

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Дідик О.К.

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему

" Автоматизована система керування температурою цукеркової маси "

" Automated temperature control system for candy mass "

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-22мб

ОПІ «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»

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

\_\_\_\_\_ Анна ДЕМИДОВИЧ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

Керівник роботи

професор, д-р техн.наук

\_\_\_\_\_ Анатолій Мацуй

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

Рецензент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
1 Призначення та область застосування системи керування.....	4
1.1. Загальна характеристика виробництва цукерок.....	4
1.2. Аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення пралінових цукерок.....	8
1.3. Вимоги до систем автоматизації керування виготовленням пралінових цукерок.....	18
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....	20
2.1 Сучасний стан автоматизованих систем керування процесами виготовлення цукерок.....	20
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій.....	29
3.1 Структурна схема системи виготовлення кондитерських виробів.....	29
3.2 Електрична принципова схема системи виготовлення цукерок.....	33
3.3 Пристрій керування системою.....	40
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи.....	43
4.1 Визначення динамічних властивостей елементів системи.....	43
4.2 Розрахунок коефіцієнтів передаточної функції регулятора.....	49
4.3 Дослідження якості синтезованої системи.....	51
Висновки.....	55
Література.....	56

## ВСТУП

Кондитерська промисловість сьогодні входить до числа важливих і динамічно зростаючих напрямів харчової галузі, які суттєво впливають на економіку України. Це пов'язано з тим, що солодощі мають високу енергетичну цінність і стабільний попит серед споживачів. Водночас, активна конкуренція на цьому ринку вимагає ретельного підходу до оцінювання якості продукції та обґрунтованого формування асортименту.

На сучасному кондитерському виробництві паралельно можуть зберігатися, підготовлюватися до обробки та виготовлятися понад сотню видів солодкої продукції. Це відбувається на кількох технологічних лініях, що відрізняються конструкцією та функціональним призначенням. Підвищити ефективність роботи підприємства можливо шляхом збільшення продуктивності основних процесів, покращення якості готової продукції та зменшення обсягів незавершеного виробництва. Досягти цього можна завдяки впровадженню сучасних автоматизованих систем керування, які дозволяють синхронізувати випуск виробів і знизити потребу в резервних запасах. Такий підхід сприяє переходу до більш високого рівня організації та оптимізації виробничого середовища.

Рівень конкурентоспроможності кондитерських виробів значною мірою визначається ступенем впровадження автоматизації в технологічні процеси. При цьому важливо зберігати традиційні підходи та враховувати багаторічний досвід майстрів-кондитерів, які створюють рецептури. Сучасна система автоматичного управління повинна базуватись на адаптивних алгоритмах із використанням інтелектуальних компонентів. Таке управління може бути реалізоване у вигляді експертної системи, що спирається на базу знань та професійні оцінки фахівців.

Розробці автоматизованих систем управління в кондитерському виробництві присвячено чимало наукових досліджень та публікацій. Проте в більшості з них недостатньо уваги приділено інтелектуалізації керуючих процесів і глибокому аналізу технологічних операцій. Також слабо висвітлено

питання побудови гнучких зв'язків між одночасними виробничими етапами в межах єдиної системи управління виготовленням продукції, яка б враховувала структуровані знання фахівців галузі.

Автоматизація виробничих процесів обумовлена необхідністю оптимізації управління ними, що сприяє досягненню високих економічних і технічних результатів. Це дозволяє зменшити витрати ресурсів, таких як сировина, паливо та електроенергія, і мінімізувати втрати кінцевої продукції. Сучасні автоматизовані та автоматичні системи керування різних рівнів не лише стабілізують окремі параметри технологічного процесу, а й забезпечують гнучке та ефективне регулювання режимів роботи як окремих установок, так і всього виробничого комплексу, адаптуючись до змін умов у реальному часі.

У процесі виготовлення цукерок використовуються цукеркові маси, що мають складну, структуровану й високодисперсну природу. Через наявність численних компонентів такі системи вимагають ретельно продуманих та різноманітних підходів у технології виробництва. Технічна організація цих процесів варіюється – від повністю автоматизованих ліній (наприклад, для виготовлення пралінових виробів) до переважно ручної праці, як у випадку з фруктами або ягодами в глазури. Актуальним викликом у галузі є зростання ефективності виробництва, що може бути досягнуто шляхом модернізації технологій, впровадження сучасного обладнання та вдосконалення вже наявних систем. Умови сьогодення диктують потребу у максимально ефективному використанні ресурсів, коли оптимізація виробничих процесів дозволяє досягти високих результатів із мінімальними витратами.

Оптимізувати виготовлення цукерок доцільно шляхом аналізу технологічного процесу на основі сучасних науково-технічних підходів – починаючи зі стадії змішування інгредієнтів і завершуючи формуванням корпусів. Такий підхід дозволяє керувати структуроутворенням, що сприяє досягненню стабільної та високої якості готової продукції.

# **1 Призначення та область застосування системи керування**

## **1.1 Загальна характеристика виробництва цукерок**

Сьогодні кондитерська промисловість вважається однією з ключових і динамічних сфер, що впливають на економіку України. В умовах зростаючої конкуренції ринок солодошів потребує ретельно продуманої маркетингової стратегії, що враховує попит, різноманітність асортименту, якість продукції та обґрунтовану цінову політику.

Кондитерське виробництво зазвичай складається з декількох спеціалізованих потокових ліній, які забезпечують виготовлення широкого асортименту солодошів: карамель, драже, цукерки з різноманітними начинками (праліновими, фруктовими, желейними), ірис, шоколад, бісквіти та інші вироби [1, 2]. Для кожного типу продукції характерна індивідуальна рецептура та особливості підготовки інгредієнтів. Залежно від фізико-хімічних властивостей мас, використовуються різні технології та обладнання, яке забезпечує відповідну обробку сировини, надає потрібну консистенцію напівфабрикатам і створює умови, необхідні для отримання продукції з високими споживчими характеристиками.

На кондитерських фабриках застосовуються різноманітні технології виготовлення цукерок, що реалізуються на спеціалізованих виробничих лініях. Однією з таких є механізована потокова лінія, що дозволяє автоматизовано виготовляти та упаковувати відливні глазуrowані цукерки з різними начинками – помадними, молочно-помадними, желейно-фруктовими та іншими варіантами. Така лінія забезпечує безперервне виробництво за чіткою технологічною схемою. Основні етапи включають: підготовку та дозування інгредієнтів, варіння суміші, збивання помади, охолодження (темперування), формування шляхом відливання, витримку, нанесення глазури, автоматичне загортання та подальше пакування продукції.

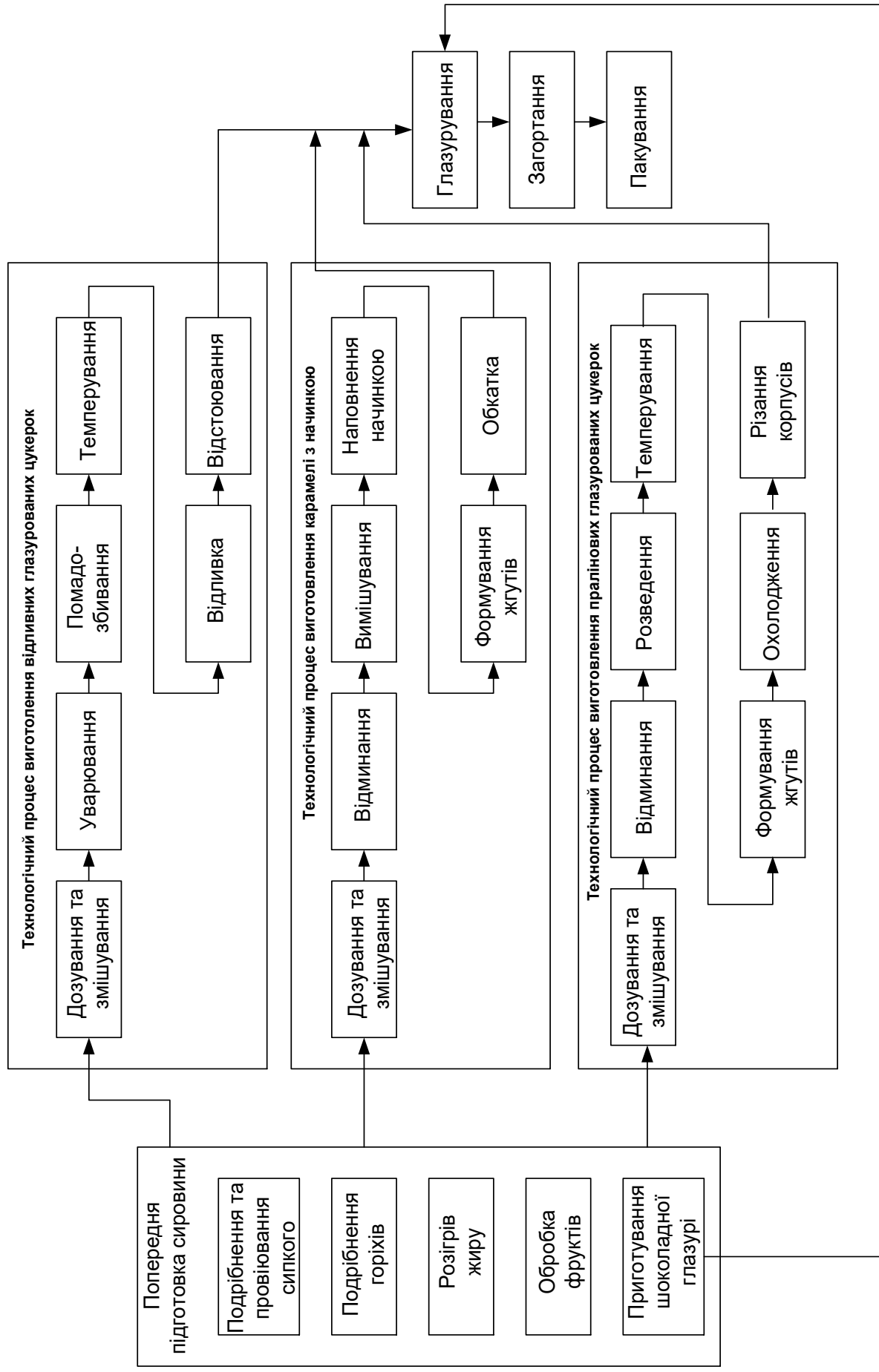


Рисунок 1.1-. Схема послідовності технологічних процесів виробництва цукерок

На рис. 1.1 показано етапи технологічного процесу виготовлення карамелі з начинкою. До них належить підготовка шоколадно-горіхової маси, обробка сировини, точне дозування інгредієнтів, попереднє змішування та відминання. Далі проводиться ретельне вимішування маси, її начинення, формування карамельного джгута, обкатування, нанесення глазури, загортання готових виробів і подальше пакування [2,5].

На рис.1.1 наведено етапи технологічного процесу виготовлення глазурованих пралінових цукерок [2, 3]. До них належать: підготовка сировини, точне дозування інгредієнтів, змішування компонентів праліне, відминання маси, введення жиру для досягнення потрібної консистенції, формування заготовок у вигляді джгутів, їх охолодження, покриття шоколадною глазур'ю, обгортання готових виробів і подальше фасування.

Аналіз технологічної схеми (рисунок 1.2) показує, що в межах різних виробничих процесів можна виокремити низку характерних операцій, які здійснюються на однаковому обладнанні. Зокрема, це підготовка сировини, що включає провіювання, подрібнення, темперування, змішування до досягнення майже однорідної консистенції; виготовлення компонентів за допомогою рецептурної станції – таких як шоколадна глазур для покриття кондитерських виробів, пралінові маси, фруктові начинки, карамелізовані заготовки, що використовуються в якості наповнювачів для солодоців, тортів і бісквітів; а також завершальні етапи – фасування готового товару, його складування та зберігання.

Кожен процес виготовлення кондитерської продукції являє собою складну багаторівневу систему, у якій матеріальні потоки рухаються одночасно послідовно й паралельно. Обладнання, агрегати та апарати, що використовуються в таких технологічних лініях, функціонують у тісному зв'язку завдяки неперервному руху сировини. Це потребує попереднього налаштування кожної одиниці техніки згідно з технічними вимогами та черговістю внутрішніх етапів виробництва. Для злагодженої роботи всі етапи необхідно чітко скоординувати, щоб забезпечити своєчасний запуск кожної наступної операції відповідно до заданої технологічної послідовності.

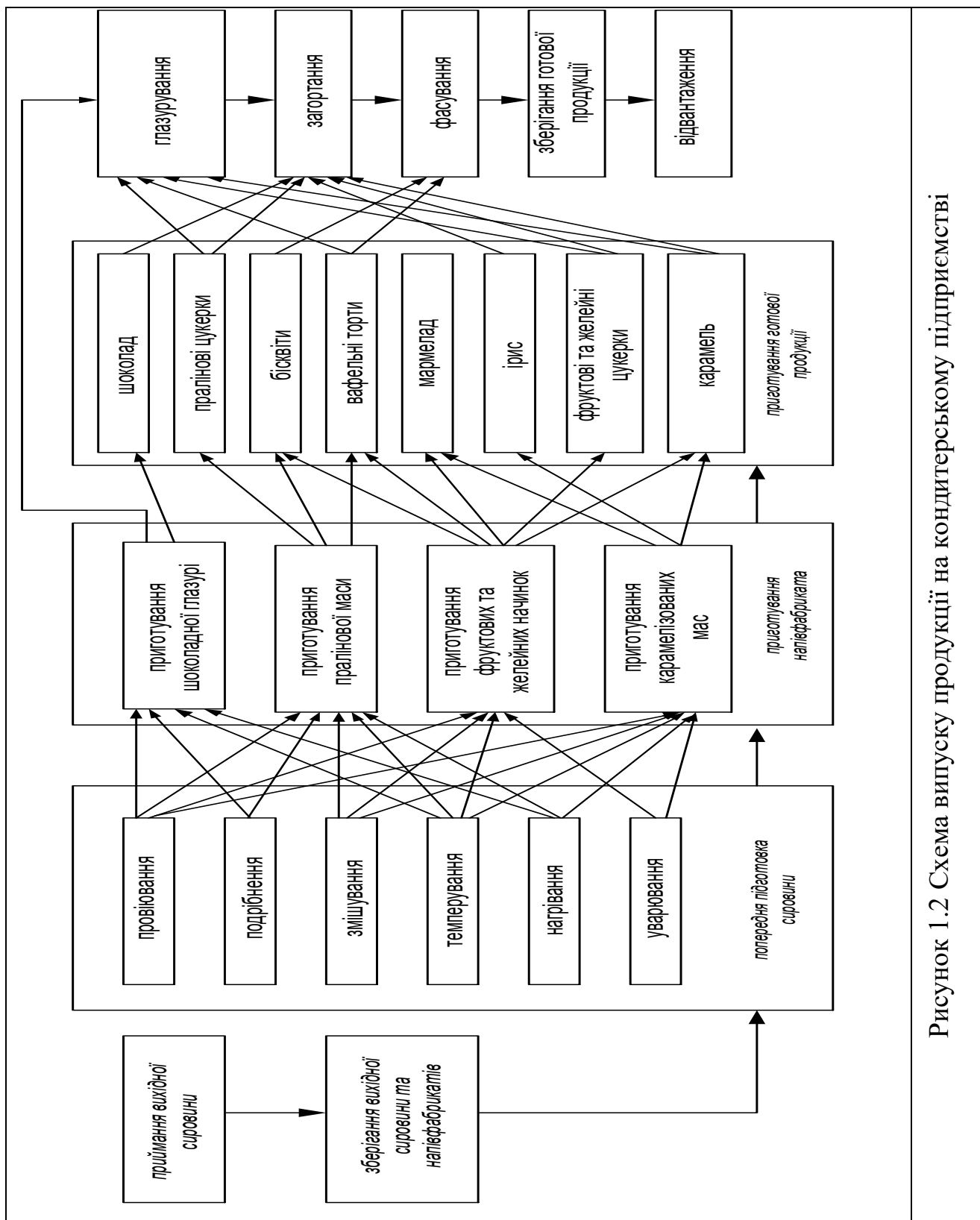


Рисунок 1.2 Схема випуску продукції на кондитерському підприємстві

Завершення попереднього процесу повинно відбуватись без зупинки обладнання. При цьому важливо досягти злагодженої роботи всіх технологічних етапів, забезпечивши максимально ефективне використання

устаткування, зменшення кількості змін у виробництві та зниження потреби в частих переналаштуваннях.

У разі паралельно-послідовного переміщення матеріальних потоків виникає необхідність у формуванні ефективного графіка взаємодії між окремими операціями технологічних ліній. Внаслідок зовнішніх або внутрішніх збурень, передбачена тривалість операцій часто порушується, що призводить до того, що технологічні вузли активуються у непередбачувані моменти. Тому синхронізація дій вузлів на паралельних виробничих лініях, зокрема в кондитерському виробництві, виступає важливою задачею для систем автоматизованого управління.

