD-800DGWGY 1100 (D1.10, D1.11) (рис. 4.7) та одного електромагнітного витратоміра LD EMFM EDF3000 (D1.12) (рис. 4.8), а також отримується інформація про положення триходового змішувального клапана Tameson V3K8T (D1.5) (рис. 4.9).



**Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд радарного
рівнеміру JBRD-800DGWGY 1100**



**Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд електромагнітного
витратоміра LD EMFM EDF3000**



**Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд триходового
змішувального клапана Tameson V3K8T**

Безпосереднє керування тепловим режимом реалізовано із застосуванням модуля аналогового виводу FX5-4DA-ADP (D1.4). На основі розрахунків внутрішніх регуляторів контролер формує керуючі сигнали, які подаються на входи чотирьох тиристорних регуляторів потужності Maxwell MS3-VD3825C (U5-U8) (рис. 4.10). Ці пристрої здійснюють фазове керування подачею напруги на відповідні групи нагрівальних елементів ТЕН (ЕК1-ЕК4). Залежність активної потужності P , що виділяється на резистивному навантаженні, від кута відкриття тиристорів α розраховується за інтегральним співвідношенням: $P = P_{max} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right)$. Такий метод забезпечує безінерційне регулювання теплової потужності та подовжує експлуатаційний ресурс нагрівачів за рахунок усунення пускових струмових ударів.



**Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд тиристорного регулятора потужності
Maxwell MS3-VD3825C**

Інтеграція мікропроцесорних пристроїв системи в єдину інформаційно-керуючу мережу здійснюється за допомогою промислового комутатора стандарту Ethernet NZ2ENG-T8N (D1.14). До нього підключено центральний ПЛК, сенсорну панель оператора GOT2000 (D1.13) та два перетворювачі частоти FR-A800 (U1, U2). Перетворювачі відповідають за керування електродвигунами нижнього (M1) та верхнього (M2) конвеєрів. Для забезпечення жорсткого зворотного зв'язку за швидкістю на валах конвеєрів встановлено інкрементальні енкодери Omron E6B2-WZ6C (U3, U4), що підключені безпосередньо до клемних колодок приводів. Силові ланцюги всіх двигунів надійно захищені мотор-автоматами серії GV2ME (QF1-QF9) відповідних номіналів. Дана мережева та

апаратна топологія гарантує детермінований обмін даними, віддалену диспетчеризацію та комплексну безпеку технологічного обладнання.

4.2. Розробка алгоритмів керування фритюрницею.

Розробка алгоритмів керування технологічним процесом обсмажування у фритюрниці базується на використанні скінченного автомата станів, що програмно реалізований у пам'яті мікропроцесорного контролера (рис. 4.11).

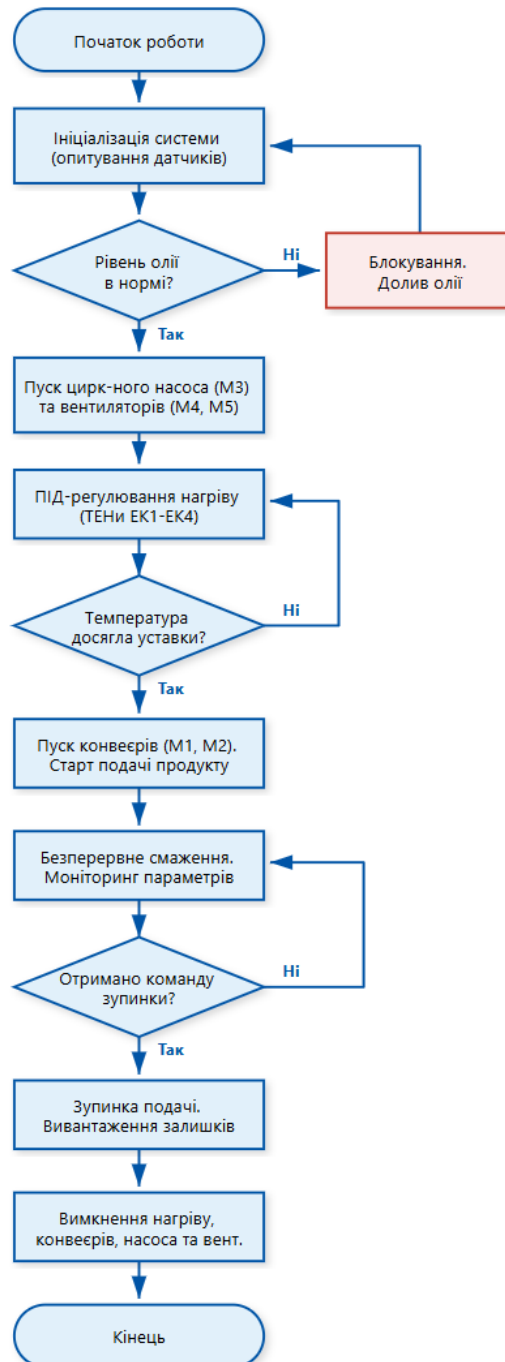


Рисунок 4.11 – Блок-схема узагальненого алгоритму керування фритюрницею безперервної дії

