

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка системи автоматичного регулювання
температури повітря попередньої сушки макаронних
виробів»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу групи АК-21-Зск

ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____Денис НОВІКОВ

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент

_____Петро ПЛІШКОВ

« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Зміст

Вступ	3
1 Огляд процесу виготовлення макаронних виробів	4
1.1 Огляд обладнання, яке використовується для сушки макаронних виробів	7
2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання температури повітря попередньої сушки макаронних виробів	11
2.1 Аналіз АСУТП виробництва макаронних виробів	12
2.2 Вибір та аналіз елементів системи автоматичного регулювання температури повітря попередньої сушки макаронних виробів	16
3 Проектування системи автоматичного регулювання температури повітря попередньої сушки макаронних виробів	26
3.1 Вибір методу синтезу регулятора	26
3.2 Синтез регулятора	33
3.3 Моделювання роботи САР температури повітря попередньої сушки макаронних виробів	37
4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання	43
4.1 Визначення періоду дискретизації	43
4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора	45
4.3 Розробка структурної схеми регулятора	48

4.4 Розробка електричної принципової схеми	50
4.5 Формування шин мікропроцесорної системи	52
4.6 Проектування селектору адреси	53
4.7 Пристрої сполучення МП з неперервною частиною системи керування	55
Висновки	58
Список літератури	59

Вступ

Багато з завдань, які виникають при керуванні виробництвом макаронних виробів, подібні до тих, які стоять перед виробництвом хліба. Ці завдання включають управління такими етапами виробництва, як зберігання борошна без упаковки, змішування, ущільнення та формування тіста, операції з обробки, різання та укладання сирих макаронів, процес сушіння, а також кінцеві операції з приготування макаронів, такі як накопичення, стабілізація, фасування, транспортування та зберігання.

Процес сушіння макаронів є важливим і довготривалим етапом в їх виробництві. Він супроводжується складними процесами тепло- та масообміну, які визначають якість готової продукції. Під час сушіння змінюються структурні та механічні характеристики макаронів. Вони набувають пружності та хрупкості, втрачаючи пластичність.

Якість управління системою тут визначає режим сушіння. З метою скорочення часу сушіння макаронів і одночасного забезпечення їх міцності процес розбивається на два етапи: попереднє та остаточне сушіння. Попереднє сушіння характеризується інтенсивним видаленням вологи з сирих макаронів при збереженні їх пластичності (до досягнення вологості близько 20%). Остаточне сушіння є періодом повільного видалення вологи з макаронів, які набувають при цьому пружні властивості.

1 Огляд процесу виготовлення макаронних виробів

Виробництво різних видів макаронних виробів має свої особливості. На чотирьох різних типах потокових ліній виробляють масові види макаронних виробів. Короткі макаронні вироби виготовляють на лініях з конвеєрними або барабанними сушарками. Для виробництва довгих видів макаронних виробів застосовують лінії з сушінням у циліндричних касетах або сушінням на бастунах - тонких металевих трубах.

Етапи технологічного процесу виробництва макаронних виробів включають такі основні кроки і операції:

- Підготовка сировини: зберігання, змішування, просівання та дозування борошна; підготовка води та додаткових складових;
- Дозування та змішування компонентів за рецептурою; вакуумування отриманої крихтоподібної суміші;
- Заміс та пресування тіста; формування та різання сирих тістових заготовок;
- Сушіння, стабілізація та охолодження тістових заготовок;
- Підготовка макаронних виробів до упаковки; упаковка виробів у споживчу та транспортну тару.

Обладнання для початкових етапів виробництва макаронних виробів відповідає за зберігання, транспортування та підготовку сировини, такої як борошно, вода та добавки. Для зберігання сировини використовуються різні контейнери, включаючи мішки, металеві ємності та бункери. На менших підприємствах мішки з борошном транспортуються механічно за допомогою навантажувачів та конвеєрів, а рідинні складники перекачуються насосами. На великих підприємствах використовуються системи пневматичного

транспортування для борошна, тоді як рідини перекачуються за допомогою насосів. Підготовка сировини здійснюється за допомогою просіювачів, змішувачів, магнітних сепараторів, фільтрів та іншого обладнання.

Ведучий комплекс лінії складається з обладнання для точного дозування, змішування та вакуумування складових за рецептом, макаронного преса, а також ріжучих і обдувочних пристроїв.

Завершальні етапи виробництва виконуються за допомогою сушильних апаратів, накопичувачів-стабілізаторів, машин для фасування і групового упакування макаронних виробів.

На малюнку 1.1 зображена схема обладнання лінії виробництва коротких макаронних виробів.

Автомуковоз з'єднується з муко-прийомним щитком 6 і постачає борошно до одного з силосів 5 для зберігання. За допомогою шнекових живильників 4 борошно вивантажується з різних силосів 5 у необхідних пропорціях і змішується гвинтовим конвеєром 3. Після контрольного просіювання у відцентровому просіювачі 2 борошно подається повітродувкою 1 у тістомісильне відділення. Борошно відділяється від транспортного повітря в циклоні 7.

Через дозатори 28 певна кількість води та добавок-збагачувачів завантажується до змішувача 27, де готується концентрована емульсія. Насосом 26 ця емульсія, разом із залишковою водою, дозується до видаткового бака 21, обладнаного терморегулюючою сорочкою. З цього бака готова емульсія подається насосом 19 у тістомісильне відділення.

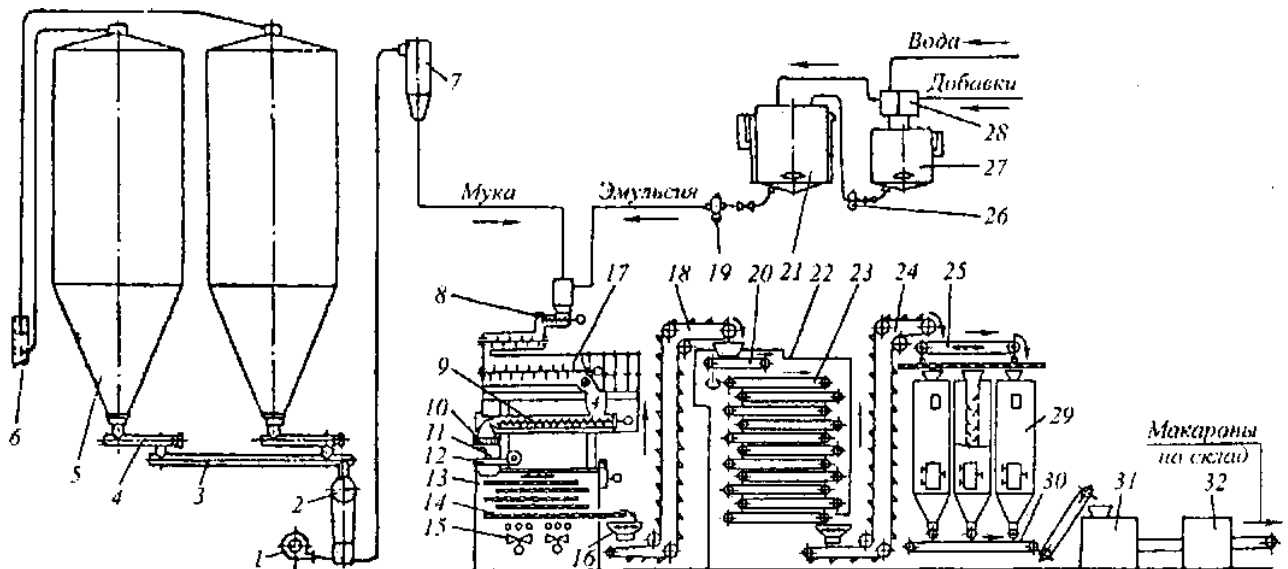


Рисунок 1.1 - Машинно-апаратна схема лінії виробництва макаронних виробів

Борошно та емульсію постійно постачаються до тістозмішувача 17 через дозатори 8. Цей змішувач має три окремі камери, через які оброблювана суміш послідовно проходить, що дозволяє збільшити тривалість замісу до 20 хвилин. На заключному етапі замісу в останній камері суміш піддається вакуумуванню за допомогою вакуумного насоса. Це призводить до отримання більш щільної структури макаронного тіста без повітряних включень, а також до отримання добре висушених виробів з рівномірною структурою, без пустот.

Після цього суміш подається у шнеки макаронного преса 9. У початковій частині шнекової зони суміш інтенсивно перемішується, рухаючись по шнековому каналу до формуючих отворів матриці, де вона перетворюється в щільну зв'язану пластифіковану масу — макаронне тісто. У передматричній камері преса створюється тиск від 6 до 12 МПа, під впливом якого через матрицю 10 випресовуються сирі пасма тіста.

Ножі 11, рухаючись в площині вихідних отворів матриць, відрізають від потоку тіста необхідні по довжині тістові заготовки, які потім обдуваються повітрям з кільцевого сопла 12.

Сирі заготовки макаронних виробів рухаються через секції вібраційного підсушувача 13. У цих секціях продукт пройде через п'ять вібруючих сіток 14, при цьому його обдуває повітря з вентилятора 15, щоб відбувалася процедура підсушування.

Після цього підсушені тістові заготовки збираються в вібралотку 16 і за допомогою елеватора 18 транспортуються до пристрою 20. Цей пристрій рівномірно розподіляє їх по всій поверхні верхнього ярусу 23 сушарки 22. Під час проходження зверху вниз по стрічкових конвеєрах тістові заготовки піддаються процесу сушіння.

Залежно від асортименту і продуктивності лінії можуть бути включені дві або три стрічкові конвеєрні сушарки, які розташовані послідовно. На них тістові заготовки проходять через попереднє та остаточне сушіння.

Після процесу сушіння нагріті заготовки переміщуються елеватором 24 та рухомим стрічковим конвеєром 25 до бункерів 29 нагромаджувача-стабілізатора. Тут заготовки поступово охолоджуються до температури приміщення цеху, а також відбувається вирівнювання вологовмісту.

Готові макаронні вироби за допомогою системи конвеєрів 30 транспортуються до фасувальної машини 31 і упаковуються у картонні коробки або пакети з полімерної плівки. У машині 32 пакети упаковуються в транспортну тару і відправляються на склад.

1.1 Обладнання, яке використовується для процесу сушіння макаронних виробів

Сушіння макаронних виробів є найтривалішою стадією їх виробництва. Зазвичай сушіння завершується, коли вироби досягають вологості 13,5–14%, щоб після остигання перед упаковуванням вологість складала не більше 13%. Ущільнене макаронне тісто та сирі макаронні вироби відносяться до колоїдно-пористих матеріалів. Дотримання оптимальних режимів сушіння

впливає на такі якісні характеристики готової продукції, як міцність, хрупкість, кислотність.

Швидке видалення води може спричинити розтріскування виробів, а занадто тривале сушіння на початковому етапі може викликати закисання виробів. Крім того, при сушінні в шарі може відбутися деформація або злипання продукту.

Макаронні вироби сушаться за допомогою конвективного методу, коли вони безпосередньо взаємодіють із сушильним агентом, яким зазвичай є нагріте повітря.

Процес сушіння макаронних виробів можна представити у вигляді кривої сушіння, що показує зміну середньої вологості W виробів з часом (див. рис. 1.2).

Легке зниження вологості W_t на початковій ділянці пояснюється тим, що концентраційна і термічна дифузія протікають у протилежних напрямках.

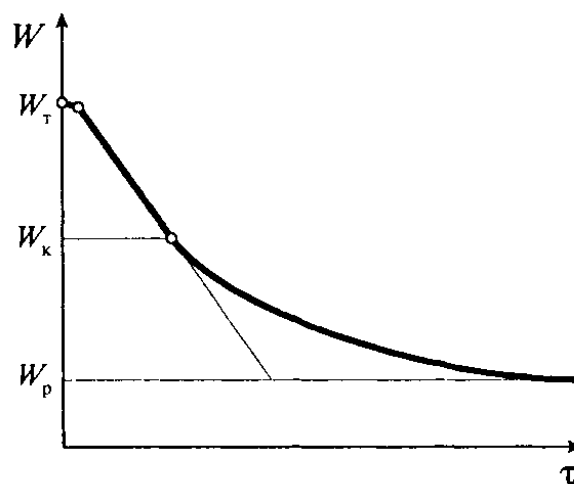


Рисунок 1.2 - Крива сушіння

Потім відбувається зміна вологості виробів по прямій лінії. Протягом цього періоду, який називається періодом постійної швидкості сушіння, з виробів видаляється менш щільнозв'язана осмотична вода. Після досягнення критичної вологості W_k настає період падаючої швидкості

сушіння, коли головним чином віддається адсорбційно зв'язана волога, яка міцно утримується білковими речовинами.

При налаштуванні режимів сушіння важливо враховувати дві основні характеристики макаронних виробів як об'єкта сушіння:

- При зменшенні вологості виробів з 29-30% до 13-14%, спостерігається зменшення їх лінійних і об'ємних розмірів (усадка) на 6-8%.
- Під час процесу сушіння макаронних виробів відбувається зміна їх структурно-механічних характеристик.

Використовують три основні режими конвективної сушки макаронних виробів, враховуючи температуру повітря.

- Використовують традиційні низькотемпературні режими, при яких температура сушильного повітря не перевищує 60°C;
- Використовують високотемпературні режими, при яких на певному етапі сушіння температура повітря досягає 70-90°C;
- Використовують режими з високою температурою, при яких температура повітря перевищує 90°C.

У вітчизняній промисловості найпоширеніші низькотемпературні сушильні установки, оскільки використання високотемпературних режимів обмежується відсутністю відповідного спеціалізованого обладнання та приладів.

Згідно з класифікацією (показаною на рис. 1.3), всю техніку для сушіння макаронних виробів можна розділити на обладнання для сушіння коротких і довгих виробів.