## **1.2. Аналіз особливостей технологічного процесу виготовлення пралінових цукерок**

Праліне – це однорідна кондитерська маса, що отримується шляхом тонкого подрібнення компонентів, серед яких: кондитерський жир, різні види горіхів (арахіс, фундук, мигдаль), цукрова пудра та додаткові інгредієнти, як-от какао-продукти, сухе молоко, борошно, ароматизатори тощо. Вивчення сучасних технологічних процесів на виробництвах [7, 8, 11] свідчить, що формування пралінових заготовок для цукерок може відбуватися як у циклічному режимі, так і з використанням безперервної обробки.

Процес виготовлення пралінових цукерок зазвичай реалізується за послідовністю етапів, що включає: підготовку інгредієнтів і напівфабрикатів; змішування складників із частиною жирового компоненту відповідно до рецептури; подальше тонке подрібнення отриманої маси на п'ятивалкових млинах; витримку охолодженого складу в спеціальних ємностях при температурі від 23 до 34 °С; повторне перемішування з додаванням залишку жиру; надання масі форми шляхом екструзії на автоматизованому обладнанні; охолодження сформованих джгутів; їх подальше нарізання поперек на окремі цукеркові заготовки; завершальним етапом є покриття корпусів шоколадною глазур'ю.

Існує декілька методів створення пралінових мас, які включають типові технологічні етапи, згадані раніше. Ці методи відрізняються характером технологічних процесів на окремих стадіях виробництва. Схематичне зображення лінії для виготовлення пралінових мас подано на рис.1.3. Одним із ключових нормативних документів у виробництві кондитерської продукції є рецептури, які визначають кількісний склад усіх необхідних компонентів на одиницю готової продукції.

Автоматизувати розробку нових рецептур можна за допомогою спеціалізованої бази знань, у якій зібрано стандартизовані варіанти заміни інгредієнтів, сформовані на основі практичних навичок та досвіду технолога, що працює у сфері виробництва кондитерських виробів.

Пралінові маси належать до систем із пластично-в'язкою структурою. Визначальними показниками таких мас є їхня в'язкість та пластична міцність, що формуються переважно під впливом кількості введеного жиру, ступеня подрібнення частинок і об'ємної частки твердих інгредієнтів. На рис.1.4 зображено структурну модель, що ілюструє зв'язок між якісними показниками сировинних компонентів. Жири відіграють ключову функцію в утворенні структури пралінових сумішей і суттєво впливають на консистенцію та технологічні властивості готового продукту. Їхня дія змінюється залежно від рецептури та умов обробки.

У процесі змішування жири формують композиції з новими фізичними властивостями. Як зазначено у джерелі [6], у разі недостатньо тривалого або повільного перемішування компонентів рецептурної суміші, відбувається нерівномірний розподіл інгредієнтів. Це, своєю чергою, призводить до утворення маси з неоднорідною консистенцією – вона може бути надто сухою або, навпаки, перенасиченою жиром. У зонах підвищеної концентрації жиру утворюється товста жирова плівка, яка вкриває тверді частинки. Під час подальшого вальцювання така плівка обмежує рух частинок усередині агрегатів, що негативно впливає на якість подрібнення та рівномірність кінцевої суміші.

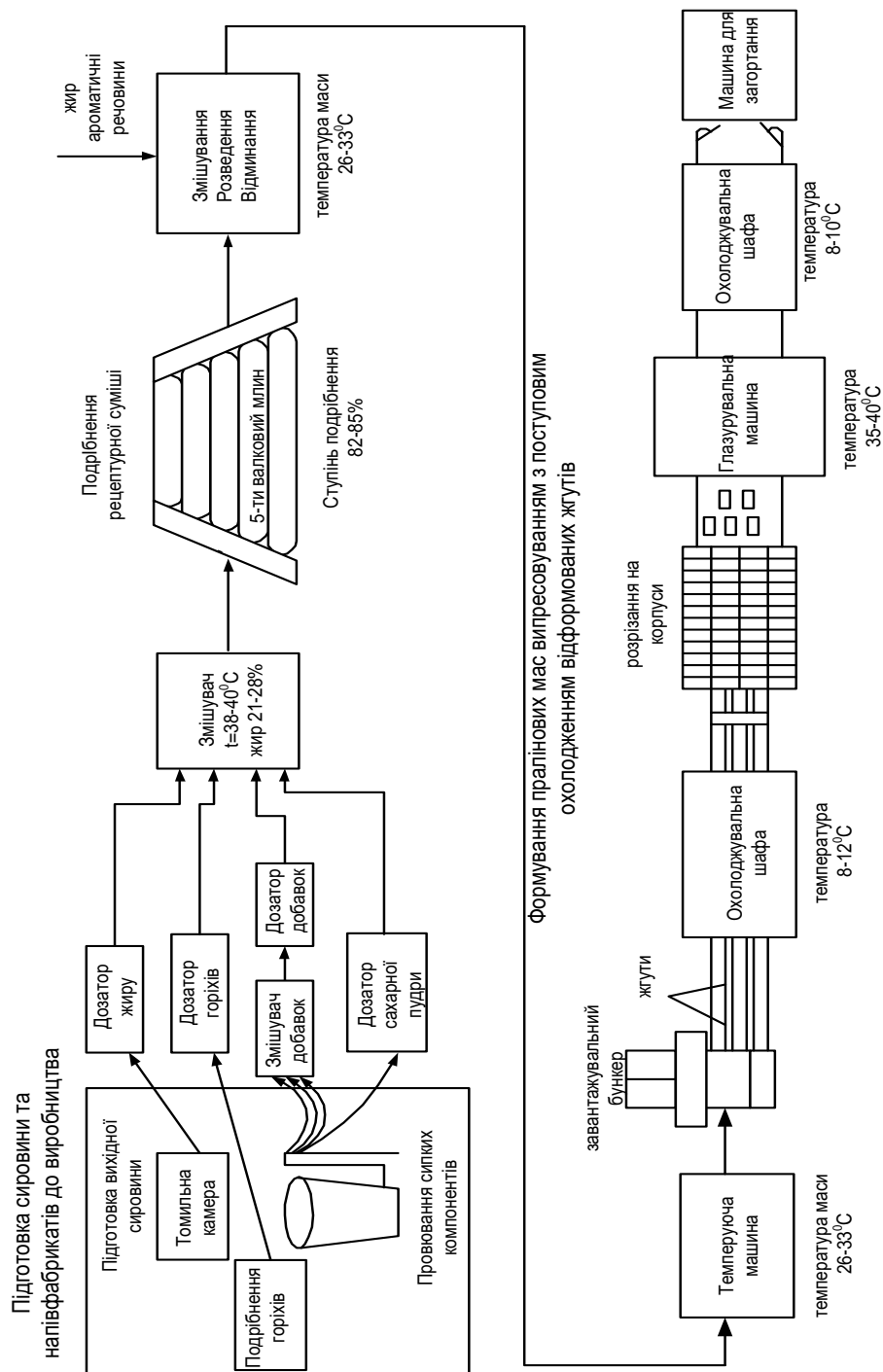


Рисунок.- 1.3 Схема технологічної лінії готування пралінових цукерок

Якість кінцевого продукту знижується. За умов надмірної вологості та недостатнього нагріву відбувається утворення грудок із сировинних компонентів, що спричиняє їх налипання на внутрішні стінки обладнання та порушення стабільності технологічного процесу. Найкращий показник вологості – близько 17%. Оскільки всі параметри якості пралінової маси взаємопов'язані (рис. 1.5), процес її виготовлення має чітко відповідати встановленим технологічним вимогам на кожному етапі.

Заданий рівень якості готового продукту можливо забезпечити, враховуючи характеристики кожного окремого інгредієнта. Наразі контроль зазначених параметрів здебільшого здійснюється фахівцями з харчових технологій шляхом лабораторних досліджень та органолептичної оцінки. Застосовувані методи базуються на принципі вибіркового відбору зразків, які аналізуються як у початковій сировині, так і в кінцевому виробі. Через тривалість таких досліджень – іноді до кількох годин – їх важко адаптувати до умов безперервного виробництва. У процесі ж виготовлення продукції, зокрема пралінових цукерок, якість може погіршуватися, тому виникає потреба у впровадженні системи оперативного автоматизованого контролю на всіх стадіях технологічного циклу.

Порівняння технологічних характеристик пралінової маси на різних етапах обробки (рис. 1.5) засвідчило, що для досягнення стабільної якості продукції ключовим є рівномірний розподіл інгредієнтів у базовій рецептурній суміші, оптимальна температура на виході та чітке дозування жирових компонентів. Отже, етапи змішування та точного дозування інгредієнтів за умов дотримання необхідного температурного режиму відіграють вирішальну роль у формуванні структури майбутньої пралінової маси. Саме на цій стадії значною мірою визначається кінцева якість кондитерського виробу, адже структура маси формується до її надходження на стадію відминання.

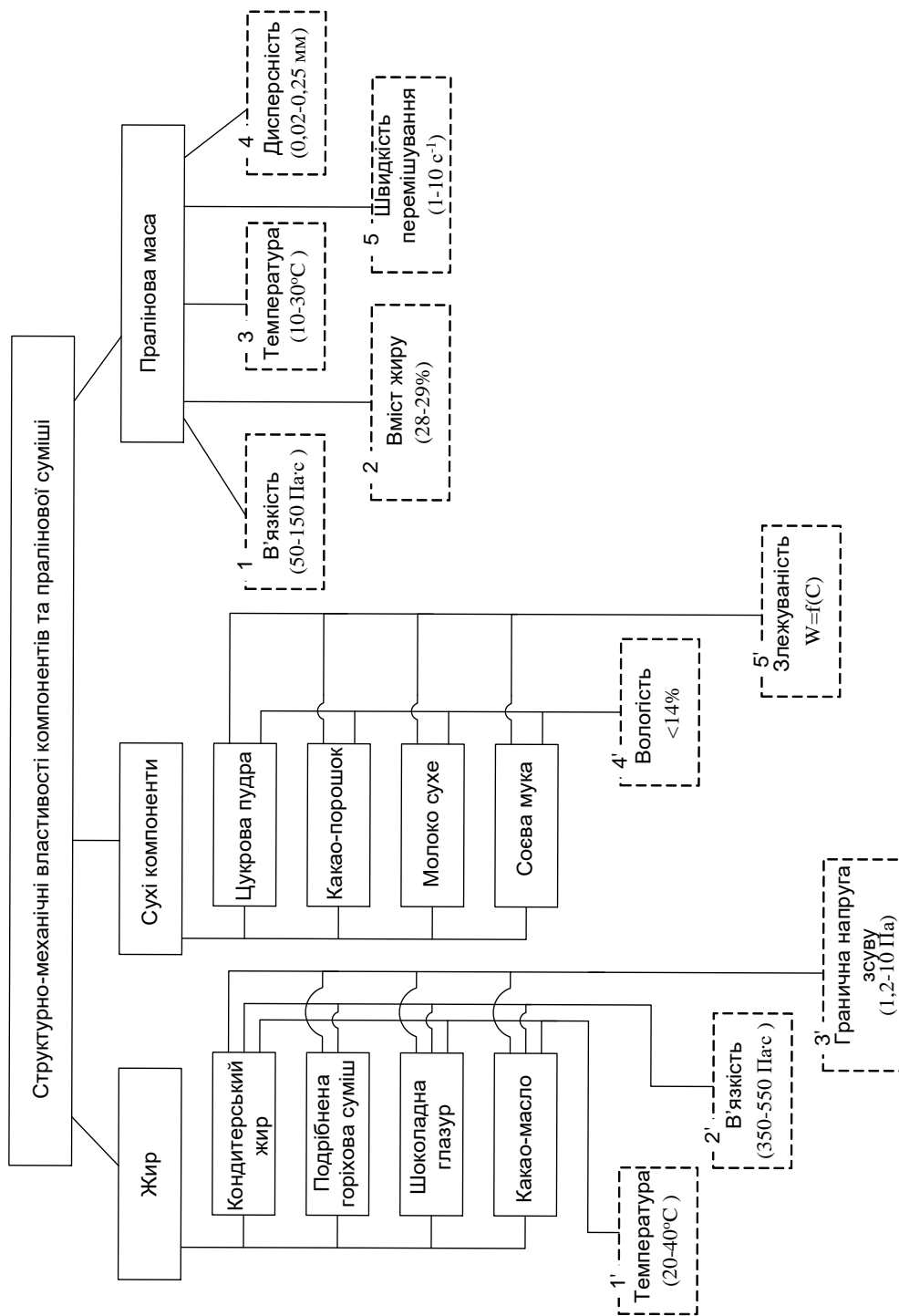


Рисунок 1.4 – Структурна схема параметрів, які визначають якість компонентів вихідної сировини

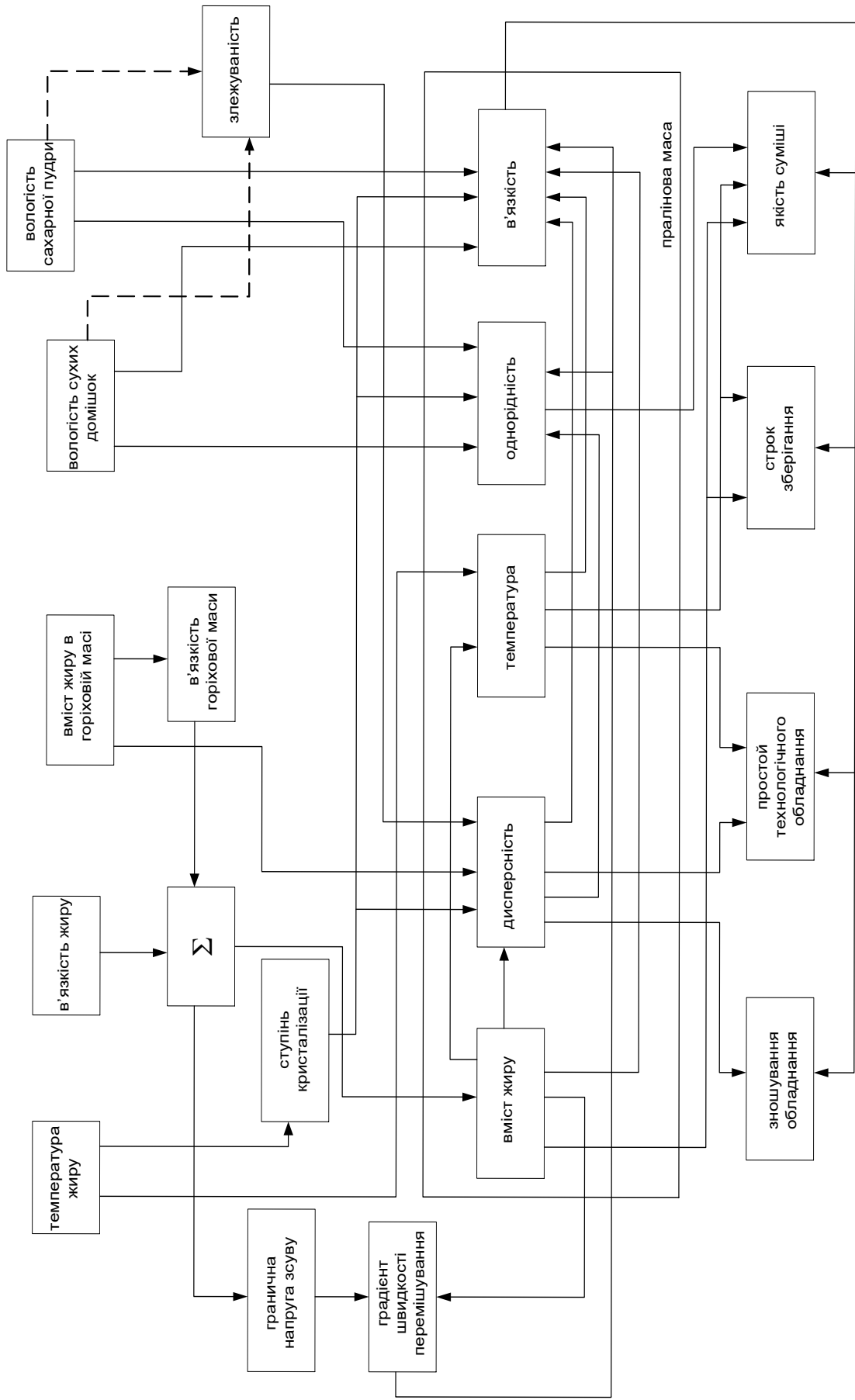


Рисунок 1.5 – Структурна схема зв'язків по технологічним параметрам

Маса з частково кристалізованим жиром може надходити на етап формування без попереднього охолодження. Водночас при використанні вже закристалізованої жирової фази неможливо досягти однорідного розподілу жиру в праліновій суміші, що призводить до зниження якості кінцевого продукту.