Цей підхід дозволяє чітко розмежувати етапи ініціалізації, підготовки, основного технологічного циклу та безпечної зупинки. На початковому етапі система автоматично проводить самодіагностику апаратної частини, опитуючи стан захисних мотор-автоматів, перетворювачів частоти, модулів розширення та периферійних датчиків. Лише за умови повної відсутності активних блокувань та апаратних помилок алгоритм формує дозвіл на перехід до наступних кроків технологічної циклограми, активуючи відповідні індикатори готовності на панелі оператора.

Процес підготовки до роботи розпочинається з обов'язкової перевірки наявності достатньої кількості теплоносія у гідравлічній системі. На основі показань радарних рівнемірів обчислюється поточний об'єм олії, і за умови досягнення мінімально допустимої позначки формується керуюча команда на запуск електродвигуна циркуляційного насоса. Після встановлення стабільного потоку, що підтверджується сигналами від електромагнітного витратоміра, ініціюється розігрів фритюру. Керування тепловою потужністю здійснюється за класичним пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом, який незалежно розраховується для кожної з чотирьох зон нагріву.

Після досягнення температурним полем заданих технологічних уставок у всіх зонах з допустимою похибкою, алгоритм переводить фритюрницю в режим готовності до прийому харчового продукту. За ініціюючою командою оператора активуються електродвигуни верхнього та нижнього конвеєрів. Для забезпечення рівномірного переміщення продукту в товщі теплоносія та запобігання його механічній деформації реалізовано алгоритм жорсткої кінематичної синхронізації швидкостей обох транспортерних стрічок. Контролер високочастотно зчитує показання інкрементальних енкoderів та безперервно коригує завдання частоти для перетворювачів. Лінійна швидкість руху транспортерної стрічки обчислюється на основі кутової швидкості валу двигуна з урахуванням параметрів механічної передачі.

Окремим пріоритетним програмним блоком реалізовано алгоритм обробки нештатних та аварійних ситуацій, що є критично необхідним для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу та збереження

дороговартісного обладнання (табл. 4.1). У разі фізичного натискання постів аварійної зупинки, виявлення критичного перегріву теплоносія вище заданого порогу, критичного падіння рівня рідини або спрацювання автоматичних вимикачів через струмове перевантаження, контролер генерує внутрішнє апаратне переривання.

Таблицю 4.1 – Матриця аварійних блокувань та відповідних логічних реакцій системи

№	Аварійна ситуація (Подія)	Джерело сигналу (Датчик/Пристрій)	Логічна умова спрацювання	Реакція системи (Дія блокування)	Сигналізація (НМІ / Світлозвукова)
1	2	3	4	5	6
1	Аварійна зупинка (E-Stop)	Кнопка «Аварійна зупинка» на пульті	Контакт розімкнуто (NC -> Відсутність 24V)	Негайне знеструмлення всіх механізмів (M1-M5) та блокування нагріву (ЕК1-ЕК4).	Блимання червоної лампи, безперервна сирена. Повідомлення на НМІ: «АВАРІЙНА ЗУПИНКА».
2	Критично низький рівень олії	Датчик рівня (напр., поплавковий або ємнісний)	Сигнал LSL (Level Switch Low) = TRUE	Блокування ТЕНів (ЕК1-ЕК4) для запобігання пожежі. Зупинка циркуляційного насоса (M3) для захисту від сухого ходу.	Червоний індикатор. Повідомлення на НМІ: «Аварія: Низький рівень олії».
3	Перегрів олії (Критичний)	Датчик температури (РТ-100) / Захисний термостат	Температура > T _{max} (напр., > 210°C) або спрацювання апаратного термостата	Блокування ТЕНів (ЕК1-ЕК4). Конвеєри (M1, M2) вивантажують залишки (працюють t секунд). Насос (M3) працює для охолодження.	Увімкнення сирени. Повідомлення на НМІ: «КРИТИЧНИЙ ПЕРЕГРІВ! Увага пожежна небезпека».

