

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Шосткинський інститут

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра системотехніки та інформаційних технологій

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Георгій Худолей
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,
(код та назва)

освітньо-професійної програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної / освітньо-наукової (назва програми)
та робототехніка»

на тему: Система управління технологічної лінії виробництва вафель

Здобувача групи СУ-01ш-1 Захарченко Дениса Ігоровича
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ (підпис)

_____ Денис Захарченко
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник ст.викладач, к.т.н Георгій Худолей
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант¹⁾ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

РЕФЕРАТ

Захарченко Денис Ігорович. Система управління технологічної лінії виробництва вафель. Бакалаврська робота. Шосткинський інститут Сумського державного університету. Шостка, 2024 рік.

Бакалаврська робота містить 53 аркушів пояснювальної записки, з урахуванням 35 рисунків, 4 таблиць; 1 креслення.

У цій дипломній роботі було зроблено модернізацію системи управління технологічним процесом виробництва вафель з акцентом на автоматизацію. Було проведено конструктивно-технологічний аналіз процесу виробництва, вибрано параметри керування та визначено канали контролю та сигналізації. Було обґрунтовано вибір сучасних засобів автоматизації та розроблено функціональну схему автоматизації. У розрахунковій частині було створено математичну модель процесу виробництва вафель за допомогою аналітичного метода, на основі цієї математичної моделі було синтезовано систему управління температурою в камері охолодження вафельних листів.

Ключові слова: системи що керуються, технологічні процеси, алгоритми управління, мікропроцесорні контролери, MatLab, параметри що регулюються, параметри управління, датчики, ідентифікація.

SUMMARY

Denys I. Zakharchenko. Control system of the technological line of wafer production. Bachelor's thesis. Shostka Institute of Sumy State University. Shostka, 2024.

The bachelor's thesis contains 53 sheets of explanatory note, including 35 figures, 4 tables; 1 drawing.

In this thesis, we modernized the control system for the technological process of waffle production with an emphasis on automation. A constructive and technological analysis of the production process was carried out, control parameters were selected, and control and signaling channels were determined. The choice of modern automation tools was substantiated and a functional automation scheme was developed. In the computational part, a mathematical model of the wafer production process was created using the analytical method; on the basis of this mathematical model, a temperature control system in the cooling chamber of wafer sheets was synthesized.

Keywords: controlled systems, technological processes, control algorithms, microprocessor controllers, MatLab, adjustable parameters, control parameters, sensors, identification.

ЗМІСТ

стр.

Список скорочень та умовних позначень.....	5
Вступ.....	6
1 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта автоматизації.....	7
2 Вибір параметрів технологічного процесу.....	12
3 Вибір каналів контролю та управління.....	14
4 Вибір засобів автоматизації.....	19
5 Розрахункова частина.....	33
Висновок.....	52
Список використаних джерел.....	53

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом

ВО – виконуючий орган

ВМ – виконуючий механізм

КВП і А – контрольно-вимірювальні прилади і автоматика

МУ – мета управління

ОУ – об'єкт управління

П-регулятор – пропорційний регулятор

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор

ПЗ – програмне забезпечення

ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом

ПК – персональний комп'ютер

ППП – пристрій плавного пуску

ПЧ – перетворювач частоти

ПУ – пристрій управління

РКІ – рідкокристалічний індикатор

РО – робочий орган

САПР – система автоматизованого проектування

САР – система автоматичного регулювання

САУ – система автоматичного управління

ТП – технологічний процес

ЦД – цифровий дисплей

ЦП – центральний процесор

ВСТУП

Автоматизація лінії виробництва вафель є важливим напрямком у розвитку харчової промисловості. Вафлі, як популярний кондитерський продукт, мають високий попит серед споживачів, що стимулює підприємства до впровадження новітніх технологій і модернізації виробничих процесів. Сучасні технологічні лінії характеризуються високим рівнем автоматизації, що дозволяє підвищити продуктивність, знизити витрати та покращити якість продукції.

Автоматизація виробництва вафель також має важливе значення для економіки країни. Вона сприяє створенню нових робочих місць, підвищенню рівня зайнятості населення та збільшенню доходів. Крім того, модернізація виробництва стимулює розвиток суміжних галузей, таких як машинобудування, IT-сектор та логістика. Збільшення обсягів виробництва та покращення якості продукції сприяють зростанню експорту, що позитивно впливає на економічну стабільність країни.

Впровадження автоматизованих систем на лінії виробництва вафель сприяє значному підвищенню ефективності виробництва. Це досягається через економію матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів, а також завдяки зниженню впливу людського фактору на процес виробництва.

Сучасні методи автоматизації включають використання передових інформаційних технологій, робототехніки та систем контролю. Це дозволяє забезпечити високу надійність та ефективність роботи виробничих ліній, знижуючи ризик помилок та простоїв. Використання універсальних, ергономічних та людино-машинних інтерфейсів значно підвищує зручність управління та обслуговування обладнання.

Основним завданням проекту є розробка та впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом лінії виробництва вафель. Це включає проектування, модернізацію та оптимізацію всіх етапів виробництва, від підготовки сировини до пакування готової продукції. Успішна реалізація проекту дозволить значно підвищити ефективність виробництва, знизити витрати та забезпечити високу якість продукції, що сприятиме зміцненню позицій підприємства на ринку та його подальшому розвитку.

1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Характеристика продукції, сировини та напівфабрикатів: Борошно вищого ґатунку одержують з м'яких скловидних і напівскловидних сортів пшениці. Колір борошна білий або білий з кремовим відтінком. Борошно має високі хлібопекарські властивості, широко використовується у кондитерському виробництві.

Яєчний жовток – інгредієнт, який використовується у виробництві вафельного тіста для покращення смаку, текстури і характеристик вафель. Жовток є частиною яйця і має багатий жовтковий колір через вміст каротину. Він додає вафлям багатий, кремовий смак, який робить їх більш апетитними і привабливими для споживачів. Також жовток містить жир та протеїн, які додають м'якість і ніжність вафлям, забезпечуючи хрусткість зовні і м'якість всередині. А колір жовтка покращує зовнішній вигляд вафель, роблячи їх більш привабливими для споживачів і додаючи апетитний вигляд.

Сіль – інгредієнт, який додається до складу тіста вафель для підсмаження, щоб підкреслити смак і додати балансу до солодких інгредієнтів, таких як цукор. Сіль допомагає збалансувати солодкість вафель, створюючи приємний концентрат смаку і підсилюючи аромати. Також вона може підсилити смак інших інгредієнтів, що додається до тіста, таких як ваніль, шоколад або спеції. Ще, сіль може впливати на роботу ферментів в тісті, таких як ріжучий фермент, що допомагає утворювати структуру вафель.

Сода питна, або також відома як гідрокарбонат натрію (NaHCO_3), є хімічним розчином, який використовується в кулінарії, зокрема, для випікання вафель і інших виробів. Основна функція соди питної в тісті для вафель - це посилення процесу викиду, що дозволяє вафлям стати пухкими і легкими. Під час взаємодії з кислотними інгредієнтами, сода питна реагує, утворюючи вуглекислий газ, який допомагає вафлям зробити зовнішню шкіру хрусткою, а в середині - ніжною і пухкою. Вуглекислий газ, також, розширює тісто, що допомагає вафлям набувати бажану форму та текстуру. Сода питна також може використовуватися для нейтралізації кислотності в рецепті, яка може бути викликана іншими інгредієнтами, наприклад, кислотними молочними продуктами.

Цукрова пудра - це вид цукру, який подрібнюється до дуже дрібних кристалів і потім проціджується через сито, щоб отримати м'який, пухкий порошок. Це інгредієнт, який

використовується для прикраси і приготування вафель, додаючи їм декоративний вигляд та приємний солодкий смак.

Цукрова пудра має властивість поглинати вологу з поверхні вафель, що робить їх зовнішню сторону більш сухою і додає хрусткості. Внаслідок того, що цукрова пудра містить цукор, вона також додає солодкого смаку до вафель, підкреслюючи їх солодкість із внутрішньої частини.

Гідрожир - це жирний продукт, який використовується в харчовій промисловості для виробництва вафель. Гідрожир є результатом гідрогенізації рослинних олій, таких як соєве, пальмове, кукурудзяне тощо. Цей процес змінює структуру жирів, роблячи їх більш стійкими до окислення і забезпечуючи більш стабільні продукти. Гідрожир має структуру, яка робить його ідеальним для виробництва хрустких та повітряних вафель. Це дозволяє вафлям бути хрусткими зовні та м'якими всередині. Також додавання гідрожиру допомагає зберігати вафлі свіжими та покращує їх тривалість зберігання, оскільки він менше схильний до окислення порівняно з ненасиченими жирними кислотами.

Фосфатиди - це клас речовин, які належать до групи фосфоліпідів. Основною функцією фосфатидів в харчовій промисловості є їх властивість емульгатора та стабілізатора. У виробництві вафель фосфатиди можуть бути використані для регулювання консистенції тіста, покращення текстури вафель та підвищення їх якості. Фосфатиди допомагають змішувати воду та жири, що забезпечує рівномірне розподілення жирів у тісті для вафель. Це покращує якість тіста та дозволяє зберігати його стабільність під час виробництва та зберігання. Також фосфатиди можуть використовуватися для покращення текстури вафель, роблячи їх більш ніжними та м'якими. Додавання фосфатидів може допомогти контролювати в'язкість тіста для вафель, що в свою чергу впливає на легкість розливання та формування вафельних пластів.

Кислота лимонна є харчовою добавкою, яка використовується для покращення смаку та консервації вафельного тіста. Основними характеристиками кислоти лимонної є кислий смак та антиоксидантні властивості. Кислота лимонна додає кислоти до тіста, допомагаючи регулювати його рН. Це може бути важливим для контролювання процесів взаємодії різних інгредієнтів у тісті та впливу на кінцевий смак та текстуру вафель. Також кислота лимонна має антиоксидантні властивості, які можуть допомогти зберігати вафлі свіжими та зменшити ймовірність окислення жирів у тісті.

Есенція - це ароматична рідина або концентрована рідка добавка, яка використовується для надання специфічного смаку та аромату вафлям. Це може бути наприклад ванільна есенція,

мигдальна, лимонна, карамельна та інші. Есенції часто використовуються у виробництві вафель для покращення смакових якостей і створення різноманітних смакових варіантів.

Усі ці продукти, сировини та напівфабрикати потрібні для виготовлення вафель, надання аромату та смаку та збереження їх свіжості як можна довше.

Пристрій і принцип дії лінії. Приготування тіста безперервним способом здійснюється шляхом попереднього приготування емульсії зі всіх компонентів рецептури, за винятком борошна, і подальшого змішування її з борошном.

Приготування емульсії проводять таким чином (див. рис. 1) [7]. У емульсатор (22) періодичної дії з Т-образними лопастями з частотою обертання 270 хв⁻¹ спочатку завантажують жовток або меланж, заздалегідь розведений у воді в співвідношенні 1:1, потім рослинне масло, харчові фосфати, гідрокарбонат натрію (сода) у вигляді 7,5 %-ного розчину, сіль і перемішують протягом 10-15хв. До отриманої суміші з розподільного бака (4) через кран (5) за допомогою порційного дозатора (6) додають приблизно 5 % загальної кількості води, що йде на заміс тіста, і перемішують ще 5хв. Отриману концентровану емульсію подають насосом (21) через фільтр (20) у витратну ємність (12) з мішалкою, звідки вона поступає в бачок постійного рівня (19). Бачок забезпечує стабільний натиск на всмоктуючій лінії плунжерного насоса-дозатора (18), що направляє емульсію в гомогенізатор (11). В нім при інтенсивному перемішуванні в невеликому об'ємі концентрована емульсія змішується з кількістю води, що подається з дозатора (3) безперервних дій, що залишилася.

Після гомогенізатора (11) розбавлена емульсія безперервно поступає у вібраційний змішувач (17). Туди ж з бункера (1) дозатором (2) безперервно подається просіяне борошно. Безперервне інтенсивне змішування розбавленої емульсії з борошном при одночасній дії направлених вібраційних коливань дозвляє прискорити приготування вафельного тіста.

З приймального бачка змішувача готове тісто за допомогою насоса проціджується через фільтр і подається у витратний бачок вафельної печі (28). Температура готового тіста повинна бути не вище 20 °С, вологість 58-65 %. Формування вафельних листів здійснюється шляхом відливання заданої порції тіста безпосередньо у форми печі (28). Тісто заповнює внутрішню порожнину завтовшки 2-3 мм між металевими плитами вафельної форми. Стабілізація форми листа відбувається в результаті видалення вологи при випічці. Температура випічки складає 170-210 °С, тривалість випічки 2-3 хв., вологість випеченого вафельного листа 0,7-1,3 %, його маса – 48-52г.

Вафельні листи з печі (28) подаються на люльки конвеєра (29) і охолоджуються до температури повітря в приміщенні цеху, а потім поступають в намазуючу машину (30).

Безперервне приготування начинки здійснюється таким чином. Вафельні обрізання заздалегідь подрібнюють в меланжері (27), а потім в п'ятивалковому млині (26). Отримана вафельна крихта подається шнековим дозатором (25) в змішувач (24). У нього ж з темперуючої машини (9) за допомогою дозатора (10) подається розплавлений жир (близько 20 % загальної його кількості, що йде на приготування начинки), в якому розчиняють лецитин. У приймальну воронку змішувача (24) дозують також розчини лимонної кислоти, що ароматизує есенції і фарбника. В результаті змішування цих компонентів виходить пастоподібна емульсія, яка шестерним насосом подається через фільтр в дозатор безперервної дії (14). З нього емульсією дозують у віброзмішувач (23).

Жир (у блоках) подають в темперуючу машину (9) і після перекладу в рідкоподібний стан велика частина жиру насосом безперервно подається в охолоджувач (15) через сітчастий фільтр (16).

Завдяки охолодженню до 20-23 °С і механічній обробці жир набуває сметаноподібної консистенції з великою кількістю центрів кристалізації і безперервно завантажується у вібраційний змішувач (23).

Цукор-пісок з бункера (7) дозатором (8) подається в мікромлин (13), звідки у вигляді пудри прямує у віброзмішувач (23).

В результаті інтенсивної обробки суміші вищеперелічених рецептурних компонентів у віброзмішувач (23) утворюється пишна, збита жирова начинка. Вона насосом через сітчастий фільтр подається в приймальну воронку намазуючої машини (30).