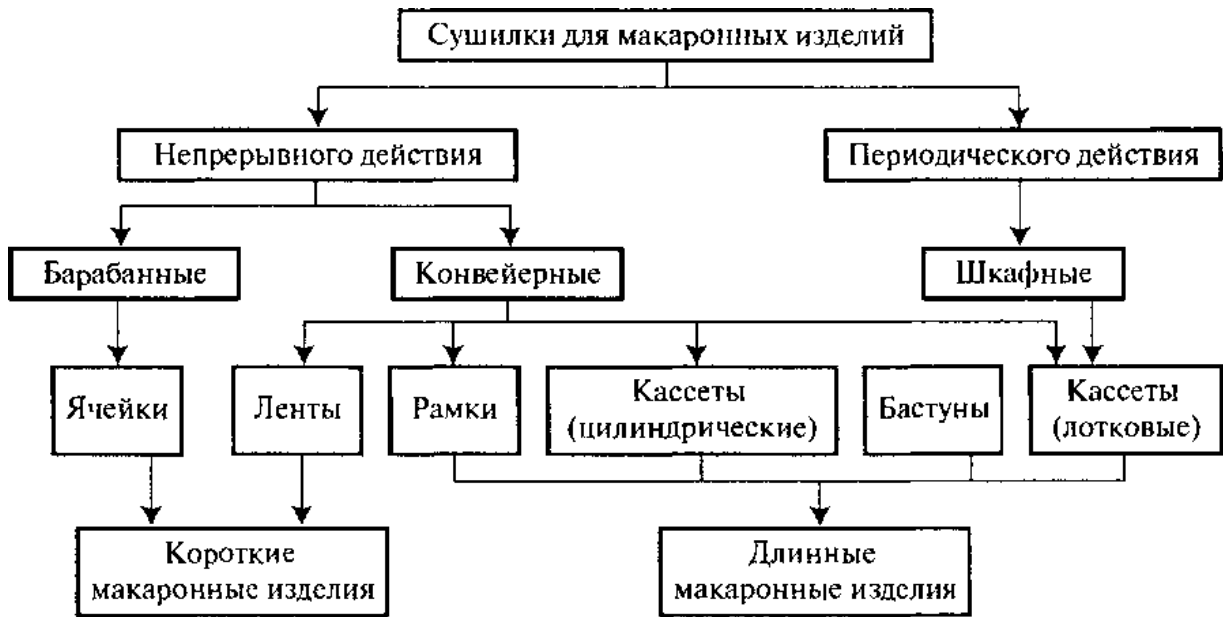


Рисунок 1.3 - Класифікація сушарок для макаронних виробів

Залежно від будови, сушильні установки поділяються на барабанні, конвеєрні та шафові, а за принципом роботи — на неперервні та періодичні. Сушильні системи для макаронних виробів відрізняються методами розміщення матеріалу, що сушиться, всередині камери (в рамках, касетах, барабанах, чи комірках), а також застосуванням пристроїв для його переміщення.

2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання температури повітря попередньої сушки макаронних виробів

Для підприємств у галузі харчової промисловості характерні особливості, особливо у виробництві харчових продуктів, де переважають неперервно-дискретні та дискретні технологічні процеси. Ці процеси використовуються для обробки сировини, яка швидко псується, за допомогою складних фізико-хімічних та біохімічних методів, а також за дотримання жорстких рецептур для забезпечення збереження харчової та смакової цінності продукції. Основна мета полягає у забезпеченні стандартної якості.

Системи автоматизованого управління та контролю технологічними процесами (АСУТП) відповідають за збір, обробку та аналіз інформації для прийняття рішень щодо керування виробничими процесами. У виробництві продуктів харчування, з огляду на складність і велику кількість технологічних процесів, значна роль відводиться людському фактору через їх велику різноманітність та недостатню деталізацію.

Створення та ефективне функціонування систем автоматизованого управління технологічними процесами (АСУТП) має на меті досягнення конкретних техніко-економічних результатів, таких як зниження витрат на виробництво продукції, забезпечення стабільної якості продукції, розширення асортименту та кількості виготовлених харчових товарів для задоволення потреб споживачів, а також поліпшення умов праці персоналу, що займається обслуговуванням обладнання.

2.1 Аналіз АСУТП виробництва макаронних виробів

Автоматизовані лінії для виробництва макаронних виробів складаються з різних технологічних установок та транспортних механізмів, що забезпечують високий рівень механізації та автоматизації усіх етапів виробництва високоякісної готової продукції. Для сушіння макаронних виробів часто використовують систему підвісного сушіння на металевих стрижнях, відомих як бастунки. Метод керування періодом попереднього сушіння, який виконується на автоматизованих лініях, таких як Б6-ЛМВ, показано на малюнку 2.1.

Структура передсушувального тунелю полягає в його герметизації та теплоізоляції. Тунель розділений перекриттям на два рівні, які створюють дві сушильні зони. У нижній зоні розташований один гребінчастий конвеєр, а у верхній - два. Додатково у нижній частині сушарки розміщений конвеєр для повернення порожніх бастунів. Для нагрівання сушильного повітря використовуються водяні калорифери, які складаються з ребристих труб, трубопроводів, насосів і регулювальної арматури.

Нагріта вода (80—90°C) направляється у першу зону для підігріву безпосередньо з централізованої системи теплопостачання. У другу зону для підігріву також подається гаряча вода, а також частина вже використаної гарячої води з першої зони за допомогою насоса.

Вентилювання в першій зоні забезпечується двома парами вентиляторів IV, які розташовані паралельно один одному. Під час входу макаронів до сушарки, два вентилятори використовуються для відведення повітря з приміщення та постачання теплого повітря до нижньої зони.

Чотири пари вентиляторів відповідають за рециркуляцію сушильного повітря шляхом його продування через калорифери. Частина вологого повітря виводиться з зони сушіння у приміщення. Система вентиляції зон сушарки здійснює часткову рециркуляцію сушильного повітря, де частина

вологого повітря викидається у приміщення, а інша частина змішується з більш сухим повітрям, яке надходить з приміщення.

Задані параметри сушіння, такі як температура і відносна вологість сушильного повітря, автоматично підтримуються. Система керування забезпечує контроль температури і вологості повітря в нижній і верхній зонах передсушарки (зони 2-3, 3-2, 5-2, 26-8, 30-2), контроль тиску і температури гарячої води по зонах сушарки (зони 8-1, 24-2, 25-1); регулювання температури і відносної вологості повітря по зонах передсушіння (зони 3-2, 5-2, 27-2, 30-2); контроль за положенням регулюючих пристроїв (4-2, 6-2, 28-2, 31-2); освітленням для сповіщення оператора про робочий стан та аварійні умови роботи сушарки.

Управління сушаркою може бути здійснене через систему автоматизації та управління технологічними процесами (АСУТП) відповідно до схеми на рис. 2.2, яка включає два ієрархічні рівні керування.

На першому рівні управління присутні датчики та індикатори для вимірювання параметрів, а також засоби управління та пускові пристрої. Пульти управління технологічним обладнанням розташовані переважно на місці виробництва. Взаємодія між пристроями здійснюється за допомогою протоколу Hart через мережу Fieldbus HI.

Другий рівень управління включає в себе використання мережевих контролерів AL-2000S. Ці контролери мають значну обчислювальну потужність та працюють у трьох комплектах з гарячим резервуванням на основі ПТК з керуючою ЕОМ (Pentium I).

Автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) для сушіння макаронів на лінії Б6-ЛМВ забезпечує відображення інформації про стан технологічного обладнання, контроль процесу надходження заготовок, введення завдань і команд з клавіатур пультів керування технологічним процесом і автоматизованих робочих місць оператора-технолога, а також управління технологічним процесом.

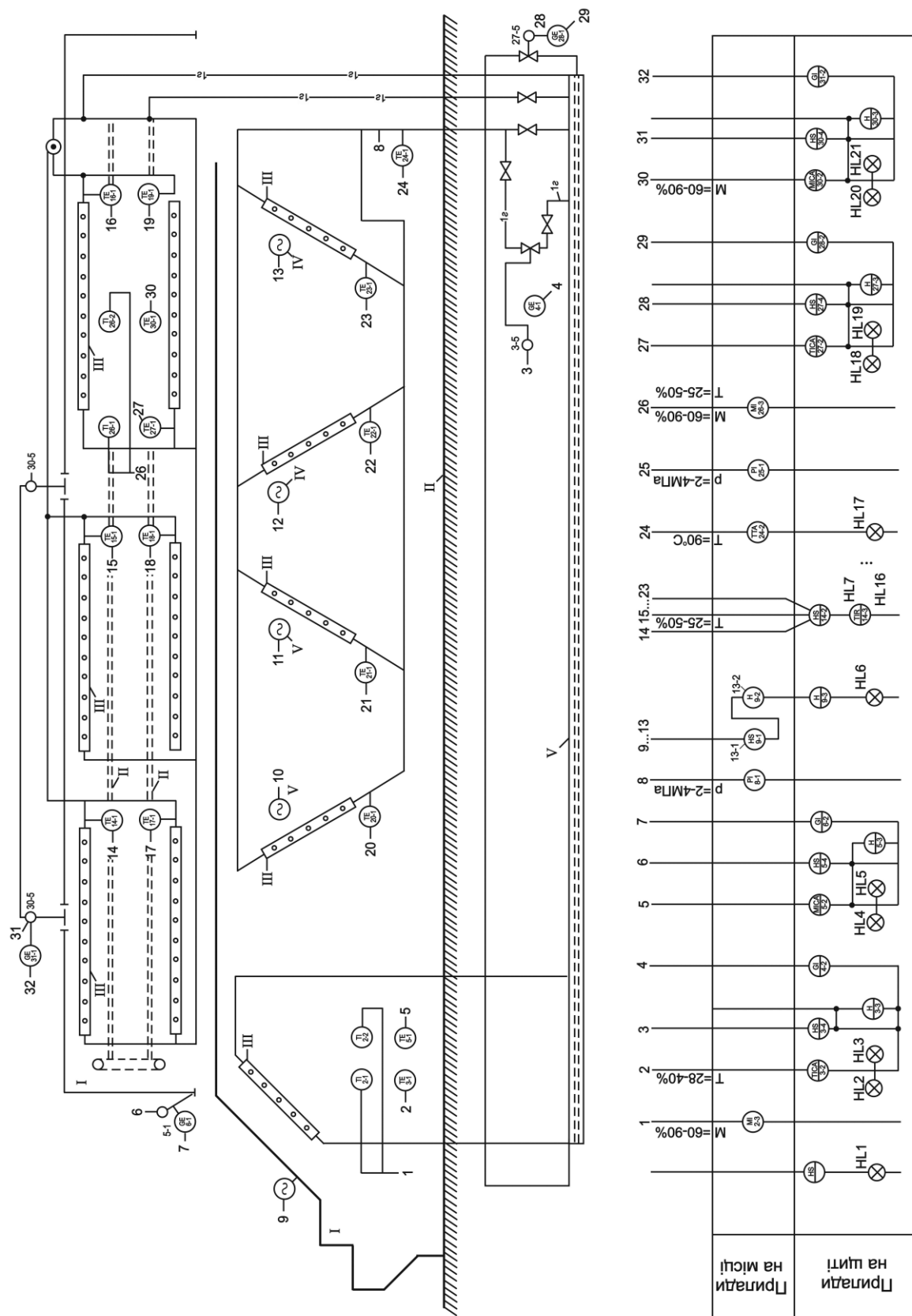


Рисунок 2.1 – Схема автоматизації виробництва макаронних виробів

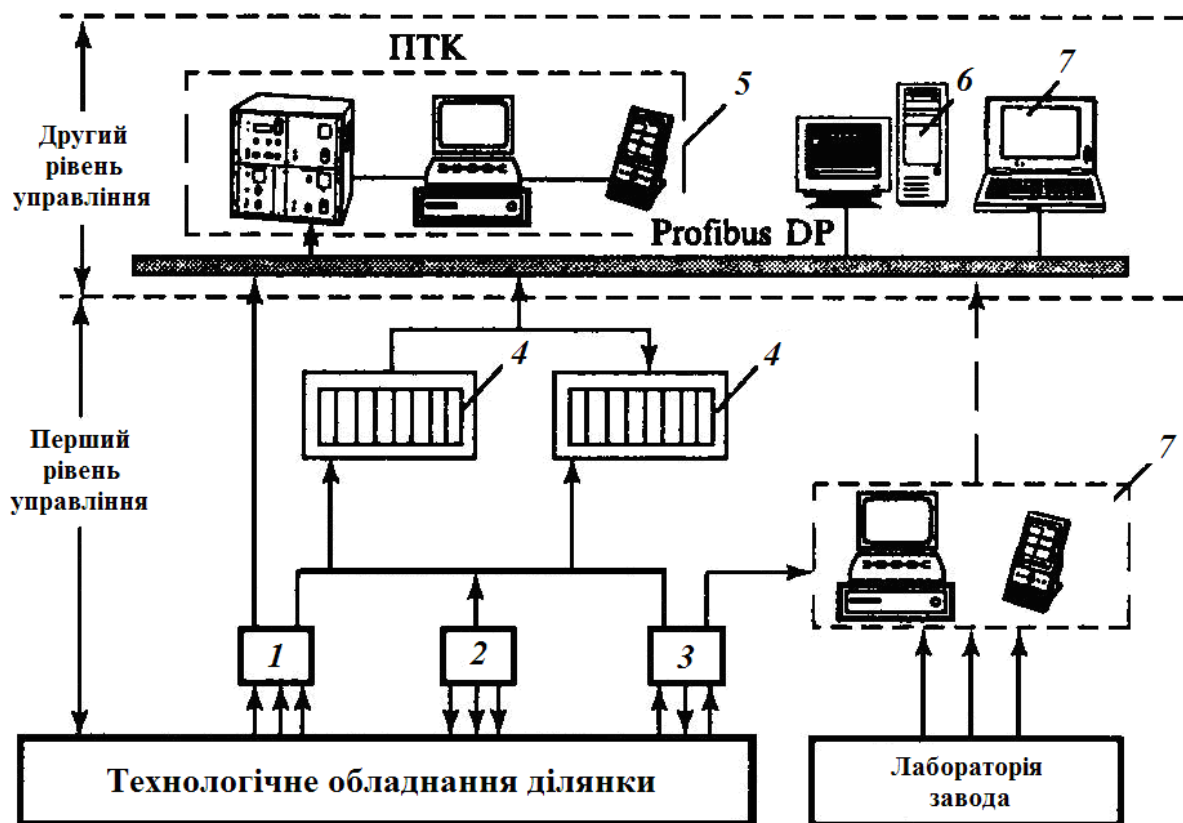


Рисунок 2.2 – Структурна схема АСУТП виробництва макаронних виробів:
 1 – претворювачі (датчики) технологічних параметрів; 2 – електропневматичні виконавчі пристрої, пускова електроапаратура; 3 – локальні пристрої управління ТП; 4 – мікропроцесорні локальні контролери; 5 – програмно-технічний комплекс (ПТК); 6 – сервер БД; 7 – АРМ оператора (технолога, інженера, хіміка-аналітика і т.п.)