Алгоритм аварійного захисту діє за безумовним сценарієм: негайно знімається сигнал дозволу роботи з тиристорних регуляторів для повної зупинки

генерації тепла, після чого виконується зупинка приводів конвеєрів шляхом зняття імпульсів з інверторів.

Прод. табл 4.1

1	2	3	4	5	6
4	Відмова/Перевантаження провідного конвеєра (M1)	Теплове реле захисту двигуна / Частотний перетворювач (ЧП)	Сигнал «Overload/Fault M1» = TRUE	Зупинка конвеєрів M1 та M2. Вимкнення нагріву (ЕК1-ЕК4), щоб продукт не згорів у ванні.	Повідомлення на НМІ: «Перевантаження приводу M1. Перевірте механіку».
5	Відмова/Перевантаження веденого конвеєра (M2)	Теплове реле / ЧП веденого приводу	Сигнал «Overload/Fault M2» = TRUE	Зупинка конвеєрів M1 та M2. Вимкнення нагріву (ЕК1-ЕК4).	Повідомлення на НМІ: «Перевантаження приводу M2».
6	Відмова циркуляційного насоса (M3)	Реле потоку олії / Теплове реле двигуна	Відсутність потоку > 5 с. Або «Fault M3» = TRUE	Блокування нагріву (ЕК1-ЕК4), оскільки без циркуляції можливий локальний перегрів олії навколо ТЕНів.	Жовтий/Червоний індикатор. Повідомлення: «Аварія циркуляції олії».
7	Відмова витяжної вентиляції (M4, M5)	Датчик перепаду тиску повітря / Контакт реле	Відсутність тяги / «Fault M4/M5» = TRUE	Блокування нагріву (ЕК1-ЕК4) для уникнення накопичення диму та небезпечних випарів у цеху.	Повідомлення на НМІ: «Відмова витяжки! Нагрів заблоковано».
8	Обрив датчика температури	ПЛК (модуль аналогового вводу)	Струм < 3.5 мА (для 4-20 мА) або опір $\rightarrow \infty$	Блокування ПД-регулятора, негайне вимкнення ТЕНів (ЕК1-ЕК4).	Повідомлення на НМІ: «ОБРИВ ДАТЧИКА TEMПЕРАТУРИ!».

1	2	3	4	5	6
9	Коротке замикання ТЕНів	Автоматичні вимикачі / Запобіжники в силовій шафі	Зникнення сигналу підтвердження від контактора ТЕНів	Логічне скидання сигналу керування нагрівом, перехід системи в режим очікування або аварії.	Повідомлення на НМІ: «Аварія в колі нагріву (КЗ)».

При цьому циркуляційний насос та витяжні вентилятори залишаються в роботі протягом розрахованого часу затримки для примусового зняття залишкового тепла з нагрівальних елементів та евакуації можливого задимлення, після чого також зупиняються, переводячи всю установку в безпечний заблокований стан до моменту усунення причин аварії та квітування помилки оператором.

4.3. Розробка прикладного програмного забезпечення.

Розробка прикладного програмного забезпечення є ключовим етапом створення автоматизованої системи керування фритюрницею безперервної дії, оскільки саме програмний код визначає логіку взаємодії всіх апаратних компонентів. Основним інструментом для написання логічного коду обрано інтегроване середовище розробки GX Works3, яке є офіційним та найбільш сучасним програмним забезпеченням для програмування логічних контролерів компанії Mitsubishi Electric. Це середовище дозволяє гнучко поєднувати різні мови програмування стандарту IEC 61131-3, забезпечуючи високу надійність та зручність супроводу проєкту. Для загальної організації алгоритму управління та обробки дискретних сигналів, таких як команди пуску, зупинки або аварійні блокування, використовується мова релейно-контактних схем Ladder Diagram. Водночас для реалізації складних математичних обчислень, зокрема контуру ПІД-регулювання температури олії та алгоритмічної синхронізації швидкостей конвеєрів, застосовується мова структурованого тексту Structured Text, яка

дозволяє компактно та зрозуміло описувати складні формули й логічні переходи (рис. 4.12).