У сучасному виробництві рецептурної суміші все частіше застосовують безперервні рецептурно-змішувальні станції, які функціонують на основі поетапного зважування інгредієнтів згідно з рецептурою. Наприклад, на підприємствах кондитерської промисловості, зокрема фабриках «Червоний Жовтень» та «Росія», впроваджено установки італійської компанії «Карлі й Монтанари», що здійснюють автоматизоване дозування складників. Однак подібне обладнання не забезпечує стабільної однорідності суміші з рідких і сипких інгредієнтів та не гарантує її якісного і достатньо інтенсивного перемішування через низку технічних обмежень.

– Змішування рідких і сипучих компонентів відбувається одночасно, при цьому рідини подаються без попереднього розпилення. Це спричиняє злипання сухих частинок у грудки, що негативно впливає на рівномірність суміші та знижує ефективність перемішування, що, у свою чергу, порушує сталість її складу.

– Об'ємне дозування інгредієнтів не забезпечує точного контролю за їх пропорціями, адже щільність компонентів може змінюватися в період між аналізами проб, що призводить до похибок у дозуванні.

Для покращення процесу змішування сухих інгредієнтів із рідкими було створено модернізовану рецептурну станцію, призначену для виробництва пралінових мас. У ній оновлено як конструкцію, так і технологічні характеристики, додано сучасні технічні вузли, що забезпечують більш ефективне досягнення рівномірної консистенції. Це стало можливим завдяки активному перемішуванню порошкових компонентів з дрібнодисперсними рідкими речовинами. Контроль пропорцій реалізовано через точне вагове дозування, яке здійснюється з використанням датчиків маси.

Рецептурна установка, призначена для змішування сипких та рідких інгредієнтів, включає бункери з пристроями для дозування та змішувач, що

складається з передкамери та основної камери, всередині яких встановлено ротори зі спіралеподібними шнеками та лопатками, що здійснюють обертання. У конструкцію додано вагові системи, що забезпечують високу точність у подачі компонентів. Бункери закріплені на цих системах, а подача рідких речовин здійснюється через розпилювальний елемент, який напряму з'єднаний із змішувальною камерою.

Схема установки включає два основні елементи: агрегат "Дозомес" і пристрій для дозування та змішування добавок, зображені на рисунку 1.6. У склад "Дозомеса" входять: пристрій для подачі жиру (ДЖ), механізм дозування горіхів (ДГ), блок змішування добавок (ЗД), дозатор харчових добавок (ДД) і модуль для внесення цукрової пудри (ДЦП). Всередині обох камер розміщені елементи, змонтовані концентрично на підшипниках кочення.

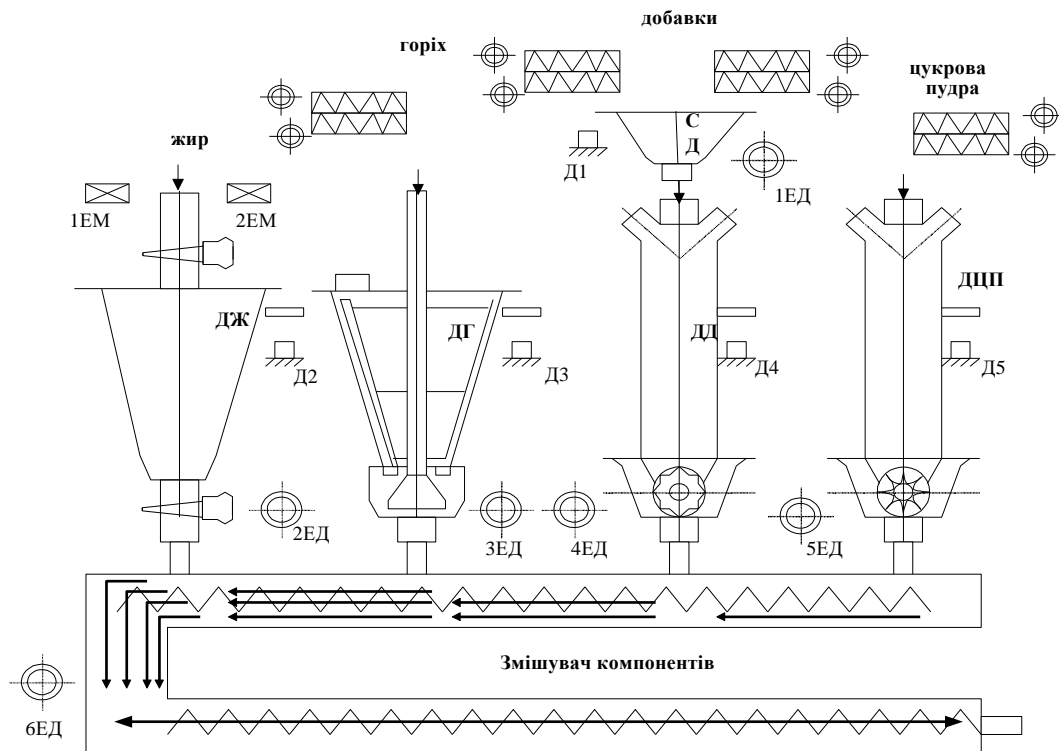


Рисунок 1.6 – Складові компоненти установки

У конструкції передбачено вали зі спіральними елементами та лопатками, які забезпечують як перемішування, так і поступове просування пралинової маси по всій довжині камер. Процес приготування суміші з рідких і сухих інгредієнтів у рецептурному вузлі відбувається наступним чином: за допомогою спеціальних живильних механізмів складники подаються в дозуючі пристрої. Далі сухі

інгредієнти із встановленою швидкістю надходять до передкамери, де шнек транспортує їх уздовж об'єму камери, здійснюючи початкове змішування.

Суміш надходить у спеціальну камеру, де завдяки обертанню лопатей компоненти активно перемішуються та переходять у завислий стан. Одночасно з бункера через форсунку додаються рідкі інгредієнти, які рівномірно з'єднуються з твердими складниками, формуючи однорідну масу.

Станція підходить не лише для виготовлення пралінових мас – її можна застосовувати і для приготування різноманітних начинкових сумішей, а також напівфабрикатів, що слугують основою для шоколадної глазури та інших кондитерських виробів.

Процес виготовлення пралінових мас істотно впливає на якість готової продукції, тому виникає потреба в автоматизованому підході до його регулювання. Це передбачає вивчення фізичних явищ, які мають місце під час виробництва, і побудову системи управління, здатної ефективно координувати всі етапи технологічного процесу.

Управління цим технологічним процесом вимагає постійного отримання даних про його перебіг, а також визначення найбільш ефективного режиму роботи системи. На основі зібраної інформації формуються керуючі дії, які дозволяють досягти оптимальних результатів. Загальна схема реалізації процесу керування наведена на рис.1.7.

Керування технологічним процесом виготовлення пралінових мас відзначається значним обсягом вхідної інформації про стан об'єкта, різноманітним способом її аналізу та варіантів подальшого використання. Для досягнення стабільності та ефективності функціонування АСУ ТП необхідна реалізація комплексу взаємопов'язаних дій: збір даних про параметри процесу, їх збереження, обробка та інтерпретація; контроль за окремими величинами, фіксація або виведення значень на індикатори, а також управління іншими змінними шляхом прийняття оптимальних рішень щодо впливу на об'єкт.

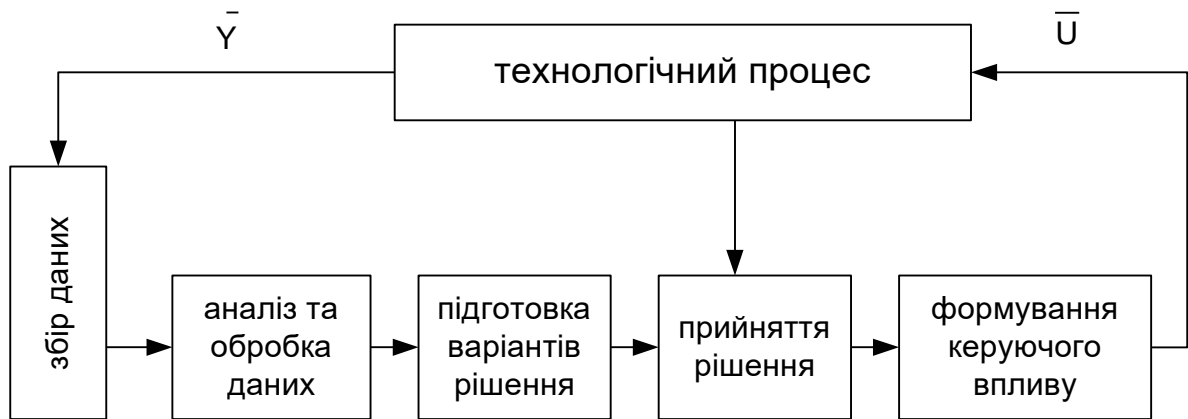


Рисунок 1.7 – Основні етапи в реалізації керування об'єктом

Автоматизована система керування технологічним процесом (АСКТП), яка аналізується, виконує широкий спектр функцій. До ключових інформаційних задач, що забезпечують надходження даних про стан виробничого процесу на вищий рівень керування, належать:

- відстеження актуальних показників основних технологічних параметрів;
- визначення, чи відповідають параметри встановленим нормативам, і оперативне сповіщення персоналу у випадку виявлення відхилень;
- проведення вимірювання значень контрольованих параметрів;
- розрахунок непрямих або комплексних величин, які неможливо визначити шляхом прямого вимірювання.

Для ефективного управління технологічним процесом приготування пралінових мас та забезпечення відповідності моделі реальним умовам, система автоматизації повинна ґрунтуватися на визначенні як статичних, так і динамічних параметрів безпосередньо в умовах функціонування виробництва.

Особливістю представлених рецептур є суттєва варіативність температур розплавлення й охолодження, що спричиняє труднощі у стабільній роботі автоматизованих ліній формування корпусів цукерок. Така температурна нестабільність знижує ефективність обладнання та ускладнює підтримання сталої якості.

Регулювання зазначених характеристик у процесі виробництва має прямий вплив на кінцеві властивості продукції, зокрема її структуру, форму та споживчі якості.

Аналіз особливостей виробничого процесу на кондитерському підприємстві свідчить про доцільність впровадження модернізованої автоматизованої системи керування виготовленням пралінових мас. Така система повинна базуватися на сучасних методах управління та технічних рішеннях, що дадуть змогу стабільно підтримувати задані параметри якості продукції, підвищити ефективність роботи обладнання та забезпечити безперервність виробничого циклу.

### **1.3 Вимоги до систем автоматизації керування виготовленням пралінових цукерок**

Автоматизація в сфері кондитерського виробництва відкриває перспективи для істотного зниження витрат на виготовлення продукції та зменшення потреби у великій кількості працівників. Ще донедавна устаткування з високим рівнем автоматизації складало менше половини загальної кількості виробничих ліній, а програмне забезпечення перебувало на стадії експериментальних розробок. Сьогодні ж завдяки стрімкому прогресу інформаційних технологій стало можливим створення надійних та стабільно працюючих комп'ютеризованих систем керування. Щодо процесу виготовлення пралінових цукерок, до систем автоматизованого управління ставляться такі ключові вимоги:

- автоматичне керування всім процесом;
- автоматичне керування електродвигунами й іншими пристроями;
- забезпечується інтерактивний режим відображення аварій з поясненнями для зручного виявлення несправностей за допомогою інтуїтивного графічного середовища;
- на дисплеї виводяться графіки динаміки параметрів у реальному часі з можливістю їх збереження для подальшого аналізу змін;
- передбачено гнучке планування програм обслуговування на різні часові проміжки;
- реалізована функція автоматичної діагностики елементів системи управління;

- система фіксує статистику по аварійним сигналам, що дозволяє визначити найбільш проблемні вузли обладнання;
- вбудовані онлайн-підказки сприяють швидкому навчанню користувачів, особливо корисні на етапі первинного освоєння системи;
- проводиться обчислення енергоспоживання обладнання з метою контролю ефективності його роботи.

## **2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу**

### **2.1. Сучасний стан автоматизованих систем керування процесами виготовлення цукерок**

Кондитерські підприємства активно впроваджують сучасне високопродуктивне обладнання та складні багаторівневі технологічні процеси. Виробництво постійно вдосконалюється як за структурою, так і за технологіями, що спричиняє тісну кооперацію між різними виробничими ланками. Усе це зумовлює розширення управлінських функцій і підвищення рівня технічної автоматизації.

У сучасних реаліях виробничої діяльності управління ґрунтується на ринкових принципах, за якими самостійні суб'єкти господарювання приймають рішення щодо обсягів виробництва, формування цін та вибору партнерів. Основна мета такого підходу – оперативне реагування на зміну ринкових умов і максимальне задоволення запитів споживача. Ринкова модель управління передбачає гнучкість у стратегії підприємства та постійну адаптацію до зовнішніх викликів.

Автоматизація впроваджується в окремі етапи технологічного процесу, що забезпечує суттєве покращення продуктивності та стабільну якість готової продукції. Проведено аналіз процесів виготовлення кондитерських виробів як об'єктів автоматичного керування, зосереджено увагу на ключових технологічних операціях. Створено математичні моделі для таких етапів, як дозування інгредієнтів, змішування, обробка тіста, охолодження, формування виробів тощо. Окрім цього, визначено передатні функції основних контурів керування і сформульовано ефективні алгоритми регулювання для підвищення точності та надійності процесів.

Покращення ефективності виробництва, зменшення втрат ресурсів та підвищення якості продукції на існуючих, новозбудованих і модернізованих

підприємствах значною мірою залежить від удосконалення систем управління. Особливо важливу роль у цьому відіграє впровадження автоматизованих систем керування, які забезпечують точніше й стабільніше функціонування виробничих процесів.

У системах автоматизованого управління технологічними процесами важливо своєчасно отримувати дані про стан виробництва та знаходити найбільш ефективні режими роботи обладнання. Також необхідно впроваджувати оптимальні керуючі дії на технологічні об'єкти, щоб забезпечити стабільну та якісну роботу всієї системи.

Автоматизована система управління технологічними процесами (АСУ ТП) зазвичай включає різноманітні технічні компоненти, що забезпечують виконання інформаційних і керуючих завдань. До таких елементів належать обчислювальні комплекси разом із пристроями для обміну даними з виробничими об'єктами – це обладнання, що здійснює прийом, обробку, передачу і перетворення сигналів для моніторингу й управління, а також організовує перемикання каналів передачі. Додатково використовуються класичні елементи автоматизації: різні датчики, перетворювачі, вторинні вимірювальні пристрої, а також автоматичні регулятори. Для взаємодії персоналу з апаратурою передбачені операторські пульти, інформаційні дисплеї, засоби ручного введення та інші пристрої, що спрощують управління технологічними процесами.

Технічні пристрої, які застосовуються для створення системи, мають відповідати таким критеріям: виготовлятися серійно в приладобудівній або суміжних галузях промисловості; бути побудованими за блочно-модульною структурою з уніфікованими інтерфейсами для з'єднання компонентів; давати змогу виконувати широкий спектр функцій при повній комплектації обладнання; характеризуватися високою надійністю та стабільністю роботи.

Високий рівень автоматизації характерний для таких процесів, як дозування, змішування, темперування, глазурування, а також обгортання і пакування продукції [10]. Для здійснення операцій дозування і змішування, як зазначалося раніше, застосовують спеціалізовані рецептурно-змішувальні

станції безперервної дії, що забезпечують точність та стабільність технологічного процесу.

Темперування відіграє ключову роль у підготовці цукеркових мас до подальшого формування. Саме на цьому етапі значною мірою визначається якість майбутніх цукерок, зокрема їх структура та однорідність. Технологічна суть процесу полягає у ретельному перемішуванні маси з одночасним регулюванням температури, що призводить до рівномірного розподілу компонентів та поліпшення властивостей готового продукту. Сучасні дослідження процесу темперування допомагають удосконалювати технічне оснащення виробництва, підбирати оптимальні режими обробки й гарантувати стабільність та якість цукеркових корпусів.

Темперування цукеркової маси передбачає її поступове охолодження у два етапи: спочатку суміш з температурою, що перевищує точку плавлення жиру, охолоджують до 30–34 °С, далі – до 28–29 °С. Після цього масу знову обережно підігрівають, але не вище 33–34 °С, що трохи нижче температури плавлення жирів. Такий процес дає змогу отримати якісний продукт із гарною текстурою та блиском.

Маса має постійну в'язкість і дає при обробці глянцеvu поверхню.

Технологічна схема, зображена на рис.2.1, ілюструє процес темперування цукеркової маси [11]. Нетемперована маса транспортується трубопроводом 3 у теплообмінник 2, оснащений мішалкою 13, після чого направляється в шнековий теплообмінник U. Після часткового темперування через трубопровід 4 частина маси повертається у теплообмінник із мішалкою, де відбувається повторне змішування з нетемперованою масою. Охолоджуюча вода подається послідовно: спочатку у сорочку шнекового теплообмінника, а далі – у теплообмінники з мішалкою, що забезпечує необхідний температурний режим для якісного темперування кондитерської маси. Така схема дає змогу ефективно підтримувати стабільність температури та однорідність продукту.