У цій машині за допомогою намазуючих механізмів на листи наноситься шар начинки, а після укладання листів, що намазали, в стопки утворюються багатошарові вафельні пласти. На виході з машини (30) пластів укладають на люльки конвеєра охолоджуючого апарату (31), а потім штаблером (32) в стопки. Далі пласти розрізають на окремі вироби за допомогою різальної машини (33). Загортковочною машиною (34) вафлі упаковують в пакети або пачки, які потім укладають в гофрокори, що заклеюються машиною (35). Готова продукція прямує на склад.



Рисунок 1. Машинно-аппаратурна схема лінії виробництва вафель з жировими начинками [7].

1 – бункер для борошна; 2 – дозатор борошна; 3 – дозатор води; 4 – розподільний бак; 5 – кран; 6 – порційний дозатор; 7 – бункер для цукру; 8 – дозатор цукру; 9 – темперувальна машина; 10 – дозатор жиру; 11 – гомогенізатор; 12 – ємність з мішалкою; 13 – мікромлин; 14 – дозатор емульсії; 15 – охолоджувач; 16 – сітчастий фільтр; 17 – вібраційний змішувач; 18 – насос-дозатор; 19 – бачок; 20 – фільтр; 21 – насос; 22 – емульсатор; 23 – віброзмішувач для начинки; 24 – змішувач; 25 – шнековий дозатор; 26 – п’ятивалковий млин; 27 – меланжер; 28 – вафельна піч; 29 – конвеєр; 30 – намазочна машина; 31 – охолодний апарат; 32 – штабелер; 33 – різальна машина; 34 – загортова машина; 35 – заклеювальна машина.

2. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Проаналізувавши хід процесу технологічної лінії виробництва вафель, було відокремлено декілька параметрів, які мають головний вплив.

Інформацію було структуровано у вигляді таблиці:

Таблиця 1 – Параметри технологічного процесу

Параметр	Позиція технологічної схеми	Функція	Відхилення	Значення	
				Min	Max
Вага	3 дозатора борошна	Контроль, регулювання	5%	240 кг	245 кг
Вага	3 дозатора води	Контроль, регулювання	5%	110 кг	120 кг
Вага	3 дозатора цукру	Контроль, регулювання	5%	385 кг	390 кг
Вага	3 дозатора емульсії	Контроль, регулювання	5%	5 кг	10 кг
Вага	3 дозатора жиру	Контроль, регулювання	5%	310 кг	315 кг
Вага	3 шнекового дозатора	Контроль, регулювання	5%	94 кг	98 кг
Рівень	Бункер для борошна	Контроль	10%	1,9 м	2,0 м
Рівень	Бачок	Контроль	10%	1,9 м	2,0 м
Рівень	Розподільний	Контроль	10%	1,9 м	2,0 м

	бак				
Температура	В охолоджувачі	Контроль	5%	20 °C	23 °C
Температура	В охолоджувачі	Контроль	5%	20 °C	23 °C
Температура	В вафельній печі	Контроль	5%	170 °C	200 °C
Температура	В охолоджуваному апараті	Контроль	5%	22 °C	23 °C

3. ВИБІР КАНАЛІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ

До уваги було обрано всю інформацію з першого та другого розділів, потрібно отримати та підібрати адміністративні, регуляторні і також управлінські канали.

3.1 Канали контролю та управління

3.1.1 Вага борошна, що виходить з дозатора борошна

З метою контролю правильного дозування борошна на виході з дозатора борошна, потрібно контролювати та регулювати вагу дозованої сировини. Для цього на виході з дозатора борошна встановлено датчик ваги. А для регулювання встановлено клапан поз. 1б, який регулює дозування борошна на виході.

3.1.2 Вага води, що виходить з дозатора води

Для контролю дозування води на виході з дозатора води, треба контролювати та регулювати вагу дозованої рідини. Для цього на виході з дозатора води встановлено датчик ваги. Для здійснення регулювання встановлено клапан поз. 2б, який здійснює контролювання дозування води на виході з дозатора.

3.1.3 Вага цукру, що виходить з дозатора цукру

З метою здійснення контролю дозування цукру на виході з дозатора, потрібно контролювати і регулювати вагу сировини. Для цього було встановлено на виході з дозатора цукру датчик ваги. Регулювання було здійснено за допомогою встановленого клапана поз. 3б, який регулює дозування цукру на виході з дозатора цукру.

3.1.4 Вага емульсії, що виходить з дозатора емульсії

Для мети по контролю правильного дозування емульсії на виході з дозатора емульсії, потрібно здійснювати контролювання та регулювання вагу дозованої сировини. Тому на виході з дозатора емульсії було встановлено датчик ваги. А для регулювання було встановлено клапан поз. 4б, щоб здійснювати регулювання дозування емульсії на виході з дозатора.

3.1.5 Вага жиру, що виходить з дозатора жиру

Для контролю дозування жиру на виході з дозатора жиру, потрібно контролювати вагу дозованої сировини та здійснювати її регулювання. На виході для контролю з дозатора жиру було встановлено датчик ваги. А для регулювання встановлено клапан поз. 5б, який регулює дозування жиру на виході з дозатора.

3.1.6 Вага вафельної крихтки, що виходить з шнекового дозатора

З метою контролю правильного дозування вафельної крихтки на виході з шнекового дозатора, потрібно контролювати та регулювати вагу дозованої сировини. Для цього на виході з шнекового дозатора встановлено датчик ваги. А для керування встановлено клапан поз. 6б, який регулює дозування вафельної крихтки на виході з дозатора.

3.1.7 Рівень у бункері для борошна

З метою запобігання переповнення бункера для борошна, потрібно в ньому контролювати рівень борошна. Для цього було встановлено датчик рівня, який вимірює рівень борошна, після чого він надсилає отриману інформацію до контролера.

3.1.8 Рівень у бачку

Для запобігання переповнення бачку, треба в ньому контролювати рівень. Тому у бачку було встановлено датчик рівня, для вимірювання рівня сировини, після чого датчик отриману інформацію надсилає до контролера.

3.1.9 Рівень у розподільному бачку

Для мети по запобіганню переповнення розподільного бачку, потрібно в ньому контролювати рівень сировини. Тому в ньому було встановлено датчик рівня. Датчик вимірює рівень, після чого отриману інформацію надсилає до контролера.

3.1.10 Температура в охолоджувачах

Для охолодження жиру, та нормального забезпечування підтримування потрібної температури в охолоджувачах, було встановлено датчик температури. Він контролює температуру в охолоджувачах, та надсилає отриману інформацію до контролера.

3.1.11 Температура в вафельній печі

Для випічки вафельних листів, та забезпечування потрібної температури в вафельній печі, було встановлено температурний датчик. Датчик здійснює контроль температури в вафельній печі, та передає інформацію до контролера.

3.1.12 Температура в охолоджуваному апараті

Для охолодження вафельних пластів, для їх охолодження потрібно підтримувати потрібну температуру в охолоджуваному апараті, для цього було встановлено датчик температури, який контролює температуру в охолоджуваному апараті, та передає отриману інформацію до контролера.

3.2 Контури управління

Здійснюючи аналіз процесу технології, етапів фізичних процесів та його основи, було зроблено контролюючі контури, їх управління та регулювання.

3.2.1 Контур контролю ваги

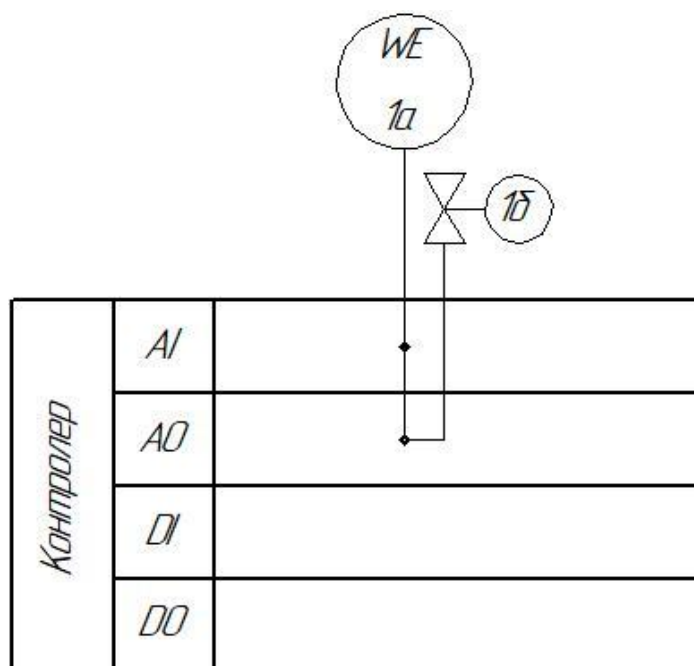


Рисунок 2 – Контур контролю ваги

В цьому контурі було використано тензодатчик ваги CAS MNT [9] з діапазоном в 20-1000 кг для вимірювання ваги вихідної сировини та рідини. Датчик ваги має виходи в діапазоні 4...20мА, вони потрібні для відправки сигналу та інформації про виміряну вагу до контролера.

3.2.2 Контур контролю рівня

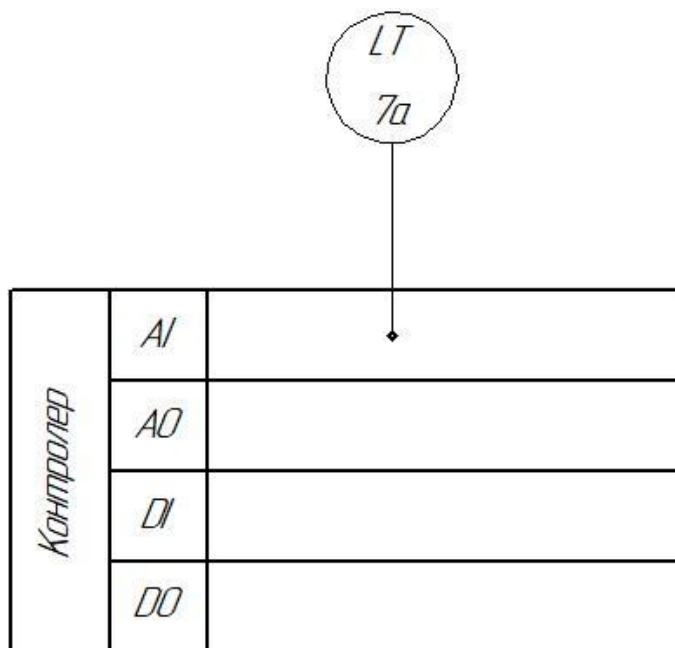


Рисунок 3 – Контур контролю рівня

В цьому контурі було використано ємнісний датчик рівня SIEMENS POINTEK CLS 100 [12] для вимірювання та контролю рівня сировини та рідини. Датчик рівня SIEMENS POINTEK CLS 100 [12] має частину погруження довжиною в 2 метри, що підходить для встановлення його в середині ємності з сировиною та рідиною.

3.2.3 Контур контролю температурою

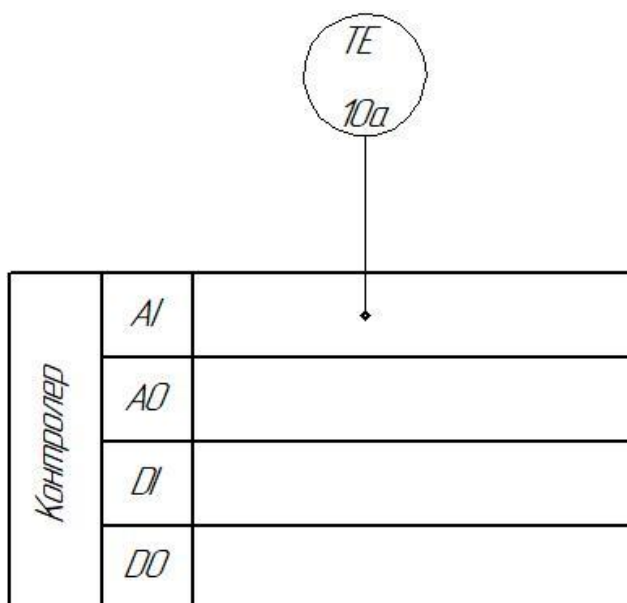


Рисунок 4 – Контур контролю температурою

В цьому контурі було використано термодатчик PT100 [11] з діапазоном -30...+200 °С. Який використовується для вимірювання температури в робочих пристроях.

3.2.4 Контур керування насосами

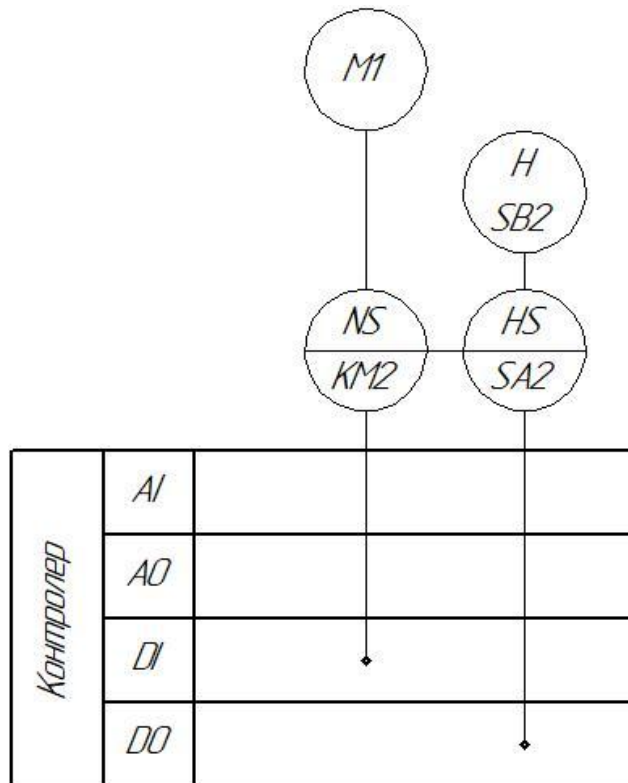


Рисунок 5 – Контур керування насосами

Для контурів керування насосами для лінії виготовлення вафель, були використані перемикачі універсальні, кнопки та магнітні пускачі. Засоби комутації мають залежність від кількості насосів, які використовуються.

Беручи за основу технологічну схему лінії виробництва вафель та розглянутих вище контурів контролю та керування може бути розроблена функціональна схема автоматизації системи управління лінії виробництва вафель. Функціональна схема має позначення СУ-01ш-1.151.04. А1, яка включає в себе елементи та пристрої керування, регулювання та контролю які необхідні для забезпечення нормального технологічного процесу лінії виробництва вафель.

