

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

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Система автоматичного регулювання температури в
збірнику какао тертого при виготовленні шоколаду»**

Виконав здобувач III курсу групи АК-22мб
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

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

_____ Юрій ФРУНЗА

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

_____ Роман ЖЕСАН

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький – 2025 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра автоматизації виробничих процесів
Рівень вищої освіти бакалавр
Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

« 03 » лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Фрунзи Юрія Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Система автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого при виготовленні шоколаду
- Керівник роботи Жесан Роман Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- Строк подання здобувачем роботи до захисту 31.05.2025 р.
- Мета та завдання кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматичного керування температурою в збірнику какао тертого при виготовленні шоколаду. 1. Огляд технологічного процесу виробництва шоколадної маси; 2. Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів; 3. Проектування системи автоматичного регулювання; 4. Практична реалізація системи автоматичної регулювання.
- Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

Анотація

на кваліфікаційну роботу здобувача групи АК-22мб Фрунзи Юрія Ігоровича зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему: «Система автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого при виготовленні шоколаду».

Кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості регулювання температури в збірнику какао тертого. В існуючій автоматизованій системі управління технологічним процесом виробництва шоколадної маси використовується пропорційний регулятор, який при значних збуреннях, що можуть діяти в системі, не задовольняє вимогам по якості. В роботі пропонується застосувати оптимальний регулятор, що дасть можливість підвищити точність підтримання температури на заданому рівні.

В роботі розглянута технологія виробництва шоколаду та визначені основні етапи виробництва. Проведений аналіз АСУТП виробництва шоколадної маси, визначені структура системи та основні її складові. Розроблена структурна схема системи регулювання температури в збірнику какао тертого, проаналізовані її елементи. В результаті синтезу системи регулювання температури в збірнику какао тертого одержаний набір регуляторів при різних значеннях вагового коефіцієнту функціоналу якості. Проведений аналіз якості системи регулювання температури дав можливість визначити регулятор, який доставляє мінімум квадратичному функціоналу якості.

На основі одержаних результатів розроблена принципова схема мікропроцесорної системи автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, виробництво шоколаду, збірник какао тертого, температура.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-22mb Frunza Yurii on a speciality 151 «Automation and computer-integrated technologies» on the theme: «System of automatic temperature control in the cocoa mass collector for chocolate production».

The qualification work is devoted to the problem of improving the quality of temperature control in the cocoa mass collector. The existing automated control system for the technological process of chocolate mass production uses a proportional regulator, which, with significant disturbances that may act in the system, does not meet the quality requirements. The work proposes to apply an optimal regulator, which will make it possible to increase the accuracy of maintaining the temperature at a given level.

The work considers the technology of chocolate production and identifies the main stages of production. The analysis of the automatic control system for the production of chocolate mass was carried out, the structure of the system and its main components were determined. A structural diagram of the temperature control system in the cocoa mass collector was developed, its elements were analyzed. As a result of the synthesis of the temperature control system in the cocoa mass collector, a set of regulators was obtained at different values of the weight coefficient of the quality functional. The analysis of the quality of the temperature control system made it possible to determine the regulator that delivers the minimum of the quadratic quality functional.

Based on the results obtained, a schematic diagram of a microprocessor system for automatic temperature control in the cocoa mass collector was developed.

Keywords: automatic control system, chocolate production, cocoa powder collection, temperature.

Зміст

Вступ.....	2
1 Огляд процесу виробництва шоколаду	4
1.1 Опис продукції, сировини та напівфабрикатів	4
1.2 Стадії виготовлення шоколаду	7
2 Аналіз автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) виробництва шоколадної маси та розробка структури системи регулювання температури в резервуарі для какао тертого.	16
2.1 Аналіз АСУТП у виробництві шоколадної маси.....	16
2.2 Розробка схеми структури системи регулювання температури у збірнику тертого какао	22
3 Розробка системи автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого	28
3.1 Синтез системи автоматичного регулювання.....	28
3.2 Оцінка ефективності вирішення задачі регулювання.....	37
4 Практичне впровадження системи автоматичного регулювання..	41
4.1 Встановлення періоду дискретизації.....	41
4.2 Визначення Z-перетворення передатної функції регулятора	43
4.3 Створення електричної структурної схеми системи	46
4.4 Розробка принципової електричної схеми системи.....	47
Висновки.....	51
Список літератури	52

Вступ

Розвиток харчової промисловості є однією з основних складових економічної та виробничої стратегії держави, що має значний вплив на добробут працівників, оскільки продукція цієї галузі відрізняється широким асортиментом і високим попитом. Для реалізації таких програм необхідний системний підхід до вивчення питань метрології, сертифікації, а також контролю та управління технологічними процесами з використанням сучасних технологій, що забезпечують виробництво високоякісних і екологічно безпечних харчових продуктів.

Для харчової промисловості характерні безперервні, дискретні або безперервно-дискретні виробничі процеси. Системи автоматичного управління повинні забезпечити належне протікання технологічних процесів, підтримуючи оптимальні режими роботи обладнання, що гарантують випуск якісних напівфабрикатів та готової продукції. Це неможливо без застосування сучасних розробок у галузі теорії та практики автоматичного управління, аналізу технологічних процесів, агрегатів і їх комплексів як об'єктів управління, побудови математичних моделей та алгоритмів оптимального управління процесами, а також створення автоматизованих систем управління за допомогою обчислювальної техніки.

Мета дослідження полягає в підвищенні якості виробництва шоколадної маси шляхом розробки системи автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого з використанням алгоритмів сучасної теорії управління.

Для досягнення мети дослідження були визначені та вирішені такі завдання:

- провести аналіз об'єкта регулювання та визначити його динамічні характеристики;

- розробити структурну схему системи автоматичного регулювання;
- здійснити синтез оптимального регулятора температури в збірнику какао тертого;
- провести аналіз якості роботи системи автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого.

Об'єкт дослідження – методи та алгоритми, що сприяють покращенню якості регулювання температури в збірнику какао тертого.

Предмет дослідження – система автоматичного управління температурою в збірнику какао тертого.

Методи дослідження – включають сучасні підходи теорії управління, математичної статистики, теорії випадкових функцій та спектрального аналізу. Для оцінки якості системи автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого, а також для перевірки ефективності запропонованих методів для вирішення поставленої задачі, було використано імітаційне моделювання.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що визначені структура та параметри оптимального регулятора дають змогу інженеру-конструктору швидко знаходити рішення задач без необхідності виконувати подібні розрахунки.

1 Огляд процесу виробництва шоколаду

1.1 Опис продукції, сировини та напівфабрикатів

Шоколад — це продукт, отриманий в результаті переробки какао-бобів та цукру, а какао-порошок виготовляють з подрібнених, частково знежирених какао-бобів. До того ж, до продукції шоколадного виробництва відноситься і шоколадна глазур.

Шоколад поділяють на дві категорії в залежності від складу та якості обробки: натуральний (без добавок) та шоколад з добавками. Кожна з цих категорій має підкатегорії — десертний та звичайний шоколад. Десертний шоколад має більший вміст какао-продуктів і менший вміст цукру порівняно з звичайним, а також відзначається більш тонким подрібнюванням.

Натуральний шоколад виготовляється з какао тертого, какао-масла та цукру. При виробництві шоколаду більша частина какао-бобів, близько двох третин, використовується для отримання какао-масла, а лише одна третина йде безпосередньо в шоколадну масу у вигляді какао тертого. Тому однією з важливих задач шоколадного виробництва є зниження витрат какао-масла шляхом введення різноманітних добавок до рецептури.

До першого типу відносяться великі добавки, які не містять вільного жиру, такі як горіхова крупка, шматочки цукатів, висушених фруктів і ягід. Ці добавки не впливають на структурно-механічні властивості шоколадної маси і можуть використовуватися в значних кількостях. Вони дозволяють значно знизити витрату какао-бобів.

Додавання другого типу складаються з поверхнево-активних речовин (ПАР), які знижують в'язкість шоколадної маси при виливанні у форми, тобто проявляють розріджуючий ефект. Зазвичай для цієї мети використовують соєвий фосфатидний концентрат.

Третій тип добавок містить вільний жир, який, змішуючись з какао-маслом, утворює жирову суміш. Фізико-механічні характеристики цієї суміші, такі як температура плавлення і затвердіння, в'язкість, гранична напруга зрушення та інші, відрізняються від властивостей какао-масла. До таких добавок відносяться молочні продукти, горіхові та інші жировмісні маси, а також спеціальні жири-еквіваленти і замітники какао-масла. Кількість таких добавок визначається після попереднього встановлення оптимальних фізико-механічних характеристик утворених жирових сумішей.

Використання добавок другого та третього типу дає змогу зменшити витрату какао-масла при виробництві шоколаду.