необхідної міцності, а жир, що міститься в масі, переходить у кристалічний стан. Зазвичай цей етап триває близько 7-8 хвилин.

Наступним етапом у виробництві є глазурування цукерок – нанесення тонкого, однорідного шару шоколаду або інших кондитерських сумішей на поверхню корпусів [7]. Ця операція служить захистом від зовнішніх впливів, таких як висихання чи зайва вологість, а також покращує харчову цінність і смакові якості виробів, надаючи їм привабливий вигляд.

Шоколадне покриття збільшує термін зберігання цукерок, запобігаючи втраті вологи та іншим негативним змінам. Процес глазурування здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання. На рис. 2.2 наведено схему роботи машини для глазурування цукерок.

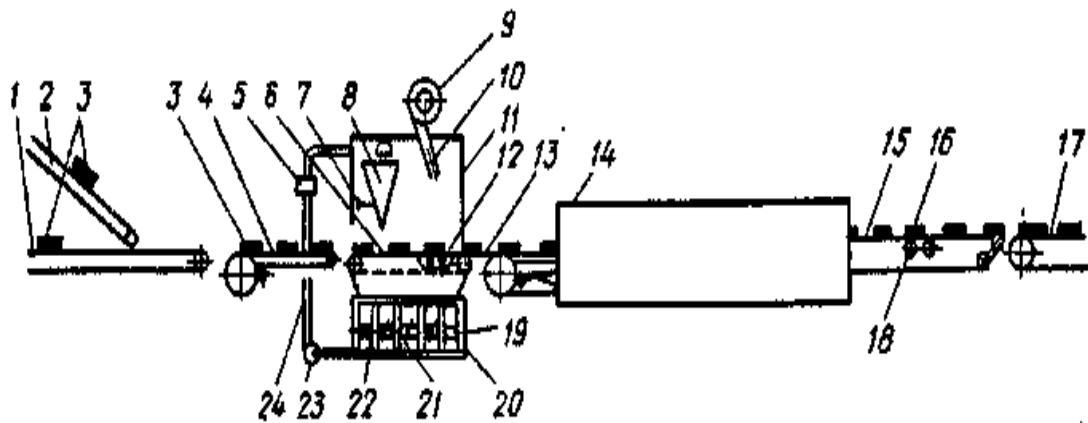


Рисунок 2.2 – Схема процесу глазурування цукерок на машині

Продуктивність обладнання визначається швидкістю нанесення глазури та шириною транспортної сітки. Після глазурувального процесу певні види цукерок додатково обробляють, посипаючи вафельною або горіховою крихтою повністю або лише зверху. В окремих моделях глазурувальних машин передбачені механізми для створення різноманітних візерунків на поверхні цукерок.

Автоматизовані лінії, згідно з класифікацією АСУТП, належать до систем логіко-програмного управління, які забезпечують керування групою однотипних технологічних операцій. Їхня ключова функція полягає у цифровому контролі, що здійснюється за жорсткою або напівжорсткою програмою з режимом поділу часу між різними операціями. Такі лінії

вирізняються високою надійністю обладнання та ефективною організацією обслуговування. Оператор виконує управління, спираючись на завдання планового відділу, проте не має можливості оперативно змінювати хід технологічного процесу у разі відхилень, що призводить до значних часових затрат на корекцію керуючих дій.

Системи керування, що базуються на методах експертного оцінювання, отримали значне поширення [12]. На рис.2.3 зображена структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом, яка функціонує з використанням експертних оцінок. Такі підходи дозволяють підвищити ефективність управління складними комплексами завдяки залученню професійних знань у прийнятті рішень.

Основними складовими системи є: модуль автоматичного створення плану виробничого завдання, диспетчерська підсистема, яка на основі інформації від аналізатора стану технологічних процесів складає графік завантаження обладнання відповідно до заданих параметрів випуску продукції різних видів; а також модулі автоматичного управління технологічними операціями, які реалізують виробничі завдання згідно з розкладом, сформованим диспетчерською системою.

На кожному рівні організації має формуватися багатоваріантова структура прийняття рішень, що забезпечує взаємодію між верхніми і нижчими ланками ієрархії. Такий підхід дозволяє рухатися в обох напрямках, запобігаючи виникненню тупикових ситуацій, коли в певний проміжок часу рішення не може бути ухвалене. Це поняття відоме як функціональна ієрархія прийняття рішень та управління. Вона виникає природним чином через три ключові складові проблеми прийняття рішень у ситуації повної невизначеності: вибір відповідної стратегії для процесу прийняття рішень; зниження або ліквідація невизначеності; а також пошук оптимального або прийняттого варіанту дій, який відповідає заданим обмеженням.

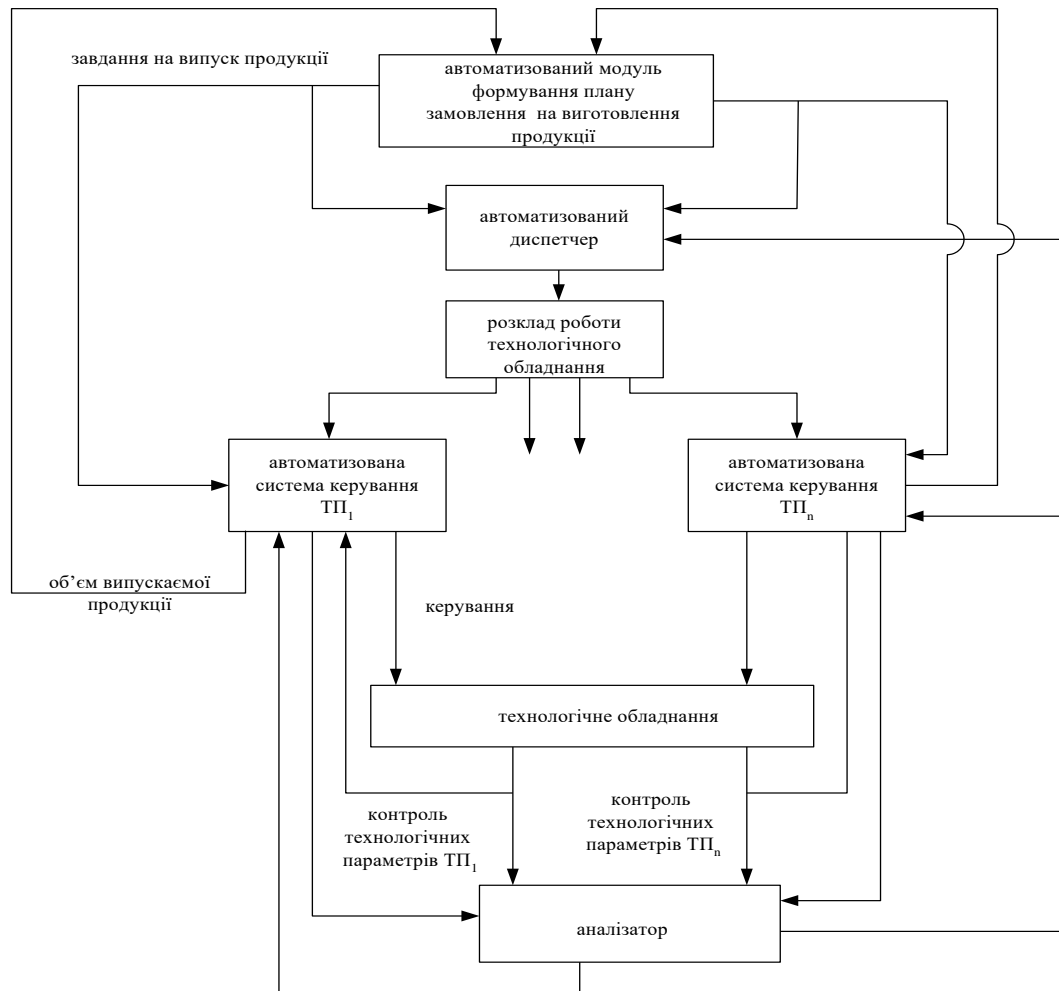


Рисунок 2.3 – Структурна схема автоматизованої системи управління комплексом технологічних процесів у кондитерській галузі, яка базується на застосуванні експертних оцінок

Якщо відсутня координація, продуктивність технологічних ліній при повному завантаженні обладнання може перевищувати реальний попит на продукцію. Це призводить до невідповідностей між плановими показниками та фактичними результатами виробництва. Недостатня узгодженість процесів часто спричиняє зриви у випуску запланованих обсягів продукції через відхилення технологічних параметрів, а також може спричинити накопичення надлишкових запасів на складах.

Підвищення продуктивності виробництва досягається завдяки збільшенню продуктивності технологічних процесів, розширенню обсягів випуску продукції, покращенню її якості, а також зменшенню незавершеного виробництва і страхових запасів. Це стає можливим завдяки локалізації

постачальників сировини, синхронізації їх роботи та регламентованому плануванню випуску продукції, що базується на глибокому аналізі споживчого попиту через маркетингові дослідження.

Основні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), розроблені для кондитерської галузі, мають централізований принцип організації управління. Аналіз практичного застосування та проектування таких систем виявив певні їхні недоліки:

1. Основною проблемою є низька надійність системи.

2. Централізовані системи мають обмежену здатність до розширення функціоналу в міру їх розвитку, що залежить від потужності обчислювальної техніки.

3. Створення програмного забезпечення є складним через те, що сучасний технологічний процес розглядають як набір автономних, але взаємопов'язаних етапів, які виконуються у різних модулях.

4. Висока ціна комунікаційних ліній зумовлена центральним розташуванням ЕОМ у сучасних автоматизованих системах управління технологічними процесами.

У проєктах децентралізованих автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) у харчовій промисловості застосовують дві основні функціональні структури – лінійну та кільцеву. При лінійній організації (рис. 2.4) інформація, яка попередньо оброблена на локальних підсистемах з власними мікро- або мінікомп'ютерами, передається до центральної мікро- чи мініЕОМ для подальшої обробки.

Обидві системи мають дворівневу архітектуру: на нижньому рівні працюють локальні мікроЕОМ, тоді як на верхньому – центральна ЕОМ, відповідальна за планування, оптимізацію та адаптацію конфігурації у випадку аварійних ситуацій. Використання багатомашинного комплексу в децентралізованих АСУТП підвищує надійність управління завдяки резервуванню ключових компонентів. Крім того, це дозволяє спростити програмні рішення, зменшити терміни й витрати на розробку, а також

поступово вводити систему в експлуатацію, розширюючи перелік виконуваних завдань.

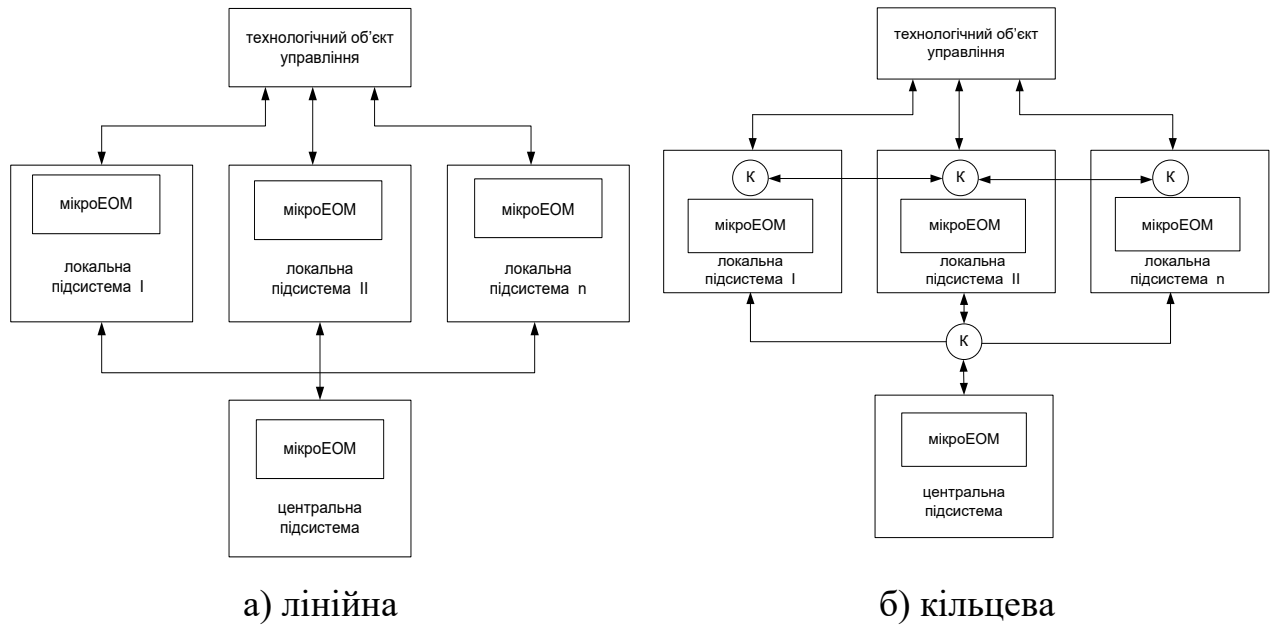


Рисунок 2.4 – Структури АСУ

Структура управління технологічними процесами у кондитерському виробництві є багаторівневою ієрархічною системою з високим ступенем складності. Для підвищення ефективності такого управління необхідно створити інтегровану автоматизовану систему, яка б застосовувала електронно-обчислювальну техніку на всіх етапах виробничого циклу. Це дозволить забезпечити стабільну якість продукції, синхронізувати роботу обладнання в паралельних технологічних процесах та оптимізувати загальне планування виробництва.

Аналіз діючої системи управління виявляє недостатню скоординованість дій, відсутність повної автоматизації контролю над процесом, складнощі з визначенням чітких керуючих впливів, а також низьку швидкість їх впровадження. Крім того, відсутні механізми оптимізації процесу та формалізованого оцінювання впливу якості сировини і параметрів режимів на якість кінцевого продукту.

## **3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій**

### **3.1 Структурна схема системи виготовлення кондитерських виробів**

Основними етапами у виробництві пралінових цукерок є темперування, охолодження та глазурування. Для підвищення ефективності цих процесів важливо впровадити сучасні методи автоматизації, зокрема за допомогою сучасних мікропроцесорних технологій, що дозволить покращити контроль і якість готової продукції.

Система управління виробництвом цукерок складається з двох рівнів і базується на мультиконтролерній архітектурі (рис.3.1). Контролери першого рівня відповідають за моніторинг технічних параметрів обладнання та керують приводами і виконавчими пристроями машинного комплексу.

Контролери першого рівня:

ПКТМ – пристрій контролю темперуючої машини;

ПКГМ – пристрій контролю глазурувальної машини;

ПКОМ – пристрій контролю охолоджувальної машини.

На рис.3.2 зображено структуру системи керування темперуючої машини. В її складі можна виділити дві основні частини: теплообмінник із мішалкою (ТОМ) та шнековий теплообмінник (ШТО). Теплообмінник із мішалкою поділено на три окремі зони, кожна з яких оснащена датчиками для вимірювання температури цукеркової маси (ДТЦМ) і температури води (ДТВ), що циркулює у сорочці теплообмінника.

Інформація про температуру, зібрана від зазначених датчиків, передається через інтерфейс зв'язку (ІЗ) до керуючої мікропроцесорної ЕОМ (КМЕОМ). У шнековому теплообміннику встановлено датчик, що контролює температуру цукеркової маси (ДТЦМ), забезпечуючи точний моніторинг процесу нагрівання.