4. ВИБІР СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для автоматизації лінії виробництва вафель використовувати найсучаснішу систему контролю та керування є правильним рішенням. Тому для цього було обрано найсучасніші технічні засоби автоматизації, контролюючі прилади, прилади реєстрації та індикації. Засоби були вибрані по критеріям надійності та уніфікованості.

Ці засоби забезпечать правильний, безаварійний та нормальний режими роботи приладів. Це дозволить забезпечити ефективну роботу лінії виробництва вафель.

4.1 Вибір датчиків

Для початку роботи контурів керування, регулювання та контролю, потрібно встановити датчики, які вимірюють вагу, рівень та температуру.

4.1.1 Вибір датчиків ваги

Фізичні принципи датчиків ваги базуються на кількох основних механізмах, які використовуються для вимірювання маси або сили. Найпоширенішими типами датчиків ваги є тензодатчики, п'єзоелектричні датчики та електромагнітні датчики. Тензодатчики є одними з найбільш поширених і використовуються для вимірювання деформації матеріалу під дією сили або навантаження. Так як тензодатчики ваги є найбільш поширеними, розглянемо саме цей тип.

Тензодатчик ваги CAS MNT [9] є прикладом високоякісного датчика, який може використовуватись для точного вимірювання ваги у різних промислових застосуваннях, включаючи автоматизацію виробничих ліній.

Цей датчик має переважні особливості, що роблять його фаворитом для автоматизації лінії виробництва вафель.

- Висока точність вимірювань дозволяє точно контролювати вагу інгредієнтів та готової продукції, що критично важливо для якості вафель.
- Стабільність вимірювань забезпечує постійну точність в умовах зміни температури та навколишнього середовища.
- Використання нержавіючої сталі або алюмінієвого сплаву забезпечує тривалий термін служби навіть в умовах інтенсивного використання.
- Високий ступінь захисту від пилу та вологи дозволяє використовувати датчик у виробничих умовах, де можливі забруднення та вологість.
- Швидкий час відгуку дозволяє оперативно здійснювати контроль ваги в реальному часі, що є важливим для забезпечення безперервного процесу виробництва.

- Вигідне співвідношення ціни та якості, що дозволяє знизити витрати на обладнання при високій продуктивності.
- Надійність конструкції та матеріалів зменшує частоту та вартість обслуговування.

Ці особливості дозволяють забезпечити стабільну якість продукції, підвищити ефективність виробничого процесу та знизити витрати на обслуговування обладнання. Також він має вихідний сигнал в 2 мВ/В або 3мВ/В, що є стандартним для підключення до різних електронних систем.



Рисунок 6 – Тензодатчик ваги CAS MNT

Тензометричний датчик одноточкового типу Zemic L6E3 [10] це високоточний пристрій для вимірювання ваги, який широко використовується у промислових вагових системах, зокрема на лініях виробництва харчових продуктів, таких як вафлі. Ось докладні характеристики та особливості цього датчика:

- Номінальне навантаження від 10 кг до 200 кг, що робить його придатним для різноманітних застосувань, від невеликих платформених ваг до промислових систем.
- Клас точності С3, що забезпечує високу точність вимірювань.
- Сигнал на виході 2 мВ/В, що є стандартним для більшості тензометричних датчиків і дозволяє легко інтегрувати його з різними ваговими індикаторами та контролерами.

- Забезпечує точні та стабільні вимірювання, що є критично важливим для контролю якості та оптимізації виробничих процесів.
- Підходить для різних типів вагових систем, включаючи платформені ваги, дозатори, конвеєрні системи та інші автоматизовані вагові системи.



Рисунок 7 – Тензодатчик ваги Zemic L6E3

З урахуванням вище перерахованих переваг датчиків ваги CAS MNT [9] та Zemic L6E3 [10], CAS MNT був обраний для використання в системі автоматичного керування лінії виробництва вафель як більш підходящий варіант.

4.1.2 Вибір датчиків рівня

Також як і для датчиків ваги, є дуже багато датчиків вимірювання рівня:

- Поплавкові датчики
- Ємнісні датчики
- Ультразвукові датчики
- Радарні (міліметровохвильові) датчики
- Гідростатичні датчики
- Провідні (кондуктометричні) датчики
- Ємнісні датчики
- Оптичні датчики
- Мікрохвильові датчики
- Лазерні датчики
- Вібраційні датчики

- Диференціальні тиск датчики
- Магнітострикційні датчики
- Резистивні ланцюгові датчики

Датчики які мають безконтактні методи вимірювання використовуються тільки в крайніх випадках і для лінії виробництва вафель не мають сенсу.

Тому розглянемо найбільш підходящий під лінію виробництва вафель тип датчика, а саме ємнісний датчик рівня 7ML5501-0AA10 SIEMENS POINTEK CLS 100 [12].

Pointek CLS 100 [12] використовує принцип ємнісного вимірювання, що забезпечує високу точність і надійність при вимірюванні рівня як рідких, так і сипучих матеріалів. Це важливо для точного контролю інгредієнтів у виробництві вафель. Цей датчик підходить для широкого спектра матеріалів, включаючи борошно, цукор, масло та інші інгредієнти, що використовуються у виробництві вафель. Це робить його універсальним рішенням для різних етапів виробництва. Також він легко встановлюється і не вимагає складного обслуговування, що знижує час простою виробничої лінії і витрати на технічне обслуговування. У стандартній комплектації він має вставку в 100 мм, але з легкістю збільшує свій діапазон до 2 метрів. Ще він має доступний аналоговий вихідний сигнал (4-20 мА або 0-10 В), що дозволяє передавати точні дані про рівень в системи моніторингу та керування. А також транзисторний вихід (PNP/NPN), що може бути конфігурований як PNP (сигнал на виході високий) або NPN (сигнал на виході низький), що також дозволяє легко інтегрувати датчик в різні типи систем керування.



Рисунок 8 – Ємнісний рівнемір Pointek CLS 100

Переваги Pointek CLS 100 [12]:

- Забезпечує точний контроль рівня інгредієнтів, таких як борошно, цукор і рідини.
- Підходить для різних матеріалів – рідин і сипучих.
- Легко встановлюється і не вимагає складного обслуговування.
- Легко інтегрується в існуюче обладнання на лінії виробництва.
- Працює в умовах пилу, вологи та змін температур.
- Оперативно реагує на зміни рівня, що забезпечує стабільність процесу.
- Ефективний для рідин, паст, порошоків і гранул.
- Підтримує самодіагностику для зниження ризику простоїв.
- Відповідає стандартам гігієни, що важливо для харчової промисловості.

З урахуванням вище перелічених переваг датчика рівня Pointek CLS 100 [12], можна зрозуміти що він є ідеальним кандидатом на місце рівнеміра для лінії виробництва вафель.

4.1.3 Вибір датчиків температури

Датчики температури поділяються на такі типи:

- Термопари
- Терморезистори (RTD)
- Термістори
- Інфрачервоні (ІЧ) датчики температури
- Біметалічні термометри
- Термометри опору (RTD)

Із всіх вище перерахованих типів, найбільш підходящим під технологічну лінію буде термодатчик PT100 [11] з діапазоном вимірювання $-30\dots+200$ градусів Цельсія.

Головною основою термодатчиків PT100 [11] є те, що вони складаються з терморезистора Pt100, який поміщений в латунну гільзу. Вони мають високу електричну міцність, що відповідає вимогам подвійної ізоляції. А також мають стандартний струмовий сигнал 4-20 мА або напруговий сигнал 0-10 В.



Рисунок 9 – Термодатчик PT100

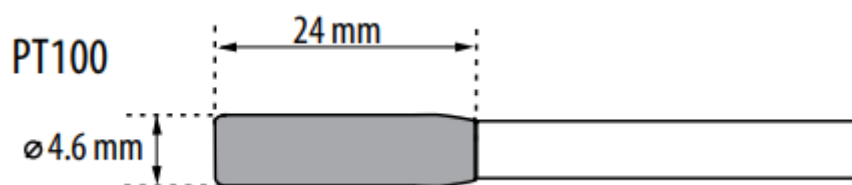


Рисунок 10 – Креслення датчика температури РТ100

Таблиця 2 – Технічні параметри датчика РТ100

Технічні параметри	РТ100
Діапазон:	-30... +200 °С
Елемент, що знімає:	РТ 100
У повітрі / у воді:	(τ 0.5) - / 7 с
У повітрі / у воді:	(τ 0.9) - / 19 с
Матеріал:	силікон
Матеріал наконечника:	латунь
Захист	ІР 67
Клас захисту:	ІІ (подвійна ізоляція)

Таблиця 3 – Співвідношення опору сенсорів і температури

Температура (°С)	Сенсор NTC (k Ω)	Сенсор РТ100 (Ω)
20	14.7	107.8
30	9.8	111.7
40	6.6	115.5
50	4.6	119.4
60	3.2	123.2
70	2.3	127.1

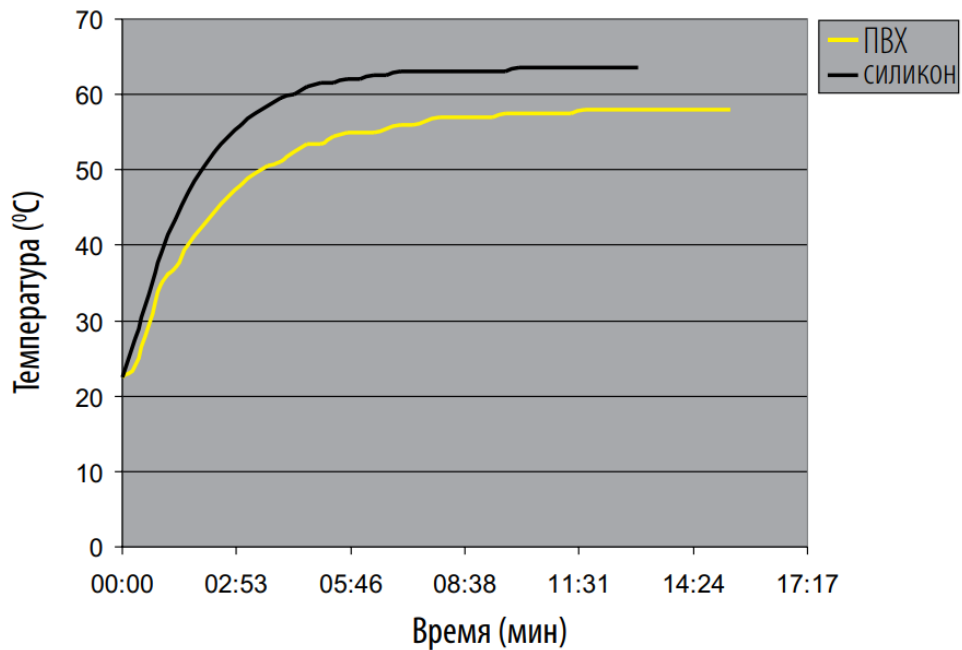


Рисунок 11 – Графік нагрівання сенсора NTC повітрям

ПВХ - реакція на температуру повітря від 22.5 °C до 58 °C

Силикон - реакція на температуру повітря від 22.5 °C до 3.5 °C

Датчик РТ100 має переваги у вигляді високої точності та стабільності, а також ідеально підходить для вимірювання температури в більш вузькому діапазоні, ніж терморезистори. Такі датчики використовуються для контролю температури у змішувальних та охолоджувальних процесах.

Оскільки датчик температури РТ100 найбільше за все підходить до лінії виготовлення вафель, саме він й буде використовуватися.

4.2 Вибір контролера

Якщо порівнювати цифрові контролери та аналогові регулятори, то можна зрозуміти, що перші мають значні переваги над другими.

Цифрові контролери здатні забезпечувати вищу точність і стабільність регулювання, оскільки вони працюють на основі чисельних значень і алгоритмів обробки даних. Це особливо важливо в умовах, де необхідно дотримуватися вузьких меж температур або інших параметрів. Завдяки програмованій природі, цифрові контролери надають більші можливості для налаштування і керування процесами. Вони дозволяють налаштовувати

різні режими роботи, програмні таймери, а також здійснювати автоматичне керування за допомогою алгоритмів регулювання. Вони легше інтегруються з іншими електронними системами та компонентами, такими як сенсори, мережеві з'єднання та зберігання даних. Це спрощує побудову складних систем керування та моніторингу. Також цифрові контролери дозволяють автоматизувати процеси керування і моніторингу, а також здійснювати дистанційне керування через мережі зв'язку. Це дозволяє забезпечувати більшу ефективність, економію ресурсів та вчасну реакцію на зміни умов. Та ще одна з переваг цифрових контролерів, це те, що вони можуть бути більш ефективними з точки зору енергоспоживання, оскільки вони можуть регулювати робочі параметри з вищою точністю і оптимізувати використання ресурсів.

Після пошуку ідеального контролера для лінії виробництва вафель за допомогою мережі інтернет, було знайдено та вирішено використовувати високотехнологічні та сучасні контролери з високою надійністю Siemens.

Siemens постійно вдосконалює свої продукти і впроваджує нові технології, такі як інтеграція з інтернетом речей (IoT), штучний інтелект (AI) та інші, що дозволяє забезпечувати передові рішення для промисловості.

4.2.1 Контролер SIMATIC S7-1500 / S7-1516

Це потужний контролер від Siemens [6,8], який призначений для автоматизації виробничих процесів у промисловості. Основні характеристики цього контролера включають високу продуктивність, широкі можливості комунікації, вбудовані функції безпеки та надійність у роботі. Він має розширюваний діапазон зовнішніх модулів для підключення до різноманітного обладнання та мереж, що робить його відмінним вибором для складних систем керування в промислових умовах.

4.2.2 Межі застосування SIMATIC S7-1500 / S7-1516 / S7-1516F

CPU 1516F-3 PN/DP [6,8] призначений для створення систем керування, які потребують виконання великих програм, швидкої обробки даних і підтримки розподіленої системи вводу-виводу за допомогою мереж PROFINET IO та PROFIBUS DP. Також має додатковий інтерфейс PROFINET IO.