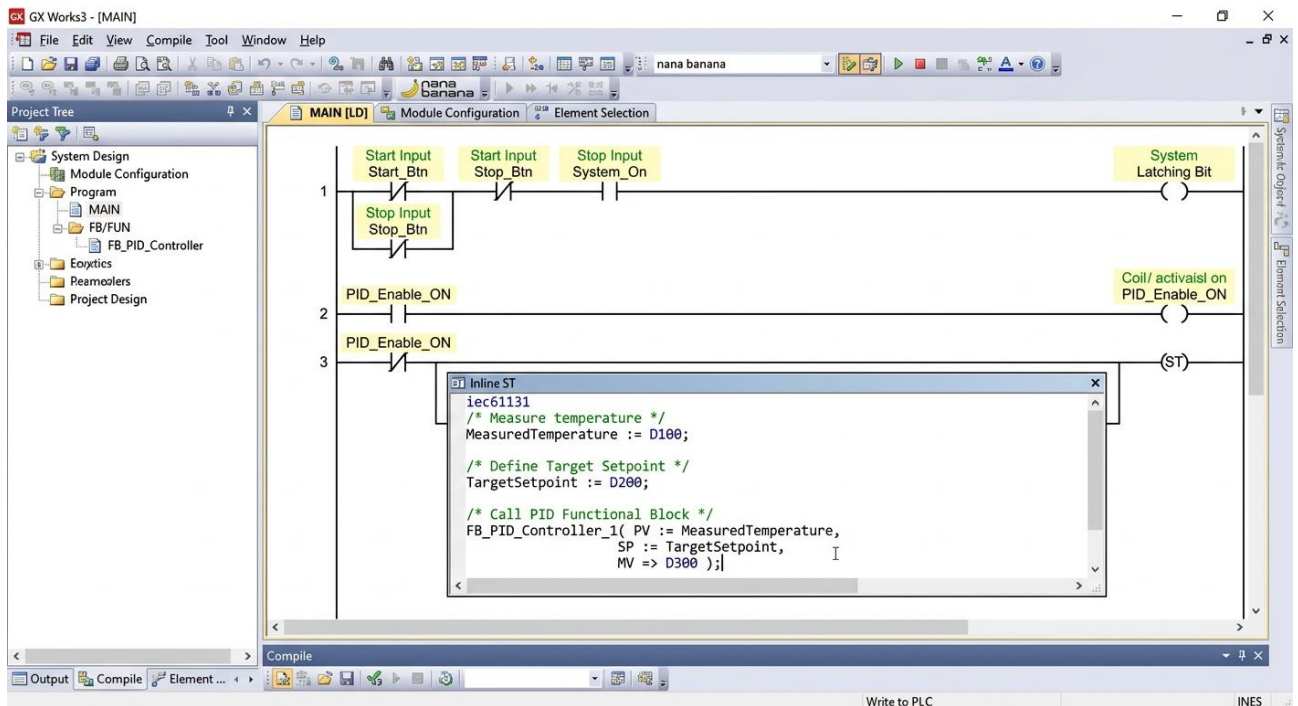


Рисунок 4.12 – Фрагмент програмного коду в середовищі GX Works3

Архітектура програмного забезпечення контролера побудована за модульним принципом, що значно спрощує подальшу модернізацію та налагодження системи керування технологічним процесом. Основний цикл програми розділений на незалежні підпрограми, кожна з яких відповідає за окремий функціональний вузол: масштабування та фільтрацію аналогових сигналів від датчиків температури, управління потужністю тиристорного нагрівача, контроль роботи циркуляційного насоса та витяжних вентиляторів, а також формування завдань для частотних перетворювачів конвеєрних стрічок. Важливим елементом програмного коду є блок аварійних захистів, який безперервно сканує стан системи і, у разі виникнення критичних ситуацій, миттєво формує керуючі впливи на вимкнення механізмів відповідно до розробленої раніше матриці аварійних блокувань. Усі змінні, що беруть участь у процесі регулювання, ретельно структуровані у глобальних списках змінних, що забезпечує швидкий та безпомилковий доступ до них як з боку логіки керування, так і з боку системи візуалізації (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Структура глобальних змінних проєкту