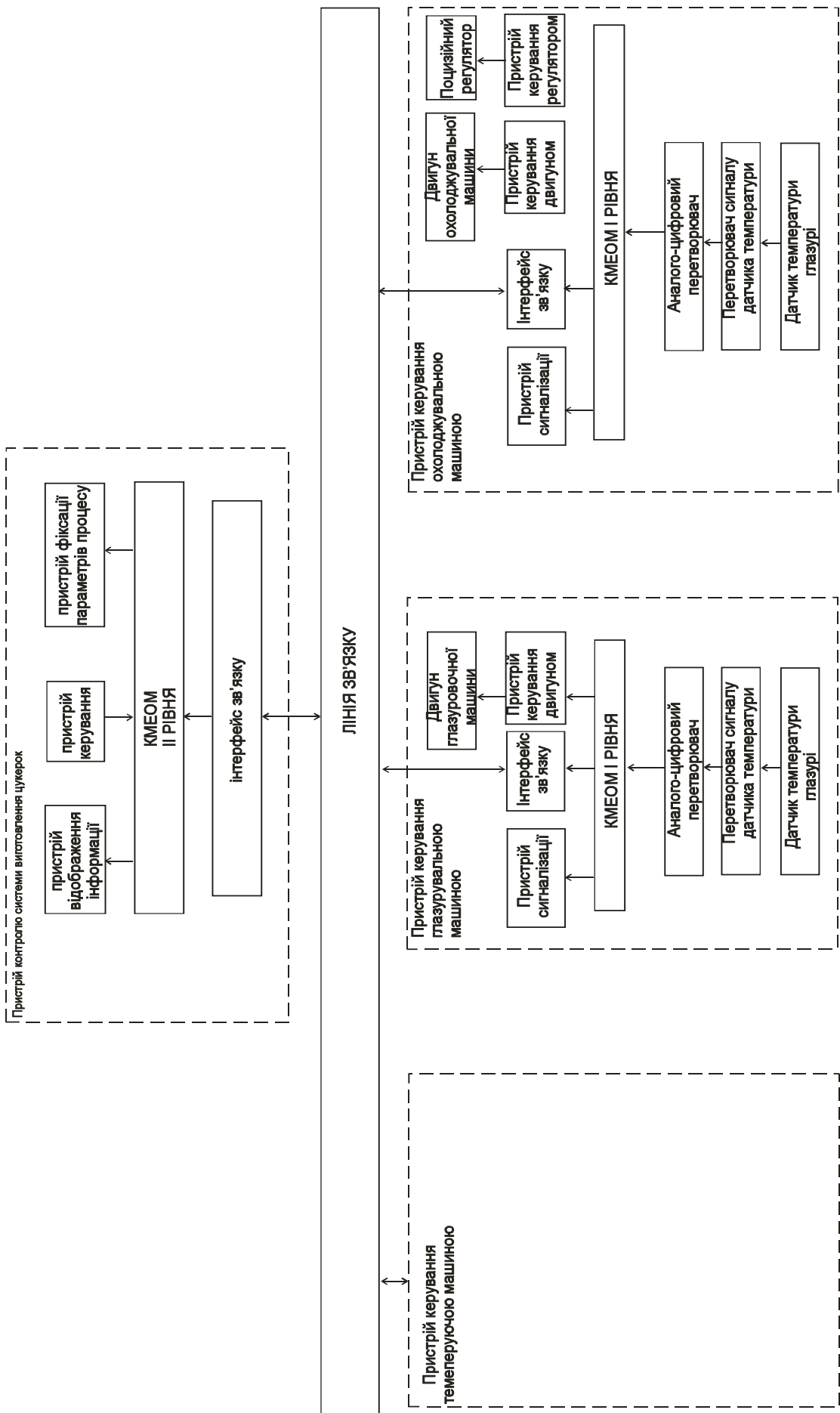


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування процесом виготовлення цукерок

Датчик температури води, встановлений у сорочці теплообмінника (ДТВ), а також датчик рівня цукеркової маси (ДРЦМ) забезпечують підтримання стабільного рівня маси всередині теплообмінника. Дані з цих сенсорів передаються через інтерфейс зв'язку (ІЗ) до керуючої мікроелектронної обчислювальної машини (КМЕОМ). Окрім цього, обладнання оснащено власним нагрівачем води, температура якого регулюється за допомогою окремого датчика води нагрівача (ДТВН).

Виконавчими пристроями ТОМ є:

- клапан для подачі глазурованої маси (КПЦМ), а також окремі водяні клапани (КПВ), встановлені в кожному з технологічних відсіків теплообмінника (ТОМ), забезпечують точне регулювання потоків відповідних речовин у задані зони.

- двигун мішалки (ДМ);

- двигун відкачки цукеркової маси (ДВГ).

Виконавчими пристроями ШТО є: двигун, що забезпечує відкачування цукеркової маси (ДВЦМ), а також водяні насоси з електроприводами (ДВН), які відповідають за подачу води до сорочки теплообмінника (ШТО) і транспортування маси трубопроводом. Управління роботою клапанів здійснюється через спеціальні пристрої керування клапанами (ПКК), тоді як за запуск і зупинку двигунів відповідають пристрої керування двигунами (ПКД). Для нагрівання води використовується нагрівальний елемент (Н), роботу якого координує пристрій управління нагрівачем (ПКН). Загальна взаємодія елементів системи реалізується за заздалегідь визначеним алгоритмом.

На початковому етапі цукеркова маса подається до теплообмінника (ТОМ) через спеціальний клапан, після чого безперервно переміщується всередині апарата. У кожній зоні ТОМ встановлені датчики, які відстежують температурні параметри як води, так і маси. Зібрані дані передаються через інтерфейс зв'язку (ІЗ) до керуючої мікроЕОМ (КМЕОМ), де інформація аналізується згідно з попередньо запрограмованим алгоритмом.



Рисунок 3.2 – Структурна схема пристрою керування температуральною машиною

Керуюча мікроЕОМ, обробляючи вхідні сигнали за допомогою програмно-керованих компонентів ПКС і ПКД, реалізує управління

виконавчими пристроями теплового обробного модуля (ТОМ). Після проходження технологічного процесу в ТОМ цукеркова маса транспортується насосом ДВЦМ до шокового термообмінника (ШТО), де автоматично підтримується її оптимальна температура й необхідний рівень. Дані про температуру та кількість маси, а також показники охолоджуючої сорочки, надходять через інтерфейс зв'язку до КМЕОМ і обробляються відповідно до закладеного алгоритму. На основі аналізу отриманих параметрів КМЕОМ, за допомогою ПКД, регулює роботу виконавчих органів ШТО. Додатково система контролює температурний режим води у вбудованому нагрівачі, керуючи цим процесом через ДТВН, ПКН і сам нагрівальний елемент.

ПКГМ використовує сенсор температури глазури для контролю технологічного процесу, а функції виконавчого елемента виконує електродвигун глазурувальної установки (ДГМ).

ПКОМ оснащений температурним сенсором для моніторингу процесу охолодження. В ролі виконавчих елементів у ньому працюють електропривод охолоджувальної системи (ДОМ) та пристрій для регулювання подачі охолоджувального розчину (ПР).

Контролери нижнього рівня під'єднані до пристрою контролю виготовлення цукерок (ПКСВЦ) через лінію зв'язку (ЛЗ) та комунікаційний інтерфейс (ІЗ). До складу ПКСВЦ входять: блок виведення інформації (ПВІ), модуль управління (ПК) та система реєстрації технологічних параметрів (ПФПП).

### **3.2 Електрична принципова схема системи виготовлення цукерок**

Виходячи зі структурної електричної схеми, сформовано принципову електричну схему керування темперувальною установкою, що представлена на рис.3.3.



Для вимірювання температури застосовано інтелектуальні напівпровідникові датчики типу DS18S20, розроблені компанією MAXIM. Діапазон температур, які можуть бути зафіксовані, коливається від -55 °C до +125 °C, при цьому точність вимірювання становить  $\pm 0,5$  °C у межах робочої зони від -10 °C до +85 °C.

Для вимірювання рівня цукеркової маси застосовано радарний рівнемір моделі BM70 виробництва компанії VEGA. Пристрій інтегровано в систему керування за допомогою інтерфейсу обміну даними формату RS485.

Основні технічні характеристики рівнеміру BM70:

Пристрій моделі BM 70A використовується для постійного безконтактного контролю рівня різноманітних середовищ – рідин, в'язких мас, шламів, зріджених газів і окремих сипучих речовин. Його можна ефективно застосовувати в резервуарах із металу або бетону, включаючи бункери, навіть за складних експлуатаційних умов.

Щоб забезпечити взаємодію послідовного порту мікроконтролера з зовнішніми пристроями, слід реалізувати інтерфейс, який відповідатиме технічним вимогам. Він має характеризуватися стійкістю до електромагнітних завад, підтримувати передачу даних на значні відстані та дозволяти підключення до трьох десятків пристроїв у єдину мережу.

Наразі значного поширення набули серійні інтерфейсні протоколи, зокрема RS-232, RS-485 та RS-422 (RS – скорочення від Recommended Standard, тобто "рекомендований стандарт"). Серед них протокол RS-485 найбільш ефективно відповідає технічним потребам системи. Для впровадження цього стандарту слід застосувати сумісний апаратний інтерфейс.

Сигнали від температурних датчиків передаються до мікроЕОМ через роз'єми ХА1 і ХА2, тоді як дані з сенсора рівня потрапляють на вхід модуля інтерфейсу RS485 DA1. У цьому випадку використовується мікросхема SP485, виробництва компанії SYPEX, яка оптимізована під такі задачі.

Мікроелектронна обчислювальна машина, отримуючи сигнали від датчиків, виконує керування виконавчими елементами відповідно до закладеного алгоритму. У системі застосовується однокристальний

мікроконтролер ATmega162 виробництва компанії Atmel, який забезпечує стабільну та ефективну роботу керуючого модуля.

Мікроконтролери серії Classic характеризуються широкими можливостями вбудованої периферії. Конкретний склад периферійних модулів визначається моделлю пристрою та вказується у відповідній таблиці-сумарці.

Силові елементи системи з'єднуються через роз'єми ХА4–ХА13. Для керування ними застосовано транзисторну схему, що працює як електронний комутатор, в якій в емітерному колі встановлено світлодіод, пов'язаний з оптосимістором. До складу виконавчих пристроїв входять електромагнітні клапани моделі EB225B 20BD виробництва компанії EVSIS (рис. 3.4), а також реле, які активують пускачі електромагнітного типу.



Рисунок 3.4 – 2/2-ходовий клапан прямої дії фірми EVSIS

Електромагнітний клапан має наступні технічні характеристики:

- діапазон тиску: макс. 10 Бар;
- Допустима температура зовнішнього повітря – не більше 40 °С, за умови, що температура робочого середовища становить до 180 °С.
- Температура середовища: 180 °С;
- напруга живлення котушки: 24В, 50Гц.

Інформація про перебіг процесу відображається за допомогою рідкокристалічного дисплея HG1, у ролі якого застосовано модель SC2004A від компанії Volumin, що працює на базі контролера Hitachi HD44780.

Керування функціоналом здійснюється через набір кнопок SB1–SB7, кожна з яких виконує певну операцію: запуск, зупинка, вибір режиму,

встановлення параметрів, збільшення/зменшення значень та скидання. Вони підключені до портів RB4–RB7 і RE2 мікроконтролера.

На основі принципової схеми було створено монтажне креслення з'єднань (рис. 3.5).

Принципова електрична схема керування процесом охолодження (рис. 3.6) включає напівпровідниковий температурний сенсор DA1, яким слугує мікросхема TMR-06.

Основним елементом, що здійснює перетворення фізичної величини, є температурний датчик. Його вибір ґрунтується на робочому температурному діапазоні та допустимому відхиленні. У даному випадку вимірювана температура варіюється від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  з точністю до  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

З огляду на невисоку потребу в точності та відносно вузький діапазон, оптимальним варіантом для такої системи є застосування напівпровідникових температурних сенсорів.

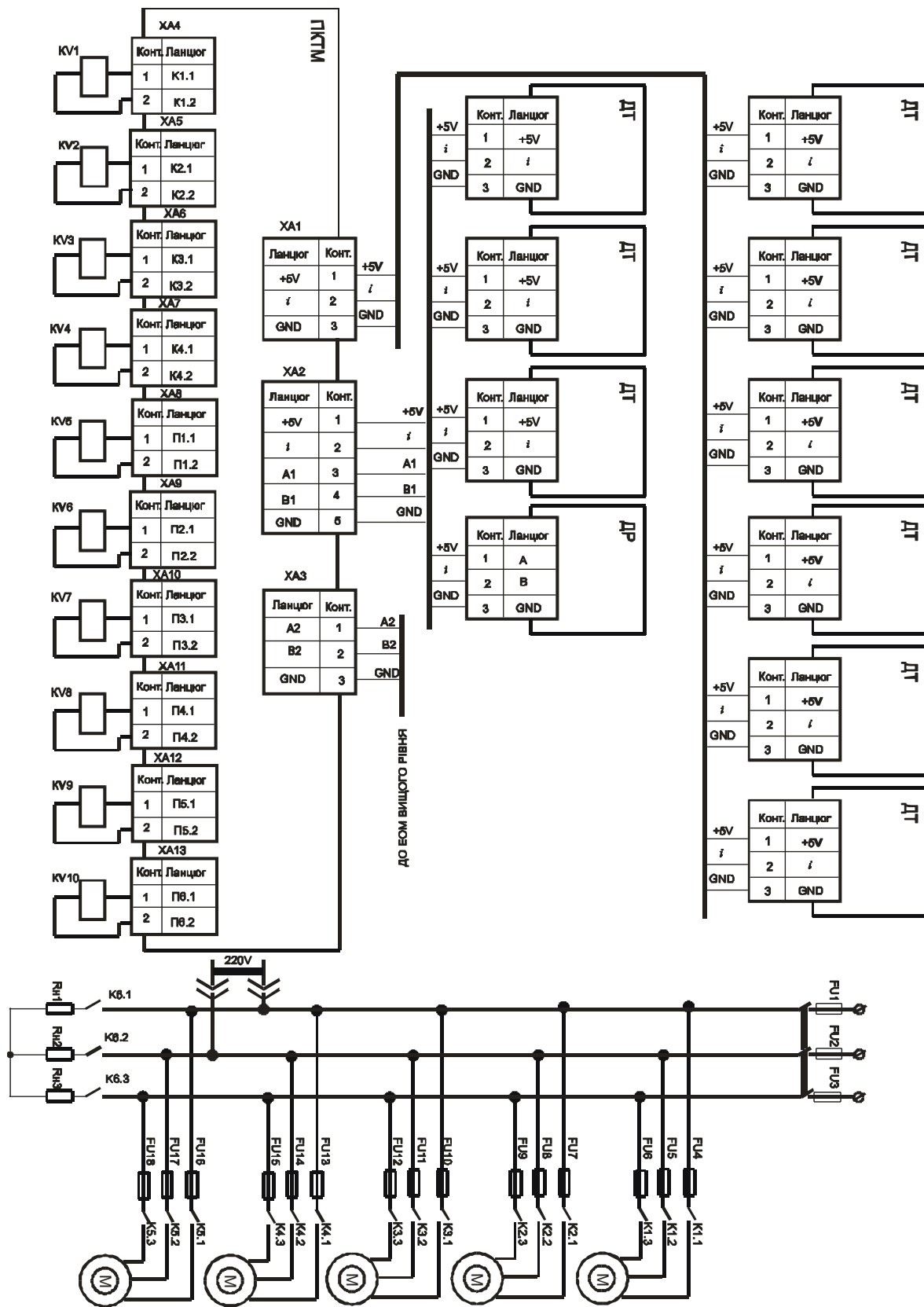


Рисунок 3.5 – Схема з'єднань

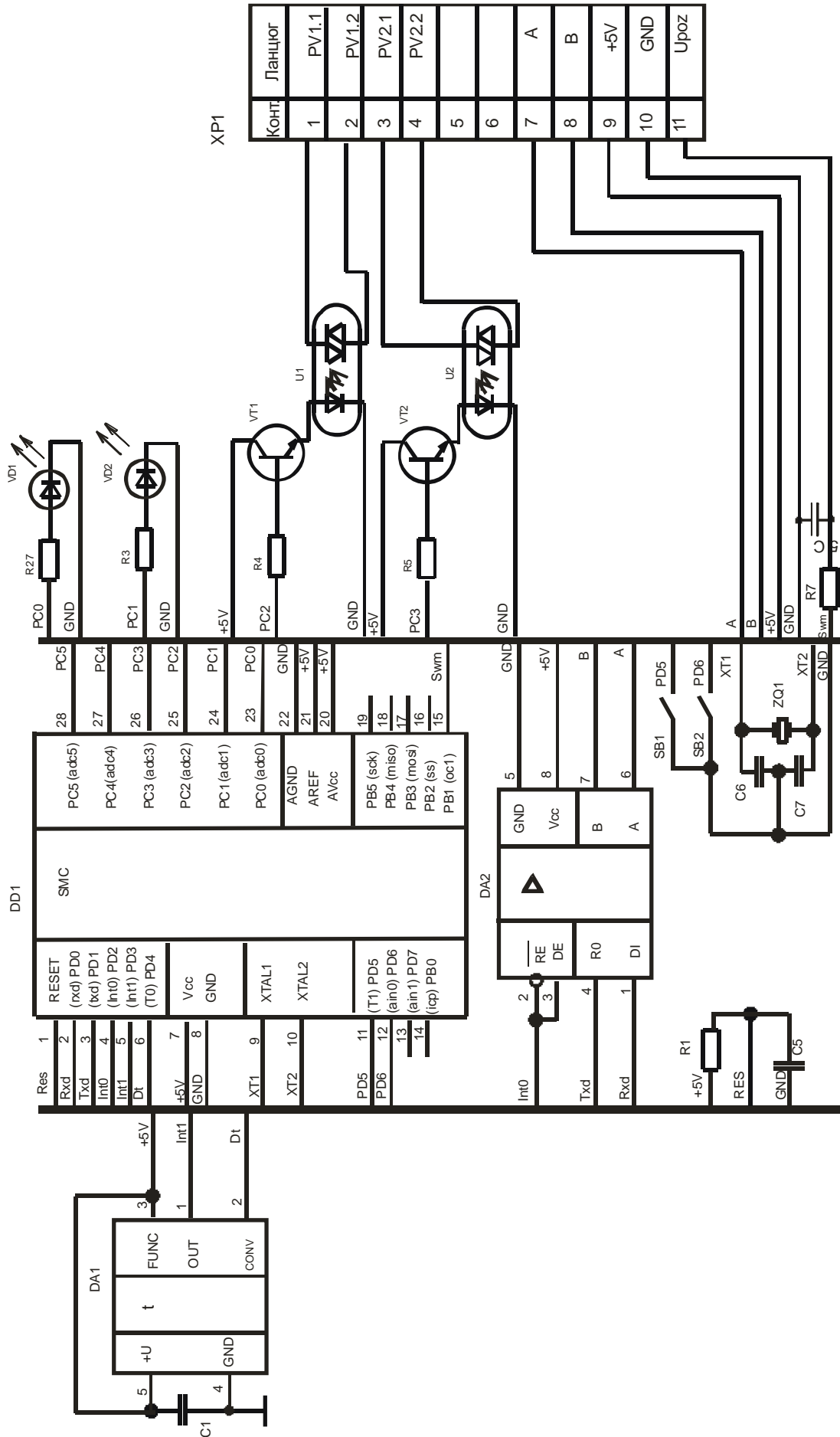


Рисунок 3.6 – Пристрій керування процесом охолодження

Наразі на ринку представлено великий вибір напівпровідникових температурних сенсорів, що відрізняються як за рівнем чутливості, так і за типами вихідного сигналу. Для розробки даної системи оптимальним варіантом є використання перетворювача з чутливістю приблизно  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  та генерацією частотного вихідного сигналу. Одним із прикладів таких пристроїв є мікросхема моделі TMP-06, розроблена компанією Analog Devices, що має відповідні технічні характеристики для ефективної роботи в заданих умовах.