4.2.3 Конструкція SIMATIC S7-1500 / S7-1516

- Встановлення на профільну шину S7-1500 з фіксацією в робочому положенні вбудованим у корпус гвинтом.
- Підключення зовнішніх ланцюгів живлення, дискретних входів і виходів через знімний 40-полюсний фронтальний з'єднувач з використанням провідників перетином 0.25 ...1.5 мм² (AWG24 ... AWG16).
- Підключення датчиків позиціонування за допомогою екранованих кабелів.
- Наявність проміжного монтажного положення фронтального з'єднувача, за якого він зафіксований на корпусі модуля, але не має електричних з'єднань з його електронікою.
- Інформація про модуль на його фронтальній панелі та захисній кришці:
 - тип модуля;
 - замовний номер модуля;
 - версія апаратури та вбудованого програмного забезпечення;
 - етикетка з маркуванням зовнішніх кіл;
 - схема підключення зовнішніх кіл модуля.
- Уніфікований набір діагностичних світлодіодів індикації:
 - станів модуля зі світінням червоним кольором за наявності помилок і зеленим кольором за нормальної роботи;
 - станів каналів модуля з відображенням погашеним світлодіодом пасивного стану каналу, зеленим кольором активного стану каналу, червоним кольором у разі помилки в роботі каналу;
 - наявності напруги живлення.

4.2.4 Модифікації контролера SIMATIC S7-1500 / S7-1516

У програмованих контролерах S7-1500 [6,8] може використовуватися широкий спектр центральних процесорів стандартного або спеціалізованого призначення. Залежно від типу використовуваного центрального процесора є такі види модифікацій:

- S7-1500 на базі стандартних центральних процесорів:
 - Використання широкого спектра центральних процесорів з різною продуктивністю для вирішення стандартних завдань автоматичного керування різної складності. Підтримка широкого набору функцій на рівні операційної системи центрального процесора.
 - Модульна конструкція з широким вибором сигнальних, функціональних і комунікаційних модулів, що забезпечує максимальну адаптацію до вимог конкретного завдання.
 - Підтримка як локальних, так і розподілених систем вводу-виводу.
 - Розвинені комунікаційні можливості, просте підключення до різних мережевих структур, підтримка інформаційних технологій.
 - Зручна конструкція без буферних батарей, робота з природним охолодженням, мінімальні експлуатаційні витрати.
 - Можливість вільного розширення функціональності під час модернізації системи.
- S7-1500C на базі компактних CPU:
 - Програмовані контролери на основі центральних процесорів з вбудованими каналами вводу/виводу, які можуть використовуватися як готові блоки управління для невеликих систем.
 - Повна підтримка всіх властивостей і функцій стандартних центральних процесорів.
 - Легке розширення системи локального вводу/виводу за допомогою всіх модулів серії S7-1500 [6,8].
- S7-1500F на базі F-CPU:
 - Програмовані контролери для створення систем протиаварійного захисту та забезпечення безпеки, з одночасною підтримкою стандартних функцій керування.
 - Підтримка функцій забезпечення безпеки на рівні операційної системи центральних процесорів.

- Обслуговування систем локального та розподіленого вводу-виводу з використанням змішаних модулів стандартного призначення, а також F- і PROFI-safe модулів.
 - Обслуговування систем розподіленого вводу-виводу на основі промислових мереж PROFIBUS DP і PROFINET IO з підтримкою профілю PROFI-safe для обміну даними з компонентами забезпечення безпеки.
 - Забезпечення рівнів безпеки SIL1 ... SIL3 згідно зі стандартами IEC 61508, а також рівнів складності PLa... PLe за стандартом ISO 13849.
- S7-1500T на базі T-CPU:
 - Технологічні контролери з розширеною підтримкою функцій керування рухом, сумісних зі стандартом PLCopen.
 - Підтримка технологічних функцій на рівні операційної системи центральних процесорів.

4.2.5 Функції контролера SIMATIC S7-1500 / S7-1516

- Висока продуктивність:
 - Висока швидкість виконання команд, яка залежить від типу центрального процесора, з мовними розширеннями та новими типами даних.
 - Швидка реакція на зовнішні події завдяки оптимальній генерації програмного коду та високій швидкості обміну даними через внутрішню шину.
- Потужні комунікаційні можливості:
 - PROFINET IO RT/IRT з вбудованим 2-канальним комутатором як стандартний системний інтерфейс у всіх типах центральних процесорів.
 - Наявність центральних процесорів з додатковими інтерфейсами PROFINET і PROFIBUS.
 - Використання другого вбудованого інтерфейсу PROFINET у відповідних типах центральних процесорів з версії V2.0 для обміну даними в режимі RT.
 - Вбудований веб-сервер у всіх типах центральних процесорів.
 - Опціональне використання OPC UA сервера в центральних процесорах з версії V2.0.
- Вбудовані функції захисту даних:

- Захист паролем від несанкціонованого читання та зміни програмних блоків (у поєднанні зі STEP 7)

4.2.6 Діагностика контролера SIMATIC S7-1500 / S7-1516

Діагностика контролера SIMATIC S7-1516 [6,8] здійснюється за допомогою уніфікованого відображення діагностичної інформації на дисплеї центрального процесора, екранах обладнання та систем людино-машинного інтерфейсу, у TIA Portal і на веб-сервері. Ця інформація залишається доступною навіть після переведення центрального процесора в режим STOP. Діагностичні функції інтегровані у вбудоване програмне забезпечення центрального процесора як системна служба, що не потребує спеціальних налаштувань. Оновлення діагностичної інформації для всіх нових апаратних компонентів виконується автоматично. Оцінка стану модулів здійснюється безпосередньо з програми користувача.

4.2.7 Центральні процесори контролера SIMATIC S7-1500

Процесори S7-1500 [6,8] мають наступні моделі:

- CPU 1511:
 - Призначення: Базова модель для простих задач автоматизації.
 - Особливості: Відмінно підходить для невеликих проектів, забезпечуючи базові функції контролю та управління.
 - Продуктивність: Середня, підходить для основних логічних операцій та управління процесами з невеликими вимогами до швидкодії.
- CPU 1513:
 - Призначення: Модель з покращеними характеристиками для середніх задач автоматизації.
 - Особливості: Забезпечує більш високу продуктивність та розширені функції у порівнянні з CPU 1511.
 - Продуктивність: Вища, що дозволяє виконувати складніші логічні операції та більш інтенсивні процеси управління.
- CPU 1515:

- Призначення: Підходить для складніших задач з вищими вимогами до продуктивності.
 - Особливості: Пропонує значну продуктивність і можливості для більш складних автоматизаційних проектів.
 - Продуктивність: Висока, з підтримкою великих обсягів даних та швидкістю обробки для комплексних задач.
- CPU 1516:
 - Призначення: Модель з високою продуктивністю для комплексних задач автоматизації.
 - Особливості: Підходить для великих проектів з високими вимогами до обробки даних та швидкодії.
 - Продуктивність: Дуже висока, забезпечує виконання складних програм і швидку реакцію на зовнішні події.
- CPU 1517:
 - Призначення: Високопродуктивна модель для найскладніших задач та великих систем автоматизації.
 - Особливості: Розширені можливості і висока надійність, підходить для критично важливих систем.
 - Продуктивність: Найвища в даному модельному ряді, підтримка великих обсягів пам'яті та інтенсивного обміну даними.
- CPU 1518:
 - Призначення: Найпотужніша модель, що забезпечує максимальну продуктивність і розширені функції для найвимогливіших задач.
 - Особливості: Максимальна продуктивність і функціональність, підходить для найвимогливіших і масштабних проектів.
 - Продуктивність: Ультрависока, з можливістю обробки найскладніших завдань і підтримкою новітніх технологій автоматизації.

Кожна з цих моделей має свої унікальні особливості та рівні продуктивності, що дозволяє вибрати оптимальний варіант для конкретного проекту автоматизації.

5. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

5.1 Ідентифікація об'єкта

Завданням ідентифікації об'єкта є камера охолодження вафельних листів. А однією з ключових цілей ідентифікації є отримання математичного опису об'єкта. Це дозволяє чітко визначити його характеристики і поведінку у вигляді математичних моделей або формул, що сприяє більш точному аналізу і прогнозуванню. Ідентифікація об'єктів може бути виконана як аналітичним, так і експериментальним методом. Аналітичний метод ідентифікації передбачає використання теоретичних знань, алгоритмів та моделей для визначення та розпізнавання об'єктів. Він базується на аналізі наявної інформації та застосуванні математичних і логічних процедур. Експериментальний метод ідентифікації базується на проведенні практичних експериментів та зборі емпіричних даних для визначення характеристик об'єкта.

5.1.1 Аналітичне визначення математичної моделі

Охолодження є критичним етапом у виробництві вафель, і правильне регулювання температури в охолоджувачі має велике значення з кількох причин:

1. **Забезпечення Хрусткості та Текстури:** Якщо вафлі охолоджуються занадто швидко, це може призвести до утворення тріщин і ламкості. Надто повільне охолодження може спричинити втрату хрусткості, адже вологість з вафель не буде випаровуватися належним чином.

2. **Збереження Форми:** Правильне охолодження дозволяє вафлям зберігати свою форму та структуру, що є важливим для їх подальшого складання та упаковки. Зміна форми під час охолодження може ускладнити нанесення начинки та знижує якість кінцевого продукту.

3. **Профілактика Конденсації:** Якщо вафлі охолоджуються неправильно, волога з повітря може конденсуватися на їх поверхні, що призведе до зволоження і, як наслідок, до втрати хрусткості та погіршення смакових якостей.

4. **Запобігання Мікробіологічному Забрудненню:** Швидке і правильне охолодження знижує ризик мікробіологічного забруднення продукту, оскільки в теплом середовищі мікроорганізми розмножуються швидше. Охолоджені до належної температури вафлі менш схильні до розвитку бактерій і цвілі.

5. **Покращення Якості Начинки:** Начинка наноситься на охолоджені вафлі рівномірно і не розтікається, що забезпечує однорідний розподіл і високий рівень якості готового продукту. Якщо

вафлі занадто теплі, начинка може плавитися або всмоктуватися в них, що негативно впливає на смакові якості.

Для опису динамічних процесів охолодження вафель у камері охолодження використовується диференціальне рівняння теплопередачі. Це рівняння враховує зміну температури вафель з часом через теплообмін з охолоджуючим повітрям.

Основні Параметри:

$T_w(t)$ — температура вафель у момент часу t (°C),

T_a — температура повітря в охолоджувачі (°C),

h — коефіцієнт теплопередачі між вафлями і повітрям (Вт/м²·°C),

A — площа поверхні вафель, яка контактує з повітрям (м²),

m — маса вафель (кг),

c — питома теплоємність вафель (Дж/кг·°C).

Диференціальне Рівняння Теплопередачі

Диференціальне рівняння, яке описує зміну температури вафель у часі:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_w(t)}{dt} = -h \cdot A \cdot (T_w(t) - T_a) \quad (1)$$

Виведення Формули

1. Розділимо змінні: перенесемо всі члени, що містять $T_w(t)$, в один бік рівняння, а члени з t — в інший:

$$\frac{dT_w(t)}{T_w(t) - T_a} = -\frac{h \cdot A}{m \cdot c} dt \quad (2)$$

2. Інтегруємо обидві частини рівняння:

$$\int \frac{dT_w(t)}{T_w(t) - T_a} = -\frac{h \cdot A}{m \cdot c} \int dt \quad (3)$$

3. Розв'яжемо інтеграл:

$$\ln |T_w(t) - T_a| = -\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t + C \quad (4)$$

4. Визначимо константу інтегрування C , використовуючи початкову умову

$$T_w(0) = T_{w0}: \quad (5)$$

$$\ln |T_{w0} - T_a| = C \quad (6)$$

Отже,

$$C = \ln |T_{w0} - T_a| \quad (7)$$

5. Запишемо загальний розв'язок:

$$\ln |T_w(t) - T_a| = -\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t + \ln |T_{w0} - T_a| \quad (8)$$

6. Виключимо логарифми, взявши експоненту з обох боків:

$$|T_w(t) - T_a| = e^{\ln |T_{w0} - T_a|} \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t} \quad (9)$$

$$|T_w(t) - T_a| = |T_{w0} - T_a| \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t}$$

7. Запишемо остаточний розв'язок для температури вафель $T_w(t)$:

$$T_w(t) = T_a + (T_{w0} - T_a) \cdot e^{-\frac{h \cdot A}{m \cdot c} t} \quad (10)$$

Інтерпретація Формули

Ця формула описує, як температура вафель $T_w(t)$ змінюється з часом у процесі охолодження:

$T_w(t)$ — температура вафель у момент часу t ,

T_a — температура охолоджуючого повітря,

T_{w0} — початкова температура вафель,

$\frac{h \cdot A}{m \cdot c}$ — коефіцієнт, що визначає швидкість охолодження, залежить від коефіцієнта теплопередачі, площі поверхні вафель, маси та питомої теплоємності вафель.

Формула показує експоненційне зниження температури вафель з часом, наближаючись до температури охолоджуючого повітря T_a .

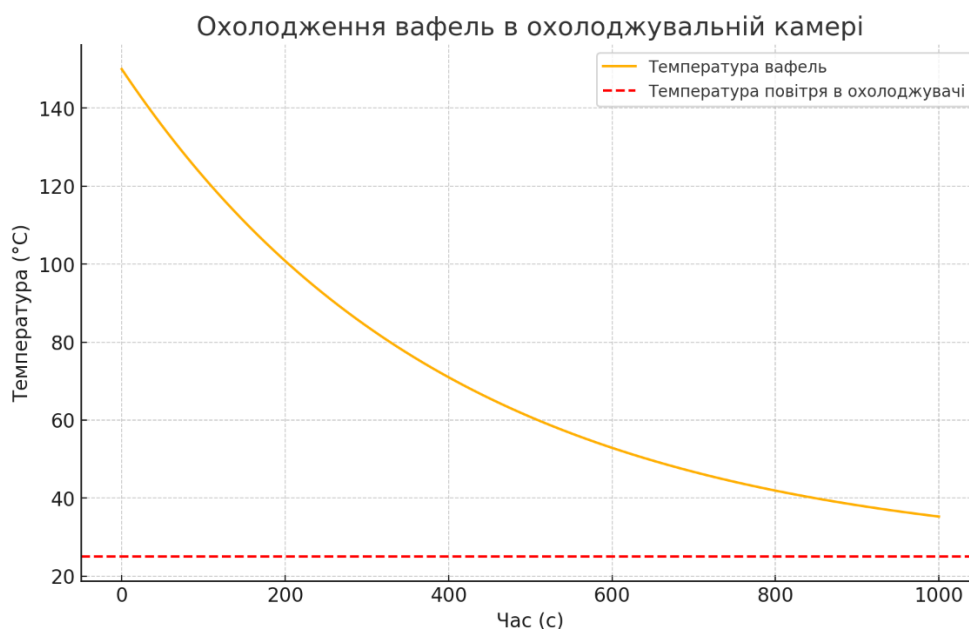


Рисунок 12 –Графік охолодження вафель

5.1.2 Побудова кривої розгону

З узгодженням та перетіканням перехідного процесу охолодження вафель. Та за замірами швидкості охолодження, було зазначено, що середня швидкість охолодження вафель буде приблизно 8 хвилин. Це означає, що постійна часу процесу охолодження буде дорівнювати 480 секунд.