Назва змінної (Ter)	Адреса (Device)	Тип даних	Опис / Призначення
bCmd_SystemStart	X000	BOOL	Фізична кнопка «Пуск» на пульті керування (NO)
bCmd_SystemStop	X001	BOOL	Фізична кнопка «Стоп» на пульті керування (NC)
bCmd_E_Stop	X002	BOOL	Сигнал від кнопки «Аварійна зупинка» (NC)
bHMI_ResetAlarms	M100	BOOL	Команда з панелі HMI: Скинути аварії
bSts_SystemRun	M0	BOOL	Внутрішній прапорець: Система в роботі (Самоблокування)
bSts_PID_Enable	M1	BOOL	Дозвіл на виконання блоку ПІД-регулятора температури
bOut_PumpRun	Y000	BOOL	Команда на увімкнення контактора циркуляційного насоса (M3)
bOut_ExhaustRun	Y001	BOOL	Команда на увімкнення витяжних вент. (M4, M5)
bOut_AlarmSiren	Y007	BOOL	Команда на увімкнення світлозвукової сигналізації аварії
bAlm_LowOilLevel	M10	BOOL	Аварія: Низький рівень олії у ванні (Блокування нагріву)
bAlm_OverTemp	M11	BOOL	Аварія: Критичний перегрів олії (Апаратний термостат)
bAlm_Conv1_Fault	M12	BOOL	Аварія: Перевантаження провідного конвеєра M1
bAlm_Conv2_Fault	M13	BOOL	Аварія: Перевантаження веденого конвеєра M2
bAlm_SensorBreak	M14	BOOL	Аварія: Обрив датчика температури PT-100
iSys_ErrorCode	D300	INT	Код поточної системної помилки (для відображення тексту на HMI)
rTemp_PV	D100	REAL	Поточна температура олії, масштабована у градусах (°C)
rTemp_SP	D102	REAL	Задана температура олії (Уставка з панелі HMI, °C)
rHeat_MV_Power	D104	REAL	Вихідна потужність нагріву (0.0 ... 100.0 %) для тиристорів
rPID_Kp	D200	REAL	Коефіцієнт пропорційності ПІД-регулятора
rPID_Ti	D202	REAL	Час інтегрування ПІД-регулятора (секунди)
rPID_Td	D204	REAL	Час диференціювання ПІД-регулятора (секунди)
rConv1_Speed_SP	D110	REAL	Задана швидкість провідного конвеєра M1 (Уставка HMI, %)
rConv1_Speed_PV	D112	REAL	Фактична швидкість конвеєра M1 (Обчислена від енкодера, %)
rConv2_Speed_SP	D114	REAL	Задана швидкість веденого конвеєра M2 (Уставка HMI, %)
rConv2_Speed_PV	D116	REAL	Фактична швидкість конвеєра M2 (Обчислена від енкодера, %)
rSync_Ratio	D120	REAL	Коефіцієнт редукції/синхронізації між M1 та M2
iConv1_RawWord	D130	INT	Слово завдання швидкості для ПЧ M1
iConv2_RawWord	D131	INT	Слово завдання швидкості для ПЧ M2

Невід'ємною складовою прикладного програмного забезпечення є розробка людино-машинного інтерфейсу, який виступає сполучною ланкою між оператором установки та технологічним процесом. Розробка візуалізації здійснюється у спеціалізованому програмному забезпеченні GT Designer3, яке безперешкодно інтегрується з базою даних змінних проєкту GX Works3, уникаючи подвійного введення адрес тегів. Головним принципом побудови екранів оператора є ергономічність, інформативність та інтуїтивна зрозумілість. Інтерфейс навмисно не перевантажується зайвими графічними елементами або яскравими анімаціями, а кольорова гама чітко відповідає промисловим стандартам: зелений колір означає нормальну роботу механізму, сірий – зупинку, а миготливий червоний сигналізує про аварію. На головний екран виведені всі ключові параметри процесу смаження, мнемосхема самої фритюрниці з індикацією рівнів та температур, а також поля для введення технологічних уставок (рис. 4.13).