- діапазон температури, що вимірюється –  $-40\div+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- точність –  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- напруга живлення –  $3\div 5\text{ В}$ .

У ролі центрального контролера використано однокристальну мікроЕОМ типу AT90S4433 із серії AVR CLASSIC, що забезпечує достатню продуктивність для керування системою.

Для індикації додаткових параметрів доцільно використовувати світлодіоди з високою світловіддачею, малим струмом споживання та здатністю працювати при напрузі до 5 В. Таким характеристикам відповідають моделі серії КИПД 01Б-1Л, які ідеально підходять для подібних завдань.

Конструкція системи управління глазурувальним агрегатом загалом аналогічна, проте її особливістю є змінена кількість задіяних виконавчих вузлів.

Монтажна електрична схема, що реалізує логіку функціонування пристрою, складена на основі відповідної принципової схеми й наведена на рис.3.7.

### **3.3 Пристрій керування системою**

Система керування (рис.3.8) включає мікроконтролер ATmega162 від компанії Atmel, який виконує функції обчислювального модуля. Для забезпечення комунікації з іншими модулями використано інтерфейси SP485, які відповідають за як зовнішню, так і внутрішню передачу даних (DA1, DA2).

Як елемент введення застосовується клавіатурний блок із шістьма кнопками (позначення SB1–SB6). Для виведення повідомлень текстового формату використовується LCD-дисплей HG2 моделі HDD44, який також дозволяє здійснювати базову індикацію та фіксацію інформації.

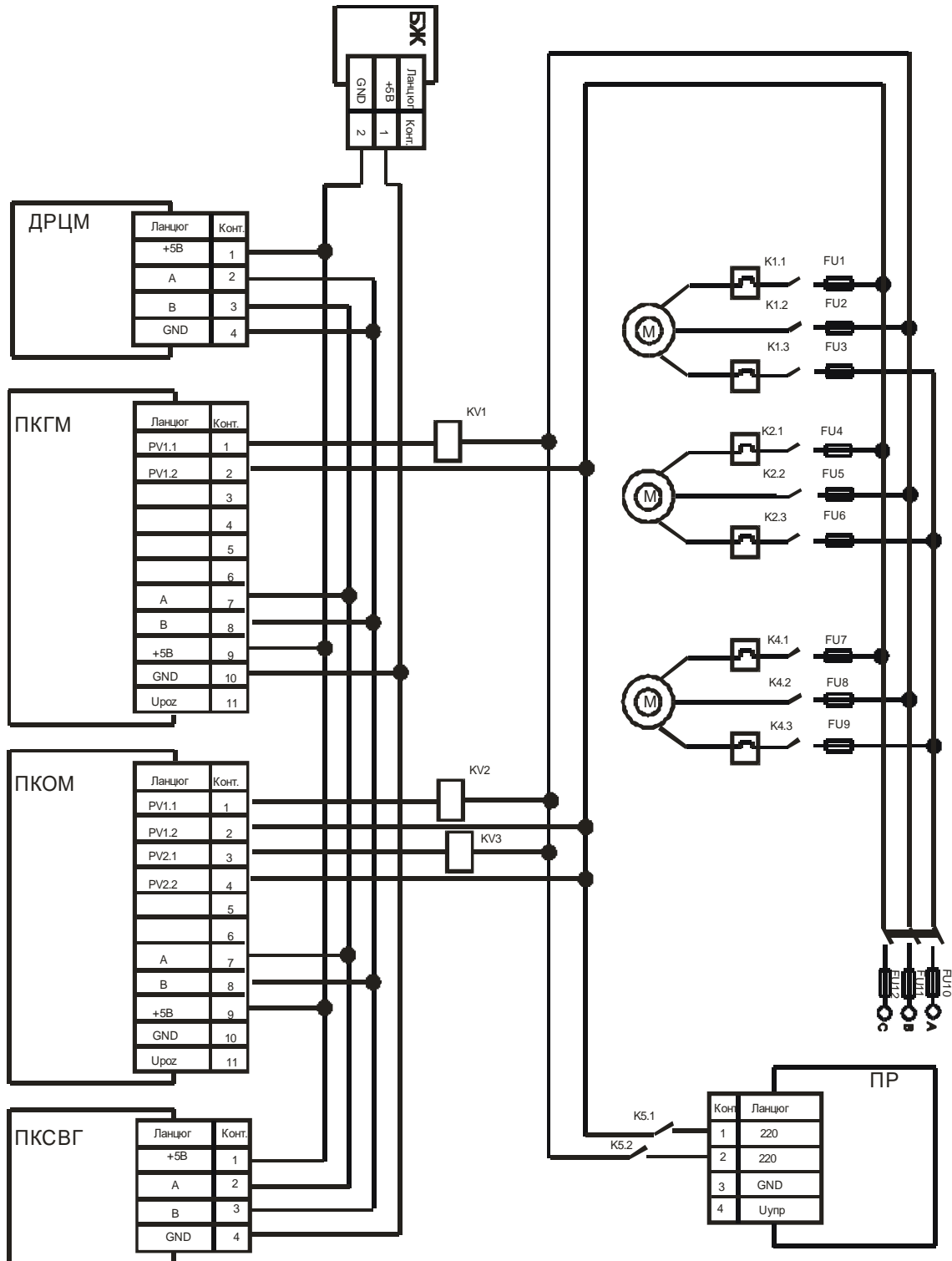


Рисунок 3.7 – Схема з'єднань

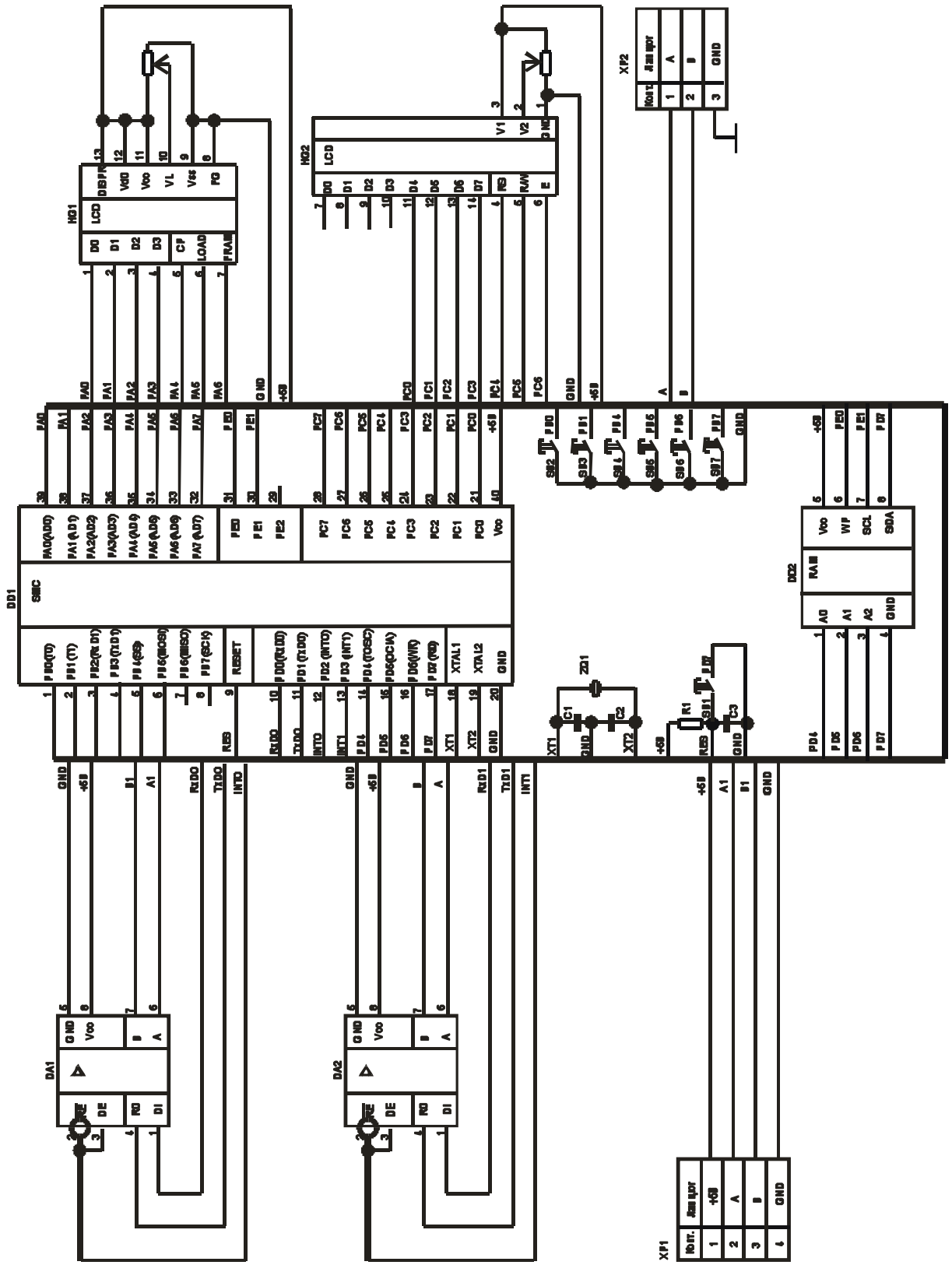


Рисунок 3.8 – Пристрій контролю системи виготовлення цукерок

## 4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

### 4.1 Визначення динамічних властивостей елементів системи

Система автоматичного контролю температури цукеркової маси під час темперування включає два окремих регулювальних контури: один відповідає за зниження температури під час охолодження, інший – за її підвищення при нагріванні. Для побудови структурних схем цих контурів необхідно визначити передаточні функції компонентів, що входять до складу системи автоматичного керування.

Передаточна функція системи регулювання отримана шляхом аналізу рівняння теплового балансу разом із рівнянням теплопередачі з урахуванням інерційних властивостей об'єкта, як зазначено у джерелах [13, 14].

Оскільки процеси нагріву та охолодження мають динамічний характер, вони супроводжуються зміною кількості тепла в об'єкті та взаємодією теплових потоків. При цьому передбачається, що усі фізичні характеристики, окрім температури, залишаються сталими. Для подальшого аналізу розглянемо формулювання теплового балансу

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3, \quad (4.1)$$

де  $dQ_1$  – це енергія, що передається тілу зовні, зокрема теплота, яку несе вода, що забезпечує процеси нагрівання та охолодження шоколадної маси, Дж;  $dQ_2$  – кількість теплоти, яка викликає зміну внутрішньої енергії шоколадної маси, тобто зміну її теплового стану, Дж;  $dQ_3$  – втрати тепла в системі, Дж.

З урахуванням усіх вказаних компонентів теплового балансу рівняння можна подати в такому вигляді

$$dQ_1 = P d\tau \quad (4.2)$$

де  $P$  – потужність, яка підводиться до об'єкту, Вт;  $d\tau$  – елемент часу;

$$dQ_2 = M c dT \quad (4.3)$$

де  $dt$  – зміна температури тіла за час  $d\tau$ , К;  $M$ – маса шоколадної маси, кг; визначається наступним чином

$$M=V*\rho \quad (4.4)$$

де  $V$ – об’єм шоколадної маси в температуру чому циліндрі, який становить 500 л;  $\rho$  – щільність шоколадної маси, 1235 кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – питома теплоємність шоколадної маси, Дж/кг\*К; її значення становить 1482 Дж/кг\*К.

$$dQ_3 = \kappa F (t-t_0) d\tau \quad (4.5)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт теплопередачі Вт/ м<sup>2</sup>\*К;  $F$ – площа поверхні нагріву, м<sup>2</sup>; складає 6 м<sup>2</sup>.

Таким чином, (1.1) записується у вигляді

$$P d\tau = Mcdt + \kappa F(t-t_0) d\tau \quad (4.6)$$

Передаточна функція об’єкту регулювання має вигляд

$$W_{об} = \frac{0,0061}{565p+1}; K_{об} = \left[ \frac{C^\circ}{Bm} \right] \quad (4.7)$$

Характеристика датчика описується як аперіодична ланка першого порядку з часовою сталою 35 с, що свідчить про значну теплову інерційність. Враховуючи особливості електричної схеми підключення, передавальний коефіцієнт дорівнює 0,238 В/°С. У результаті математичне подання передаточної функції сенсора має такий вигляд

$$W_o = \frac{0,238}{35p+1} \quad (4.8)$$

Виконавчий механізм включає такі основні компоненти: електродвигун асинхронного типу, насосний агрегат і електроклапан з двопозиційним керуванням. Характеристики асинхронного двигуна за параметром кутової швидкості описуються передаточною функцією аперіодичної першої ланки, що має наступну математичну форму

$$W_{об}(p) = \frac{\omega(p)}{U_y(p)} = \frac{\kappa_{об}}{T_m p + 1}, \quad (4.9)$$

де

$$\kappa_U = \frac{M_{пном}}{U_{ун}}, \quad \kappa_{\omega} = \frac{\kappa_U}{\kappa_{\omega}} \quad (4.10)$$

де  $M_{пном}$  – номінальний пусковий момент, Н \*м; дорівнює 1,6 Н\*м;  $U_{ун}$  – номінальна напруга обмотки керування, В; становить 110В.

Підставивши відповідні значення до формули отримаємо

$$\kappa_U = \frac{1.6}{110} = 0,014 \left[ \frac{H \cdot M}{B} \right] \quad (4.11)$$

У цьому випадку значення параметрів передаточної функції отримано виключно на основі паспортної інформації, без врахування графічно заданої регульовальної кривої, з використанням такого математичного виразу

$$\kappa_{\omega} = \frac{30(M_{пном} - M_{ном})}{\pi n} \quad (4.12)$$

де  $n$  – частота обертання при номінальній напрузі керування, об/хв.

Підставивши відповідні значення до виразу (1.13) отримаємо

$$\kappa_{\omega} = \frac{(1.6 - 0.83) \cdot 30}{3.14 \cdot 3500} = 0.0021 [H \cdot m \cdot c] \quad (4.13)$$

Таким чином, коефіцієнт передачі двигуна дорівнює

$$\kappa_{\omega} = \frac{0.014}{0.0021} = 6.3 \left[ \frac{1}{B \cdot C} \right] \quad (4.14)$$

Електромеханічна стала двигуна становить 0,07 с. Відповідно, передатна функція цього двигуна матиме такий вигляд

$$W_{\omega}(p) = \frac{6.3}{0,07p + 1} \quad (4.15)$$

Передавальні коефіцієнти для клапана та насоса розраховуються в умовах номінального режиму роботи. Водночас враховується, що температура шоколадної маси повинна знизитись на 16 °С, а згодом підвищитись на 4 °С. Тобто необхідно обчислити теплову енергію (потужність), яка витрачається на охолодження продукту з 45 °С до 29 °С, а потім – на повторне підвищення температури до 33 °С. Для проведення цих розрахунків використовується відповідна формула

$$\Delta\Theta = \kappa_{дв} * \kappa_{н} * \kappa_{кл} * \kappa_{об} \quad (4.16)$$

Де  $\Delta\Theta$  – зміна температури шоколаду , дорівнює  $16^{\circ}\text{C}$  при охолодженні і  $4^{\circ}\text{C}$  при нагріванні;  $K_{дв}$ ,  $K_{н}$ ,  $K_{кл}$ ,  $K_{об}$  – коефіцієнти передачі двигуна, насоса, клапан та об’єкту керування відповідно, були обчислені вище.