Робота автоматизованої системи регулювання сушарки базується на використанні психометричного методу для вимірювання та регулювання параметрів сушильного повітря. Це досягається за допомогою регулюючого каналу AL-2000S (3-2, 5-2, 27-2, 30-2), який передає дані для реєстрації на пульт технолога та автоматизоване робоче місце оператора. Датчики температури та вологості повітря встановлені в обох зонах передсушування. Для вимірювання температури використовуються термоперетворювачі опору (TCM і ADAM-5017H) або модулі ADAM-5013 (3-1, 5-1, 27-1, 30-1). Кожна пара термометрів складається з одного "мокрого" та одного "сухого" датчика.

Автоматична система регулювання забезпечує встановлення режиму сушіння шляхом підтримки необхідної різниці між вимірами "сухого" та "мокрого" термометрів. У системі регулювання температури повітря кількість гарячої води, яка подається в калорифер, відтворюється за допомогою клапанів (3-5, 27-5), керування якими відбувається через ЦАП (модуль ADAM-5024) у верхній та нижній зонах сушарки. Контроль температури гарячої води на виході з калориферів передсушування здійснюється за допомогою термоперетворювача опору TCM та АЦП (ADAM-5017) або модулями ADAM-5013 (14-1 ÷ 23-1) у поєднанні з логіко-програмним каналом AL-2000S сушильного повітря та моніторується психрометрами (2-3, 26-3).

2.2 Вибір та аналіз елементів системи автоматичного регулювання температури повітря попередньої сушки макаронних виробів

Давайте розглянемо контур керування температурою повітря в процесі попередньої сушки макаронних виробів (рис. 2.1). У викладеній системі автоматизації виробництва макаронних виробів в цьому контурі використовується пропорційний регулятор, реалізований через логіко-програмний канал AL-2000S. Цей регулятор забезпечує стабільність управління, але якість регулювання залишає бажати кращого. Покращення якості керування можливе шляхом розробки автоматичної системи регулювання з використанням оптимального регулятора.

В цій автоматичній системі керування об'єктом є тунель передсушки, де необхідно підтримувати температуру повітря на заданому рівні. У системі керування температурою повітря в ролі регулюючого параметра виступає витрата гарячої води в калорифері, яка регулюється за допомогою клапанів.

Давайте розглянемо теплові процеси, що відбуваються в тунелі передсушки під час випаровування рідини з макаронних виробів.

Кількість випаровуваної вологи визначається за допомогою формули.

$$I = \Pi[(100 - W_c)/(100 - W_1)] \cdot [(W_1 - W_c)/(100 - W_c)], \quad (2.1)$$

де Π — продуктивність сушильної установки по сухих виробам; W_c — вологість сухих виробів ($W_c = 13,5...14,0\%$); W_1 — вологість сирих виробів ($W_1 = 28...30\%$).

Питома витрата свіжого повітря

$$l = 1000/(d_2 - d_0), \quad (2.2)$$

де d_1, d_2 — вологовміст свіжого повітря й повітря на виході із сушарки, г/кг сухого повітря.

Годинна витрата свіжого повітря

$$L = K_3 l I, \quad (2.3)$$

де K_3 — коефіцієнт запасу ($K_3 = 1,06$).

Об'ємна витрата повітря

$$V = L V_0, \quad (2.4)$$

де V_0 — питомий об'єм свіжого повітря, м³/кг сухого повітря,

$$V_0 = R_B T / (p - \varphi p_{\text{нас}}), \quad (2.5)$$

тут R_B — газова постійна для повітря, ($R_B = 288$ Дж/(кг·°К)]; T — температура повітря, °К; p — барометричний тиск свіжого повітря, Па; φ — відносна вологість повітря; $p_{\text{нас}}$ — тиск насиченої пари при заданій температурі повітря, Па.

Витрата теплоти на сушіння розраховують по формулі

$$Q = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)K_n, \quad (2.6)$$

де K_n — коефіцієнт неврахованих втрат ($K_n = 1,4$); Q_1 — втрати теплоти, затрачувані на підвищення тепломісткості відпрацьованого повітря:

$$Q_1 = L(J_2 - J_0), \quad (2.7)$$

тут J_0, J_2 — тепломісткість свіжого й відпрацьованого повітря, Дж/(кг сухого повітря • °K). Q_2 — втрати теплоти на нагрівання виробів:

$$Q_2 = \Pi c_n(t_c - t_1), \quad (2.8)$$

c_n — теплоємність сирих виробів, Дж/(кг • °K):

$$c_n = 1650 + 15,49W_0, \quad (2.9)$$

W_0 — вологість виробів у перерахуванні на суху масу:

$$W_0 = 100H/(100 - H), \quad (2.10)$$

t_c, t_1 — температура макаронів на виході й вході в сушильну камеру;

Q_3 — втрати теплоти на нагрівання транспортних пристроїв і пристосувань (конвеєрів, касет, бастунів та ін.) у сушильній камері:

$$Q_3 = G_T c_T(t_k - t_n), \quad (2.11)$$

де G_t — маса транспортних пристроїв і пристосувань, що проходять в одиницю часу через сушильну камеру; $c_{\text{л}}$ — питома теплоємність матеріалу, з якого виготовлені транспортні пристрої й пристосування [для сталі $c_{\text{л}} = 0,44$ кДж/(кг • °K), для алюмінію $c_{\text{л}} = 0,896$ кДж/(кг • °K)]; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ — температура транспортних пристроїв і пристосувань на вході й виході із сушильної камери;

Q_4 — втрати теплоти в навколишнє середовище:

$$Q_4 = K_0 F \Delta t, \quad (2.12)$$

де K_0 — представляє собою коефіцієнт теплопередачі через стінки сушарки, який зазвичай коливається від [$K_0 = 0,44 \dots 0,53$ Вт/(м² • °K)]; F - це загальна площа поверхонь сушарки, що мають контакт із зовнішнім середовищем; Δt — це середній температурний градієнт між зовнішньою стінкою сушарки та оточуючим повітрям.

Поверхня нагрівання калорифера

$$F_{\text{к}} = Q / K_{\text{к}} \Delta t_{\text{ср}}, \quad (2.13)$$

де $F_{\text{к}}$ — представляє коефіцієнт теплопередачі через стінки калорифера, який зазвичай коливається від [$K_{\text{к}} = 13,3 \dots 32,8$ Вт/(м² • °K)]; $\Delta t_{\text{ср}}$ — це середній температурний градієнт між носієм тепла, який нагрівається, і оточуючим повітрям на всій поверхні нагрівання:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_{\text{м}}}{2,31 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (2.14)$$

тут Δt_6 — визначає найбільшу різницю температур між нагріваним носієм тепла та оточуючим повітрям; $\Delta t_{\text{м}}$ — позначає найменшу різницю температур між тими ж об'єктами.

Оскільки процес теплообміну вкрай складний і практично неможливо врахувати всі його особливості в математичній моделі, прийнято використовувати спрощену версію цієї моделі. Вона базується на припущенні, що питомі теплоємності можна представити у вигляді постійних часу, а сам об'єкт регулювання можна описати як аперіодичну ланку першого порядку

$$W_{OP}(p) = \frac{k_{OP}}{T_{OP} \cdot p + 1}. \quad (2.15)$$

Враховуючи всі збурення, що впливають на об'єкт регулювання та їхню різну природу, можна узагальнити їх у вигляді "білого" шуму. Цей шум є стаціонарним випадковим процесом і має задане математичне очікування та середньоквадратичне відхилення. Крім того, він підкоряється нормальному розподілу амплітуд.

Для вимірювання температури повітря в АСУТП використовуються термоперетворювачі опору (ТС). Ці пристрої призначені для вимірювання температури різних типів речовин, включаючи тверді, рідкі, газоподібні та сипучі матеріали. ТС здатні працювати як у нейтральних, так і в агресивних середовищах. Вони виготовляються з чутливими елементами з платини (ТСП) або міді (ТСМ).

Характеристики термоперетворювачів опору наведено у таблиці 2.1.

Термоперетворювач опору - це пристрій, який реагує на температуру. Він складається з чутливого елемента, захисної оболонки, внутрішніх з'єднувальних проводів і зовнішніх виводів для підключення до електричних вимірювальних пристроїв.

У розглянутій системі автоматизованого управління та контролю технологічного процесу виробництва макаронних виробів використовується термоперетворювач опору ТСМ-0295/1 для вимірювання температури суміші. Розглянемо детальніше його характеристики, які подані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 містить коди для номінальних статичних характеристик, діапазонів вимірюваних температур та середовищ, в яких проводиться вимірювання

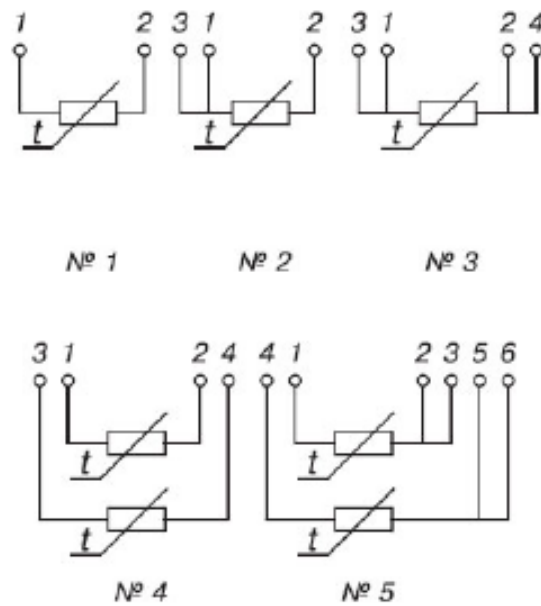
Модифікація ТС	Умовне позначення НСХ	Діапазон вимірюваних температур, °C	Середовище вимірювання
ТС-1088,	50П	-50...+500	Рідкі та газоподібні середовища, тверді тіла. Для ТС-1288 додатково сипучі середовища та повітря вантажних вагонів
ТС-1088А,	Pt100	-50...+600	
ТС1288,	100П	-50...+350	
ТС-1288А	50М, 100М	-50...+200	
ТС-1088Э,	46П, 50П	-50...+500	
ТС1288Э	Pt100, Pt500	-50...+600	
	100П	-50...+350	
	50М, 53М, 100М	-50...+200	
ТС-1388,	50П	-50...+500	Вимірювання температури малогабаритних підшипників та
ТС-1388А	100П, Pt100, Pt500	-50...+350	
	50М, 100М	-50...+200	
ТС-0295	50П	-50...+200	Вимірювання температури при гарячій і холодній переробці харчових продуктів
	100П, Pt100		
	50М, 100М		
ТС-1187Exd	46П, 50П	-50...+350	Вимірювання температури рідких та газоподібних середовищ у вибухонебезпечних зонах
	100П, Pt100		
	50М, 53М, 100М	-50...+200	

Таблиця 2.2 містить основні технічні характеристики термоперетворювача опору ТСМ-0295/1.

Параметри	Значення
НСХ	50П, 100П, 50М, 100М, Pt100
Діапазон вимірювання	-50...+200 °С; -50...+180 °С
Клас допуску	А; В; С
Кількість чутливих елементів	1;2
Схема підключення	1; 2; 3; 4; 5
Довжина монтажної частини	100, 140, 160, 200 мм
Показник теплової інерції	6 с

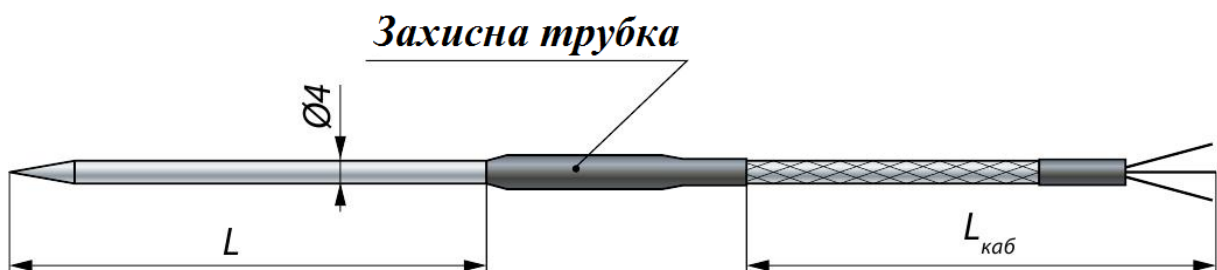
Умовний тиск	0,4 Па
Матеріал захисного чохла	Цільна труба 12Х18Н10Т
Кліматичні умови	Група виконання ДЗ: -50...+50 °С
Степінь захисту	IP54
Середній наробіток на відмову	15000 годин
Середній строк служби	6 років
<u>Міжповірочний інтервал</u>	2 роки

Відповідно до інформації з таблиці 2.2, існує п'ять різних варіантів схем підключення даного датчика, які зображені на рисунку 2.3.



Зображені на Рисунку 2.3 схеми показують різні способи підключення датчика ТСМ-0295/1.

На Рисунку 2.4 показано зовнішній вигляд термоперетворювача опору ТСМ-0295/1.



У Рисунку 2.4 зображено зовнішній вигляд термоперетворювача опору з позначенням ТСМ-0295/1.

Функція передачі температурного датчика, яка відображає його характеристику як аперіодичної ланки першого порядку, може бути виражена таким чином:

$$W_{дт}(p) = \frac{k_{дт}}{T_{дт} \cdot p + 1} \quad (2.4)$$

В якості виконавчого пристрою використовується електромагнітний клапан, призначений для регулювання подачі води. Цей клапан, позначений як 15-Б-859-П на рисунку 2.5, призначений для використання як запірний пристрій з дистанційним управлінням на трубопроводах різних систем.