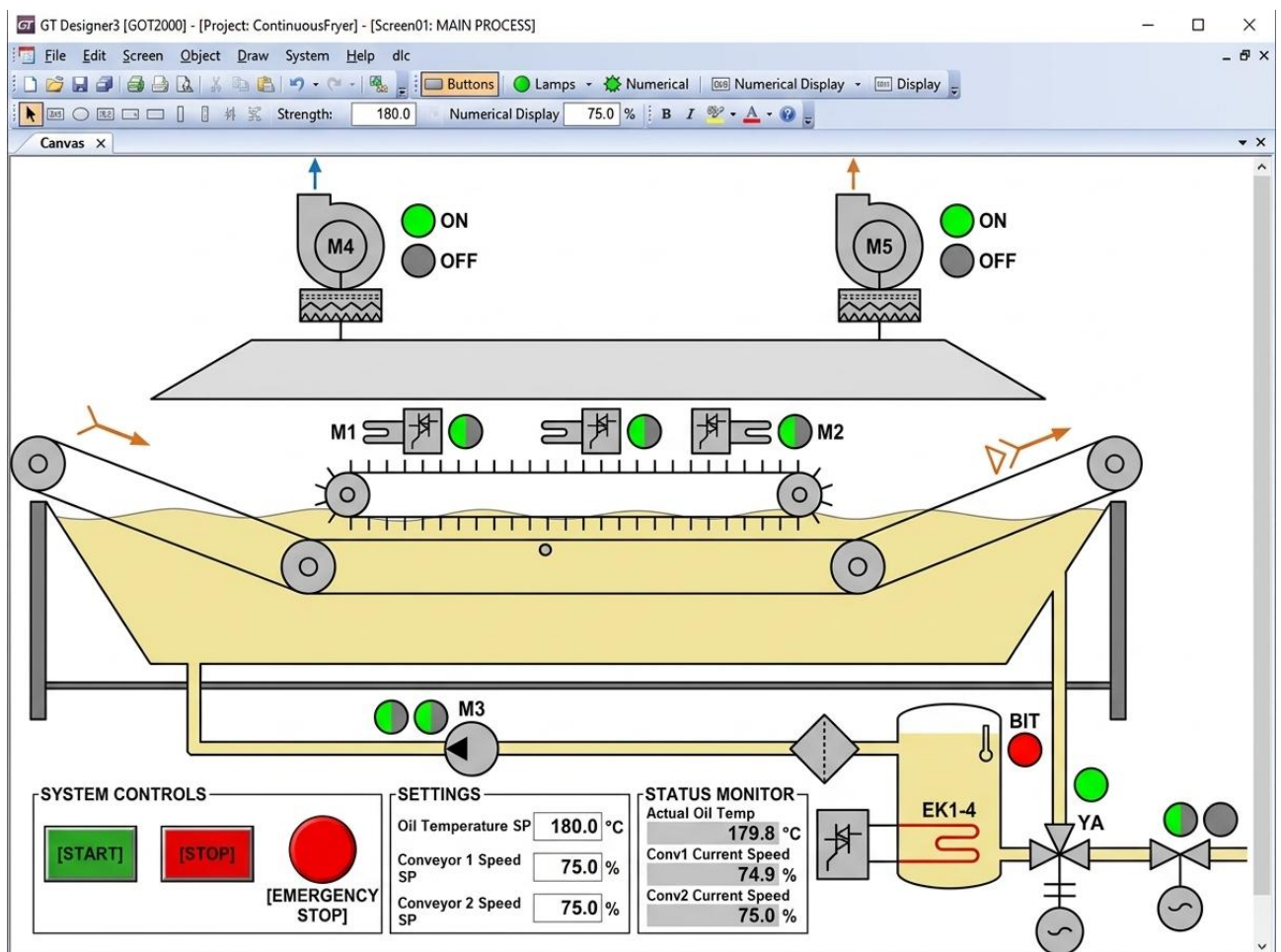


Рисунок 4.13 – Головний екран людино-машинного інтерфейсу

Крім головного екрана, загальна структура людино-машинного інтерфейсу включає низку додаткових сервісних вікон для глибшого контролю за обладнанням. До них належать екрани для тонкого налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора, сторінки архівації історичних трендів температури та швидкості, а також деталізований журнал аварійних подій (рис. 4.14). Усі критичні дії оператора, такі як зміна температурних режимів, квітування помилок або перехід у ручний режим керування, автоматично реєструються в системі для подальшого аналізу технологічним персоналом. Після розробки базового логічного коду та графічного інтерфейсу проводиться їхнє комплексне тестування за допомогою вбудованого програмного симулятора GX Simulator3. Цей інструмент дозволяє в режимі реального часу імітувати зміну вхідних сигналів, перевіряти адекватність реакції логіки на можливі апаратні відмови та оптимізувати розміщення елементів на панелі оператора ще до моменту завантаження кінцевої програми у реальне обладнання на виробничому майданчику.



Рисунок 4.14 – Екран історичних трендів та журналу подій

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1. Розрахунок капітальних витрат на проектування та обладнання.