Окрім зазначених раніше добавок, у рецептурах шоколаду також використовуються ванілін та ароматизуючі есенції.

В залежності від методу формування, шоколад поділяється на плитковий, пористий та шоколад з різними начинками, такими як пралінові, помадно-вершкові, фруктові-мармеладні тощо.

Какао-порошок — це дрібно подрібнений продукт, який отримують з частково знежиреного какао тертого, і використовують для приготування напоїв. Він виробляється з какао-макухи, що є побічним продуктом при отриманні какао-масла.

Шоколадна глазур — це тип шоколаду без додатків, але з підвищеним вмістом жиру, що забезпечує кращу текучість. Вона використовується для покриття зовнішньої частини цукерок, вафель, інших кондитерських виробів, а також для глазурування морозива.

Сучасне шоколадне виробництво в нашій країні переважно оснащено імпортним обладнанням, що забезпечує повну механізацію та автоматизацію технологічних процесів. У кондитерській промисловості активно використовуються комплекси для переробки какао-бобів і отримання какао тертого, какао-масла та какао-порошку, а також для приготування та обробки шоколадних мас, формування й упаковки

плиткового шоколаду, шоколадних батонів з начинками, пустотілих шоколадних фігур і виробів «Асорті». Ефективність роботи шоколадного виробництва та якість продукції значною мірою залежать від стану обладнання, зокрема від його морального та фізичного зношування, а також від якості використовуваної сировини.

Особливості виробництва шоколаду обумовлені процесом формування виробів методом виливки у форми. Для ефективного заповнення форм необхідно, щоб шоколадна маса мала низьку в'язкість. В'язкість рідкої шоколадної маси залежить від кількості какао-масла, температури та в меншій мірі від частки какао тертого. Оскільки відповідно до стандартної рецептури частка какао-масла становить 0,35, його властивості здебільшого визначають характеристики шоколадної маси, а в подальшому — і характеристики готових виробів.

Якщо шоколадну масу, отриману при температурі 45...50 °С, остудити до звичайної температури 20...25 °С, то шоколад набуде грубого смаку, оскільки тверді частки какао тертого та цукру, що містяться в масі, при охолодженні збираються в великі агрегати, зцементовані какао-маслом. Крім того, на поверхні такого шоколаду може з'явитися сірий наліт, який створює враження цвілі, хоча насправді цей шоколад є цілком якісним і безпечним для споживання.

Утворення сірого нальоту на поверхні шоколаду, яке викликається кристалами какао-масла, називається жировим посивінням. Це явище пов'язане з поліморфними перетвореннями какао-масла, тобто здатністю при збереженні хімічного складу утворювати різні кристалічні структури з різними властивостями. Жирове посивіння виникає через перехід нестійких (метастабільних) кристалічних структур у стабільну, стійку β -форму. Кристали β -форми мають найбільш щільну упаковку молекул, тому перехід шоколадної маси в цю структуру призводить до зменшення об'єму на 3 % порівняно з рідким какао-маслом. Плитки шоколаду, коли застигають, можуть мати усадку до 2,4 % від свого об'єму і легко

відокремлюються від форм. Якщо процес кристалізації маси порушений, плитки погано відділяються від стінок форм і ламаються при вибірці. Тому важливим етапом у виробництві шоколаду є темперування маси, що забезпечує правильний режим охолодження для належної кристалізації какао-масла.

Якість шоколаду визначається його харчовою цінністю, смаковими характеристиками та зовнішнім виглядом. Шоколад є високопоживним продуктом, оскільки містить 55–60 % вуглеводів, 30–38 % жирів та 6–8 % білків. Його нежирна поверхня та легке «танення» в роті без солістості, а також твердість і крихкість плитки при кімнатній температурі є основними показниками якості шоколаду, що обумовлені властивостями какао-масла. Зовнішній вигляд шоколадного виробу при температурі 16–18 °C має бути гладким, злегка блискучим, з чітким малюнком форми, без сіруватого нальоту, плям, дефектів і бульбашок. Злам плитки повинен бути матовим, з рівномірною структурою.

Упаковка шоколаду повинна захищати його від механічних пошкоджень і вологи. Шоколад без додавань зберігається протягом 6 місяців за температури 18 ± 3 °C та відносної вологості повітря не більше 75 %.

1.2 Стадії виготовлення шоколаду

Рисунок 1.1 ілюструє основні етапи виробництва шоколаду.

Очищення та сортування какао-бобів.

Какао-боби, що надходять на переробку, часто містять забруднення та сторонні включення, такі як грудки ґрунту, волокна мішковини чи пісок. Ці домішки обов'язково видаляють, оскільки вони не лише знижують якість готової продукції та напівфабрикатів, але й можуть спричинити пошкодження обладнання. Потрапляння таких речовин у кінцевий продукт

також становить загрозу для здоров'я споживачів. Крім того, у сировині можуть бути подрібнені боби та фрагменти оболонок, які також відокремлюють від цілих бобів у процесі сортування.

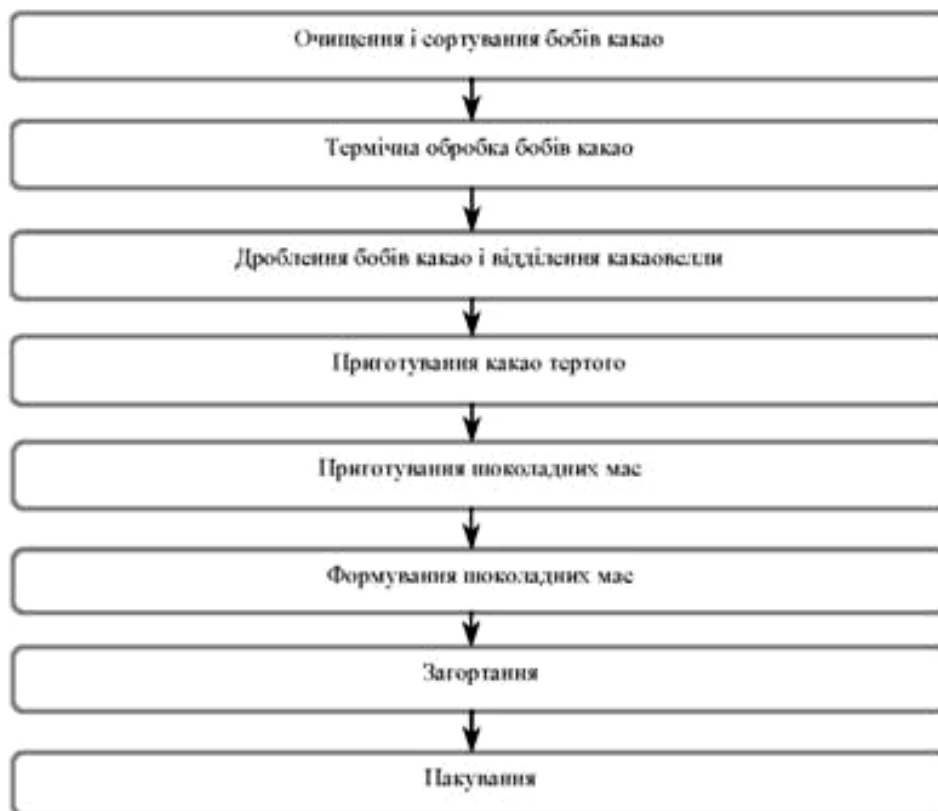


Рисунок 1.1 – Загальна схема виробництва шоколаду

Какао-боби з різних партій і сортів можуть суттєво відрізнятися за розмірами та масою. Щоб забезпечити високу якість шоколаду та какао-порошку, їх необхідно термічно обробляти за різними режимами залежно від розміру. Тому перед обробкою боби сортують за розмірними характеристиками, часто поєднуючи цей процес з етапом очищення.

На великих виробництвах, де какао-боби зберігаються без тари, їх спочатку очищують у складських приміщеннях — цей етап називають первинним очищенням. Безпосередньо перед переробкою проводять вторинне очищення та сортування бобів. Для первинного очищення застосовують спеціальне високопродуктивне обладнання (до 9 тонн на годину). Якщо боби зберігаються у мішках, очищення й сортування здійснюють безпосередньо перед обсмажуванням. Відібрані за розмірами

та очищені боби зберігають у роздільних ємностях, як і різні товарні сорти. Ламані та злиплі боби збирають окремо, обсмажують окремо від цілих, а після цього змішують із обсмаженими цілими бобами перед подальшою переробкою.

Процес сортування какао-бобів, а також їх очищення від пилу та сторонніх домішок здійснюється в окремих приміщеннях, ізольованих від основних виробничих зон. Щоб покращити якість шоколаду та какао-порошку, особливо при використанні сировини нижчого сорту, після очищення та сортування боби додатково промивають водою кімнатної температури. Після миття боби висушують у спеціальних сушарках при температурі 80–90 °C протягом 35–40 хвилин до досягнення вологості 3–4 %.