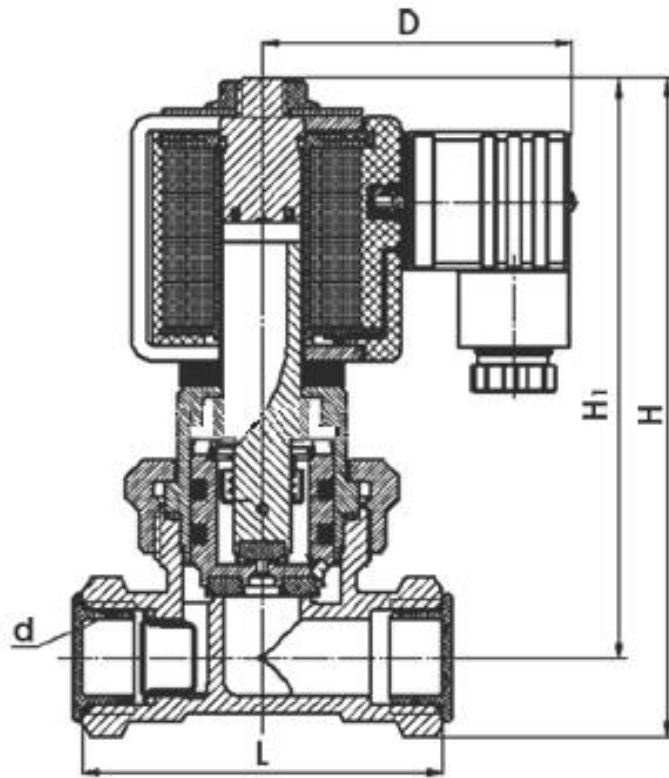
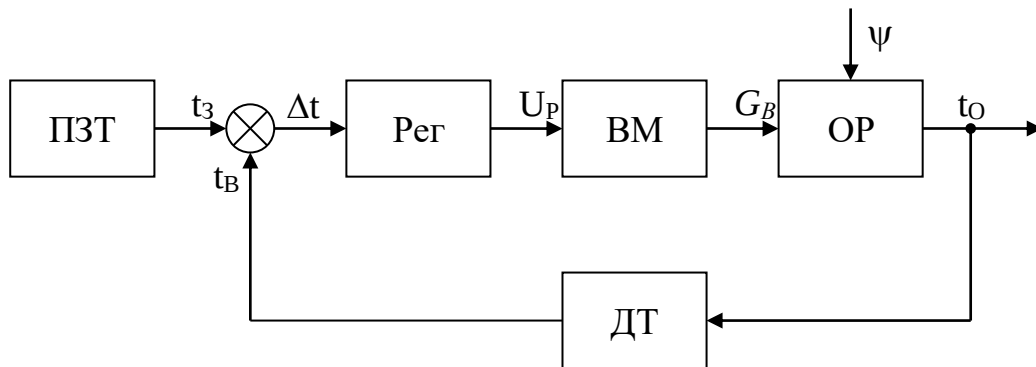


Рисунок 2.5 – Клапан електромагнітний 15-Б-859-П

У системі автоматичного регулювання температури повітря в попередній сушці макаронних виробів електромагнітний клапан може працювати у режимі імпульсного управління. Для цього регулятор має надсилати керуючі сигнали на виконавчий механізм у вигляді широтно-імпульсно модульованих сигналів. Таким чином, відсоткове співвідношення часу, протягом якого передається сигнал, і загального інтервалу передачі сигналу, визначатиме необхідний розхід гарячої води в калорифері.

Шляхом аналізу складових елементів системи автоматичного регулювання температури повітря у передсушувальні для макаронних виробів

можна скласти структурну схему цієї системи, яка відображена на рисунку 2.6.



Зображено структурну схему системи автоматичного регулювання температури суміші карамелі у змішувачі на рисунку 2.6.

У цій схемі, об'єктом регулювання є тунель попередньої сушки, де потрібно зберігати температуру повітря на заданому рівні. Температура об'єкту регулювання t_o вимірюється за допомогою датчика (ДТ), який перетворює сигнал в цифровий вигляд t_b для порівняння з програмованим значенням температури t_3 в програмному задавачі температури (ПЗТ). Будь-яке відхилення Δt від програмованої температури подається на регулятор (Рег), який, відповідно до розрахованого закону регулювання, генерує керуючий сигнал U_p для виконавчого механізму (ВМ). Електромагнітний клапан, який регулює подачу гарячої води в калорифер, виступає в якості виконавчого механізму.

3 Переведення системи автоматичного контролю температури повітря в тунелі передсушки макаронних виробів

3.1 Підбір методики для створення регулятора

Динамічне проектування ґрунтується на наукових методах синтезу оптимальних систем керування, які мають відповідати наступним вимогам:

- здатні найбільш повно враховувати реальні умови експлуатації, забезпечуючи при цьому максимальну ефективність;
- мають бути простими та зручними у практичному використанні;
- використовувати квадратичний критерій якості.

На сьогоднішній день існує багато різноманітних підходів і методів для розробки оптимальних регуляторів. Для визначення найбільш підходящого алгоритму синтезу, який буде використаний для створення системи, необхідно пройти через всю доступну інформацію про існуючі методи синтезу та провести аналіз для вибору найкращого в даному контексті.

Один із найпоширеніших методів синтезу - метод амплітудно-фазових характеристик у різних варіаціях, хоча, не дивлячись на його важливі переваги, такі як простота і наочність, він має деякі серйозні недоліки. Наприклад, під час вибору параметрів коректуючих контурів не враховуються енергетичні витрати на управління, що може призвести до необґрунтованого збільшення потужності виконавчих органів. Крім того, метод амплітудних характеристик не вирішує питання про вибір порядку коригуючого пристрою та максимально досягну якість перехідного процесу в замкнутій системі "об'єкт + регулятор" за наявності певних обмежень (наприклад, властивості об'єкту), тобто до якого рівня слід ускладнювати систему, яку розробляють.

Використання методів синтезу замкнених систем, що еквівалентні розімкненим, потребує обов'язкової стійкості як об'єкта, так і системи вимірювань. Однак ефективність практичних рішень при використанні цих

методів зазвичай досить обмежена, що часто призводить до неоднозначностей у виборі оптимальної структури системи.

Методи, що ґрунтуються на теорії інваріантності, переважно придатні для детермінованого управління.

Детерміноване оптимальне управління розімкненими системами, як правило, не адаптоване до реальних стохастичних сценаріїв практичних завдань. Управлінські завдання вирішуються на обмеженому інтервалі часу.

Варіаційні задачі детермінованого управління з пасивним зворотним зв'язком, включаючи багато-задачі "аналітичного конструювання", застосовують основні методи, такі як динамічне програмування, принцип максимуму і інші. Ці завдання ефективні при управлінні системою на протязі часу, що близький до часу "пам'яті" системи.

На сьогоднішній день найвищі стандарти якості функціонування складних динамічних систем практично можна досягти лише у оптимальних системах, які були синтезовані на основі технологій, що використовують ідеї калманівського або вінерівського методів оптимальних фільтрів.

Перша особливість цього підходу полягає у використанні фільтрів Калмана-Б'юсі як у прямих, так і у зворотних зв'язках систем, для оцінювання стохастичного стану об'єктів керування. Цей метод також використовує отримані оцінки для вибору оптимального управління замкнутими системами.

У завданнях оптимального стохастичного управління успішне вирішення рівнянь Ріккаті є ключовим для досягнення ефективних результатів. У таких задачах стійкість системи протягом нескінченного часу гарантується у випадку асимптотично стійкого об'єкта і спостерігача.

В вінеровському підході до створення оптимальних систем за умов стохастичних впливів важливим етапом є передбачення оптимальних структур регуляторів та оцінка ефективності системи, що розробляється, перед створенням та подальшим її удосконаленням на практиці. Цей підхід до

розробки гарантує конкурентоспроможність системи. Використання методу Вінера–Колмогорова для синтезу оптимальних систем має значну перевагу, оскільки автоматично забезпечує стійкість замкнутої оптимальної системи. Результати застосування цих алгоритмів у практичних задачах свідчать про їхню високу ефективність при стохастичних впливах. В системах, синтезованих за допомогою цих алгоритмів, можливо значно підвищити точність стабілізації на один-два порядки.

Отже, після проведеного аналізу технологічного процесу попередньої сушки макаронних виробів як динамічної системи і з урахуванням взаємозв'язків між технологічними параметрами та енергетичними витратами під час обробки для досягнення максимальної точності регулювання рекомендується використовувати метод, описаний у дослідженні [5]. Його основу становлять результати структурної ідентифікації моделей динаміки вивченого об'єкту, отримані внаслідок експерименту, проведеного в реальних умовах експлуатації.

Отже, головною метою є створення системи автоматичного регулювання температури під час попередньої сушки макаронних виробів, що полягає в розробці оптимальної структури та визначенні параметрів регулятора. Цей регулятор має забезпечувати підтримання температури відповідно до заданого програмного сигналу.

У роботі [5] пояснено, що завдання синтезу системи стабілізації в умовах випадкових впливів полягає в наступному. Маємо задану структурну схему системи (див. рис. 3.1), на входах якої діють вектори центрованих стаціонарних випадкових процесів ψ_0 , φ_0 . Також припускається, що динаміка зв'язку між входом та виходом об'єкта керування відома і описується системою звичайних диференціальних рівнянь.

$$P_0 x_0 = M_0 u + \psi_0, \quad (3.1)$$

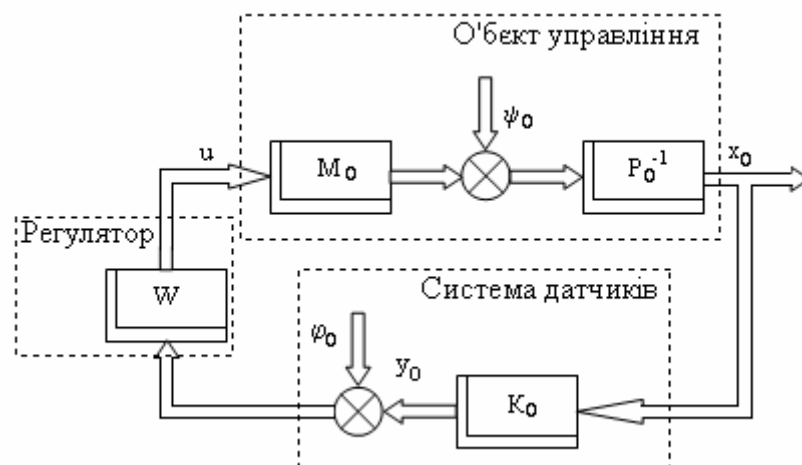
де x_0 – n -вимірний вектор вихідних координат об'єкта;

u – t -вимірний вектор сигналів керування;

P_0 – поліноміальною матрицею розмірності $n \times n$ пщо діє від оператора диференціювання s . У цьому випадку, поліном, який є визначником цієї матриці, має тільки стійкі нулі;

M_0 – поліноміальна матриця розмірності $n \times m$;

ψ_0 - n - Вектор ψ_0 є стаціонарними випадковими збуреннями з нульовими математичними очікуваннями і дробово-раціональною матрицею спектральних щільностей $S_{\psi_0\psi_0}$. Вихідний вектор об'єкта керування вимірюється повністю за допомогою системи неідеальних датчиків, динаміка яких характеризується матрицею передаточних функцій K_0 , а помилки вимірювання - вектором φ_0 стаціонарних випадкових центрованих процесів з відомою матрицею спектральних щільностей $S_{\varphi_0\varphi_0}$.



Фігура 3.1 ілюструє структурну схему многовимірної системи стабілізації

Треба визначити форму та параметри матриці передаточних функцій $\backslash (W \backslash)$, щоб забезпечити стійкість замкнутої системи "об'єкт-регулятор" та досягти мінімуму наступного функціоналу якості

$$e = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} (S'_{x_0 x_0} R + S'_{uu} C) ds, \quad (3.2)$$

де j – комплексна одиниця,

tr – знак операції знаходження сліду матриці;

S_{x0x0} – матриця спектральних щільностей зміни вихідних координат системи розмірності $n \times n$;

“ / ” – знак транспонування матриці;

R – додатно визначена поліноміальна вагова матриця розмірності $n \times n$;

S_{uu} – матриця спектральних щільностей зміни вектору сигналів керування системи розмірності $m \times m$;

C – невід’ємно визначена поліноміальна вагова матриця розмірності $m \times m$;

$s = j\omega$ – комплексний аргумент.

В роботі [5] доведено, що при стійкому об’єкті керування матриця передаточних функцій оптимального регулятора W , яка задовольняє умові задачі синтезу, поставленої вище, знаходиться як добуток двох матриць передаточних функцій

$$W = F_u^\psi (F_x^\psi)^{-1}, \quad (3.3)$$

де

F_u^ψ Задача полягає в пошуку матриці передаточних функцій для системи "об'єкт-регулятор", яка зв'язує вектор збурен ψ_0 і вектор сигналів керування u , з метою мінімізації критерію якості (3.2);

F_x^ψ - Матриця передаточних функцій замкненої системи "об'єкт-регулятор" від вектору збурень ψ_0 до вектору вихідних координат x знайдена з рівняння зв'язку, що було пояснено вперше у роботі [5], має вигляд

$$F_x^\psi = P^{-1} (M F_u^\psi + E_n), \quad (3.4)$$

де

P – поліноміальна матриця розміру $n \times n$, яка характеризує динаміку розширеного об’єкта керування (з урахуванням системи датчиків)

$$P = K_{10} P_0 K_0^{-1}; \quad (3.5)$$

M – Поліноміальна матриця розміру $n \times m$, що описує чутливість розширеного об'єкта до зміни сигналів керування, може бути описана так:

$$M = K_{10}M_0; \quad (3.6)$$

K_{10} – Результат видалення полюсів ліворуч або розкладання ліворуч добутку матриць (MFD) $P_0K_0^{-1}$;

„-1” У верхньому індексі - символ обертання матриці.

Матриця передаточних функцій F_u^ψ яка є фізично реалізованою та стійкою, відповідно до базового методу синтезу [5], дорівнює

$$F_u^\psi = -\Gamma^{-1}(N_0 + N_+)D^{-1}, \quad (3.7)$$

де

Після вінеровської факторизації правої суми матриць отримується дробово-раціональна та стійка матриця розміру $m \times m$ разом з оберненою матрицею.

$$\Gamma = \left[M_* P_*^{-1} K_{0*}^{-1} \begin{pmatrix} E_n \\ O_n \end{pmatrix} R(E_n \quad O_n) K_0^{-1} P^{-1} M + C \right]^+, \quad (3.8)$$

У виразі з верхнім індексом "+", який є знаком операції факторизації праворуч, E_n позначає одиничну матрицю розміру $n \times n$, а O_n – нульову матрицю того ж розміру. У цьому контексті індекс "*" вказує на операцію ермітового спряження матриці;

Матриця D розмірності $n \times n$ є результатом вінеровської факторизації ліворуч добутку матриць і є дробово-раціональною, стійкою, а також має обернену матрицю.

$$D = {}^+ \left[\begin{pmatrix} E_n & P \end{pmatrix} S_{\xi\xi}^{\prime} \begin{pmatrix} E_n \\ P_* \end{pmatrix} \right], \quad (3.9)$$

Матриця D розмірності $n \times n$, яка є дробово-раціональною та стійкою, разом з її оберненою матрицею, отримана в результаті вінеровської факторизації ліворуч добутку матриць. У даному контексті верхній індекс "+" вказує на операцію факторизації ліворуч, а $S_{\xi\xi}^{\prime}$ - є транспонованою матрицею спектральних щільностей вектора ξ , що утворений векторами ψ_0 та φ_0 (рис. 3.1) таким чином, що

$$\xi = [\psi_0' K_{10}' \quad \varphi_0']; \quad (3.10)$$

Матриця $N_0 + N_+$, що є дробово-раціональною та має стійкі полюси, була отримана в результаті вінеровської сепарації (розщеплення) добутку матриць.

$$N = \Gamma_*^{-1} M_* P_*^{-1} K_{0*}^{-1} \begin{pmatrix} E_n \\ O_n \end{pmatrix} R \begin{pmatrix} E_n & O_n \end{pmatrix} K_0^{-1} [P^{-1} \begin{pmatrix} E_n & P \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} O_n & E_n \end{pmatrix}] S_{\xi\xi}^{\prime} \begin{pmatrix} E_n \\ P_* \end{pmatrix} D_*^{-1}. \quad (3.11)$$

Отже, відповідно до описаного алгоритму (3.3)-(3.11) для визначення структури та параметрів оптимального регулятора необхідно виконати наступні кроки послідовно:

- Визначити вагові коефіцієнти R та C .
- Знайти вираз для $\Gamma^* \Gamma$ та провести його факторизацію.
- Обчислити вираз для DD^* та здійснити його факторизацію.
- Розрахувати вираз для T та провести його сепарацію.