Таким чином, можемо записати наступне

$$16^{\circ}\text{C}=6,3 * K_{н} * K_{кл} * 0,0064 \quad (4.17)$$

$$4^{\circ}\text{C}=6,3 * K_{н} * K_{кл} * 0,0064 \quad (4.18)$$

Коефіцієнт виконавчого вузла, до якого входять електродвигун, насос і регулюючий клапан, становить  $2584 \text{ Вт/В}$  при охолодженні та  $646 \text{ Вт/В}$  у разі нагрівання. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що у наявному контурі управління використовується пропорційний принцип із передавальним коефіцієнтом  $K_p$ : для зниження температури – 7, а для її підвищення – 16. Візуальне подання структурних моделей систем охолодження й нагріву наведено відповідно на рис.4.1 та 4.2. Для подальшого аналізу ефективності температурного регулювання шоколадної маси доцільно визначити передаточні функції як відкритої, так і замкненої систем автоматичного управління.

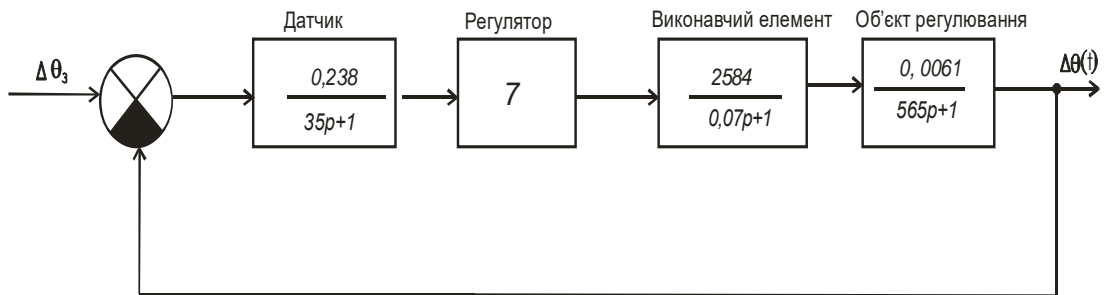


Рисунок 4.1 – Структурна схема контуру охолодження

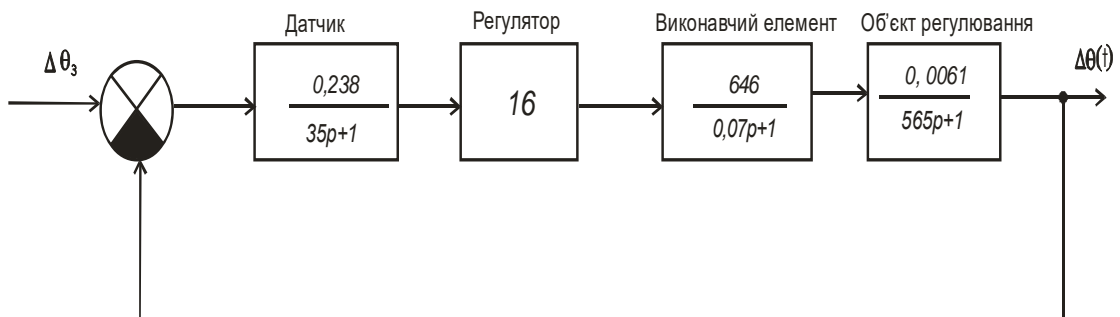


Рисунок 4.2 – Структурна схема контуру нагрівання

Для обох контурів керування передаточна функція відповідної ділянки системи формується шляхом множення функцій передавання, що відповідають датчику, регулятору, виконавчому механізму та самій регульованій ланці

$$W_{зч}(p) = W_{д}(p) \cdot W_{BE}(p) \cdot W_{OP}(p) \quad (4.19)$$

Згідно з формулою (1.20), передаточну функцію для розімкненої системи можна подати у такій формі

– для процесу охолодження

$$W_{ох}(p) = \frac{3.8}{(35p + 1)(585p + 1)} \quad (4.20)$$

– для процесу нагрівання

$$W_{наг}(p) = \frac{0.95}{(35p + 1)(585p + 1)} \quad (4.21)$$

З метою аналізу ефективності температурного регулювання шоколадної маси під час її охолодження та підігріву, у середовищі MATLAB побудовано відповідні перехідні характеристики систем управління. Результати моделювання відображено на рис. 4.3 (для охолодження) і 4.4 (для нагріву).

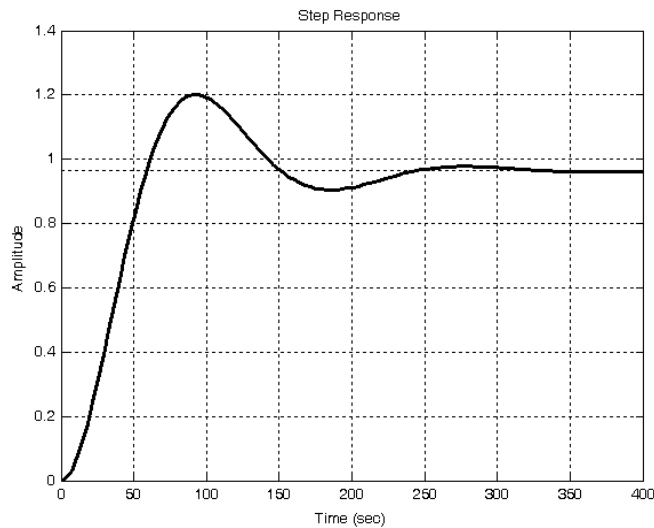


Рисунок 4.3 – Перехідний процес в контурі охолодження

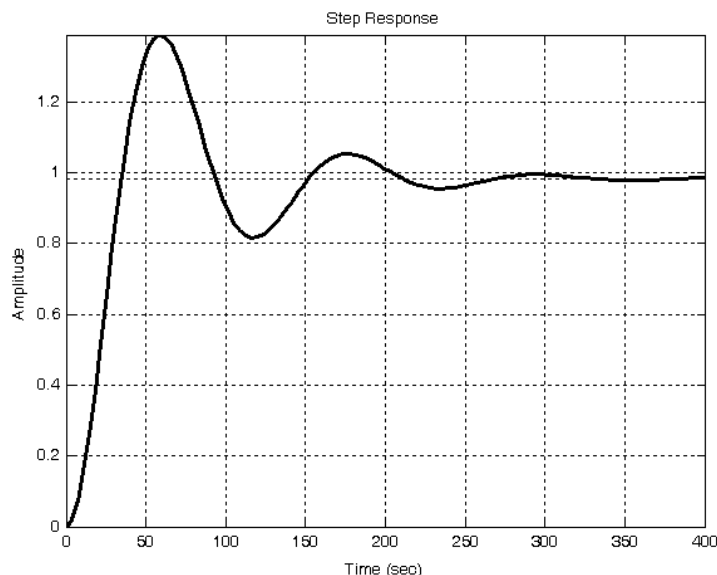


Рисунок 4.4 – Перехідний процес в контурі нагрівання

На основі аналізу перехідних процесів було встановлено ключові характеристики ефективності роботи систем терморегулювання. Виявлені параметри наведені у табл.4.1, що відображає рівень якості регулювання температурних режимів при охолодженні та нагріванні.

Таблиця 4.1 – Основні параметри якості роботи систем температурного керування.

Показники якості системи	Процес охолодження	Процес нагрівання
1. Характер перехідного процесу	коливальний	аперіодичний з перерегулюванням
2. Час регулювання $t_{рег}$ , с	330	210
3. Величина перерегулювання, %	20	10
4. Помилка в усталеному режимі, %	5	3,8

Після вивчення технологічного процесу було розроблено функціональну схему автоматизованої системи регулювання температури цукеркової маси на етапі темперування. На її основі побудовано структурні схеми контурів терморегуляції – охолодження та підігріву. За допомогою імітаційного

моделювання в середовищі MATLAB створено математичні моделі цих контурів для аналізу динамічної поведінки системи. Було визначено ключові характеристики: час реакції, форма перехідного процесу, ступінь перерегулювання та точність. Показники якості можна вдосконалити шляхом впровадження регулятора зі змінним коефіцієнтом підсилення, реалізованого на базі моделі у просторі станів, що дозволить зменшити час встановлення і підвищити точність температурного керування.

#### 4.2 Розрахунок коефіцієнтів передаточної функції регулятора

Коефіцієнти передаточної функції регулятора обчислюються згідно з наведеним раніше алгоритмом. Для неперервної частини системи автоматичного регулювання у режимі охолодження отримано такі значення параметрів:  $a = 0.029$ ,  $b = 1.77 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha = 1.856 \times 10^{-4}$ . У режимі нагрівання параметри набувають значень:  $a = 0.029$ ,  $b = 1.77 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha = 4.804 \times 10^{-5}$ . Залежно від вибраного кроку квантування були визначені відповідні передаточні функції регуляторів. На основі цих розрахунків побудовано номограми для знаходження коефіцієнтів  $K_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$  і  $b_2$ . Числові значення, використані при побудові номограм, подано в табл.4.1 для охолодження та в табл.4.2 для нагрівального процесу.

Таблиця 4.1- Значення коефіцієнтів передаточної функції регулятора при охолодженні

h,c	A	B	$K_0$	$a_1$	$b_1$	$b_2$
10	0,751	0,983	62,476	0,475	-1,735	0,739
30	0,424	0,95	9,145	0,425	-1,374	0,403
50	0,24	0,918	4,22	0,378	-1,158	0,22
70	0,135	0,887	2,69	0,334	-1,023	0,12
90	0,076	0,857	1,99	0,295	-0,934	0,066
110	0,043	0,829	1,604	0,26	-0,872	0,036
120	0,032	0,815	1,467	0,244	-0,847	0,026
130	0,024	0,801	1,354	0,229	-0,825	0,02
140	0,018	0,787	1,26	0,216	-0,805	0,014
150	0,014	0,774	1,18	0,203	-0,78	0,011

На рис. 4.7 представлено номограми, які дозволяють визначити значення коефіцієнта  $K_0$ , а також параметри  $a_1$ ,  $b_1$  і  $b_2$ , що входять до передаточної функції регулятора, оптимізованого за критерієм швидкодії.

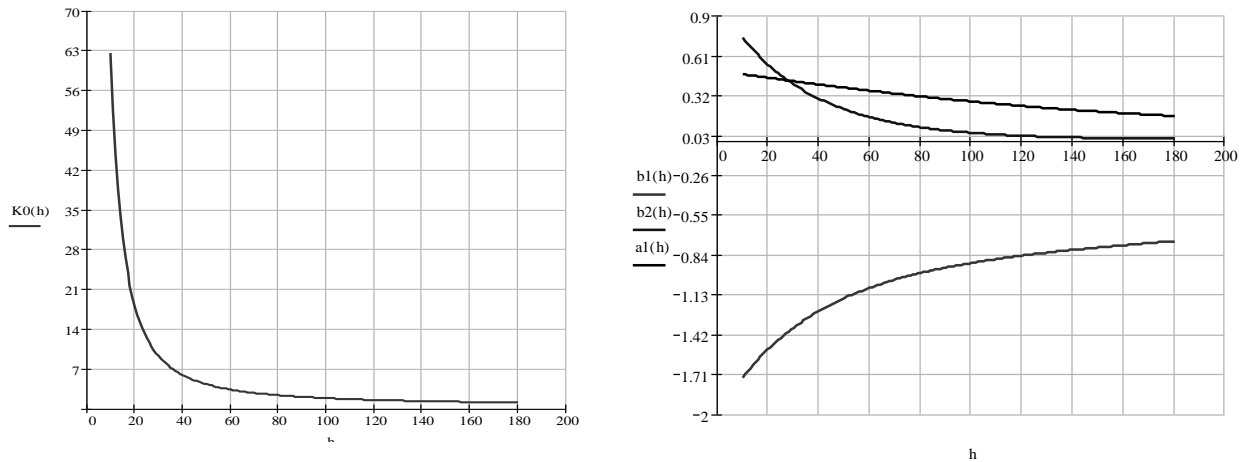


Рисунок 4.7 – Номограма для визначення коефіцієнту  $K_0$  та коефіцієнтів  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  передаточної функції регулятора при охолодженні

Таблиця 4.2- Значення коефіцієнтів передаточної функції регулятора при нагріванні.

h,с	A	B	$K_0$	$b_1$	$b_2$	$a_1$
10	0751	0,982	241,43	0,475	-1,734	0,738
20	0,565	0,965	69,53	0,45	-1,53	0,545
30	0,424	0,948	35,36	0,425	-1,37	0,402
40	0,319	0,932	22,61	0,401	-1,25	0,297
50	0,24	0,915	16,34	0,378	-1,15	0,219
60	0,18	089	12,74	0,353	-1,079	0,162
70	0,135	0,88	10,44	0,334	-1,019	0,12
80	0,102	0,868	8,87	0,313	-0,97	0,088
90	0,076	0,853	7,74	0,294	-0,92	0,065
100	0,057	0,838	6,88	0,276	-0,89	0,048

На рис.4.8 зображено номограми, які дають змогу визначити значення коефіцієнтів передаточної функції регулятора залежно від заданих параметрів системи.

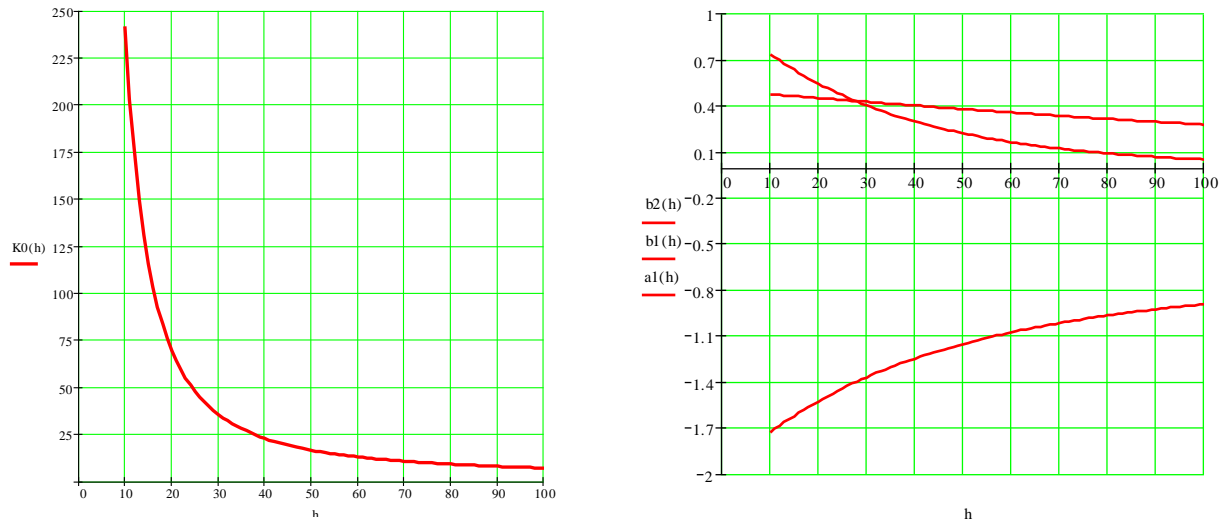


Рисунок 4.8 – Номограма для визначення коефіцієнту  $K_0$  та коефіцієнтів  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  передаточної функції регулятора при нагріванні

### 4.3 Дослідження якості синтезованої системи

Для оцінювання ефективності створеної системи керування проаналізуємо ключові параметри якості: тривалість виходу на встановлений режим, величину перерегулювання та статичну похибку стабілізації.

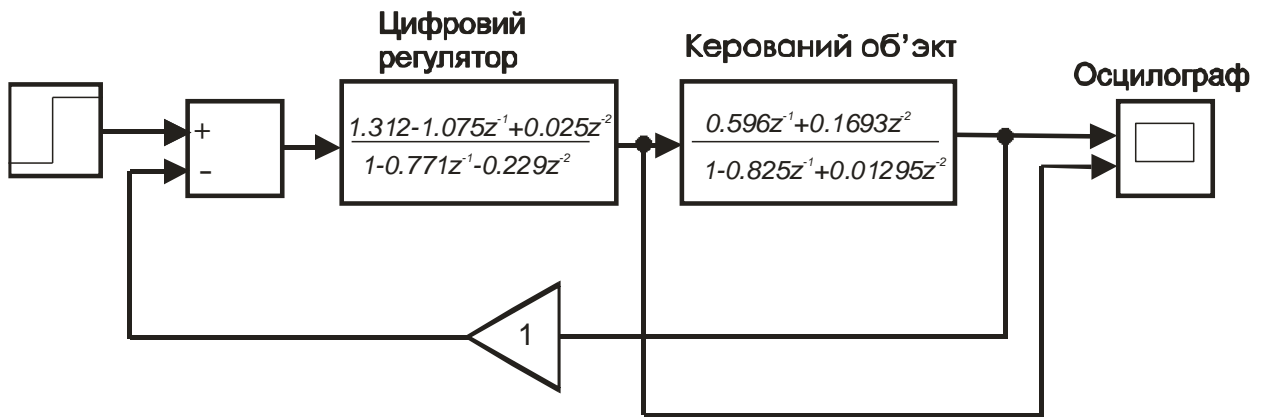
Перехідні процеси в системі були змодельовані за допомогою імітаційного підходу в програмному середовищі MATLAB, з урахуванням різних значень кроку квантування.