Загальна сума капіталовкладень формується з вартості придбання апаратних засобів, витрат на розробку проєктної документації, створення прикладного програмного забезпечення, а також витрат на монтажні та пусконаладжувальні роботи. Основну частку матеріальних витрат складає придбання комплектуючих елементів системи керування. Відповідно до розробленої специфікації, базовим вузлом системи є програмований логічний контролер Mitsubishi Electric FX5U-32MR/DS, який доповнюється модулями розширення для обробки аналогових сигналів: модулем вводу сигналів термоопорів FX5-4AD-PT-ADP, стандартним модулем аналогового вводу FX5-4AD-ADP та модулем аналогового виводу FX5-4DA-ADP. Для забезпечення ефективного людино-машинного інтерфейсу в кошторис закладається вартість графічної панелі оператора GOT2000, а надійна мережева взаємодія компонентів забезпечується промисловим світчем NZ2ENG-T8N. До капітальних витрат також входить силове та приводне обладнання, зокрема два перетворювачі частоти FR-A800 для керування конвеєрами, чотири тиристорні регулятори потужності Maxwell MS3-VD3825C для нагрівальних елементів ТЕН, а також відповідна комутаційно-захисна апаратура (автоматичні вимикачі, магнітні пускачі ПМЛ-4100, проміжні реле PTF11A). Вагомою статтею витрат є польовий рівень, представлений чотирма датчиками температури PT-100, двома радарними рівнемірами JBRD-800DGWGY 1100, електромагнітним витратоміром LD EMFM EDF3000, триходовим клапаном Tameson та двома енкодерами Omron E6B2-WZ6C. Математично загальна вартість обладнання визначається як сума добутків кількості кожного технологічного елемента на його ринкову ціну (табл. 5.1). До отриманої матеріальної бази додаються прямі

витрати на оплату праці інженерів-проектувальників і програмістів, а також накладні витрати підприємства-інтегратора.

Таблиця 5.1 – Загальна вартість обладнання

№	Назва обладнання	Тип	Кількість	Ціна/шт	Ціна
1	ПЛК Mitsubishi Electric	FX5U-32MR/DS	1	29910.00	29910.00
2	Радарний рівнемір	JBRD-800DGWGY 1100	2	16700.00	33400.00
3	Електромагнітний витратомір	LD EMFM EDF3000	1	13200.00	13200.00
4	Панель оператора	GOT2000	1	32131.00	32131.00
5	Промисловий світч	NZ2EHG-T8N	1	8281	8281.00
6	Модуль аналогового вводу	FX5-4AD-PT-ADP	1	12130	12130.00
7	Модуль аналогового вводу	FX5-4AD-ADP	1	11 746	11746.00
8	Модуль аналогового виводу	FX5-4DA-ADP	1	7 026	7026.00
9	Триходовий змішувальний клапан	Tameson V3K8T	1	54 800	54800.00
10	Датчик температури	PT-100	4	1679.00	6716.00
11	Лампа сигнальна червона	A22-RLF-RT 220 B	10	51.00	510.00
12	Сигнальна арматура зелена	AD16-16DS 24V AC/DC	8	47.00	376.00
13	Пускач електромагнітний	ПМЛ-4100 О*4А 220В	7	3 418	23926.00
14	Проміжне реле	PTF11A LY3 220 B	2	205	410.00
15	Проміжне реле	PTF11A LY3 24 B	9	167.00	1503.00
16	Вимикач автоматичний	GV2ME01	1	4125.00	4125.00
17	Вимикач автоматичний	GV2ME14	2	2531.00	5062.00
18	Вимикач автоматичний	GV2ME05	3	2443.00	7329.00
19	Вимикач автоматичний	GV2ME10	4	2832.00	11328.00
20	Кнопка подвійна "Старт/Стоп"	TB5-AL8425	10	157.00	1570.00
21	Пост одномісний "АВАРІЙНИЙ СТОП"	XAL-D174	2	157.00	314.00
22	Перетворювач частоти	FR-A800	2	33717.00	67434.00
23	Енкодер	Omron E6B2-WZ6C	2	1710.00	3420.00
24	Регулятор потужності	Maxwell MS3-VD3825C	4	2820.00	11280.00
25	Клапан	Belimo V3BW3	1	20436.00	20436.00
	Всього				368363.00

5.2. Визначення економічної ефективності та терміну окупності системи автоматизації.

Для визначення терміну окупності впровадженої системи розраховується очікуваний річний економічний ефект. Цей показник формується за рахунок зниження питомих витрат електроенергії завдяки використанню частотного регулювання та точного ПІД-регулювання нагріву, зменшення кількості бракованої продукції через жорстку стабілізацію технологічних параметрів, а також завдяки оптимізації фонду оплати праці обслуговуючого персоналу. Нормативний термін окупності розраховується за формулою:

$$T = \frac{K}{E}, \quad (5.1)$$

де K – загальні капітальні витрати на створення та впровадження системи автоматизації;

E – чистий прибуток.