- Знайти передаточну функцію .
- За допомогою рівняння зв'язку визначити передаточну функцію .
- Використовуючи знайдені та обчислити передаточну функцію регулятора згідно з рівнянням (3.10).

Щоб визначити, чи слід продовжувати використовувати отримані результати, необхідно здійснити оцінку ефективності системи автоматичного регулювання температури передсушки макаронних виробів з використанням оптимального регулятора.

3.2 Синтез регулятора

Відповідно до структурної схеми системи автоматичного регулювання температури передсушки макаронних виробів, зображеної на рисунку 2.6, компоненти системи включають об'єкт регулювання, датчик температури, регулятор і виконавчий механізм. Після аналізу літературних джерел та технічних характеристик елементів системи, можна визначити їх передаточні функції.

$$W_{OP}(s) = \frac{k_{OP}}{T_{OP}s + 1}; \quad (3.12)$$

$$W_{DT}(s) = \frac{k_{DT}}{T_{DT}s + 1}; \quad (3.13)$$

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM}s + 1}. \quad (3.14)$$

Збурення, що впливають на об'єкт регулювання, можуть мати різноманітні джерела та природу. Проте їх загальний вплив можна узагальнити у вигляді стаціонарного випадкового процесу з нульовим

математичним очікуванням та спектральною щільністю, яка характеризується обмеженою "білою" шумовою характеристикою.

$$S_{\psi\psi}(s) = \frac{\sigma_{\psi}^2}{\pi} \left| \frac{1}{T_{\psi}s + 1} \right|^2. \quad (3.15)$$

Щодо похибки вимірювання φ_0 , ми також припустимо, що її спектральна щільність може бути представлена у формі шуму, що має "білу" характеристику:

$$S_{\varphi_0\varphi_0}(s) = \frac{\sigma_{\varphi_0}^2}{\pi}. \quad (3.16)$$

Для застосування алгоритму синтезу регулятора (3.3)-(3.11), потрібно виконати структурні перетворення системи зображеної на рисунку 2.6 до форми, аналогічної тій, що зображена на рисунку 3.1. Це включає визначення поліномів $M_0(s)$, $P_0(s)$ та $K_0(s)$, а також визначення спектральної щільності $S_{\psi\psi}(s)$ для нової структурної схеми.

Встановимо необхідні параметри у виразах (3.12) – (3.16) і здійснимо необхідні обчислення для отримання початкової інформації для синтезу регулятора.

$$\begin{aligned} k_{OP} &= 0,2; T_{OP} = 20 \text{ с}; k_{BM} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C/B}; T_{BM} = 5 \text{ с}; k_{TD} = 1; T_{TD} = 6 \text{ с}; \\ \sigma_{\psi} &= 1 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{\psi} = 0.1 \text{ с}; \sigma_{\varphi_0} = 0,5. \end{aligned}$$

$$M_0(s) = 0.04 \quad (3.17)$$

$$P_0(s) = (s + 0.05)(s + 0.2) \quad (3.18)$$

$$K_0(s) = \frac{0.1667}{(s + 0.1667)} \quad (3.19)$$

$$S_{\psi 0 \psi 0}(s) = \frac{7957.7472 (s + 0.2) (s - 0.2)}{(s + 10) (s - 10)} \quad (3.20)$$

$$S_{\varphi 0 \varphi 0}(s) = 0.079577 \quad (3.21)$$

Після цього визначимо поліноми $M(s)$ та $P(s)$ відповідно до формул (3.5) та (3.6), причому після видалення полюсів ліворуч, K_{10} визначаємо як 0.1667.

$$M(s) = 0.0067 \quad (3.22)$$

$$P(s) = (s + 0.05) (s + 0.2) (s + 0.1667) \quad (3.23)$$

Для застосування алгоритму синтезу регулятора задамо вагові коефіцієнти функціоналу якості

$$R = 1; \quad C = 1. \quad (3.24)$$

Після встановлення вихідних даних з виразів (3.20), (3.21) і (3.23) у формули (3.9), (3.10), та факторизації отриманого результату було знайдено значення матриці D :

$$D = \frac{0.28209 (s + 10.01) (s + 0.2) (s^2 + 3.206 \cdot s + 5.263)}{(s + 10)} \quad (3.25)$$

Далі за алгоритмом синтезу потрібно знайти дробово-раціональну функцію Γ шляхом факторизації правої частини виразу (3.8)

$$\Gamma = \frac{(s^2 + 0.3535s + 0.04123)}{(s + 0.05) (s + 0.2)} \quad (3.26)$$

Виконання підготовки дробово-раціональної матриці N для сепарації та її подальша сепарація були проведені відповідно до алгоритму (3.11), використовуючи дані, визначені у виразах (3.19) - (3.26). Це призвело до отримання наступного результату

$$N_0 + N_+ = \frac{5.6366}{(s + 0.05)} \quad (3.27)$$

Використання формули (3.7) з даними, поданими у виразах (3.25) - (3.27), призвело до отримання варійованої матриці передаточних функцій оптимальної системи від вектора зовнішніх збурень ψ_0 до сигналу керування u

$$F_u^\psi = \frac{19.9814(s + 10)}{(s + 10.01)(s^2 + 0.3535s + 0.04123)(s^2 + 3.206s + 5.263)} \quad (3.28)$$

Отриманий результат (3.28), разом з виразами Р і М, які були знайдені згідно з рівняннями (3.22), (3.23), дозволили знайти передаточну функцію оптимальної системи стабілізації від вектора збурень ψ_0 до вектору вихідних координат x_0 за допомогою рівняння зв'язку (3.4) у вигляді

$$F_x^\psi = \frac{(s + 0.3205)(s^2 + 3.189s + 5.24)}{(s + 0.1667)(s + 0.2)(s^2 + 0.3535s + 0.04123)(s^2 + 3.206s + 5.263)} \quad (3.29)$$

Знайдені формули F_u^ψ та F_x^ψ дозволили розрахувати передаточну функцію оптимального регулятора W . Ця передаточна функція забезпечує стійкість системи та мінімізує критерій якості (3.2), використовуючи алгоритм (3.3):

$$W = \frac{19.9814(s + 10)(s + 0.1667)(s + 0.2)}{(s + 0.3205)(s + 10.01)(s^2 + 3.189s + 5.24)} \quad (3.30)$$

Частотна характеристика регулятора зображена на рис. 3.2.

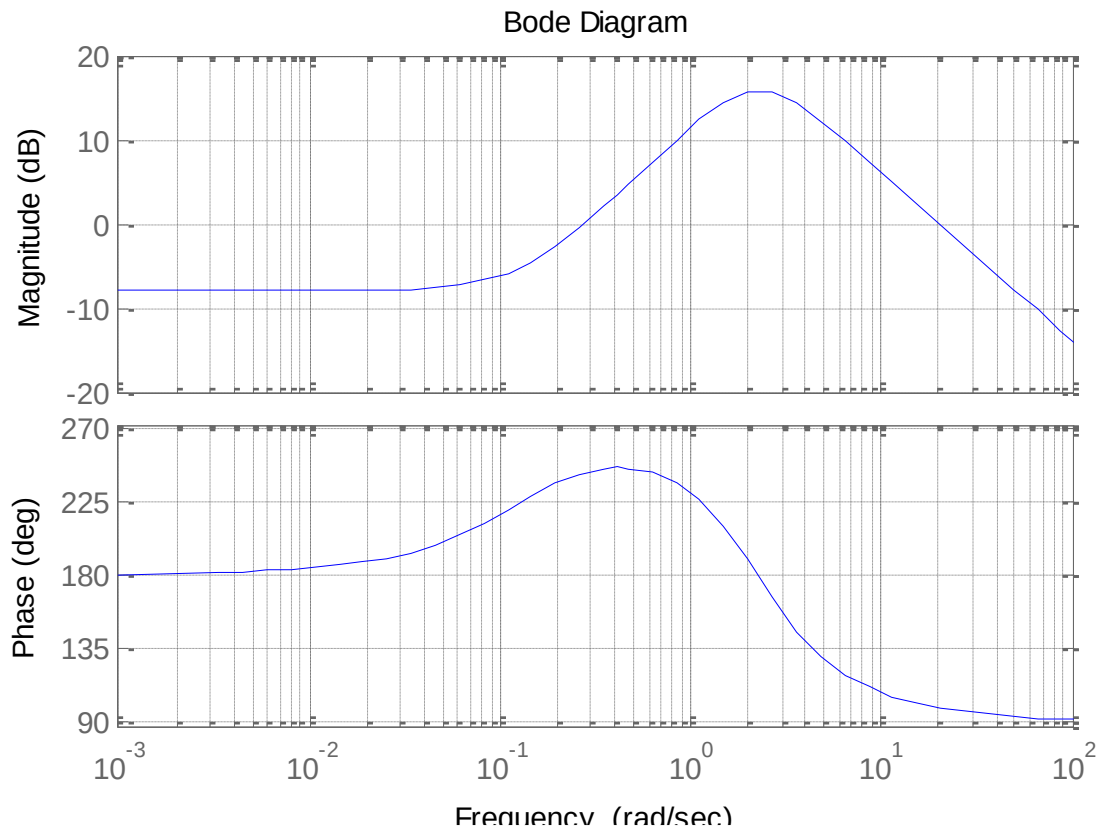


Рисунок 3.2 – Частотна характеристика оптимального регулятора

Отже, завдання синтезу оптимального регулятора для системи автоматичного регулювання температури повітря під час передсушки макаронних виробів успішно виконано.

3.3 Моделювання роботи САР температури повітря попередньої сушки макаронних виробів

Для перевірки працездатності системи автоматичного регулювання температури передсушки макаронних виробів і для оцінки якості регулювання з використанням розрахованого регулятора був застосований метод імітаційного моделювання. У середовищі MATLAB з використанням

пакету Simulink була розроблена модель системи відповідно до структурної схеми, зображеної на рисунку 2.6.

Елементи системи автоматичного регулювання були визначені за допомогою блоку "Transfer Fcn" у розділі "Continuous" бібліотеки Simulink. У цьому блоку передаточні функції елементів системи визначаються як коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника (див. рис. 3.3).

Отже, були налаштовані наступні блоки: регулятор, виконавчий механізм, об'єкт регулювання та датчик температури.

Для введення збурюючого впливу був використаний блок «Band-Limited White Noise» з розділу Sources бібліотеки Simulink (див. рис. 3.4). Цей блок генерує випадковий сигнал з нормальним розподілом амплітуд та рівномірною амплітудо-частотною характеристикою, відомий як "білий шум". У цьому блоку визначаються наступні параметри: Noise power - потужність збурюючого впливу відносно смуги частот сигналу; Sample time - інтервал між вимірами сигналу шуму, тобто час дискретизації; Seed - початкове значення генератора випадкових чисел.

Таким чином, блоком налаштовується випадковий сигнал з нормальним розподілом, і за допомогою параметру Sample time можна встановити обмеження на смугу частот, що відповідає виразу (3.15).

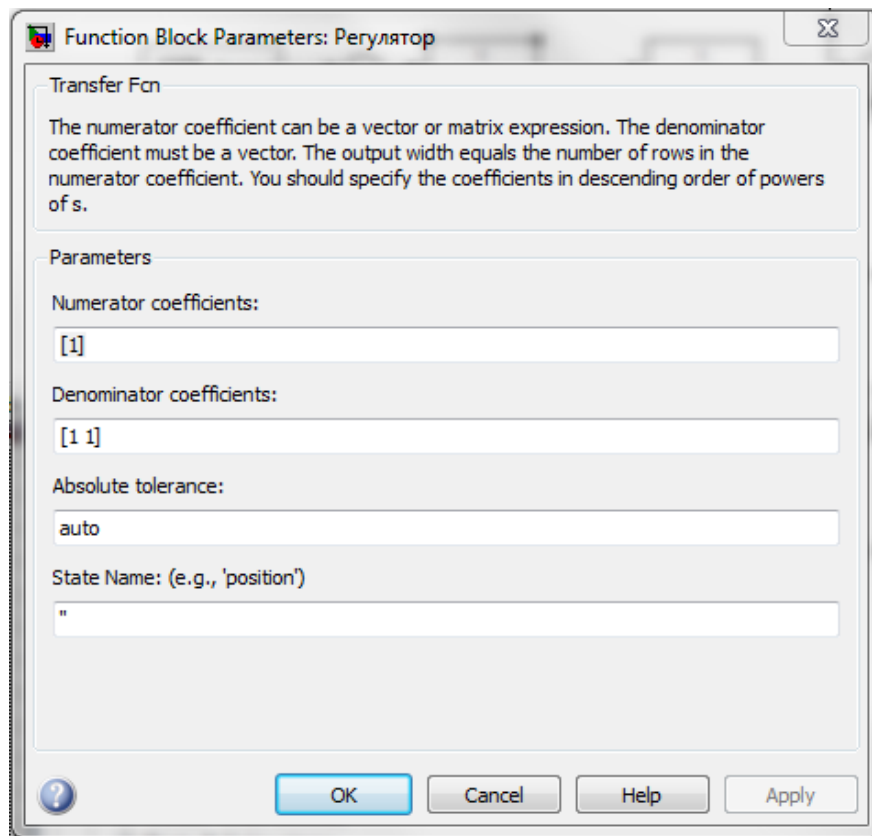


Рисунок 3.3 – Параметри блоку «Transfer Fcn»

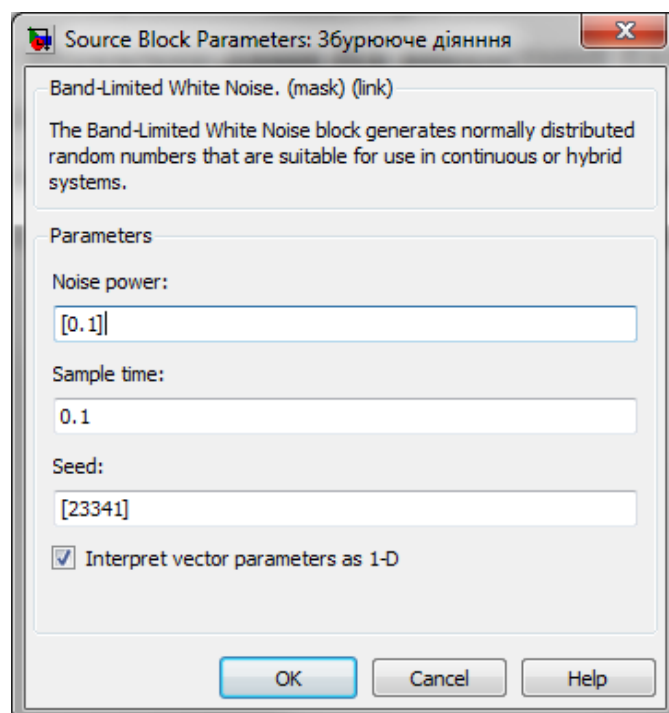


Рисунок 3.4 – Параметри блоку «Band-Limited White Noise»

Для моніторингу поточного значення температури та збурюючого впливу був використаний блок "Scope" з розділу "Sinks" бібліотеки Simulink (див. рис. 3.5).