- охолодження –  $h=130\text{с}$ ,  $h=140\text{с}$ ,  $h=150\text{с}$ ;
- нагрівання –  $h=80\text{с}$ ,  $h=90\text{с}$ ,  $h=100\text{с}$ .

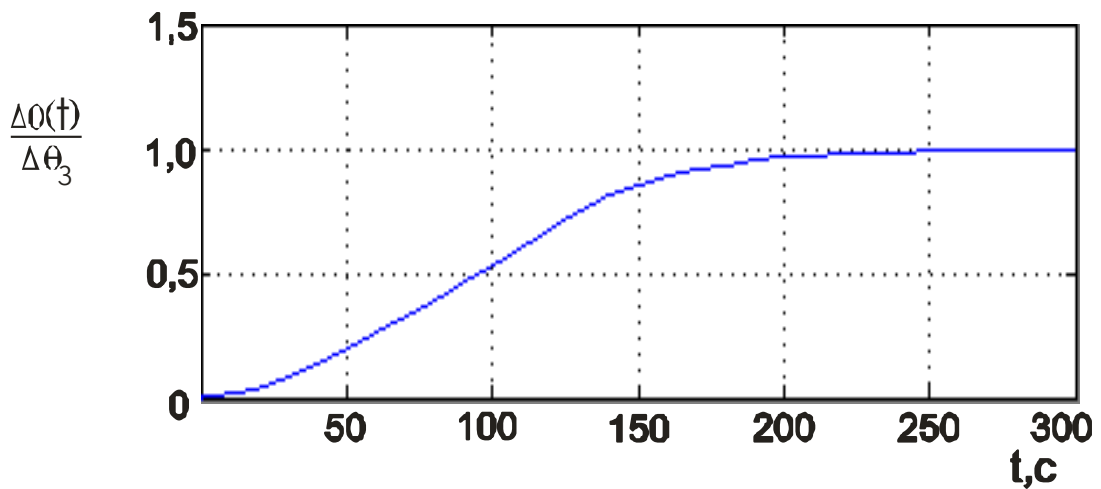
Для дослідження перехідних процесів у системі керування охолодженням була побудована імітаційна модель, яка містить низку функціональних блоків. Зокрема, в її склад входить генератор сигналу ступінчастої форми, в параметрах якого задано: початок подачі імпульсу – при нульовому значенні часу, значення на вході та виході – рівні одиниці, інтервал вибірки – мінус один. Також до моделі включено блоки цифрового регулятора з заданими передаточними функціями, а також модель об'єкта. Для візуалізації результатів використовується двоканальний осцилограф: один вхід фіксує вихід об'єкта, інший – відповідь регулятора.

Моделювання для системи охолодження проведено при значеннях кроку квантування  $h = 130$  с,  $140$  с і  $150$  с. Результати для  $h = 130$  с, зокрема схема моделі, нормалізована перехідна характеристика та сигнал керування, наведено на рис.4.9

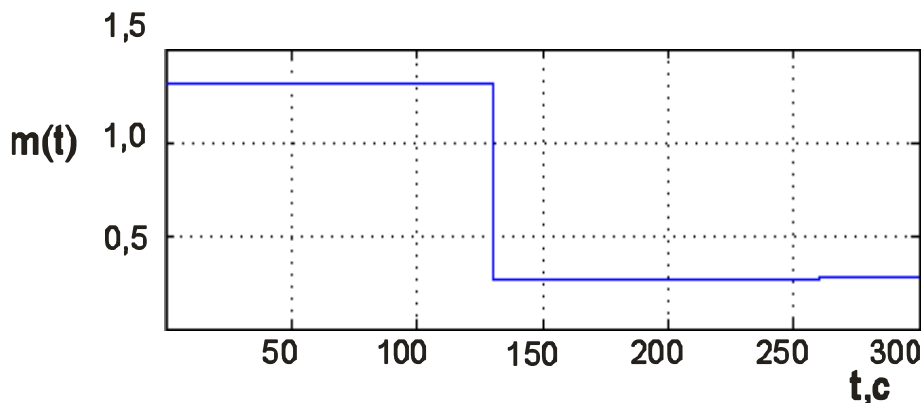
У випадку моделювання системи керування нагріванням застосовано схожий підхід. Аналіз виконано для  $h = 80$  с,  $90$  с,  $100$  с. Результати для першого з них – зображені на рис.4.10.



а) схема моделювання

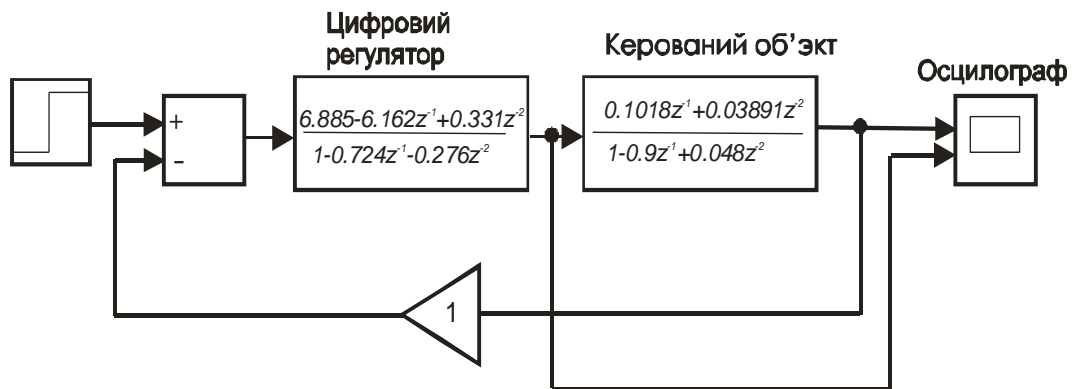


б) перехідний процес

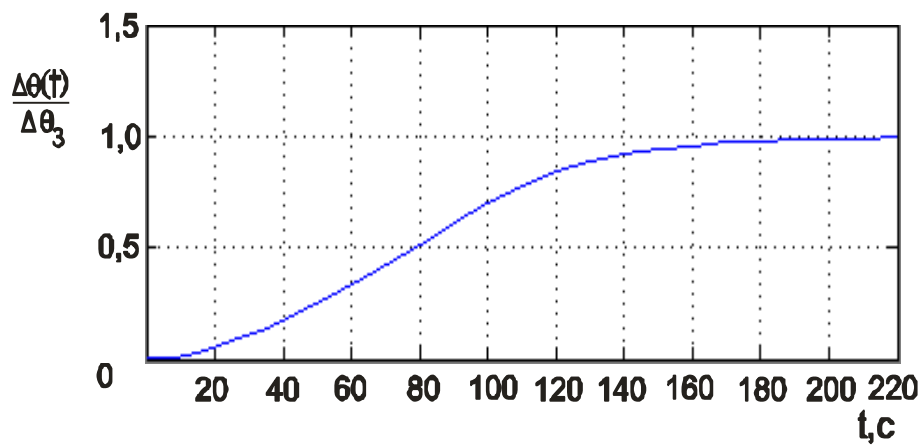


в) керуючий вплив

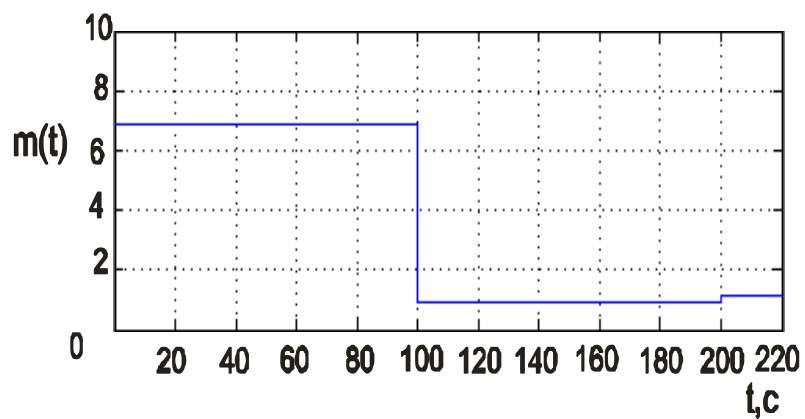
Рисунок 4.9 – Контур охолодження



а) схема моделювання



б) перехідний процес



в) керуючий вплив

Рисунок 4.10 – Контур нагрівання

У табл. 4.5 та 4.6 наведено характеристики якості перехідних процесів у синтезованій системі, а також значення амплітуд керуючих впливів для режимів охолодження й нагрівання відповідно.

Таблиця 4.5 – Результати оцінки ефективності регулювання та величини впливів для процесу зниження температури

Крок квантування $h, c$	130	140	150
величина перерегулювання $\sigma, \%$	–	–	–
Помилка в усталеному режимі $\delta, \%$	0,2	0,33	0,4
амплітуда керуючого діяння на першому кроці квантування $m_0$	1,312	1,221	1,144
амплітуда керуючого діяння на другому кроці квантування $m_1$	0,238	0,246	0,251

Таблиця 4.6 – Значення показників ефективності регулювання синтезованої автоматичної системи, а також зазначено амплітуди впливів керуючих сигналів під час реалізації процесу нагріву

крок квантування $h, c$	80	90	100
величина перерегулювання $\sigma, \%$	–	–	–
помилка в усталеному режимі $\delta, \%$	0,17	0,23	0,34
амплітуда керуючого діяння на першому кроці квантування $m_0$	8,876	7,74	6,885
амплітуда керуючого діяння на другому кроці квантування $m_1$	0,269	0,548	0,721

Найбільш доцільним вважається такий інтервал квантування, за якого одночасно досягається мінімальний час стабілізації системи та найменша величина регулювальної похибки. Оскільки остання перебуває в межах допустимого, оптимальним приймаємо найменший можливий інтервал: 130 секунд – для охолодження, та 80 секунд – для нагрівального процесу.

## ВИСНОВКИ

В даній пояснювальній записці досліджено автоматизовану систему керування температурою цукеркової маси на підприємстві харчової промисловості. Проведено аналіз наявних рішень у сфері автоматизації відповідного технологічного процесу та запропоновано вдосконалену систему управління, адаптовану до умов сучасного виробництва.

Розроблена система створена з використанням сучасної мікропроцесорної бази та реалізована на основі однокристальної мікроЕОМ Atmega 162 виробництва Atmel. Вона забезпечує повний цикл функціонування: збір і обробку даних, прийняття рішень, регулювання параметрів та моніторинг технологічного стану обладнання.

Керування температурою та рівнем цукеркової маси здійснюється за допомогою високоточних сенсорів, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для виготовлення пралінових виробів. У разі відхилення від заданих параметрів система автоматично активує світлову та звукову сигналізацію для оперативного реагування персоналу.

Оптимізацію процесу темперування реалізовано за рахунок використання регулятора з адаптивним коефіцієнтом підсилення, що дозволяє суттєво скоротити час налаштування, мінімізувати перерегулювання та забезпечити стабільність температурних режимів під час охолодження та підігріву.

В результаті реалізації даної бакалаврської роботи досягнуто повного розкриття поставленої мети, а всі заплановані інженерні задачі виконано в повному обсязі.

## Література

1. Драгилев А.И, Лурье И.С. Технология кондитерских изделий. – М.: ДеЛиПринт, 2001. – 284 с.
2. Загальна технологія харчових виробництв у прикладах та задачах/А.Л. ТОВАЖИЛИНСЬКИЙ.: К.: Вища школа, 2005.- 343с.
3. Драгилев А.И., Сезанаев Я.М. Оборудование для производства сахарных кондитерских изделий: Учеб. для нач. проф. образования. – М.: ИРПО; Изд. центр «Академия», 2000. – 272 с.
4. Общая технология пищевых производств /Под ред. Назарова Е.Н. – М.: Агропромиздат, 1989.– 435с.
5. Конфеты / Истомина М.М., Соколовская Т.А. , Талейсник М.А. и др. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 227 с.
6. Ефетова К.Ф., Португал В.М. Планирование производства в условиях АСУ. – Киев: Техника, 1989. – 278 с.
7. И.С.Лурье. Технология и технологический контроль кондитерского производства. М: «Лёгкая и пищевая промышленность», 1981.
8. Технология кондитерских изделий. Под редакцией Г.А. Маршалкина.. М.: «Пищевая промышленность», 1978г.
9. Вальков В.М. Вершин В.Е. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. – Л.: Политехника, 1991. – 269 с.
10. Кофка Б.В., Лурье И.С., Технологический контроль кондитерского производства. М.: «Пищевая промышленность», 1967г.
11. Соколов В.И. Автоматизация технологических процессов пищевых производств. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1991. – 420 с.

12. Новая технология производства пралиновых конфет /Зобова Р.Г., Талейсник М.А., Игнатъева Л.П., Демидов В.И. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 72 с.
13. Технология кондитерских изделий / Под ред. Маршалкина Г.А.– М.: Агропромиздат, 1978.– 532с.
14. А.В. Зубченко Влияние физико-химических процессов на качество кондитерских изделий. –М.: Агропромиздат, 1986. – 321с.
15. Селезнева Г. Д. Экспертиза качества кондитерских изделий. Методическое руководство МВШЭ. МР-020-2003. – М.: МВШЭ, 2003. – 106 с.
16. Автоматика и автоматизация пищевых производств./М.М. Благовещенская, Н.О. Воронина и др. М.: Агропромиздат, 1991 – 239 с.
17. Автоматизация технологических процессов пищевых производств. /Под ред Карпина Е.Б. М.: Агропромиздат, 1985 – 376 с.
18. Скобло Д.И. Глыбин И.П. Автоматический контроль и регулирование процессов пищевых производств. К.:Техника, 1974 – 488 с.
19. Ключев А.С. Проектирование систем автоматизации технологических процессов./Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х.- М.:Энергия, 1980.-512 с.
20. Остапчук Н.В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств. – К.: Вища школа, 1991.–242с.
21. Драгилев А.И. Практикум по расчетам оборудования кондитерских производств. – М.: Агропромиздат, 1990.–278с.
22. Живописцев Е.Н., Косицын О.А. Электротехнология и электроосвещение. – М.: Агропромиздат, 1990.–303с.
23. Статические и динамические экспертные системы./ Попов Э.В., Фоминых И.Б., и др. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 320 с.
24. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты

интегральных микросхем.: Справочник. В 2-х т./Н.Н. Аверьянов, А.И. Березенко, Ю.И. Борщенко и др.; под ред. В.А. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1988. Т1 – 368 с.

25. Каминский М. Л., Каминский В. М. Монтаж приборов и систем автоматизации. Учебник для СПТУ. М.: Высш. шк., 1988.-296 с.

26. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. – М. : Высшая школа, 1986. – 335с.

27. Гостев В.И., Стеклов В.К. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами : Справочник. – К.: Радиоаматор,1998.–704с.

28. Жидецкий В.Ц. Основи охорони праці. Підручник – Львів: Афіша, 2002. – 320 с.

29. Практикум з питань охорони праці. Навч. посібник. / За ред. В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.

30. Губський А.І. Цивільна оборона. Підручник для вищих учбових закладів. – К.: Мін. Освіти, 1995. – 216 с.

31. Гайдамак В.А. Ликвидация последствий радиоактивного заражения /М.: Энергоиздат, 1981. – с.

32. Гражданская оборона на объектах агропромышленного комплекса /И.М.Дмитриев, Г.Я.Курочкин,О.М.Мдинишвили, и др.; Под ред Н.С.Николаева, И.М.Дмитриева. – М. Агропромиздат, 1990. – 354 с.

33. Депутат О. П., Коваленко І. В., Мужик І. С. Цивільна оборона. Навч. посібник /За ред. полковника В.С.Франчука - Львів, Афіша, 2000 - 336 с.

34. Миценко І. М., Мезенцева О. М. Цивільна оборона: навчальний посібник - Кіровоград: Кіровоградська районна друкарня, 2003. - 404 с.

35. Элементы систем автоматического управления и контроля /  
Н.И.Подлесный, В.Г. Рубанов.– 2-е изд., перераб. и доп.–К.:Выща школа.  
Головное изд-во, 1982.–477с.