Різні партії бобів можуть мати різний вихід залежно від рівня засміченості після процесу сортування та очищення. В середньому вихід бобів какао становить 97 %, при цьому 2,7 % складають склеєні та ламані боби, які також використовуються в виробництві. Не використовувані відходи можуть становити від 0,3 % до 1,0 %. Для подальшої переробки боби какао подаються окремо за сортами або в спеціальних композиціях різних сортів відповідно до встановлених рецептур. Це обумовлено тим, що боби какао з різних регіонів значно різняться за якістю, включаючи смакові та ароматичні характеристики.

Термічна обробка какао бобів є ключовою стадією в процесі виробництва, від якої значною мірою залежить якість готового шоколаду та какао-порошку. Під час цієї обробки відбуваються фізичні та хімічні зміни, які значно впливають на склад і властивості бобів. Процес термічної обробки варіюється в залежності від характеристик кожної партії бобів, таких як сорт, якість ферментації, вологість, розміри, а також від цілей їх подальшого використання. Наприклад, високоякісні боби з тонким ароматом обробляються при м'якших умовах, щоб зберегти ароматичні речовини, тоді як боби з недосконалою ферментацією піддаються більш

інтенсивній обробці при вищих температурах. Боби, призначені для какао-порошку, обробляють при вищій температурі, ніж ті, що використовуються для шоколаду.

Під час термічної обробки масова частка сухих речовин підвищується з 92-94 % до 97-98,5 %. Це призводить до того, що оболонка какао (какаоелла) стає твердою, пористою і крихкою (її температура досягає 135°C), що полегшує її відділення від ядра завдяки ослабленню зв'язку з ним. Ядро, втрачаючи значну частину води, також стає більш крихким і легше дробиться. Обробка покращує смакові якості какао бобів і розвиває їх характерний аромат. Ці зміни спричинені численними хімічними перетвореннями, які відбуваються в усіх складових какао бобів під час обсмажування. Якість смаку, кольору та аромату залежить як від сортових характеристик бобів, так і від умов термічної обробки, зокрема проведення її в оптимальних умовах. Покращення ароматичних властивостей під час обсмажування зумовлено хімічними перетвореннями, зокрема перетворенням дубильних речовин. В результаті обсмажування, конденсації та інших хімічних змін знижується вміст розчинних дубильних речовин, що зменшує терпкий смак, властивий необсмаженим бобам, і надає гіркуватий, але приємний смак, характерний для шоколаду. Крім того, покращення смакових якостей пов'язано з видаленням частини летких кислот, особливо оцтової кислоти. Загальний вміст кислот знижується, кислий смак сирих бобів значно зменшується, що підтверджується зниженням титрованої кислотності на приблизно 1,5°.

Під час обсмажування какао бобів утворюється безліч речовин, які надають їм приємний аромат. Це зумовлено реакцією амінокислот з цукрами. В процесі цукрово-аміної реакції зменшується вміст вільних амінокислот і редуруючих цукрів, зокрема глюкози та фруктози. Як наслідок, при обсмажуванні утворюються різні леткі органічні сполуки, такі як альдегіди, які сприяють розвитку аромату, а також нелеткі компоненти (меланоїди), що впливають на смак і аромат. Також при

обсмажуванні відбуваються зміни цукрів. Продукти деградації цукрів, ймовірно, мають вплив на формування різноманітних ароматів і присмаків.

Під час обсмажування частина крохмалю, що міститься в бобах після часткової клейстеризації, переходить з нерозчинної форми в розчинну, тобто крохмаль зазнає гідролізу (декстринізації). Згодом, при підвищеній температурі, відбувається обезводнення набряклих зерен крохмалю.

Під час обсмажування частина какао масла переходить у какаовеллу. Зокрема, при м'яких режимах обсмажування в какаовеллу потрапляє близько 0,1 % какао масла, а при жорстких режимах (високі температури, триваліший процес і повільне охолодження) ця кількість може зрости до понад 1 %. Щоб уникнути таких втрат какао масла, на деяких підприємствах проводять обсмажування не цілих бобів, а какао крупки, яку попередньо відокремлюють від оболонки.

Термічна обробка какао крупки дозволяє покращити її якість. Коли обсмажують цілі какао боби, які мають великі розміри, прогрівання відбувається нерівномірно через їх товщину. Зовнішні шари прогріваються значно інтенсивніше, ніж внутрішні. В результаті зовнішні шари можуть пересмажуватися, а внутрішні – обробляються недостатньо. Однак при обсмажуванні какао крупки якість термічної обробки значно покращується.

Якість обсмажування какао бобів залежить від однорідності їх розмірів і точності виконання попередньої операції (сортування). Для бобів різного розміру необхідні різні умови термічної обробки.

Після термічної обробки какао боби швидко охолоджують до температури близько 30°C. Охолодження призводить до сповільнення або припинення хімічних процесів у какао бобах. Після цього зупиняється перехід какао масла в какаовеллу.

Дроблення какао бобів і відділення какаовелли здійснюється через значну різницю в хімічному складі та харчовій цінності ядра і оболонки. Оболонка какао боба містить лише 3-5 % жиру і 13-18 % клітковини. Варто

зазначити, що частина жиру в какаоеллі є жиром, який перейшов з ядра в оболонку під час термічної обробки. При попаданні оболонки в шоколад чи какао-порошок вона погіршує смак і харчову цінність цих продуктів, оскільки містить велику кількість незасвоюваної клітковини.

До складу какао боба, окрім ядра та оболонки, входить ще і зародок, який також варто відокремити від ядра. Зародок розташовується в розширеній частині боба між двома сім'ядолями. Це невелика стеблинка завдовжки близько 4 мм і діаметром 1 мм. В обсмажених какао бобах зародок складає близько 0,8-0,9 % за масою. Він має значно більшу твердість, ніж ядро, і значно важче подрібнюється на вальцевих млинах. Масова частка жиру в зародку, який має значно нижчу якість порівняно з жиром ядра, становить лише 3,5 %. Для його видалення фракцію, отриману після дроблення бобів, пропускають через трієр, який може бути окремим механізмом або вбудованим в дробильно-сортувальну машину.

Для відділення оболонки какао боби подрібнюють, в результаті чого утворюється крупка — шматочки ядра розміром від 0,75 до 8,0 мм. Після цього відокремлюють какаоеллу. Під час цього процесу частка крупки, що утворюється після подрібнення та відділення оболонки, має становити 81-83 %.

Співвідношення ядра, оболонки та зародка в какао бобах різних сортів варіюється в залежності від сорту та розміру зерен. В середньому частка зародка для всіх сортів становить близько 0,85 %.

Оболонку відокремлюють після подрібнення какао бобів у два етапи. Спочатку частково подрібнені боби (крупка) сортують за розміром на ситах, що дозволяє отримати кілька фракцій різних розмірів. Потім кожну фракцію окремо розділяють за допомогою повітряного потоку, відокремлюючи лущиння від крупки. Чим більше фракцій, тим рівномірніші розміри частинок у кожній фракції, що полегшує подальше відділення оболонки (це легше зробити для більших частинок, ніж для дрібних). Для подрібнення обсмажених або необсмажених какао бобів у

крупку та відділення какаоелли використовують дробильно-сортувальні машини, оснащені рифленими валками або дисками. Розділення крупки і какаоелли на фракції здійснюється на ситах, а какаоелла відокремлюється від крупки за допомогою повітряної сепарації.

Масова частка вологи в какао крупці не повинна перевищувати 3 %. Частка какаоелли в отриманій крупці (засміченість) не повинна бути більше 1-1,5 %. Найбільш очищеною від оболонок є найбільша крупка, що пройшла через сито з отворами 5-8 мм. Цю крупку використовують для виробництва шоколаду та какао-порошку. З дрібнішої крупки виготовляють шоколадну глазур, цукеркову масу та начинки. Однак часто какао крупу не розділяють і переробляють всі фракції разом. Під час переробки какао бобів на дробильно-сортувальних машинах утворюються дрібні фракції: дрібна какао крупка, сильно забруднена какаоеллою, а також фракція какаоелли, що містить дрібні частки какао крупки.

Отримана какаоелла має нерівномірний вміст жиру. У дрібних фракціях (які складають приблизно 9 % від загальної маси) масова частка жиру вища, ніж у великих фракціях. Це пояснюється тим, що в дрібну какаоеллу потрапляють дуже дрібні частинки какао крупки. Тому дрібні фракції какаоелли часто використовують у виробництві, просіюючи їх і застосовуючи при виготовленні жирової глазури. Вміст крупки в середньому зразку какаоелли не повинен перевищувати 0,5 %.