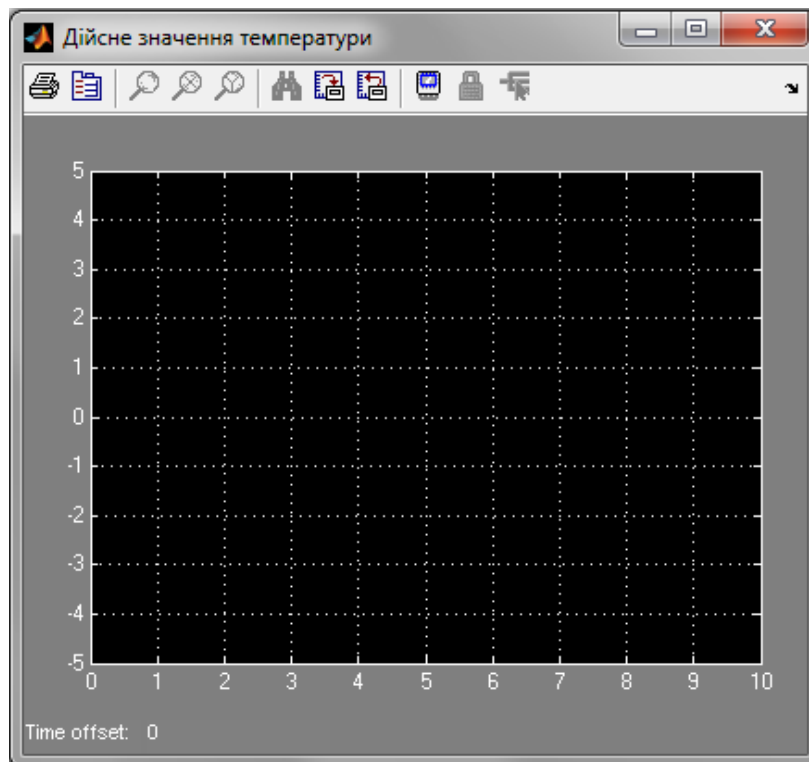


Рисунок 3.5 – Блок «Scope»

Під час моделювання була створена модель системи автоматичного регулювання температури повітря передсушки макаронних виробів (див. рис. 3.6).

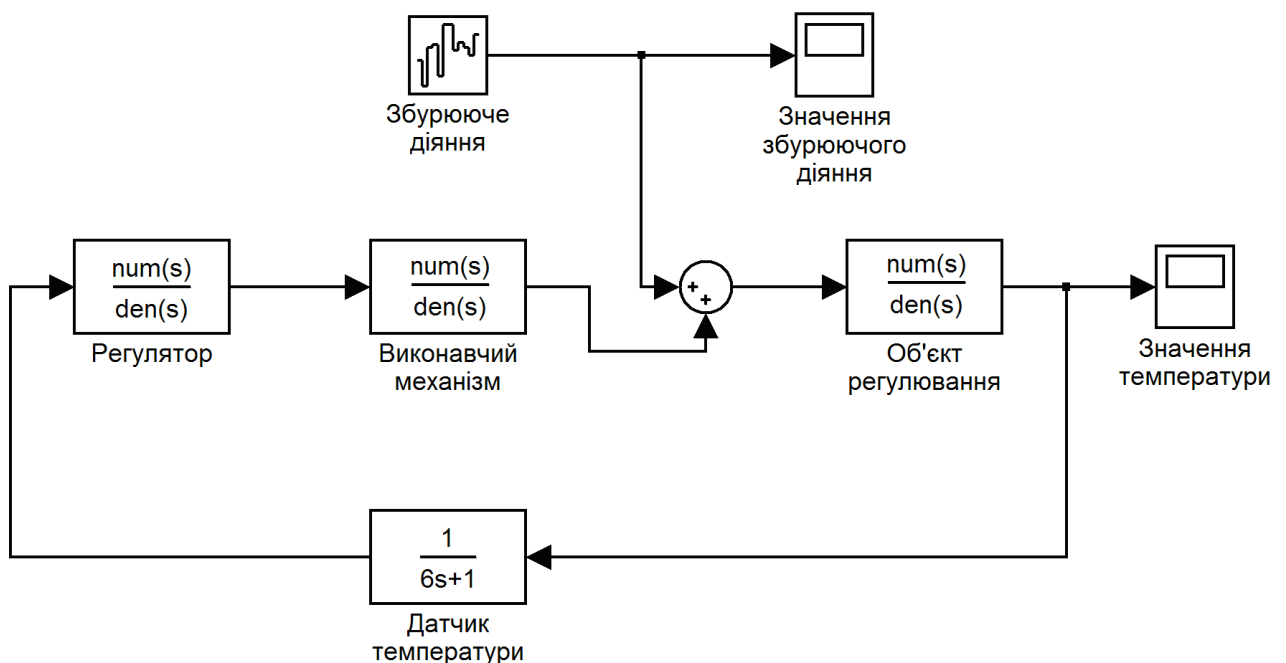


Рисунок 3.6 – Модель САР температури повітря попередньої сушки

Моделювання тривало 100 секунд. У результаті були отримані графіки, що відображають зміну збурюючого впливу (див. рис. 3.7) та значення

відхилення температури повітря передсушки від заданого значення (див. рис. 3.8).

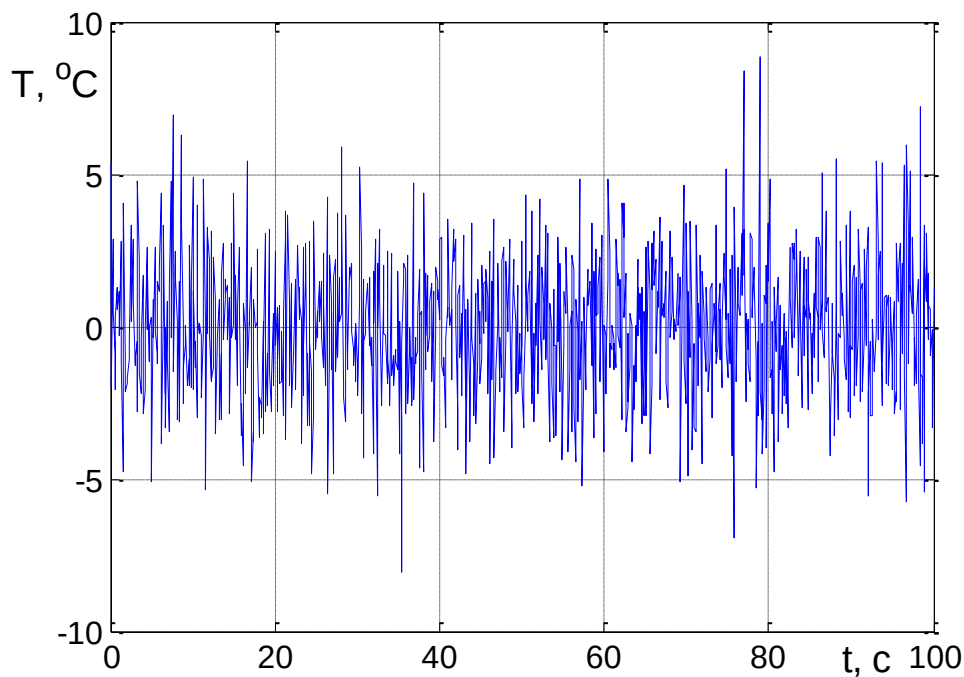


Рисунок 3.7 – Графік зміни збурюючого діяння

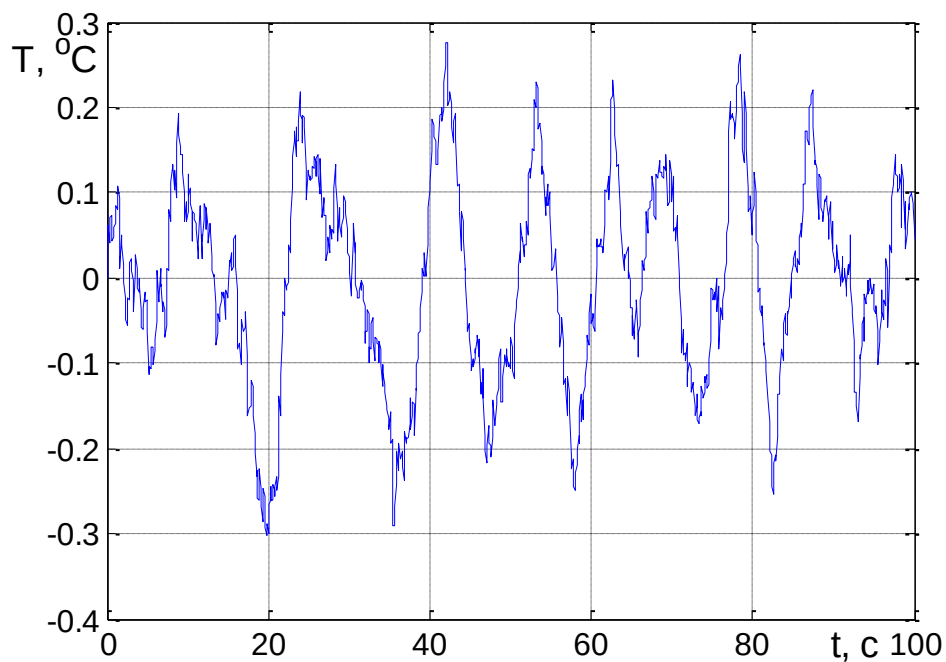


Рисунок 3.8 – Графік відхилення температури повітря попередньої сушки від заданого значення

За даними графіків, значення температури повітря передсушки макаронних виробів залишається в межах $\pm 0,3$ °С, тоді як збурюючий вплив змінювався в широкому діапазоні більше ніж ± 5 °С. Аналіз статистичних даних на основі цих графіків показав наступне:

- Щодо збурюючого впливу

Середнє значення становить 0,02 °С;

середньоквадратичне відхилення 2,26 °С;

- Щодо температури повітря

Середнє значення складає 0,002 °С;

середньоквадратичне відхилення 0,12 °С.

Зауважили, що впроваджена система автоматичного регулювання температури передсушки макаронних виробів привела до зменшення середньоквадратичного відхилення в 18 разів.

4 Практична реалізації системи автоматичного регулювання

4.1 Визначення періоду дискретизації

Перетворення неперервних сигналів на дискретні відбувається завдяки присутності у системі дискретного елемента, що генерує послідовність імпульсів на виході. Таким елементом може бути ключ К', який відкривається та закривається через кожен період квантування T .

Вибір оптимального періоду квантування T є однією з ключових проблем при реалізації систем цифрового керування через його пряму залежність від ефективного використання машинного часу. Зменшення T призводить до підвищення точності керування та завантаження мікроконтролера, але це може витрачати машинний час неефективно. З іншого боку, збільшення T погіршує якість керування системою. Таким чином, виникає потреба знаходження компромісного рішення для вирішення цих протиріччя. Вибір оптимального T зазвичай базується на спектральних характеристиках неперервної функції за теоремою Котельникова.

Теорема Котельникова стверджує, що якщо функція часу $\Theta(t)$, не містить гармонічних складових з частотами, які перевищують $\omega_{\max}$ то вона повністю визначається своїми значеннями в моменти часу nT , які відстають один від одного на період T

$$T = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (4.1)$$

Отже, частота квантування повинна бути вибрана так, щоб вона відповідала умови $\omega \geq \omega_{\max}$. У цьому випадку дискретна решітчаста функція точно відобразить неперервну функцію

$$\Theta(t) = \Theta \left[n \cdot \frac{\pi}{\omega_{\max}} \right] \quad (4.2)$$

таким чином, при такому підборі частоти квантування не відбудеться втрати інформації під час процесу квантування.

Максимальну частоту $\omega_{\max}$ у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$ за амплітудно-частотною характеристикою замкненого цифрового керування можна визначити за допомогою критерію Джурі. Якщо на вхід регулятора подається гармонічний одиничний сигнал $\alpha(t) = \sin \omega t$, то вихідний сигнал замкненого контуру можна представити як функцію

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \quad (4.3)$$

Це дозволяє визначити частоту $\omega_{\max}$ при якій $|\beta(j\omega)|$ матиме невелике значення, оскільки замкнена система пригладжує високочастотні компоненти сигналу. Значення Θ_{om} визначає точність, яку необхідно забезпечити на виході системи.

Використовуючи вихідні дані, визначаємо найбільш підходящий період квантування сигналів у цифровій системі.