Таким чином, передавальна функція, яка описує, як температура змінюється з часом після початку охолодження, буде:

$$W(s) = \frac{1}{480s + 1} \quad (11)$$

Вихідні значення змінної нормуються у діапазоні від 0 до 1, що відповідає одиничному вхідному стрибку.

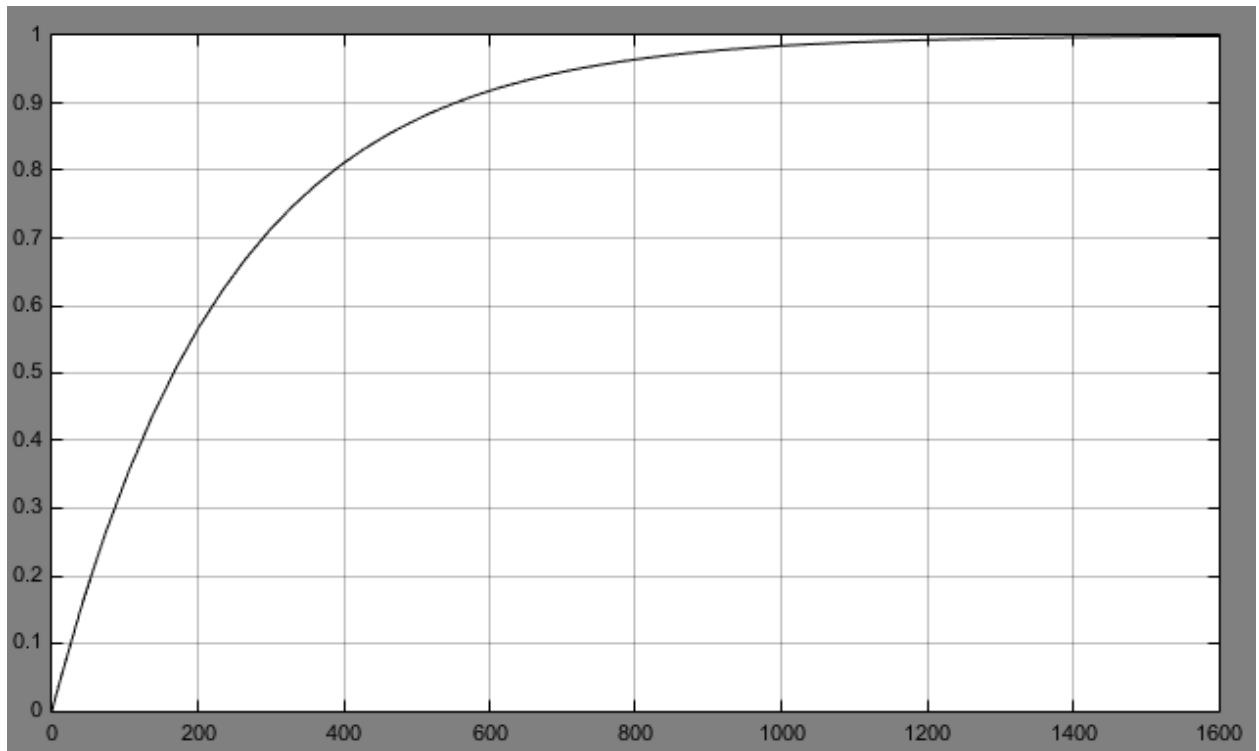


Рисунок 13 –Побудова кривої розгону

Підхід Орманса [4] дозволить ідентифікувати два найбільш впливових постійних об'єкта управління, відповідно до кривої розгону.

$$W(s) = \frac{K e^{-fs}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (12)$$

Процес визначення передавальної функції:

- 1) Було розпочато з визначення часу на нормованій кривій розгону, де значення $h = 0,7$ відповідає моменту t_7 . Згідно з кривою, цей час складає 295 секунди.
- 2) Було розділено інтервал на три частини та проведено перпендикуляр до кривої розгону, щоб визначити значення h_4 . За кривою $h_4 = 0.33$.
- 3) Було встановлено зв'язок між точками на кривій розгону та параметрами моделі, конкретно $t_7 = 1.2 (T_1 + T_2)$.
- 4) Для визначення постійних часів об'єкта управління була використана допоміжна величина Z^2 , яку можна знайти на номограмі.

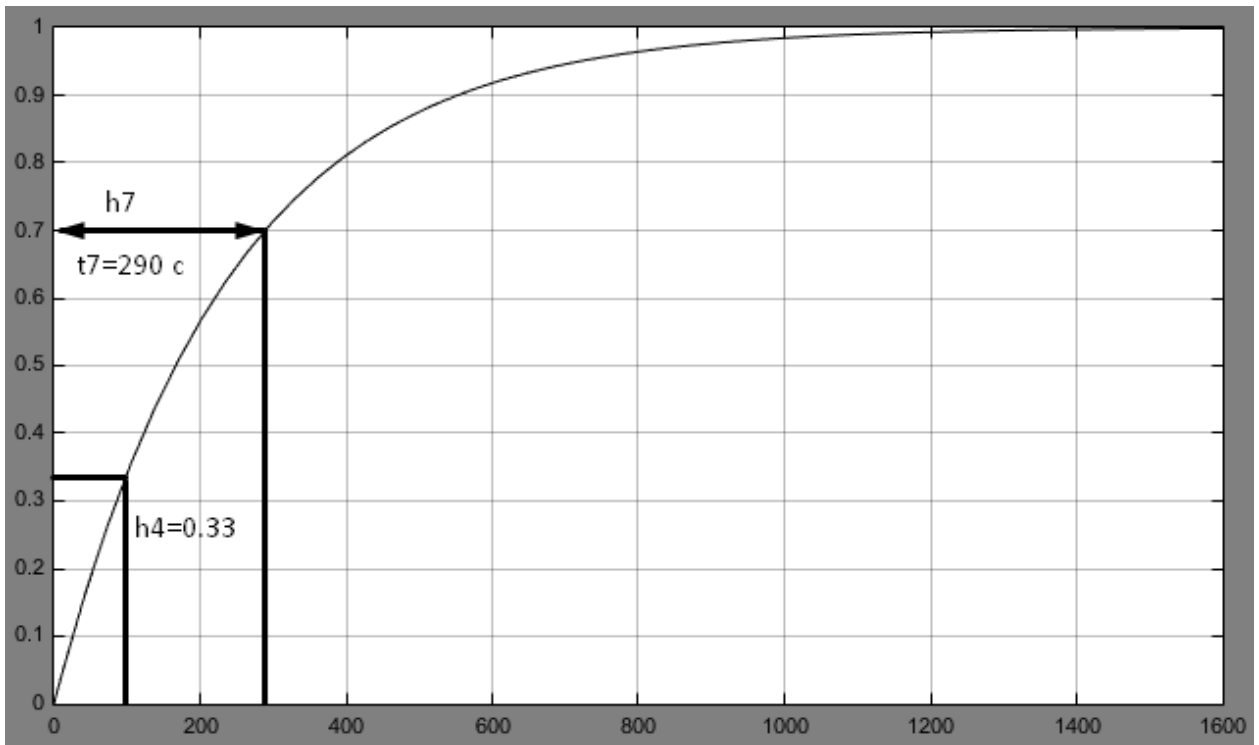


Рисунок 14 –Графік кривої розгону

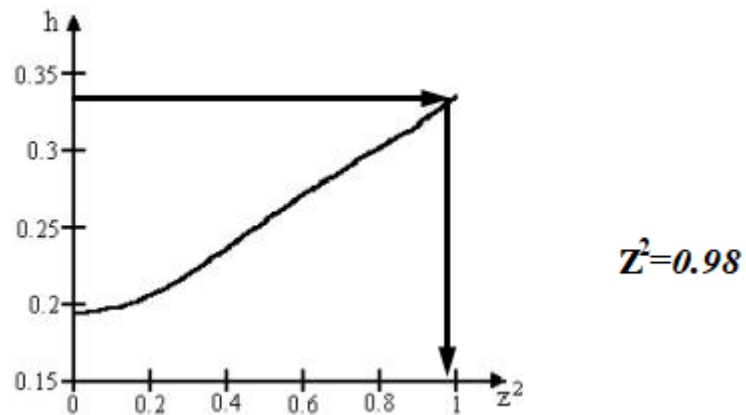


Рисунок 15 –Номограма для отримання величини Z^2

5) Було встановлено значення постійних часів об'єкта управління T_1 і T_2 .

$$T_1 = \frac{t_7}{2.4}(1+z) \quad T_2 = \frac{t_7}{2.4}(1-z) \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{290}{2.4}(1 + 0.99) = 240.5 \text{ c} \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{290}{2.4}(1 - 0.99) = 1.2 \text{ c} \quad (15)$$

Оскільки постійна часу T_1 значно більша за T_2 , було перейдено до використання моделі першого порядку: $W(s) = \frac{Ke^{-fs}}{1+Ts}$

Передаточна функція буде виглядати:

$$W(s) = \frac{1}{240.5s + 1} \quad (16)$$

Було складено перехідну характеристику і порівняно її з вихідною кривою розгону, щоб отримати нормовані графіки.

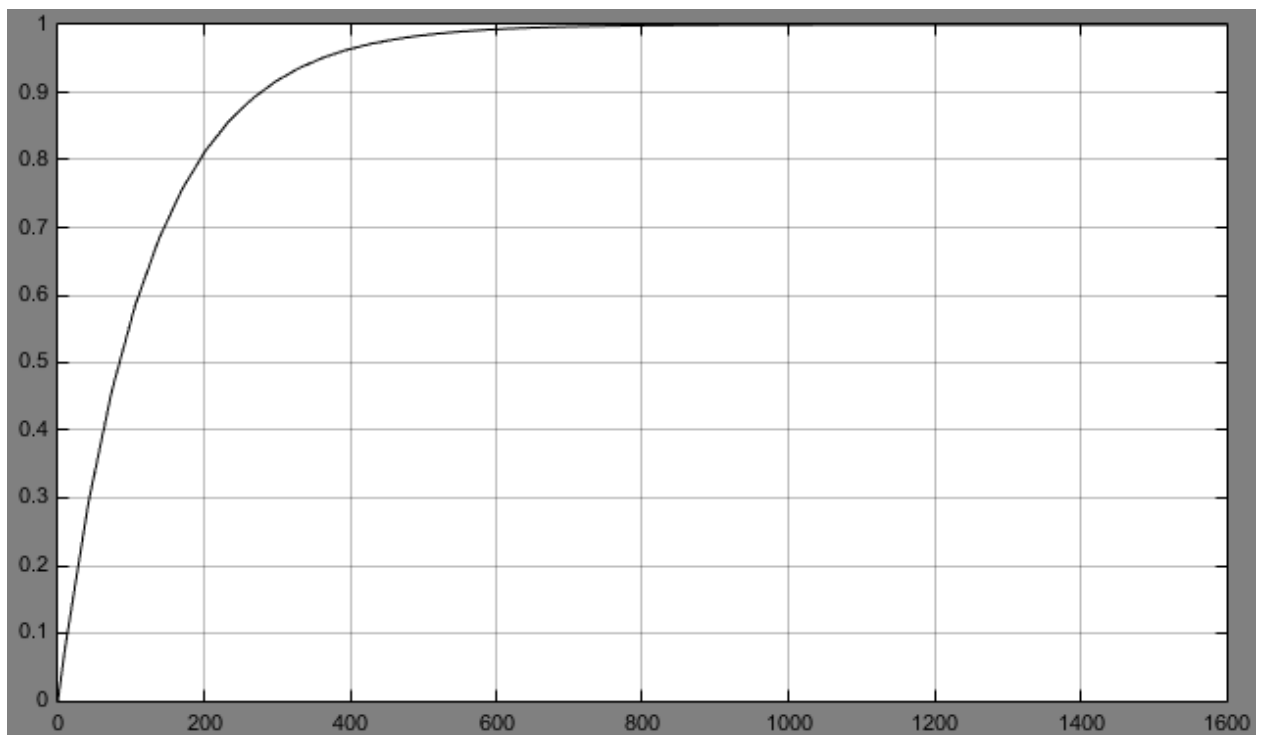


Рисунок 16 –Експериментальна крива розгону

5.1.3 Підбір типу регулятора та його параметрів налаштування

Для цього було використано програмне середовище MatLab, та побудована схема системи регулювання:

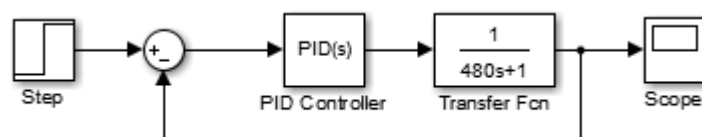


Рисунок 17 –Модель в програмному середовищі MatLab

Під час вибору регулятора для системи управління було розглянуто промислові П, ПІ та ПІД-регулятори. Основними критеріями вибору будуть час налаштування і величина перернгулювання. Для зручності, нижче була наведена таблиця з параметрами всіх регуляторів. Налаштування параметрів регулятора було здійснено шляхом переміщення відповідного повзунка.