Розміри фракцій, що утворюються на дробильно-сортувальних машинах, залежать від розміру отворів ситових секцій, через які вони проходять. Оболонка містить менше жиру порівняно з ядром, тому її присутність знижує масову частку жиру в крупці. Тому рівень масової частки жиру в різних фракціях крупки може служити індикатором їх засміченості оболонкою.

Приготування какао тертого є важливим етапом у виробництві шоколадної маси та є напівфабрикатом для отримання какао масла та какао порошку. У всіх рецептурах шоколаду використовується какао терте,

а не самі боби какао. Ядро какао боба, а також отримана з нього крупка складаються з окремих клітин, у стінках яких містяться какао масло, крохмальні та білкові зерна. Розмір цих клітин коливається між 20-40 мкм. Основне завдання помелу крупи полягає в руйнуванні клітинних стінок та звільненні какао масла, що знаходиться всередині клітин. Чим ретельніше зруйновані клітинні стінки та чим менше залишилося цілих клітин, тим більше какао масла звільняється, частинки стають дрібнішими, а процес помелу ефективнішим. Під час помелу з какао крупи отримують какао терте — напіврідку масу, схожу на сметану, при температурі вище 40°C. Це суспензія, в якій дрібні тверді частинки знежиреного какао знаходяться в рідині (какао маслі). Формування сметано-подібної консистенції какао тертого під час помелу пояснюється тим, що какао крупа нагрівається до температури понад 40°C, вище температури плавлення какао масла. В результаті цього маса стає напіврідкою суспензією, де какао масло є рідкою фазою, а частинки клітинної тканини — твердою.

Про ефективність процесу помелу какао крупи судять за в'язкістю какао тертого та дисперсністю твердої фази (ступенем подрібнення). Основними якісними характеристиками какао тертого є його в'язкість, ступінь подрібнення, а також масова частка жиру та вологи.

Під час помелу какао крупи, навіть при короткочасному процесі, відбуваються певні хімічні зміни в її складі. Інтенсивність цих змін значною мірою залежить від температури під час помелу, яка варіюється в широких межах в залежності від використовуваного обладнання. Наприклад, при помелі на восьмивалковому млині температура не перевищує 60°C, а при помелі на ударно-штифтовій машині може досягати 105-110°C.

Під час помелу какао крупи зменшуються вологість, титрована кислотність та вміст дубильних речовин. Це призводить до посилення темно-коричневого забарвлення та пом'якшення гіркого терпкого смаку.

В'язкість какао тертого значною мірою залежить від його вологості. Зі збільшенням вологості в'язкість помітно зростає. Наприклад, при збільшенні масової частки води з 2,5 до 3,5 % в'язкість підвищується в 1,5 рази.

Какао терте є суспензією, що складається з компонентів різної густини, через що воно схильне до розшаровування. Під час зберігання в рідкому стані верхні шари збагачуються жировими компонентами, а нижні — тверда фаза. Цей процес відбувається швидше, якщо какао терте містить більші частинки. Зі збільшенням ступеня подрібнення здатність до розшаровування зменшується. Для запобігання цьому какао терте зберігається в ємкостях з обігрівом та мішалками. Какао терте застигає при температурі близько 20°C.

При перемішуванні какао тертого за підвищеної температури (85-90°C) не лише сповільнюється процес розшаровування, а й спостерігається певне зниження його в'язкості. Товарне какао терте зберігають у чистих, сухих, добре вентильованих приміщеннях при температурі $18 \pm 3^\circ\text{C}$ та відносній вологості повітря не більше 75 %. Термін зберігання в таких умовах становить 6 місяців.

2 Аналіз автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) виробництва шоколадної маси та розробка структури системи регулювання температури в резервуарі для какао тертого.

Для підприємств харчової промисловості характерні певні особливості, зокрема на етапі виробництва продуктів харчування переважають неперервні, дискретні та змішані технологічні процеси. Вони дозволяють переробляти швидкопсувні сировини за допомогою складних фізико-хімічних і біохімічних методів, а також суворого дотримання рецептур для збереження харчової цінності та смакових якостей продукції. Головною метою є забезпечення стабільної якості продукту.

АСУТП забезпечують автоматизований збір та обробку даних для формування керуючих дій на об'єкт управління. В управлінні виробництвом харчових продуктів, через складність і недостатню вивченість технологічних процесів, роль людини залишається важливою.

Створення та функціонування АСУТП повинно принести конкретні техніко-економічні переваги: знизити собівартість продукції, забезпечити її стабільну якість, гарантувати достатній обсяг та різноманіття харчових продуктів для задоволення потреб споживачів, а також покращити умови праці для обслуговуючого персоналу.

2.1 Аналіз АСУТП у виробництві шоколадної маси

Сучасні системи управління на підприємствах харчової промисловості середньої та великої потужності зазвичай складаються з двох ієрархічних рівнів (див. рис. 2.1).

Перший рівень включає: первинні перетворювачі (датчики), сигналізатори, що вказують на досягнення заданих параметрів, засоби управління виконавчими механізмами та пусковою апаратурою з

контролерами. Перспективним є використання інтелектуальних датчиків і виконавчих пристроїв, з'єднаних з контролерами або ПТК через цифрову польову шину Fieldbus H1. Для з'єднання контролерів з пристроями різних виробників рекомендується застосовувати стандартний протокол – HART-протокол, який дозволяє оператору отримувати інформацію про порушення в роботі польової мережі, пристроїв та контролерів. Локальні пульти управління технологічними процесами та обладнанням здебільшого розташовані безпосередньо на місці об'єкта управління.

Вибір апаратури зазвичай здійснюється на основі таких критеріїв:

- відповідність технічних характеристик вимогам технічного завдання;
- наявність необхідної сертифікованої документації;
- вартість технічних засобів.

На першому рівні АСУТП виконуються наступні функції:

- збір даних від перетворювачів (датчиків) щодо стану об'єкта та технологічного обладнання. Якщо є локальні контролери, то виконуються такі завдання:
- первинна обробка інформації (фільтрація, лінеаризація та масштабування) вхідних аналогових сигналів;
- формування управляючих сигналів для керування виконавчими пристроями системи;
- передача інформації на другий рівень системи автоматизованого управління.

Технічні рішення для другого рівня передбачають використання програмно-технічного комплексу (ПТК), сервера бази даних (БД), АРМ оператора-технолога та АРМ хіміка-аналітика для контролю та управління технологічним процесом.

АСУТП другого рівня виконує такі функції:

- приймання та обробка інформації за допомогою ПТК, сервера СУБД і БД, АРМ оператора-технолога та АРМ хіміка-аналітика;

- формування управляючих сигналів;
- контроль і управління технологічним процесом та виконавчими пристроями;
- передача інформації на вищестоящий рівень управління через мережеві структури (Fieldbus DP).