Для цього обчислимо добуток передаточних функцій компонентів системи автоматичного регулювання, які розташовані в гілці від програмного сигналу до вихідного сигналу

$$W_{np} = W_p W_{BM} W_{OP} = \frac{0.79(s + 10)(s + 0.1667)}{(s + 0.3205)(s + 10.01)(s^2 + 3.189s + 5.24)(s + 0.05)} \quad (4.4)$$

У гілці зворотнього зв'язку розташований датчик температури, який має свою передаточну функцію

$$W_{33} = W_{DT} = \frac{0.1667}{(s + 0.1667)} \quad (4.5)$$

У цьому випадку, в усталеному режимі, необхідно досягнути певної точності керування об'єктом $\Theta_{om} = 0.1$

Функція, яка визначає частотну передачу замкненої системи, виражається наступним чином:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_{np}(j\omega) \cdot W_{33}(j\omega)}{1 + W_{np}(j\omega) \cdot W_{33}(j\omega)} = \Theta \quad (4.6)$$

Після використання виразів (4.4, 4.5) у формулі (4.6), ми отримаємо:

$$\frac{0.13321(j\omega + 10)}{(j\omega + 10.01)(-\omega^2 + 0.3535j\omega + 0.04123)(-\omega^2 + 3.206j\omega + 5.263)} = 0.1 \quad (4.7)$$

Подальше розв'язання цього рівняння дозволить знайти частоту $\omega_{\max} = 1.91$

Ідеальний інтервал квантування сигналів

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{\pi}{1.91} = 1.65c \quad (4.8)$$

Приймаємо $T < T_{роз}$

$T = 0.1 c$

Ми вибираємо цей інтервал дискретизації, оскільки наша основна мета - забезпечити максимально можливу точність системи.

4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для реалізації мікропроцесорної системи регулювання потрібно провести Z-перетворення передаткової функції регулятора, яку було отримано в результаті синтезу у розділі 3.2.

$$W = \frac{19.9814(s + 10)(s + 0.2)(s + 0.1667)}{(s + 0.3205)(s + 10.01)(s^2 + 3.189s + 5.24)} \quad (4.9)$$

Розіб'ємо передаткову функцію регулятора на прості дроби:

$$W_P(s) = \frac{0.03722}{s + 10.01} + \frac{0.08564}{s + 0.3205} + \frac{19.86s + 0.6556}{s^2 + 3.189s + 5.24}. \quad (4.10)$$

Тепер ми проведемо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, при часі дискретизації $T_0 = 0.1$ с.

$$W_P(z) = \frac{0.0024}{z - 0.3674} + \frac{0.0084}{z - 0.9685} + \frac{1.688z - 1.683}{z^2 - 1.682z + 0.7269}. \quad (4.11)$$

$$W_P(z) = \frac{0.0024 \cdot z^{-1}}{1 - 0.3674 \cdot z^{-1}} + \frac{0.0084 \cdot z^{-1}}{1 - 0.9685 \cdot z^{-1}} + \frac{1.688 \cdot z^{-1} - 1.683 \cdot z^{-2}}{1 - 1.682 \cdot z^{-1} + 0.7269 \cdot z^{-2}} \quad (4.12)$$

На основі отриманої дискретної передаткової функції регулятора формуємо різницеві рівняння:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n] + u_3[n];$$

$$u_1[n] = 0.0024 x[n-1] + 0.3674 u_1[n-1];$$

$$u_2[n] = 0.0084 x[n-1] + 0.9685 u_2[n-1];$$

$$u_3[n] = 1.688 x[n-1] - 1.683 x[n-2] + 1.682 u_3[n-1] - 0.7269 u_3[n-2].$$

Структуру програмної реалізації показано на рисунку 4.1.

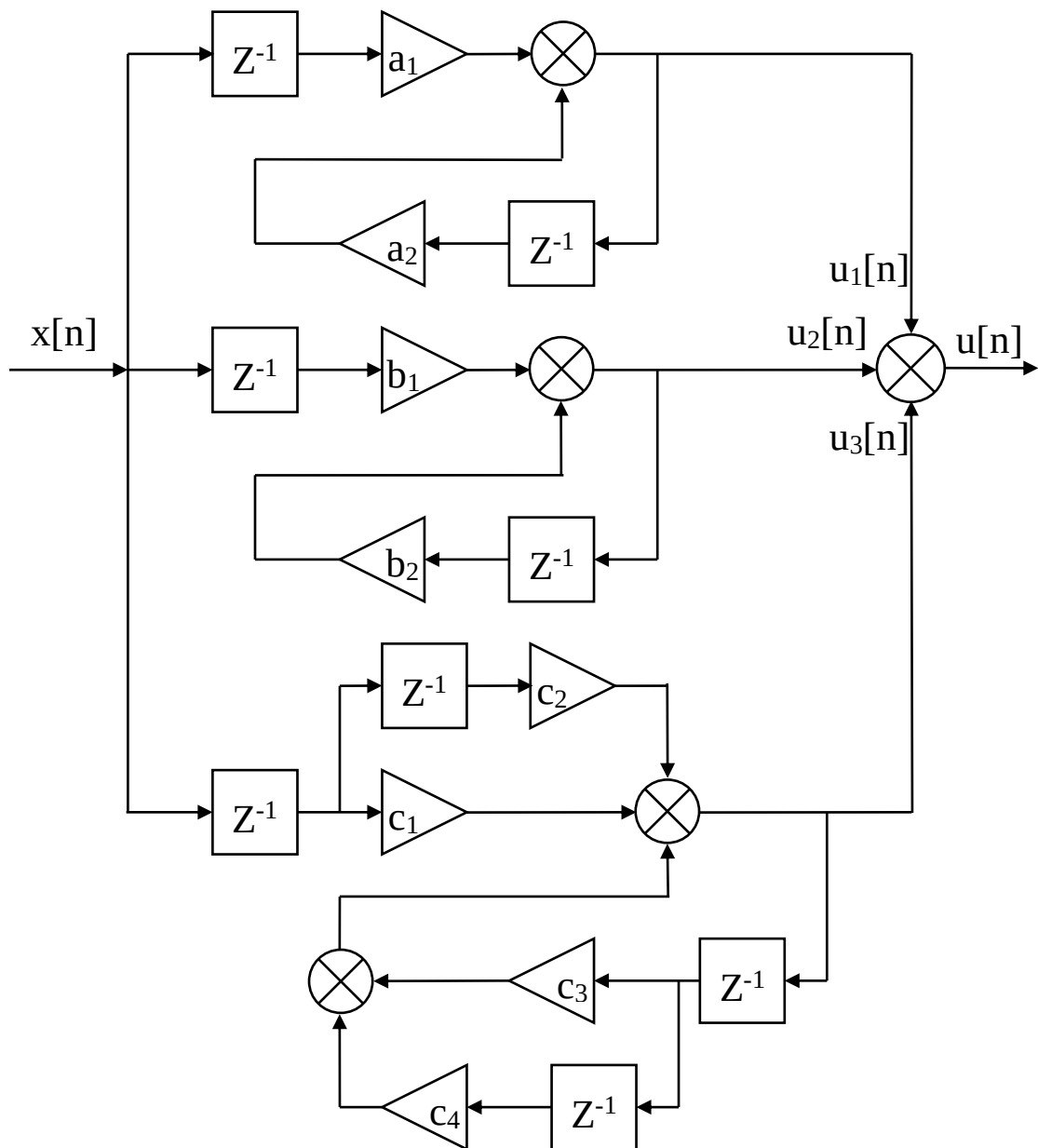


Рисунок 4.1 – Схема алгоритму програмної реалізації регулятора

Де коефіцієнти рівні:

$$a_1 = 0.0024; a_2 = 0.3674; b_1 = 0.0084; b_2 = 0.9685;$$

$$c_1 = 1.688; c_2 = 1.683; c_3 = 1.682; c_4 = -0.7269.$$

На основі створеної схеми програмної реалізації, потрібно створити регулятор, використовуючи мікропроцесор.

4.3 Розробка структурної схеми регулятора

Регулятор складається з таких елементів:

- мікроЕОМ з пристроями введення-виведення ПВВ1, ПВВ2;
- пристроєм зв'язку між мікропроцесором та неперервною частиною системи.

Схема мікропроцесора, яка має дві або три загальні магістралі, є досить поширеною. Під дією пристрою управління модулі можуть по черзі підключатися до цих магістралей. Ця структура має обмежену кількість зовнішніх контактів, але обмін інформацією між модулями повинен відбуватися у визначеній послідовності.

При використанні спеціалізованих інтегральних схем (ІС) для різних модулів мікропроцесорної системи її структурна схема може бути представлена як сукупність функціональних блоків, які з'єднані між собою відповідно до вимог інтерфейсів. У вказаній схемі обробку інформації виконує мікропроцесор (МП), що синхронізується тактовими імпульсами пристрою синхронізації (ГТІ). Обмін інформацією між мікропроцесором та іншими блоками здійснюється за допомогою трьох шин: адресної (ША), даних (ШД) та управління (ШУ).

Шина адреси використовується для передачі коду адреси, за яким виконується доступ до пристроїв пам'яті, введення-виведення та інших зовнішніх пристроїв, які підключені до мікропроцесора. Інформація, що обробляється, та результати обчислень передаються через шину даних (ШД). Шина управління (ШУ) передає сигнали управління до всіх блоків мікроЕОМ, налаштовуючи їх у потрібний режим для виконання заданих команд.

Використання трьох шин у мікроЕОМ забезпечує високу швидкодію та спрощує процес обчислення. Системний контролер (СК) використовується

для фіксації стану мікропроцесора, обробки системних сигналів управління, буферизації шини даних мікропроцесора та керування передачею даних.

Для підвищення навантажувальної здатності адресних виводів АО...А15 мікропроцесора використовується буферний шинний формувач (БШФ). Селектор адреси (СА) застосовується для забезпечення адресації до відповідних пристроїв.

Для обміну даними між мікропроцесором та зовнішніми пристроями використовуються пристрої вводу-виводу (ПВВ1, ПВВ2) в мікроЕОМ. У випадку з цифровим регулятором такими пристроями можуть бути цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та аналогово-цифровий перетворювач (АЦП).

Для зберігання керуючої програми мікропроцесора використовується постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), який дозволяє лише зчитувати інформацію, збережену в ньому.

У системах використовується оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) для тимчасового зберігання інформації під час виконання програми. Він забезпечує можливість як запису, так і зчитування інформації.

Таймер (Т) - це пристрій, який створює визначені за допомогою програми часові інтервали між імпульсами. Довжина і форма цих імпульсів можуть бути налаштовані програмно. Режим роботи таймера, які контролюються програмно, дозволяють розділяти вхідну частоту, генерувати одноразові сигнали стробування, підраховувати кількість зовнішніх імпульсів та вимірювати тривалість часових інтервалів.

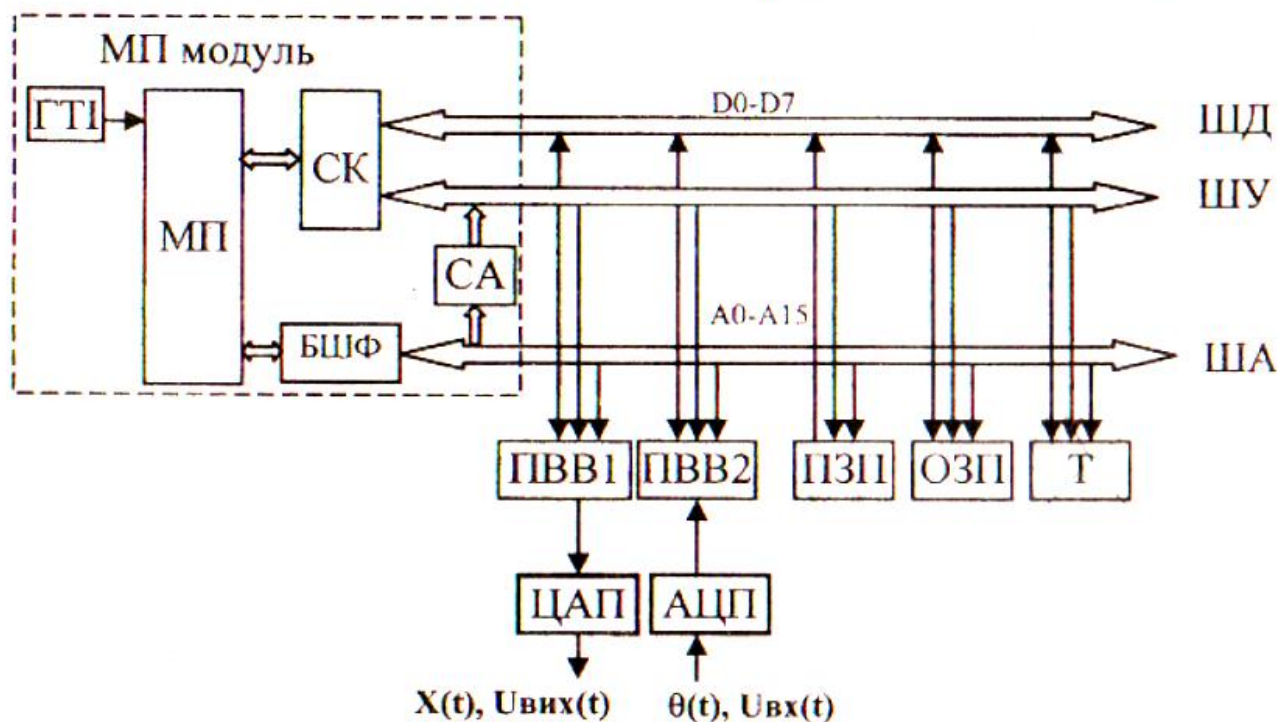


Рисунок 4.2 - Структурна схема цифрового мікропроцесорного регулятора:

МП - мікропроцесор:

ГТІ - генератор тактових імпульсів;

СК - системний контролер;

БШФ - буферний шинний формувач;

СА - селектор адреси:

ПВВ1 - пристрій вводу-виводу 1;

ПВВ2 - пристрій вводу-виводу 2;

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач;

АЦП - аналогово-цифровий перетворювач;

ПЗП- постійний запам'ятовуючий пристрій;

ОЗП — оперативний запам'ятовуючий пристрій;

Т- таймер.