Розрахунок терміну окупності зводимо в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Зведена таблиця терміну окупності

	Розрахункові значення	Од.	Відповідний коефіцієнт	Значення
1	Загальна вартість технічних засобів автоматизації			368363.00
2	Торгівельно-транспортні витрати		0.11	40519.93
3	Витрати на монтаж технічних засобів		0.17	62621.71
4	Витрати на прокладення проводок	150	17.67	2650.5
5	Інші капітальні витрати 2%		0.02	7367.26
6	Капітальні витрати			481522.4
7	Відрахування на амортизацію		0.15	72228.36
8	Витрати на поточний ремонт		0.18	86674.032
9	Витрати на енергоресурси		1.3	5466.24
	потужність автоматизації	1.46		
	кількість годин роботи	2880		
10	Витрати на оплату праці персоналу			172800
	кількість персоналу	2		
	ставка оператора	30		
11	Річні експлуатаційні витрати			337168.632
12	Зведені витрати		0.15	409396.992
13	Чистий прибуток			170467.2
	прибуток за рахунок зменшення персоналу			168307.2
	прибуток за рахунок зменшення браку			2160
	економія за рахунок підвищення якості	0.01%		
14	Термін окупності САК			2.824721706

Термін окупності складає 2.8 роки, тобто розроблений проєкт автоматизації економічно доцільний та рентабельний до практичного впровадження.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему керування технологічним процесом смаження у фритюрниці безперервної дії. Аналіз об'єкта визначив ключові вектори автоматизації: прецизійну стабілізацію температури олії та синхронізоване керування швидкостями конвеєрів для дотримання точного часу обробки продукції.

Завдяки математичному моделюванню теплової динаміки враховано інерційність установки та оптимізовано параметри ПІД-регулятора. Це гарантує швидкий вихід на температурний режим без перерегулювання, що мінімізує ризик утворення шкідливих домішок та деградації олії.

Апаратну частину системи побудовано на базі сучасного обладнання Mitsubishi Electric, зокрема перетворювачів частоти FR-A800 та сенсорної панелі GOT2000. Розроблене у середовищі GX Works3 програмне забезпечення ефективно реалізує алгоритми регулювання процесу та комплексну систему аварійних блокувань. Економічні розрахунки повністю підтвердили доцільність і рентабельність впровадження спроектованої системи на виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fellows P. J. Food Processing Technology: Principles and Practice. CRC Press, 2000. 575.
2. Шинкар В.І., Грищенко В.О. Дослідження та розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом обсмаження картопляних чіпсів із використанням комплексу технічних засобів Mitsubishi Electric. 79-ої науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК». 2026. 192.
3. [Kiremko Potato Chips Fryer] (<https://kiremko.com/machines/potato-chips-fryer/>). Continuous frying process systems for potato chips production. 2025.
4. Gholamibozanjani G., Leong S. Y., Oey I. та ін. Heat and mass transfer modeling to predict temperature distribution during potato frying after pre-treatment with pulsed electric field // Foods. 2021. Vol. 10, No. 8. Article 1679. DOI: 10.3390/foods10081679.
5. Haverkort A. J., Linnemann A. R., Struik P. C., Wiskerke J. S. C. On processing potato 2. Survey of products, processes and operations in manufacturing // Potato Research. 2023. Vol. 66. 339–383.
6. A digital twin integrating multi-objective optimization to support fryer operators in managing potato crisps production // Journal of Food Engineering. 2026. Vol. 406. Article 112800. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2025.112800.
7. Fellows P. Food Processing Technology: Principles and Practice. 5th ed. Cambridge : Woodhead Publishing, 2022. 1152.
8. Brennan J. G. Food Processing Handbook. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2021. 800.
9. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to Food Engineering. 6th ed. London : Academic Press, 2022. 892 p.
10. Astrom K. J. & Hagglund T. Advanced PID Control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460.
11. Isermann R. Digital control systems. Springer Science & Business Media, 2013. 566.

12. Грищенко В. О., Степаненко С. П., Грищенко І. Ю. Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2025. 240.
13. [Mitsubishi Electric Factory Automation] (<https://www.mitsubishielectric.com/fa/>). MELSEC iQ-R Series programmable controllers documentation. 2026.
14. [Mitsubishi Electric FR-A800 Series] (https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/drv/inv/pmerit/fr_a800/). Technical manuals and industrial drive applications. 2026.