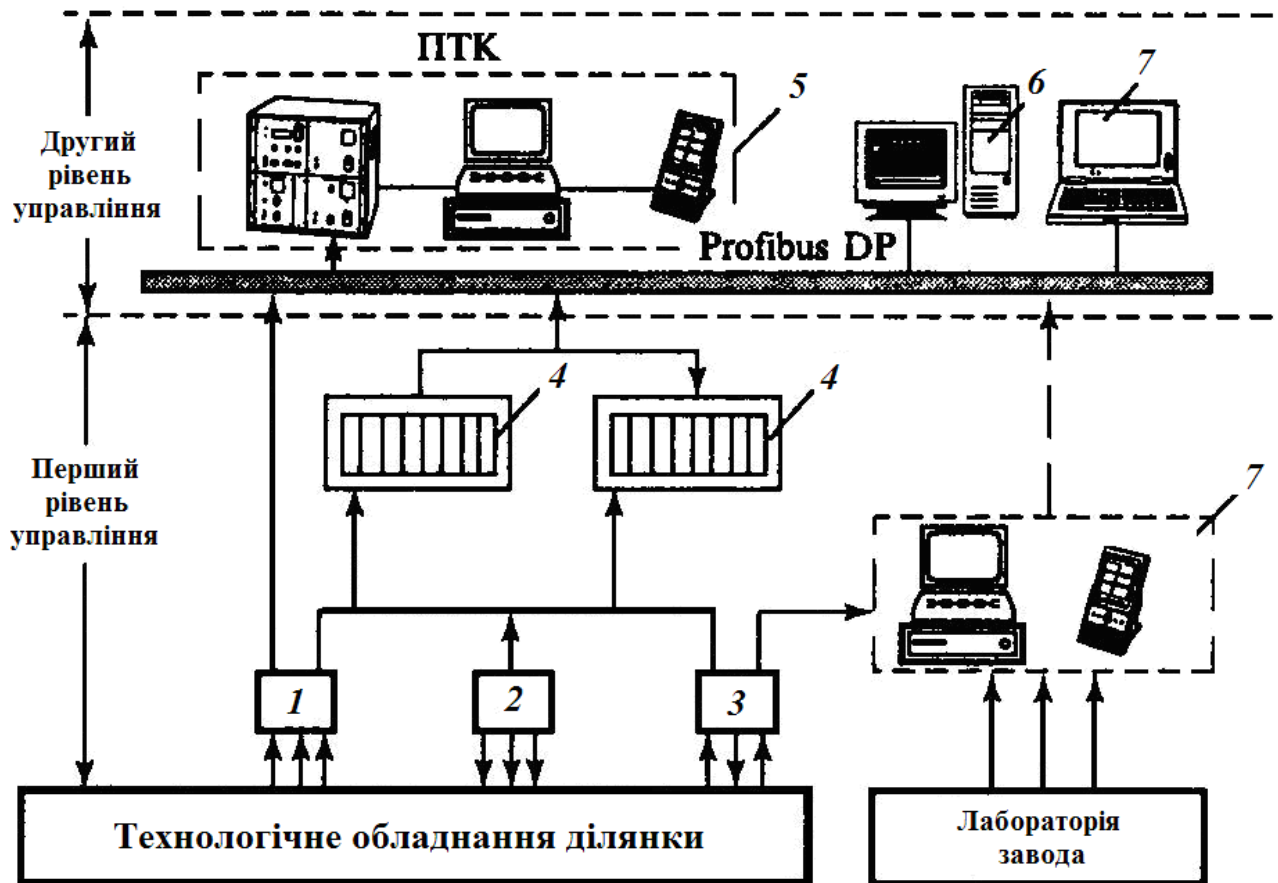


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСУТП виробництва шоколадних мас: претворювачі (датчики) технологічних параметрів, електропневматичні виконавчі пристрої, пускова електроапаратура, локальні пристрої управління технологічним процесом, мікропроцесорні локальні контролери, програмно-технічний комплекс (ПТК), сервер бази даних (БД), автоматизовані робочі місця (АРМ) оператора (технолога, інженера, хіміка-аналітика тощо).

Технологічна лінія для виробництва шоколадних мас (рис. 2.2) передбачає процес змішування какао-масла, какао тертого, цукрової пудри, смакових добавок та розріджувачів. Терте какао та какао-масло подаються в збірники VII та XIII, які підігріваються гарячою водою, звідки вони через дозатори VIII надходять у перший змішувач I. Одночасно в цей змішувач

поступає цукрова пудра, що отримується шляхом розмолу цукру-піску в мікрмельниці II. Пудра переміщується через дозатор III та ворошитель IV з бункера V за допомогою шнека VI. Маса з першого змішувача направляється в п'ятивалкову мельницю IX, де утворюється тонко розтерта суміш, що далі подається в другий змішувач X. До нього також додаються розріджувач та есенція через дозатори XI та XII. Після змішування в другому змішувачі отримана маса потрапляє в емульсатор для гомогенізації, що забезпечує ідеальну однорідність і рівномірний розподіл ароматичних і жирових компонентів. Далі шоколадна маса подається шестеренним насосом у збірник шоколадної маси XIV, який також підігрівається гарячою водою.

Схема управління (рис. 2.2) забезпечує точне дозування інгредієнтів, а також контроль рівнів і температурних параметрів у збірниках. Для досягнення високої точності дозування система передбачає моніторинг рівнів у бункері з цукровим піском, а також у збірниках тертого какао VII та какао-масла XIII.

Управління процесом виробництва шоколадних мас здійснюється через АСУТП, яка працює в супервізорному режимі (рис. 2.1).

АСУТП виробництва шоколадних мас є розподіленою системою управління середнього масштабу, що включає підсистеми збору та відображення інформації, автоматичного регулювання, дискретно-логічного управління, а також протиаварійного захисту та блокувань.

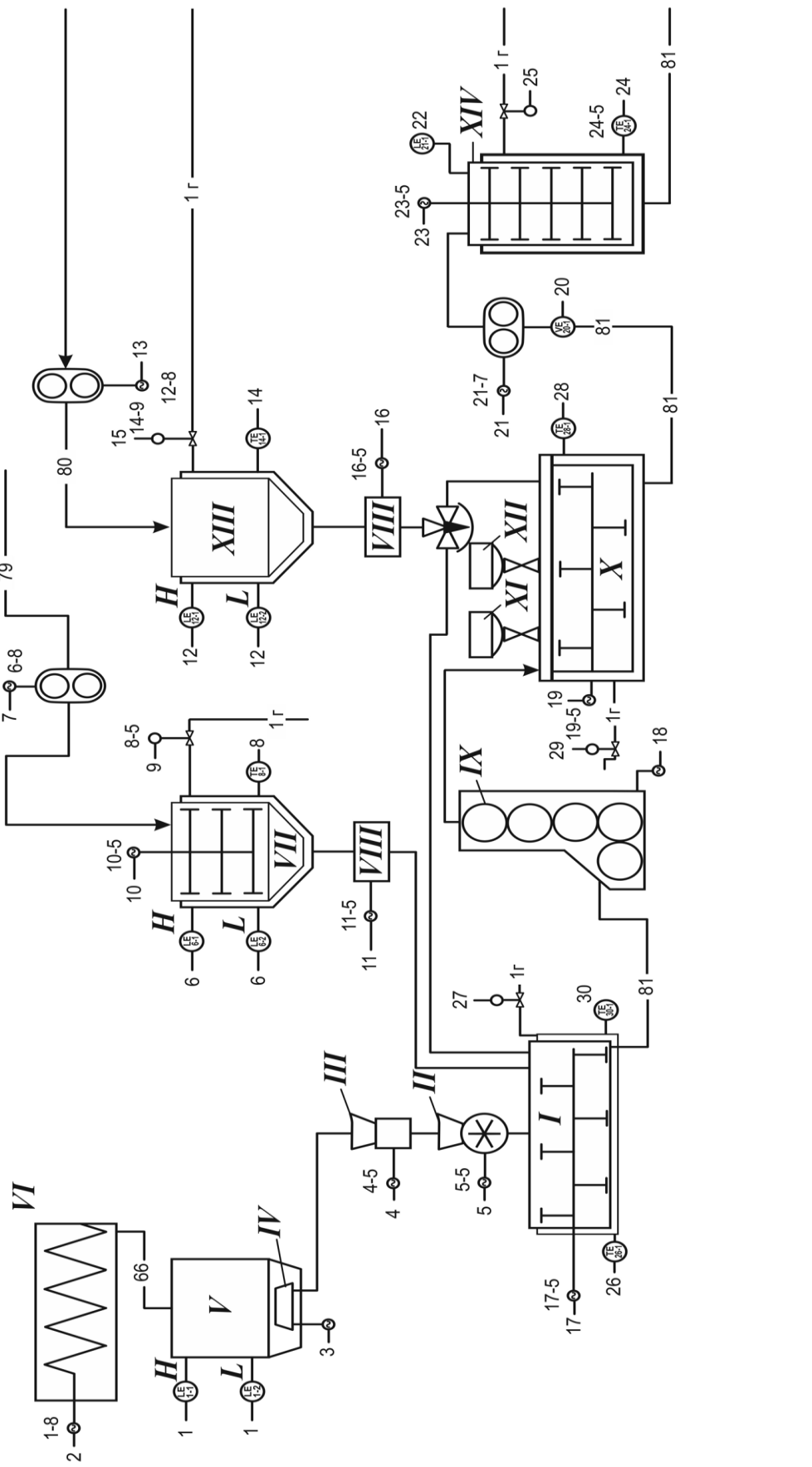


Рисунок 2.2 - Технологічна лінія виробництва шоколадних мас

Рівень у бункері цукру-піску вимірюється датчиками (1-1) та (1-2), нормалізовані сигнали яких надходять на АЦП (ADAM-5017) та логіко-програмний канал контролера (1-3). Контролер керує включенням і вимиканням електродвигуна (1-8) шнека подачі цукру-піску в бункер через ЦАП (ADAM-5024) і магнітний пускач (1-7). Аналогічно здійснюється регулювання рівнів у збірниках тертого какао та какао-масла (контури 6 та 12 відповідно). У збірнику шоколадної маси XIV передбачено регулювання рівня по верхній межі. Коли рівень досягає цієї межі, сигнал з датчика верхнього рівня (21-1) надходить на АЦП (ADAM-5017) та логіко-програмний канал контролера (21-2). Через ЦАП (ADAM-5024) та магнітний пускач (21-6) зупиняється електродвигун (21-7), що припиняє подачу шоколадної маси в проміжний збірник.