5.1.3.1 П -регулятор

Ідеальний безперервний П -регулятор

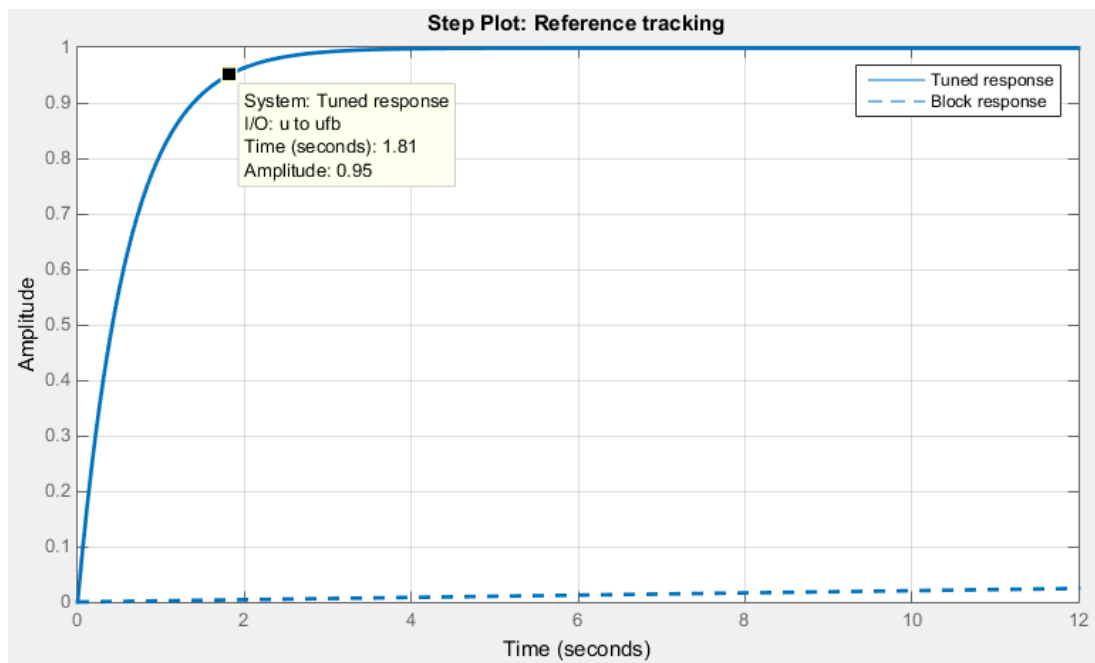


Рисунок 18 –Крива моделювання

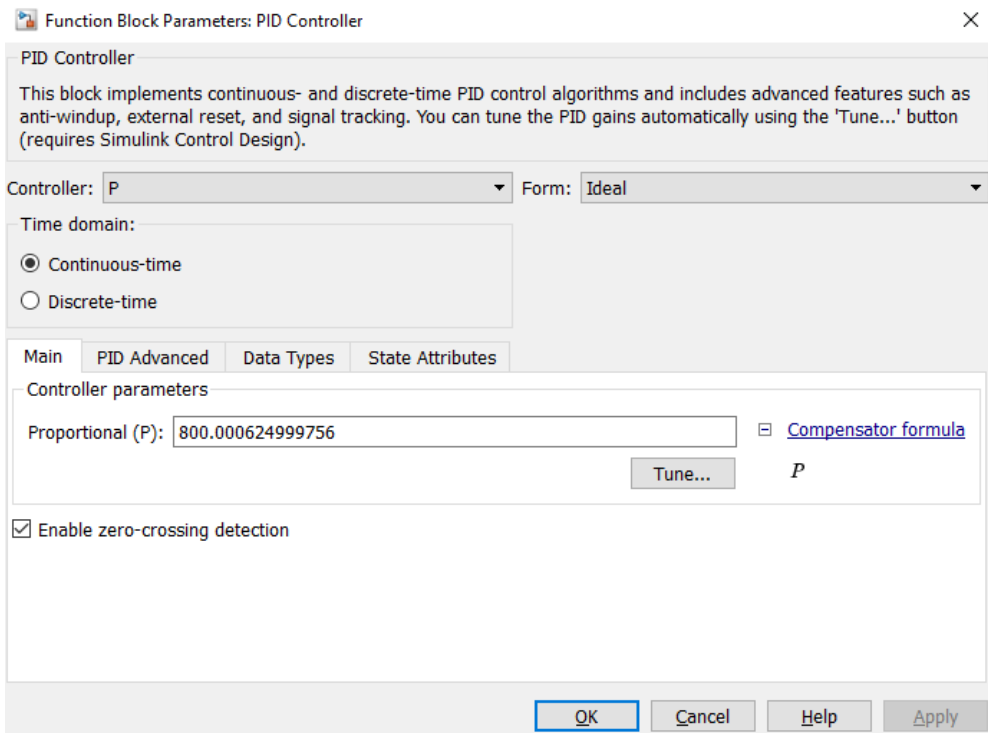


Рисунок 19 –Налаштування для П -регулятора

Після зробленого налаштування регулятора було отримано такі результати: коефіцієнт підсилення - 800, час регулювання - 1.81 секунди, саме перерегулювання відсутнє. Аналогічні значення було отримані та для безперервного паралельного П-регулятора під час налаштування.

5.1.3.2 ПІ -регулятор

Паралельно безперервний ПІ -регулятор

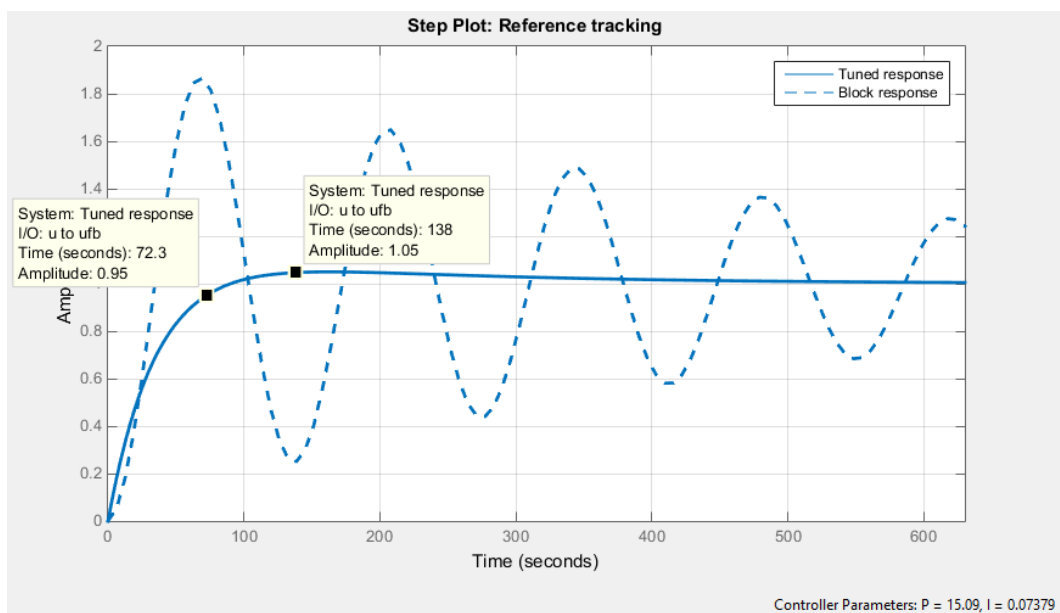


Рисунок 20 –Крива моделювання

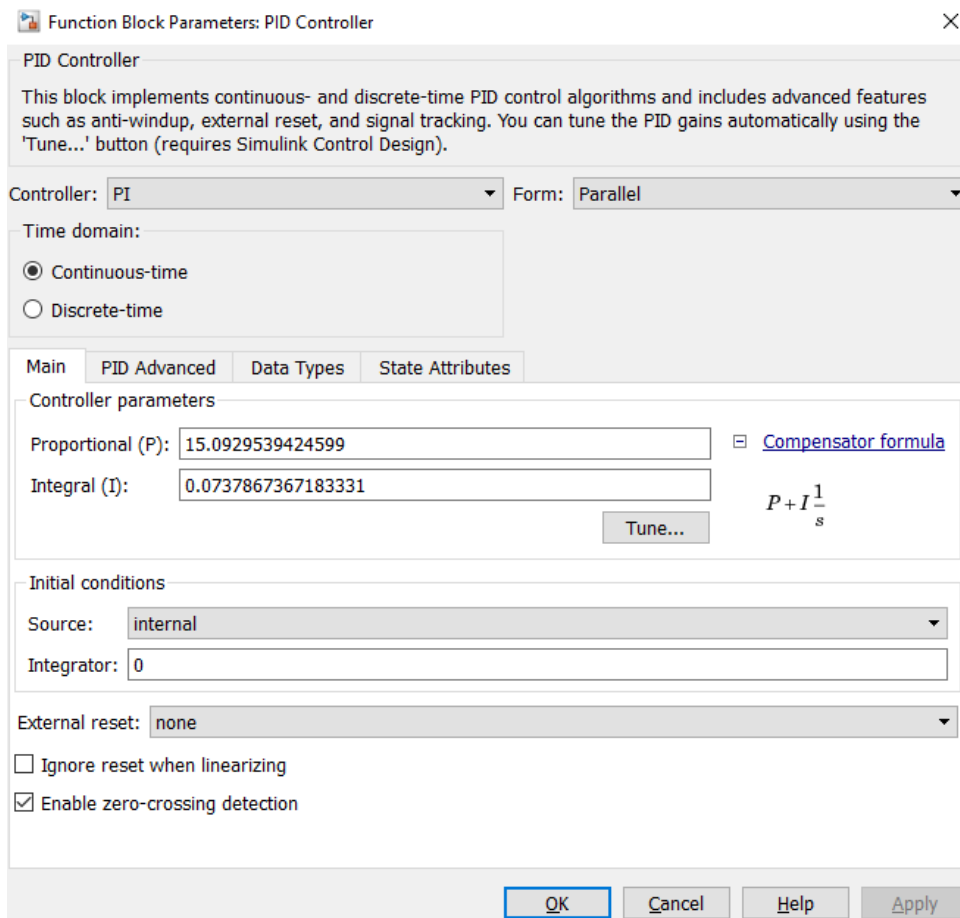


Рисунок 21 –Налаштування для ПІ -регулятора

Після зробленого налаштування отримали наступні значення: підсилюючий коефіцієнт – 15.1, час інтегрування - 0,07, час регулювання - 72,3 секунди, перергулювання становить 5%.

Ідеально безперервний ПІ -регулятор

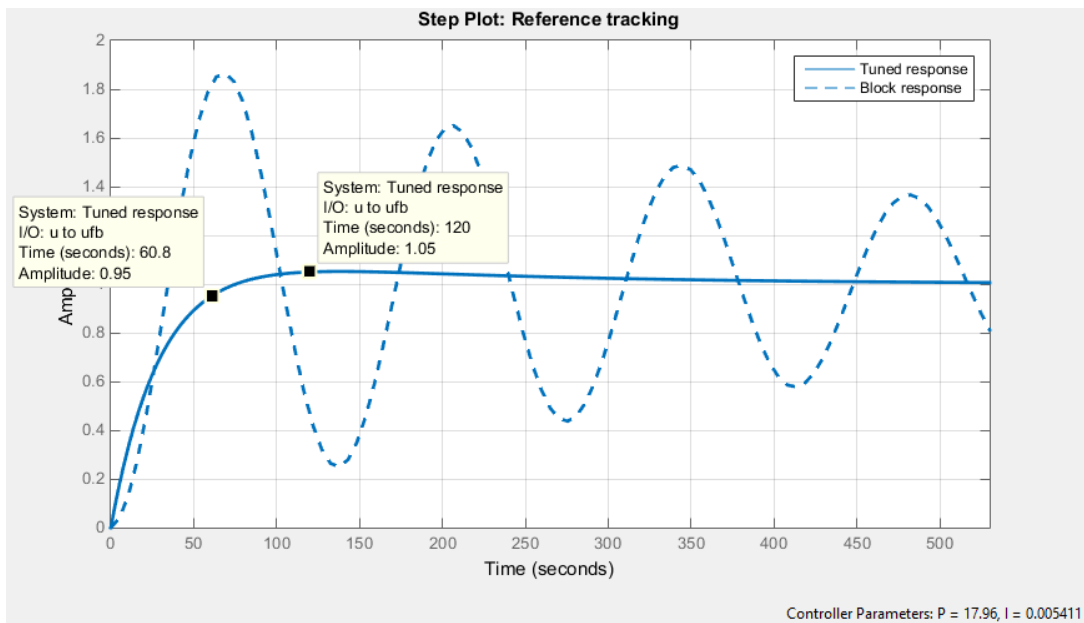


Рисунок 22 –Крива моделювання

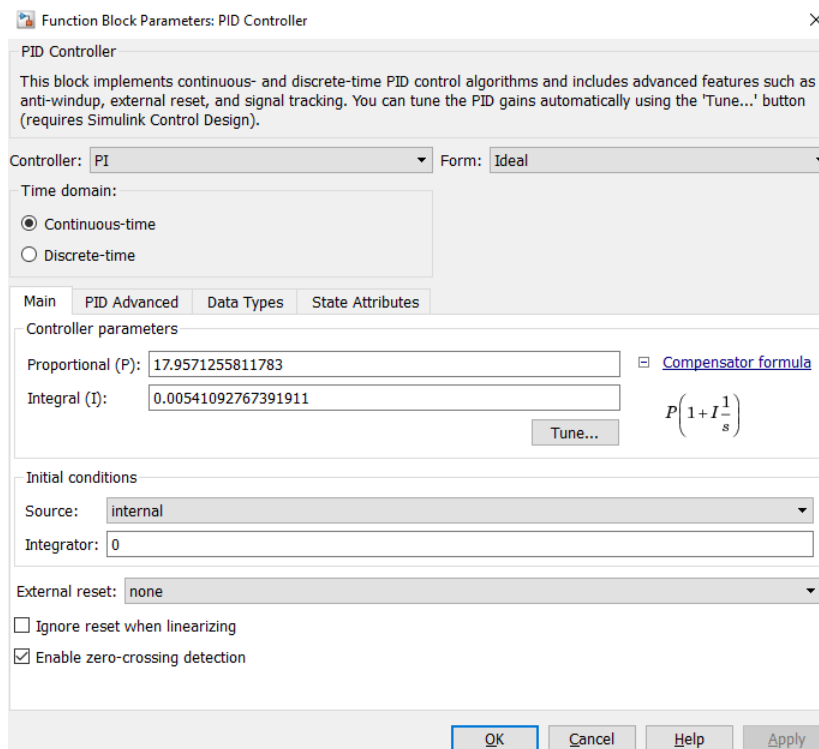


Рисунок 23 –Налаштування для ПІ -регулятора

Після зробленого процесу налаштування отримали наступні результати: підсилюючий коефіцієнт – 17.96, час інтегрування - 0,005, час регулюючого процесу - 60,8 секунди, перерегулювання дорівнює 5%.