4.4 Розробка електричної принципової схеми

Синхронізація роботи мікропроцесорного модулю з генератором тактових імпульсів ґрунтується на використанні мікропроцесора МП. При виборі мікропроцесора основним критерієм є його швидкодія. У випадку, коли вимоги до системи не настільки високі, можна обрати мікропроцесор з середньою швидкодією, наприклад, із мікропроцесорного комплексу МПК

серії КР580. Цей комплект є популярним у сфері створення обчислювальних пристроїв, і відомий своєю ефективністю. Його базу становить однокристальний МП КР580ВМ80. Серія КР580, крім мікропроцесора, включає велику кількість Великої Інтегральної Схеми (ВІС), які дозволяють легко підключати різноманітні пристрої до мікропроцесора. Це дозволяє ефективно організовувати швидкий обмін інформацією між різними модулями мікро ЕОМ. Мікро ЕОМ, заснована на цьому комплекті, може працювати з тактовою частотою до 2,5 МГц. Схеми програмуються за допомогою фіксованого набору команд мікропроцесора ВІС КР580ВМ80. Сам мікропроцесор КР580ВМ80 є однокристальним 8-розрядним пристроєм із двома магістралями: однонапрямленою 16-розрядною адресною магістраллю і двонапрямленою 8-розрядною магістраллю даних, а також 12 сигналами керування (6 вхідних і 6 вихідних). Мікропроцесор застосовується як головний процесор у пристроях для обробки даних і управління. Канал адреси дозволяє пряму адресацію зовнішньої пам'яті обсягом до 65535 байт, підключення 256 пристроїв введення і 256 пристроїв виведення. Мікропроцесорна ВІС призначена для виконання логічних і арифметичних операцій з 8-розрядними числами в двійковій і десятковій системах числення, а також операцій з подвійною розрядністю (із 1-бітними числами). Однак сам мікропроцесор не може виконати всі необхідні функції самостійно. Він виконує команди за машинними циклами, які, у свою чергу, виконуються за машинними тактами. Таким чином, потрібен пристрій, який генерує ці такти з певною частотою. Цей пристрій - генератор тактових імпульсів (ГТІ). У МПК серії КР580 роль синхронізації роботи мікропроцесора виконує Мікросхема КР580ГФ24. Початковий етап розробки електричної принципової схеми полягає в встановленні з'єднання між мікропроцесором КР580ВМ80 та ГТІ КР580ГФ24. Для синхронізації мікропроцесора генератор КР580ГФ24 генерує імпульси на виводах Р1, з тривалістю тактового імпульсу рівною двом періодам опорної частоти, і Р2, з тривалістю імпульсу рівною п'ятьом

періодам опорної частоти, з амплітудою 12 В. Частота імпульсів визначається частотою кварцового резонатора, який підключений до виводів XTAL1 і XTAL2 мікросхеми КР580ГФ24. Резонансна частота цього резонатора повинна бути в 9 разів більшою від вибраної тактової частоти мікропроцесора. На вході мікросхеми КР580ГФ24, використовуючи зовнішній RC-ланцюжок з елементів $R=100\text{ кОм}$, $R_2=1\text{кОм}$, $C_1=10\text{мкФ}$ і VD1, реалізується схема установки мікроЕОМ в початковий стан. При вмиканні перемикача SA1, ємність C1 замикатиметься на землю, створюючи стрибок напруги на вході RESIN. Це, в свою чергу, формує вихідний сигнал RESET. Сигнал RESET використовується для встановлення у вихідний стан мікропроцесора та інших мікросхем мікропроцесорного регулятора. Крім того, генератор формує:

- Серія тактових імпульсів P2 (TTL) має логічний рівень напруги, характерний для TTL-логіки, і їх частоту можна використовувати як опорну для живлення каналів таймера.

- Сигнал STSTB активується, якщо на вході SINC з мікропроцесора надходить високий рівень напруги. Це відбувається на початку кожного машинного циклу. Сигнал STSTB використовується для передачі інформації про стан мікропроцесора в системний контролер для формування сигналів управління.

4.5 Формування шин мікропроцесорної системи

Для забезпечення комунікації між мікропроцесором (КР580ВМ80) та шинами мікроЕОМ використовуються шинні формувачі (КР580ВА86) та системний контролер (КР580ВК28). Ці мікросхеми безпосередньо спілкуються з мікропроцесором і розширюють його можливості. Підключення 16-розрядного каналу адреси мікропроцесора до шин мікроЕОМ здійснюється через шинні формувачі КР580ВА86(87). Ці

формувачі є двонаправленими 8-розрядними пристроями, які мають велику навантажувальну здатність (здатність до струму навантаження до 32 мА). Відмінність між мікросхемами KP580BA87 та KP580BA86 полягає у тому, що двонаправлена передача відбувається з інверсією у KP580BA87. Кожна з мікросхем KP580BA86(87) має двонаправлений канал А, що підключається до мікропроцесора, і двонаправлений канал В, який підключається до магістральної шини.

Передача даних відбувається за умови, що сигнал $CS=0$ в напрямку $A \rightarrow B$ ($T=1$), та $A \leftarrow B$ ($T=0$). При $CS=1$ всі виходи каналів А та В відключаються і переходять в високоомний стан. Системний контролер та шинний формувач KP580BK28 складаються з двонаправленої буферної схеми даних, регістра стану та дешифратора сигналів управління. Восьмирозрядна буферна схема даних отримує дані з каналу даних мікропроцесора через виводи D0-D7 та передає інформацію стану в регістр стану. Під час запису, коли надходить сигнал WR від МП через виводи DB0...DB7, дані видаються на системний канал даних. Під час читання, коли сигнал DBM надходить від МП, дані приймаються з системного каналу через виводи DB0...DB7 і передаються через виводи D0...D7 на канал даних МП. Регістр стану фіксує інформацію про стан мікропроцесора в кожному такті T1 за входнім сигналом STSTB, що надходить від ГТІ

У кожному машинному циклі мікропроцесора формується один із сигналів управління: під час читання з пам'яті (наприклад, ОЗП або ПЗП) - сигнал MEMR, при записі в пам'ять - сигнал MEMW, при читанні з портів введення/виведення - сигнал I/OR, при записі в порти введення/виведення - сигнал I/OW, при підтвердженні запиту на переривання - сигнал INTA. Передача інформації через двонаправлену шину можлива, якщо системна шина керування $BUSEN=0$, а напрямок передачі визначається сигналом DBIN та WR.

При значенні $DBIN = 1$ та $WR = 1$ передача $D \leftarrow DB$, а при $DBIN = 0$, $WR = 0$ передача $D \rightarrow DB$. При $BUSEN = 1$ виводи DB системного контролера переходять у високоомічний стан.

4.6 Проектування селектору адреси

Мікросхеми пам'яті мають два основних типи: ПЗП (або ROM), які дозволяють лише зчитувати інформацію, та ОЗП (або RAM), що дозволяють виконувати операції зчитування та записування. Для адресації 1024 комірок пам'яті використовуються 10 ліній адреси ($2^{10} = 1024$), а 8 ліній даних показують, що в кожній комірці може бути збережено 8 бітів інформації.

Можна описати організацію цієї мікросхеми пам'яті як 1024x8, що означає, що вона має 1024 рядки і кожен рядок містить по 8 бітів інформації. Інформація зчитується з мікросхеми, коли сигнал CS (Chip Select) має значення "0".

Розподіл контактів для мікросхем ОЗП аналогічний ПЗП, але вони мають додатковий сигнал R/WR для зчитування/запису на шині управління мікропроцесора, який визначає напрямок передачі байту. Мікросхеми ПЗП та ОЗП під'єднуються до шини даних і необхідної кількості молодших ліній адреси. Дешифратор адреси 2:4 генерує сигнали вибору кристала, що дозволяє одночасно вибирати лише одну мікросхему. У цій схемі пам'яті адреси формуються так: сигнал на лінії A15 ініціює роботу дешифратора, а сигнали на лініях A12 та A11 дешифруються для вибору мікросхеми.

Символ "x" вказує на те, що сигнал не активний і має значення нуля.

Якщо в схемі пам'яті використовується більше ніж чотири мікросхеми, замість дешифратора 2:4 потрібно використовувати дешифратор 3:8. На входи цього дешифратора підключаються старші лінії шини адреси, які не використовуються.

Таблиця 4.1 - Таблиця істинності дешифратора адреси 2:4

Входи		Виходи			
A12	A11	CS4	CS3	CS2	CS1
0	0	1	1	1	0
0	1	1	1	0	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1

4.7 Пристрій сполучення МП з неперервною частиною системи керування

Зовнішніми пристроями, які взаємодіють з мікропроцесором, є цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі (ЦАП та АЦП). ЦАП перетворює цифрові сигнали в аналогові значення, тоді як АЦП виконує зворотний процес, перетворюючи аналогові сигнали на цифрові коди. У вітчизняній промисловості вже розроблено різноманітні типи ЦАП та АЦП. Важливою вимогою до них є можливість легкої інтеграції з мікропроцесором, що включає сумісність логічних рівнів сигналів, збіг формату даних і програмну сумісність. Серія перетворювачів KP572 успішно використовується для зв'язку з мікропроцесорами серії KP580. Наявність в цій серії 12-розрядних АЦП і ЦАП дозволяє розширювати розрядність вхідних і вихідних даних з мінімальними модифікаціями пристрою зв'язку, якщо це необхідно.

Цей пристрій здійснює обмін даними між мікропроцесором і вхідними та вихідними аналогово-цифровими перетворювачами без переривання програми. Його характеристики такі: діапазон вхідних аналогових сигналів становить 0 до 4 В, діапазон вихідних аналогових сигналів — ± 12 В; Час перетворення (зчитування) інформації у вхідний аналого-цифровий перетворювач дорівнює 120 мкс, а час встановлення (видачі) інформації вихідного аналого-цифрового перетворювача — 15 мкс.

3	Ucc1	^/#	Ucc2	24
27	зап		цикл	22
25	Tu		Q	26
				15
				14
				13
				12
			МЗР	11
				10
				9
				8
23	К			7
17	посл.			6
1	вх		СЗР	5
28	цикл			4
29	строб		Rк	31
16	МР		R1,2	32
2	СР		Rвх	45
40	R1		I1	46
41	R2		I2	47
42	Uоп		AGND	48
43	Rвх1			
44	Rвх2			
30	DGND			

Рисунок 4.2 - Призначення виводів мікросхеми K572ПВ1:

1 – послідовний вхід (посл.в); 2 - вхід управління (СР); 3 - напруга джерела живлення (Ucc1); 4...15 - цифровий вхід-вихід; 16- вхід управління (МР); 17 - вхід управління режимом (р.); 22 - вихід "цикл"; 23 - вхід порівняння (К); 24 - напруга джерела живлення (Ucc2); 25 - вхід тактових імпульсів (Tu); 26 - вихід "кінець перетворення" (Q); 27 - вхід "запуск" (зап); 28 - вхід "цикл" (цикл); 29 - вхід стро́бування ЦАП (строб); 30 - цифрова земля (DGND); 31 – кінцевий вивід R-2R структури (Rк); 32 – загальний вихід R/2,R/4 (R1,2); 40 - вивід резистора R/2 (R1); 41 - вивід резистора R/4 (R2); 42 - опорна напруга (Uоп); 43,44 – аналогові входи (Rвх 1-Rвх2); 45 - загальний вихід резистора аналогових входів 1,2 (Rвх); 46,47- аналогові виходи 1,2 (I1,I2); 48 – аналогова земля (AGND).

Головними компонентами цього пристрою є 12-розрядні аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі, що реалізовані за допомогою мікросхем К572ПВ1 та К594ПА2 відповідно.

Мікросхема є 12-розрядним біполярним цифро-аналоговим перетворювачем. Вона здійснює перетворення вхідного паралельного двійкового цифрового коду у вихідний струм, який пропорційний значенню цього коду. Час встановлення вихідного сигналу цієї мікросхеми становить 3.5 мкс.

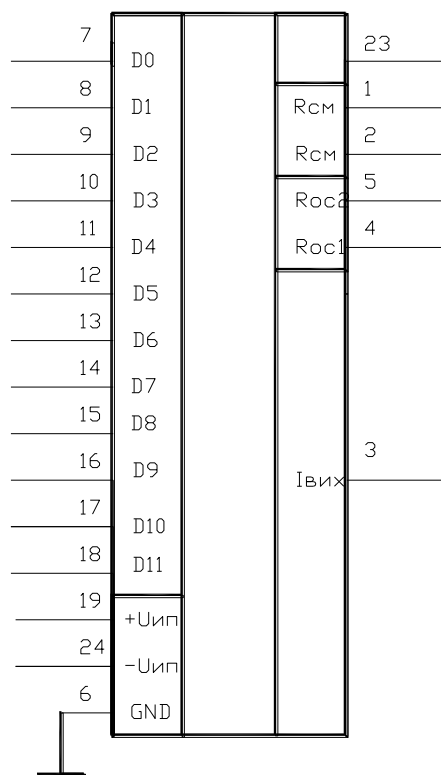


Рисунок 4.3 - Призначення виводів мікросхеми К594ПА2:

1,2 – резистор зміщення ($R_{см}$); 3 - вихід струму (I); 4,5 - резистори зворотного зв'язку ($R_{ос1}$ та $R_{ос2}$); 6 - загальний; 7..18 - цифрові входи (D0 - D11); 19,20 - плюс джерела живлення ($+U_{ип}$); 21 - інвертуючий вхід ОП; 22 - неінвертуючий вхід ОП; 23 - опорна напруга ($U_{оп}$); 24 - мінус джерела живлення ($-U_{ип}$).

Ця мікросхема може бути використана для перетворення цифрового коду, який надходить від КМОН цифрових мікросхем.

Висновки

1. У дослідженні описана технологія виготовлення макаронних виробів, включаючи огляд кроків технологічного процесу.
2. Проведений аналіз системи автоматизованого управління технологічним процесом виробництва макаронних виробів, визначено структуру системи та її основні складові.
3. Розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температури повітря для попередньої сушки макаронних виробів, проаналізовані її елементи та визначені завдання автоматизації.
4. Проведений аналіз методів синтезу оптимального регулятора, і на основі обраного методу виконано синтез регулятора для системи автоматичного регулювання температури повітря під час попередньої сушки макаронних виробів.
5. Застосування системи автоматичного регулювання температури під час попередньої сушки макаронних виробів, визначено за допомогою моделювання, зменшило вплив збурень в 18 разів.
6. Розроблено структурну та принципову схеми оптимального цифрового регулятора, а також алгоритм програмної реалізації регулятора.

Список літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
3. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
4. Astrom K.J. Control System Design. Lecture notes for ME 155A [Текст] / Astrom K.J. - Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Sweden, 2002. – 168 p.
5. Гостев В. Й., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: "Радіоаматор", 1998.
6. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
7. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
8. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
9. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.

10. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.

11. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.

12. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.

13. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.