Автоматичне регулювання температури в збірниках здійснюється шляхом управління зливом води з обігрівачів рубашок. У збірнику тертого какао температура вимірюється термоопором ТСМ і АЦП (ADAM-5017) або модулем (ADAM-5013) (8-1), сигнал з якого надходить на нормуючий підсилювач-перетворювач (8-2), потім на систему відображення та реєстрації (телемонітор і АЦПУ) (8-3), а також на логіко-програмний канал контролера (8-4). Контролер керує через ЦАП (ADAM-5024) електромагнітним клапаном (8-5), що здійснює злив води з обігрівача рубашки збірника. Такий самий принцип використовується для регулювання температури в збірниках какао-масла та шоколадної маси (відповідно по контурах 14 і 24).

Схема дозволяє здійснювати управління електродвигунами машин і апаратів поточних ліній з пульта ПТК (або АРМ технолога) та обирати режими управління.

2.2 Розробка схеми структури системи регулювання температури в збірнику тертого какао

Розглянемо контур регулювання температури в збірнику тертого какао. Об'єктом регулювання є збірник тертого какао, а параметром регулювання – його температура. Температура регулюється шляхом подачі або зливу гарячої води в обігрівуючу рубашку збірника. Показником ефективності цього процесу є температура t_{II}'' продукту на виході зі збірника, а метою регулювання є підтримка цієї температури на заданому рівні.

Зв'язок між температурою t_{II}'' та параметрами процесу можна визначити за допомогою рівняння теплового балансу:

$$G_{II}c_{II}(t_{II}'' - t_{II}') = G_Tc_T(t_T' - t_T''), \quad (2.1)$$

де G_{II} , G_T – витрати відповідно продукту та гарячого теплоносія; c_{II} , c_T – питома теплоємність продукту і гарячого теплоносія; t_{II}', t_T' – температури продукту та гарячого теплоносія на вході в теплообмінник; t_{II}'' – температура гарячого теплоносія на виході з теплообмінника.

Розв'язуючи це рівняння щодо температури t_{II}'' , отримаємо:

$$t_{II}'' = (G_Tc_T / G_{II}c_{II})(t_T' - t_T'') + t_{II}' \quad (2.2)$$

Розхід продукту G_{II} визначається іншими технологічними процесами, а не процесом нагріву, тому його неможливо стабілізувати та використовувати для регулювання. Зміна G_{II} призводить до значних збурюючих впливів на теплообмінник. Температури t_{II}', t_T' , а також питома теплоємності c_{II} , c_T залежать від технологічних умов інших процесів, тому їх неможливо стабілізувати під час нагріву. До неможливих для усунення

збурень також відносяться зміни температури навколишнього середовища, властивості теплопередаючої стінки через відкладення солей та корозію.

Аналіз об'єкта регулювання показав, що більшість збурюючих впливів неможливо усунути. Тому в якості параметра регулювання доцільно обрати температуру t_{II}'' , а регулюючий вплив слід здійснювати шляхом зміни розходу G_T .

Теплообмінники, як об'єкти регулювання температури, мають значні затримки, тому важливо ретельно вибрати місце для встановлення датчика та визначити закон регулювання.

Контрольованими величинами слід вважати розхід теплоносія, його початкову та кінцеву температури, а також тиск. Знання поточних значень цих параметрів є необхідним для правильного пуску, налаштування та експлуатації процесу.

Оскільки процес теплообміну є досить складним і врахувати всі його особливості в математичній моделі практично неможливо, зазвичай застосовують спрощену модель, яка враховує питомі теплоємності як сталу величину. Об'єкт регулювання в такій моделі представляється аперіодичною ланкою першого порядку

$$W_{OP}(p) = \frac{k_{OP}}{T_{OP} \cdot p + 1}. \quad (2.3)$$

Враховуючи всі збурення, які впливають на об'єкт регулювання, а також різну природу їх виникнення, можна уявити узагальнене збурення як «білий» шум. Це стаціонарний випадковий процес з визначеним математичним очікуванням і середньоквадратичним відхиленням, який підкоряється нормальному закону розподілу амплітуд.

Для вимірювання температури буде використовуватись термометр опору ТС 1288/2-Pt100. Принцип роботи термометрів опору ґрунтується на властивості провідників і напівпровідників змінювати свій електричний опір залежно від температури. Залежність опору провідника від температури описується відповідною формулою

$$R = Ae^{\alpha T}, \quad (2.4)$$

де A – сталий коефіцієнт; α – температурний коефіцієнт опору (ТКО); T – температура,

Якщо при початковій температурі $T_0, ^\circ\text{C}$ опір провідника дорівнює R_0 , то опір R_t цього провідника при будь-якій температурі $T, ^\circ\text{C}$ можна визначити за допомогою формули.

$$R_t = R_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (2.5)$$

або, застосовуючи розкладення в степеневий ряд і обмежуючись першими двома членами, отримаємо

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (2.6)$$

Матеріали, з яких виготовляються термометри опору, повинні мати високий та стабільний температурний коефіцієнт опору (ТКО), лінійну залежність опору від температури та бути стійкими до впливу навколишнього середовища.

Для виготовлення провідникових термометрів опору застосовують мідь, нікель, платину та вольфрам, які мають додатній температурний коефіцієнт опору (ТКО), що залишається практично сталим у діапазоні температур $0 - 150 ^\circ\text{C}$ (для міді та нікелю) і $0 - 600 ^\circ\text{C}$ для платини. При більш високих температурах ці матеріали активно окислюються.

В якості чутливих елементів платинових термометрів опору використовують платинову спіраль, яка розміщується в капілярній керамічній трубці, заповненій керамічним порошком, і знаходиться в захисній арматурі.

Термометри опору є одними з найточніших пристроїв для вимірювання температури. Помилка вимірювання температури може становити $0,001 ^\circ\text{C}$.

Термометр опору ТС 1288/2-Pt100 має діапазон вимірювання температури від -50°C до $+350^\circ\text{C}$, теплову інерцію $T = 15$ с, ступінь

захисту від пилу та вологи IP54, а також середній час безвідмовної роботи 15000 годин.

Передавальна функція датчика температури, який є аперіодичною ланкою першого порядку, має такий вигляд

$$W_{дт}(p) = \frac{k_{дт}}{T_{дт} \cdot p + 1}. \quad (2.7)$$

Для підключення термометра опору можна використовувати двопровідну, трьохпровідну або чотирипровідну схему. Вибір схеми підключення впливає на точність вимірювання температури. Найчастіше застосовують трьохпровідну схему.

В якості виконавчого механізму використовується електромагнітний клапан для регулювання подачі гарячої води. Електромагнітний клапан бронзовий 15-Б-859-П (рис. 2.3) призначений для використання як запірний пристрій з дистанційним управлінням на трубопроводах різних систем.

У системі автоматичного регулювання температури збірника тертого какао електромагнітний клапан може працювати в імпульсному режимі. Для цього регулятор повинен подавати сигнали керування на виконавчий механізм у вигляді широтно-імпульсно модульованих сигналів. Відповідно, відсоток заповнення імпульсом інтервалу передачі сигналу визначатиме необхідний розхід гарячої води в обігрівачу рубашку збірника.

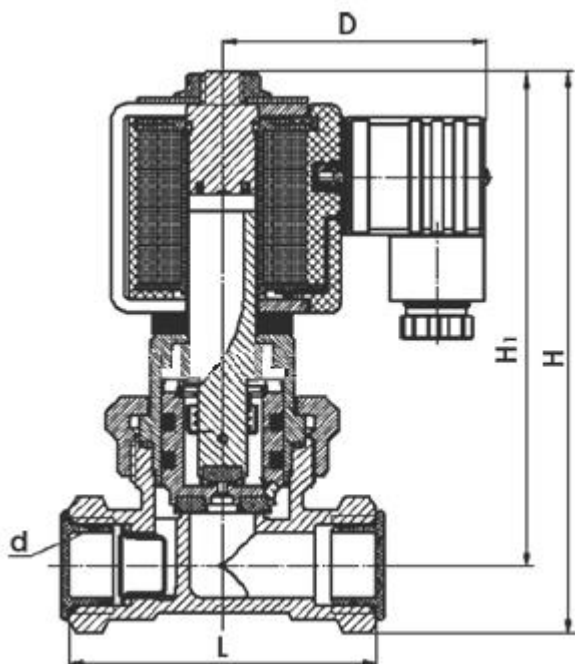


Рисунок 2.3 – Електромагнітний клапан моделі 15-Б-859-П

На основі аналізу елементів системи автоматичного регулювання температури в збірнику тертого какао можна побудувати структурну схему системи (рис. 2.4).