Ідеально дискретний ПІ -регулятор

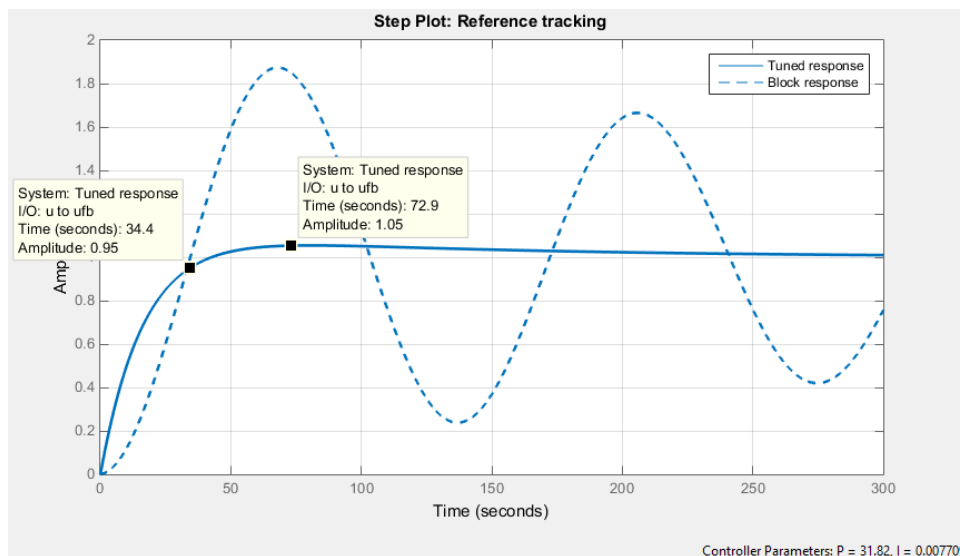


Рисунок 24 –Крива моделювання

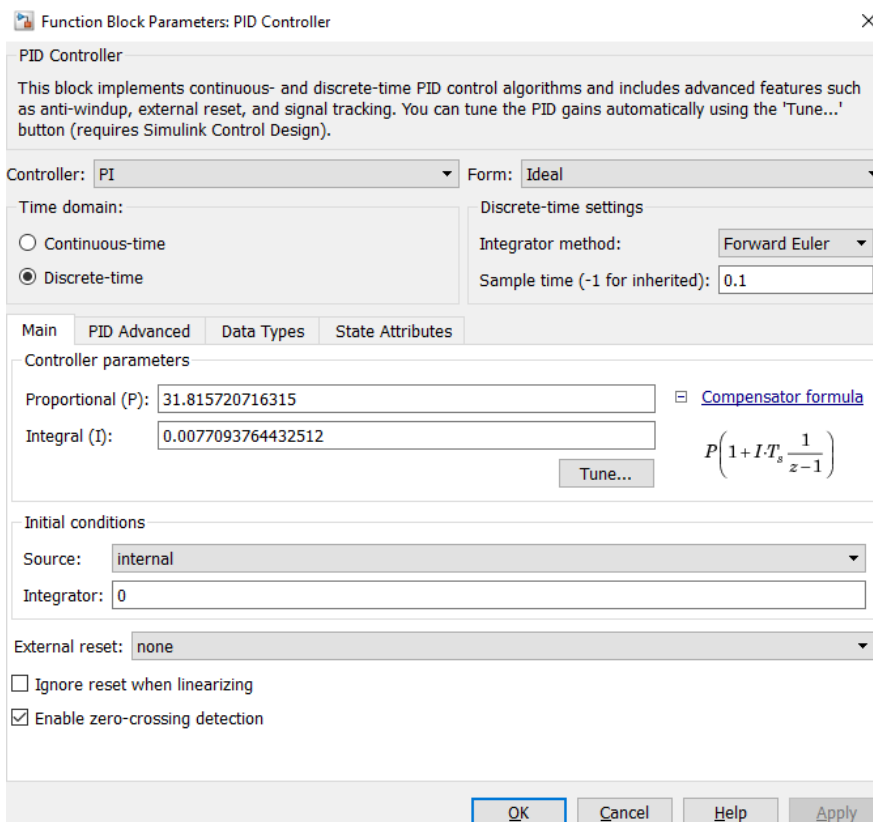


Рисунок 25 –Налаштування для ПІ -регулятора

В результаті було отримано наступні значення: коефіцієнт підсилення - 31.82, час інтегрування - 0,008, час регулювання - 34,4 секунди, перерегулювання - 5%.

Паралельно дискретний ПІ –регулятор

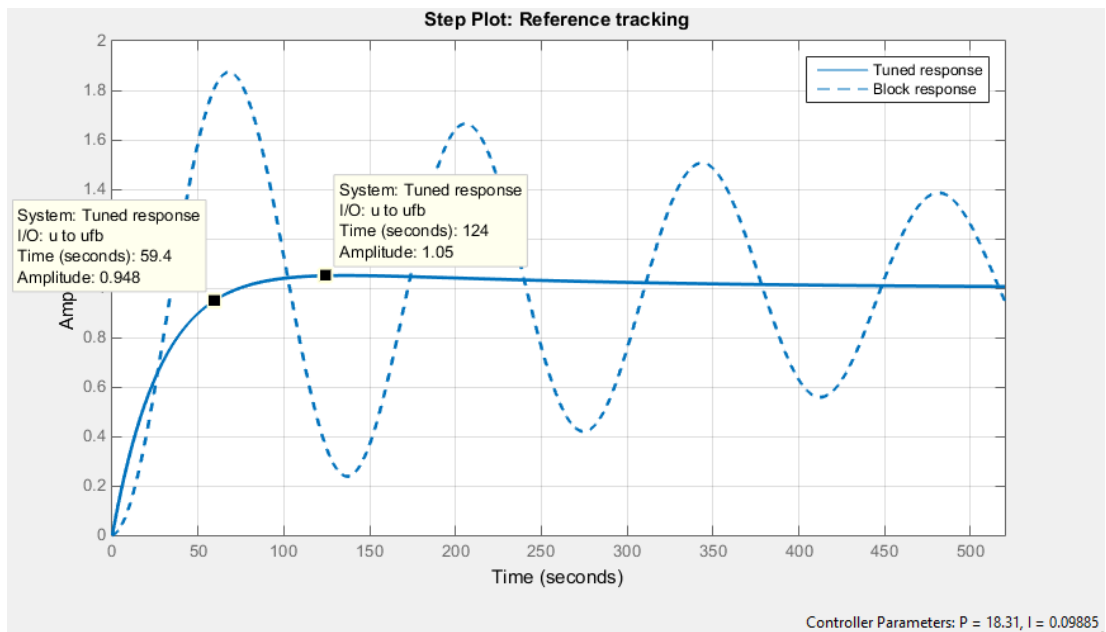


Рисунок 26 –Крива моделювання

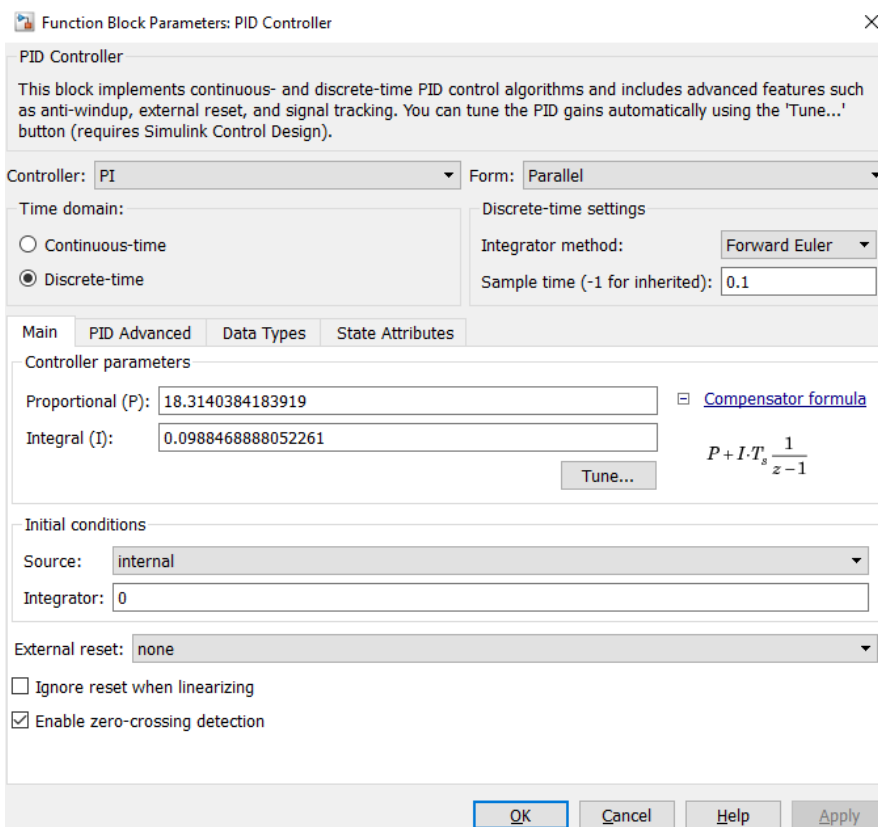


Рисунок 27 –Налаштування для ПІ -регулятора

Після цього налаштування отримали наступні результати: підсилюючий коефіцієнт – 18.31, час інтегрування - 0,1, час регулювання - 59,4 секунди, перегулювання - 5%.

5.1.3.3 ПІД -регулятор

Ідеально безперервний ПІД -регулятор

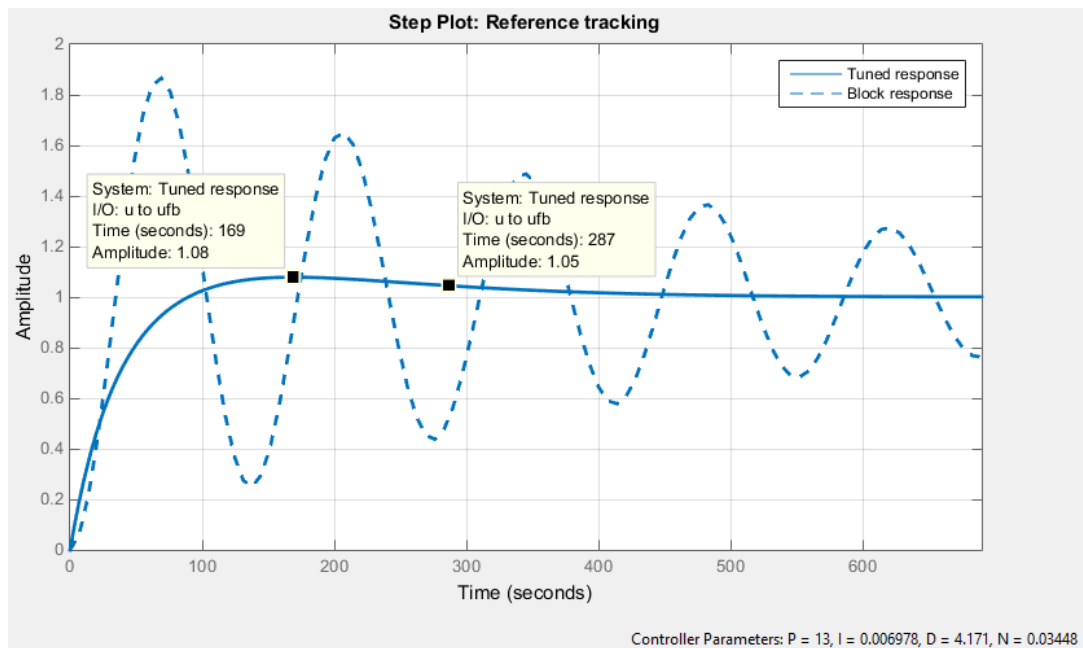


Рисунок 28 –Крива моделювання

Function Block Parameters: PID Controller

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Ideal

Time domain:

Continuous-time
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P): 12.9988162515835 [Compensator formula](#)

Integral (I): 0.00697844344823929

Derivative (D): 4.17117714256204

Filter coefficient (N): 0.0344754570532205

Tune...

$$P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right)$$

Initial conditions

Source: internal

Integrator: 0

Filter: 0

External reset: none

Ignore reset when linearizing
 Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Рисунок 29 –Налаштування для ПІД -регулятора

Після цих налаштувань були отримані значення: коефіцієнт підсилення - 13, час інтегрування – 0.007, час диференціювання – 4.17, час регулювання - 287 секунд, перерегулювання - 8%.

Паралельно безперервний ПІД -регулятор

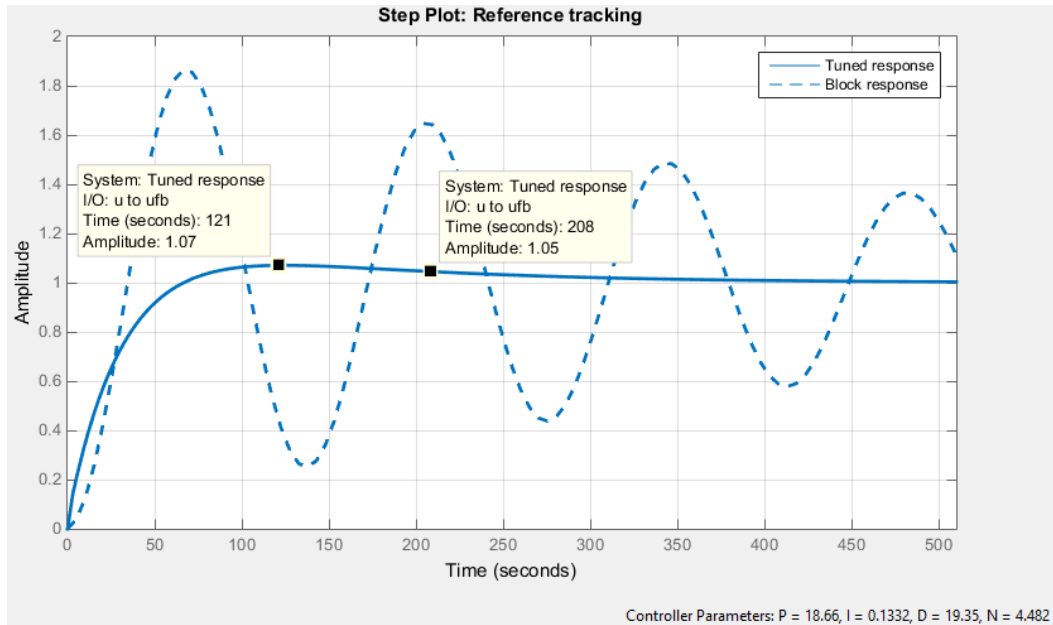


Рисунок 30 –Крива моделювання

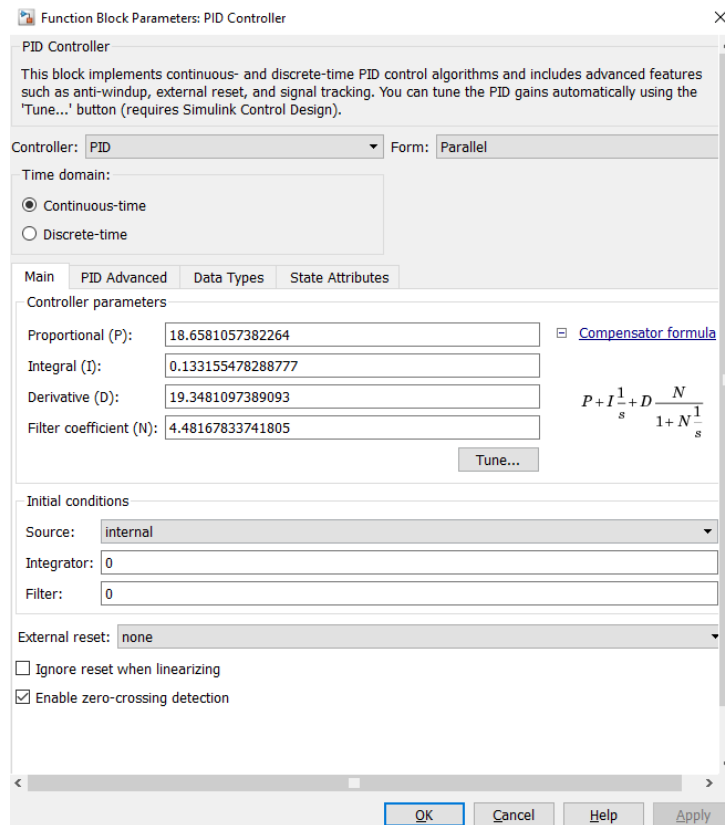


Рисунок 31 –Налаштування для ПІД -регулятора

Було отримано наступні результати: коефіцієнт підсилення – 18.66, час інтегрування – 0.13, час диференціювання – 19.35, час регулювання - 208 секунд, перерегулювання - 7%.

Паралельно дискретний ПІД -регулятор

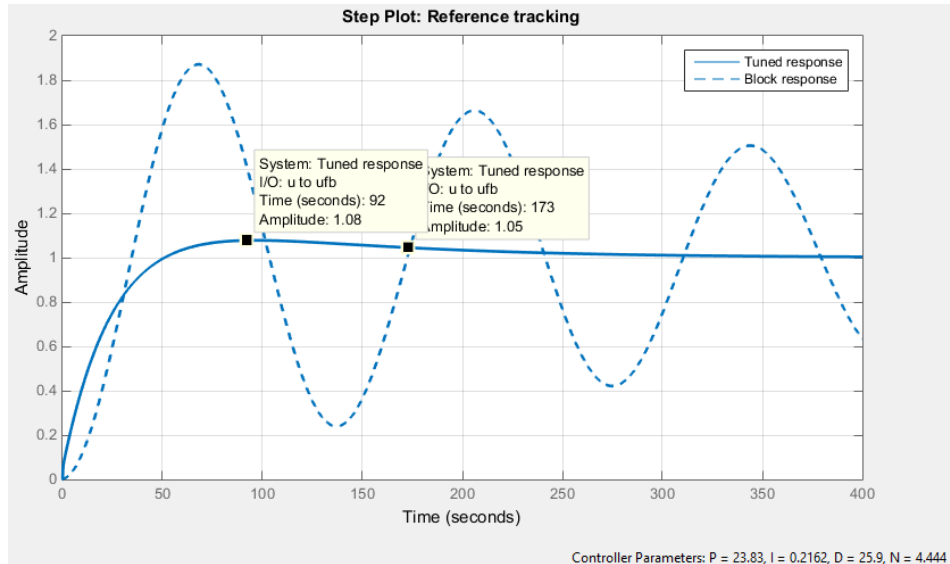


Рисунок 32 –Крива моделювання

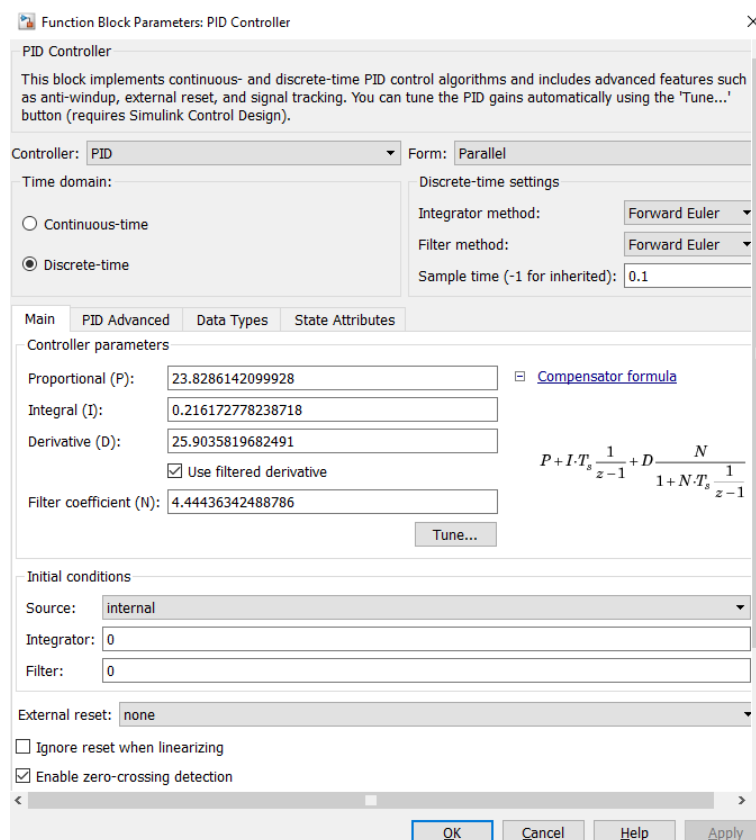


Рисунок 33 –Налаштування для ПІД -регулятора

Були отримані такі результати: коефіцієнт підсилення – 23.83, час інтегрування – 0.22, час диференціювання – 25.9, час регулювання - 173 секунд, перерегулювання - 8%.

Ідеально дискретний ПІД -регулятор

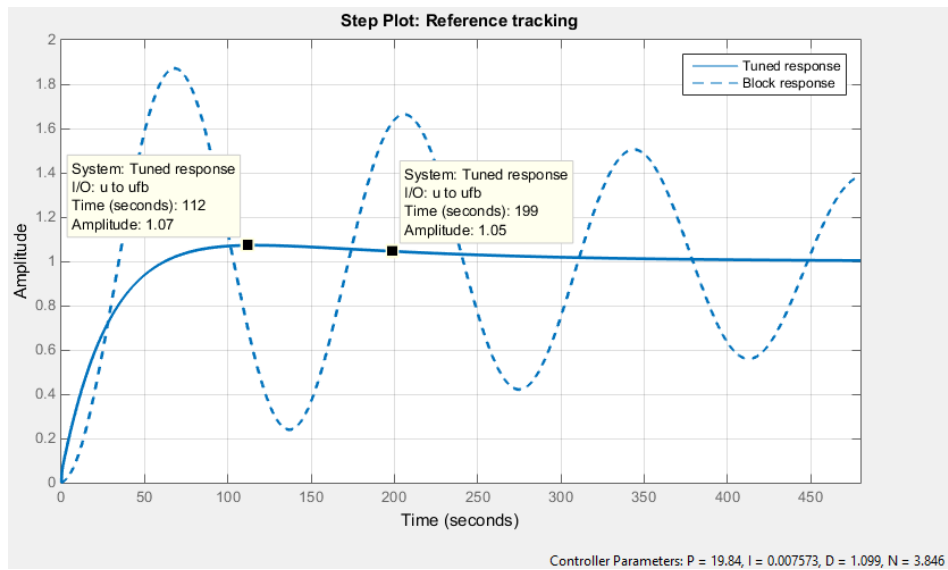


Рисунок 34 –Крива моделювання

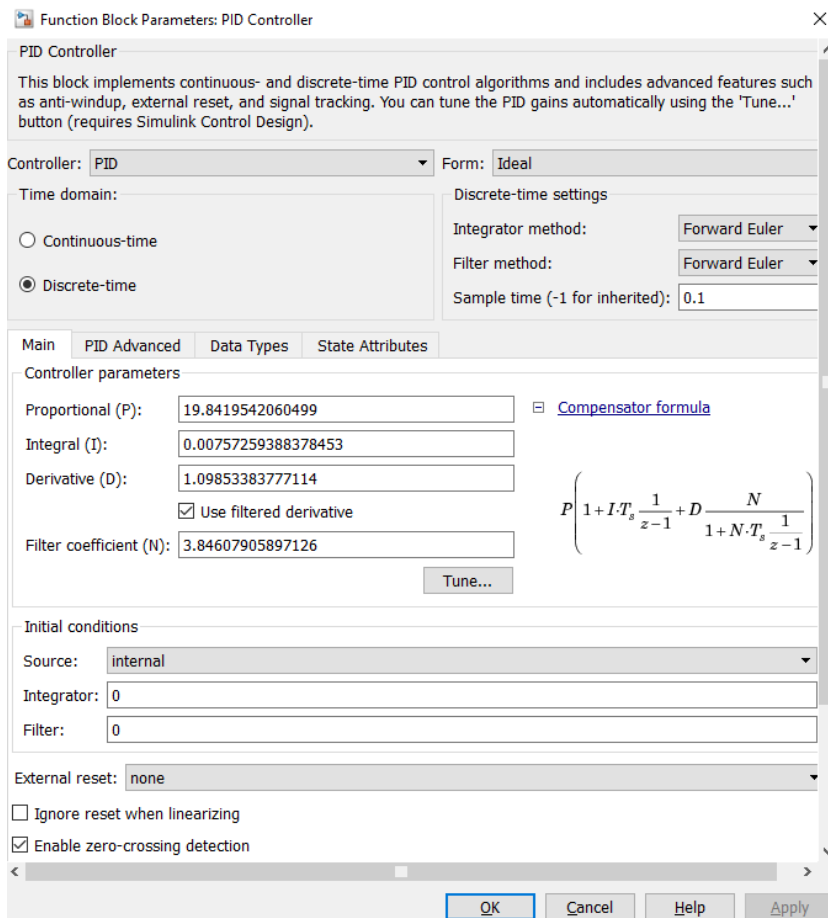


Рисунок 35 –Налаштування для ПІД -регулятора

Після налаштування отримали наступні значення: коефіцієнт підсилення – 19.84, час інтегрування – 0.007, час диференціювання – 1.1, час регулювання - 199 секунд, перерегулювання - 7%.

Усі результати експериментів зібрані у Таблиці 4:

Таблиця 4 –Результати регулювання

Регулятор	P	I	D	Час регулювання, с	Перерегулювання,%
Ідеально безперервний П -регулятор	800	-	-	1.81	-
Паралельно безперервний ПІ - регулятор	15.1	0.07	-	72.3	5
Ідеально безперервний ПІ - регулятор	17.96	0.005	-	60.8	5
Ідеально дискретний ПІ - регулятор	31.82	0.008	-	34.4	5
Паралельно дискретний ПІ - регулятор	18.31	0.1	-	59.4	5
Ідеально безперервний ПІД - регулятор	13	0.007	4.17	287	8
Паралельно безперервний ПІД - регулятор	18.66	0.13	19.35	208	7
Паралельно дискретний ПІД - регулятор	23.83	0.22	25.9	173	8
Ідеально дискретний ПІД - регулятор	19.84	0.007	1.1	199	7

При виборі регулятора основна увага приділялася показникам часу регулювання та ступеня перерегулювання. Тому як можна побачити з таблиці вище, найідеальнішим варіантом був би П - регулятор. Однак технічно такий регулятор неможливо втілити.

Після застосування ПІ-регулятора були отримані наступні результати: усереднений час регулювання має 57 секунд, а перерегулювання має 5%. ПІД -регулятор не є ідеальним через необхідність налаштування трьох параметрів (що ускладнюють процес), а також він має недолік який відображає його вразливість до впливу перешкод та інших факторів. Після моделювання системи з використанням ПІД-регулятора, зафіксовано погіршення показників: час регулювання збільшився приблизно вчетверо порівняно з ПІ-регулятором, а також спостерігається зростання перерегулювання приблизно на 50%.

Основаючись на даних з Таблиці 4, було обрано Ідеально дискретний ПІ -регулятор, який має час регулювання 34.4с. та перерегулювання не більше 5%, оскільки він демонструє найкращі показники порівняно з іншими варіантами, представленими у таблиці 4.

ВИСНОВКИ

У цій роботі було розглянуто та вирішено питання, які пов'язані з розробкою системи управління лінією виробництва вафель.

Досліджено було також структурну схему процесу та роботу основного обладнання. Базуючись на проведеному аналізі, було визначено ключові параметри системи управління технологічною лінією виробництва вафель.

Було зроблено креслення функціональної схеми автоматизації та обрано відповідні технічні засоби: датчики, перетворювачі, виконавчі механізми, блоки та системи захисту. Проведено розрахунки параметрів керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструктивні вказівки до виконання курсових і дипломних проектів з напряму підготовки «Системна інженерія» і спеціальності «Комп'ютеризовані системи управління і автоматика», – Суми.:СумДУ, 2013. –69с.
2. Технологія борошняних кондитерських виробів:Підручник/ С. Я.Корячкіна, Т. В. Матвеева, 2011. —400с.
3. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного регулювання. –Підручник. К.Либідь,1997. – 544 с.
4. Дмитрієв, Е.А.Теплообміні апарати хімічних виробництв: навчальний посібник /Є. А.Дмитрієв, Є. П.Моргунова, Р. Б.Комляшев; – М: Хіміко технологічний ун-т ім. Д. І. Менделєєва, 2013. – 87 с.
5. Технологія приготування мучних кондитерських виробів- <https://msd.com.ua/tehnologiya-prigotovleniya-muchnyx-konditerskix-izdelij/tehnologiya-prigotovleniya-vafel/>
6. Каталог фірми Siemens- <https://www.avigan.com.ua/page/cpu-1516-3-pn-dp/mp/14203/>
7. Машинно-апаратурна схема виробництва вафель- <https://vmasshtabe.ru/promzona/mapp/mashinno-apparturnaya-shema-proizvodstva-vafel.html>
8. Головний сайт продукції Siemens- <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500.html>
9. Тензодатчик CAS MNT 20-1000 кг- <https://topscan.com.ua/ua/p2094575075-tenzodatchik-cas-mnt.html>
10. Тензодатчик Zemic L6E3- <https://topscan.com.ua/ua/p910262534-tenzodatchik-zemic-l6e3.html>
11. Датчик температури PT100- <https://electrokom.kiev.ua/ru/product/datchik-temperatury-pt100>
12. Датчик рівня SIEMENS POINTEK CLS 100- https://simat.com.ua/product-7ml5501-0aa10?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwo6GyBhBwEiwAzQTmc9tWt10lm0YZS-mwLtOQvsNSMYg2SR5CJ3dC53mH10vEEfA1DLOmhBoCbyQQA_vD_BwE