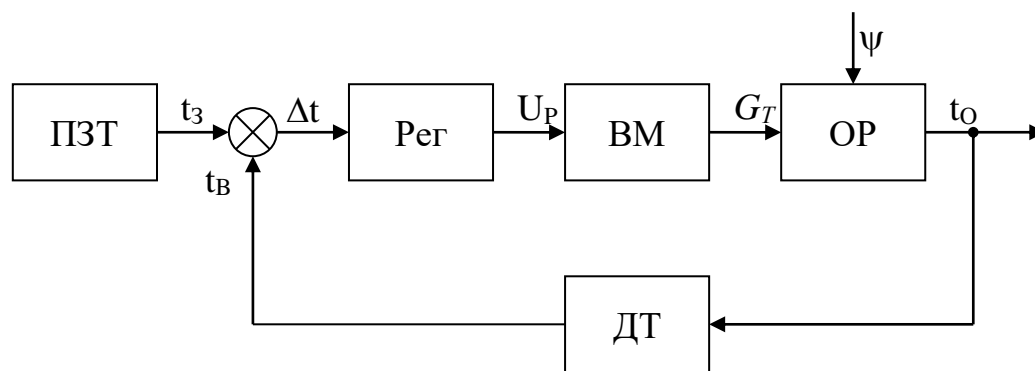


Рисунок 2.4 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температури в збірнику тертого какао

Об'єктом регулювання (ОП) в цій схемі є збірник тертого какао, температуру якого потрібно підтримувати на заданому рівні. Температура об'єкта регулювання t_0 вимірюється за допомогою датчика (ДТ), сигнал з якого оцифровується t_B і порівнюється з програмно заданою температурою t_3 (ПЗТ). Різниця Δt між виміряною та заданою температурою надходить до

регулятора (Рег), який на основі розрахованого закону регулювання генерує керуючий сигнал U_P для виконавчого механізму (ВМ). Виконавчим механізмом є електромагнітний клапан, що регулює подачу G_{II} гарячої води в обігрівачу рубашку збірника.

У розглянутій АСУТП (рис. 2.2) використовується регулятор з пропорційним законом регулювання. Цей регулятор забезпечує стабільність системи автоматичного регулювання температури, однак якість її роботи залишає бажати кращого. Для покращення якості функціонування можна розробити оптимальний регулятор для системи стабілізації температури, який буде враховувати динаміку елементів системи та збурюючі впливи, що діють на об'єкт регулювання.

3 Розробка системи автоматичного регулювання температури в збірнику тертого какао

3.1 Синтез системи автоматичного регулювання

Аналізуючи структурну схему, наведена в розділі 2 (рис. 2.4), систему автоматичного регулювання температури в збірнику тертого какао, можна перетворити на систему стабілізації, якщо змінити структуру системи так, як показано на рисунку 3.1.

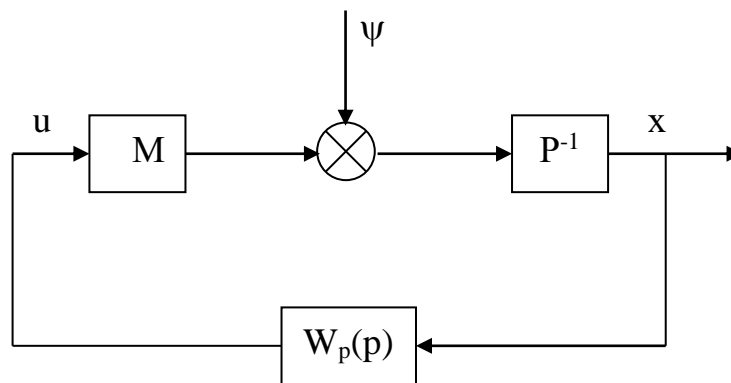


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи стабілізації

У такому випадку рух об'єкта можна описати лінійним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами

$$P(p)x(t) = M(p)u(t) + \psi(t), \quad (3.1)$$

де $x(t)$ – координата об'єкта; $u(t)$ – координата регулятора (керуючий вплив); $\psi(t)$ – зовнішнє збурення, яке вважається стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним сподіванням і відомою спектральною щільністю.

$$S_{\psi}(\omega) = \frac{\Gamma_1(i\omega)\Gamma_1(-i\omega)}{\Gamma_0(i\omega)\Gamma_0(-i\omega)}; \quad (3.2)$$

$P(p)$ та $M(p)$ – операторні поліноми від $p = d/dt$, де p є диференціальним оператором.

Потрібно визначити закон управління у контурі зворотного зв'язку (знайти диференціальне рівняння, яке зв'язує u та x), щоб замкнута система "об'єкт + регулятор" була стійкою та оптимальною для досягнення мінімуму квадратичного функціоналу

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle, \quad (3.3)$$

де r та c – вагові константи, $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ - дисперсія величин x та u .

Потрібно визначити рівняння для регулятора

$$W_0(p)u = \tilde{W}(p)x \quad (3.4)$$

(Операторні поліноми $W_0(p)$ та $\tilde{W}(p)$) повинні бути визначені таким чином, щоб функціонал (3.3) досягав мінімуму для класу стійких замкнутих систем "об'єкт + регулятор".

Рівняння регулятора визначаємо за методикою Ларіна [22]. Синтез системи стабілізації здійснюємо за допомогою середовища MatLab. Для зручності роботи з програмним середовищем замість оператора p використовуватимемо оператор s . Передаточна функція $W(s)$ регулятора матиме наступний вигляд

$$W(s) = \frac{-rM(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + P(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}{c(s)P(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + M(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}, \quad (3.5)$$

де $B_-(s)$, $G(-s)$, $\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$ визначаються формулами

$$B_0(s) + B_+(s) + B_-(s) = \frac{R(s)\Gamma_1(s)}{G(-s)Q(s)\Gamma_0(s)}, \quad (3.6)$$

$$R(s) = r\beta(s)M(-s) - c(s)\alpha(s)P(-s), \quad (3.7)$$

$$G(s)G(-s) = rM(s)M(-s) + c(s)P(s)P(-s), \quad (3.8)$$

$$Q(s) = \alpha(s)M(s) + \beta(s)P(s), \quad (3.9)$$

$$S_\psi(s) = \frac{\Gamma_1(s)\Gamma_1(-s)}{\Gamma_0(s)\Gamma_0(-s)}; \quad (3.10)$$

$\alpha(s)$ та $\beta(s)$ – обираються довільно;

$\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$ – поліноми, що мають нулі тільки в лівій півплощині.

Згідно з структурною схемою системи автоматичного регулювання температури в збірнику тертого какао (рис. 2.4), до її складу входять об'єкт регулювання, датчик температури, регулятор та виконавчий механізм. На основі аналізу літературних джерел і технічних характеристик елементів системи можна визначити їх передаточні функції:

$$W_{OP}(s) = \frac{k_{OP}}{T_{OP}s + 1}; \quad (3.11)$$

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

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

Щодо збурень, що впливають на об'єкт регулювання, слід зазначити, що їх природа та джерела настільки різноманітні, що узагальнений вплив можна подати як стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням та спектральною щільністю, яка має характеристики «білого» шуму:

$$S_{\psi\psi}(s) = \frac{\sigma_{\psi}^2}{\pi}. \quad (3.14)$$

Для застосування алгоритму синтезу регулятора (3.5)-(3.10) потрібно провести структурні перетворення системи (рис. 2.4) до форми, зображеної на рис. 3.1. Це передбачає визначення поліномів $M(s)$, $P(s)$, а також обчислення спектральної щільності $S_{\psi}(s)$ для нової структурної схеми.

Задамо необхідні параметри для виразів (3.11) – (3.14) та здійснимо необхідні розрахунки для отримання вихідних даних, необхідних для синтезу регулятора.

$$k_{OP} = 0,2; T_{OP} = 60 \text{ с}; k_{BM} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C/В}; T_{BM} = 4 \text{ с}; k_{TD} = 1; T_{TD} = 15 \text{ с};$$

$$\sigma_{\psi} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$M(s) = 1.111 \cdot 10^{-3}; \quad (3.15)$$

$$P(s) = (s + 0.01667)(s + 0.06667)(s + 0.25); \quad (3.16)$$

$$S_{\text{вир}}(s) = -7161.9724(s + 0.25)(s - 0.25)(s - 0.01667)(s + 0.01667). \quad (3.17)$$

Згідно з алгоритмом синтезу проведемо факторизацію виразу (3.17) і визначимо поліноми $\Gamma_0(s)$ та $\Gamma_1(s)$.

$$\Gamma_1(s) = 84.6284(s + 0.25)(s + 0.01667); \quad (3.18)$$

$$\Gamma_0(s) = 1. \quad (3.19)$$

Приймаємо $\alpha = 0$, $\beta = 1$ та за виразом (3.9) знайдемо

$$Q(s) = (s + 0.01667)(s + 0.06667)(s + 0.25). \quad (3.20)$$

Далі розрахунки будуть виконані для вагового коефіцієнта $r = 1$, а значення коефіцієнта s прийматимуть такі значення: 0,1; 0,3; 1; 3; 10. Використовуючи вираз (3.8) при $s = 1$, знайдемо поліном та здійснимо його факторизацію

$$G(-s) = -(s - 0.2507)(s^2 - 0.1163s + 0.004569). \quad (3.21)$$

Далі за виразом (3.7) обчислюємо

$$R(s) = 1.111 \cdot 10^{-3}. \quad (3.22)$$

Наступним кроком, підставляючи значення виразів (3.18)-(3.22) у формулу (3.6), отримуємо вираз і проводимо його сепарацію

$$B_{-}(s) = \frac{-17.6759(s^2 - 0.4336s + 0.06262)}{(s - 0.2507)(s^2 - 0.1163s + 0.004569)}. \quad (3.23)$$

Згідно з виразом (3.5), підставивши значення виразів (3.18)-(3.23), обчислюємо передаточну функцію оптимального регулятора для вагового коефіцієнта $s = 1$. Частотну характеристику зображено на рисунку 3.2

$$W_{(1)}(s) = \frac{0.20887(s + 0.25)(s + 0.01668)}{(s + 0.2442)(s + 0.0561)}. \quad (3.24)$$

Аналогічні розрахунки були виконані для інших значень вагового коефіцієнта s . Оскільки вирази (3.15)-(3.20), (3.22) не залежать від цього коефіцієнта, вони залишаються незмінними для всіх варіантів розрахунків. Тому для інших значень вагового коефіцієнта будемо наводити розрахунки лише для виразів $G(-s)$, $B_{-}(s)$, $W(s)$.

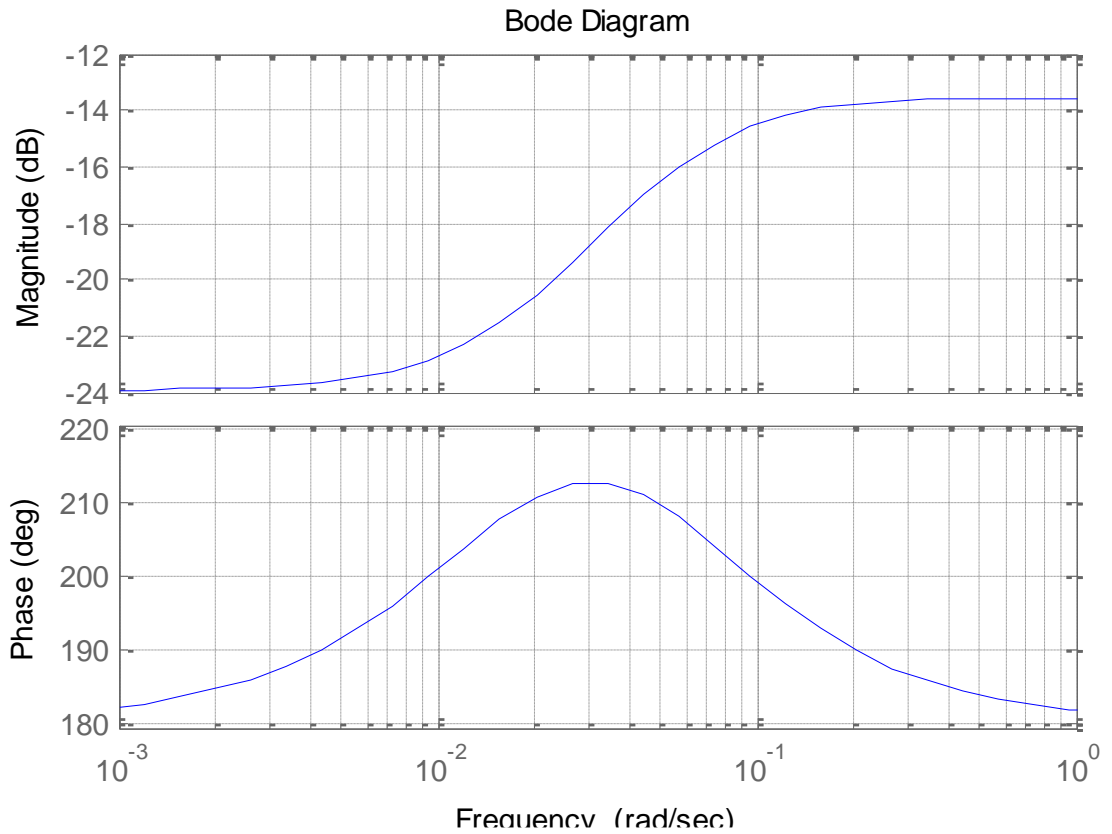


Рисунок 3.2 – Частотна характеристика регулятора при значенні $c = 1$

Отже, при значенні $c = 0,1$ було отримано наступний результат:

$$G(-s) = -0.31623 (s - 0.2561) (s^2 - 0.1707s + 0.01376). \quad (3.25)$$

$$B_{-}(s) = \frac{-31.1359 (s^2 - 0.4935s + 0.09039)}{(s - 0.2561) (s^2 - 0.1707s + 0.01376)}. \quad (3.26)$$

$$W_{(0,1)}(s) = \frac{1.1634 (s + 0.25) (s + 0.01667)}{(s^2 + 0.3602s + 0.03348)}. \quad (3.27)$$

Частотну характеристику регулятора можна побачити на рис. 3.3.

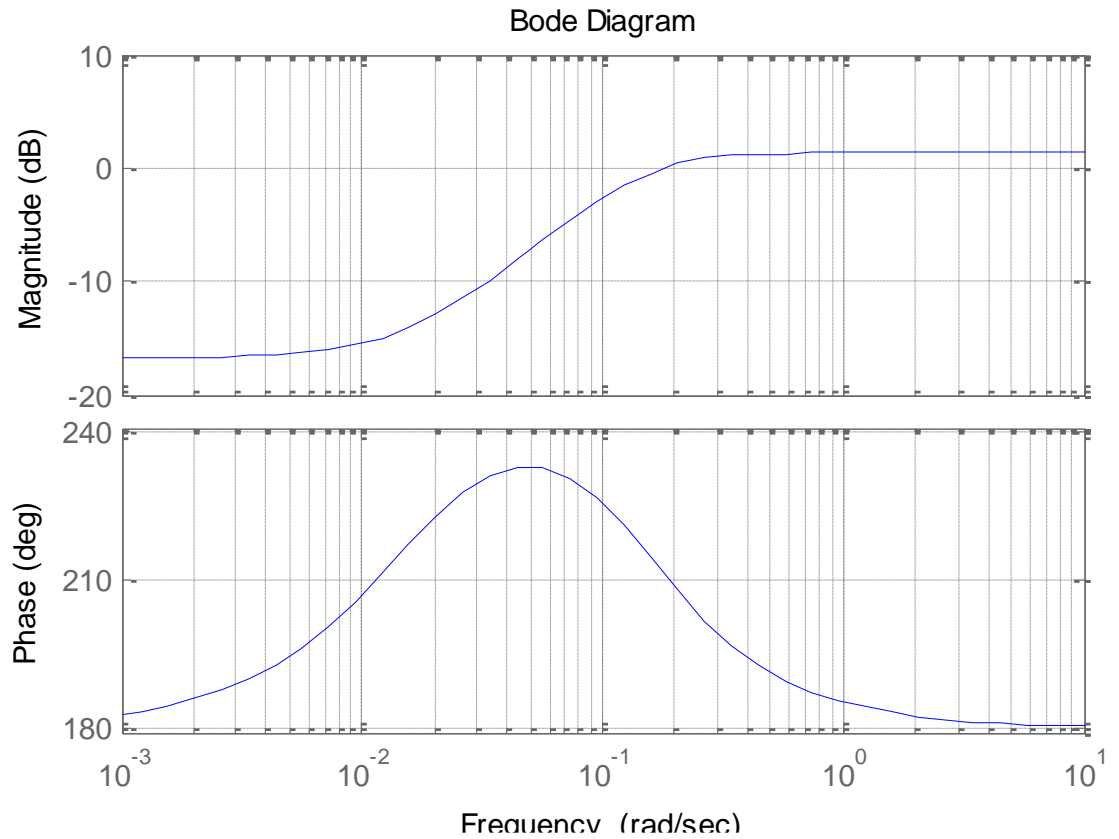


Рисунок 3.3 – Частотна характеристика регулятора при значенні $c = 0,1$

За значення $c = 0,3$ отримано наступний результат:

$$G(-s) = -0.54772 (s - 0.2522) (s^2 - 0.1409s + 0.008119). \quad (3.28)$$

$$B_{-}(s) = \frac{-24.5217 (s^2 - 0.4598s + 0.07431)}{(s - 0.2522) (s^2 - 0.1409s + 0.008119)}. \quad (3.29)$$

$$W_{(0,3)}(s) = \frac{0.52902 (s + 0.25) (s + 0.01667)}{(s + 0.2321) (s + 0.09434)}. \quad (3.30)$$

Частотну характеристику регулятора можна побачити на рисунку 3.4.

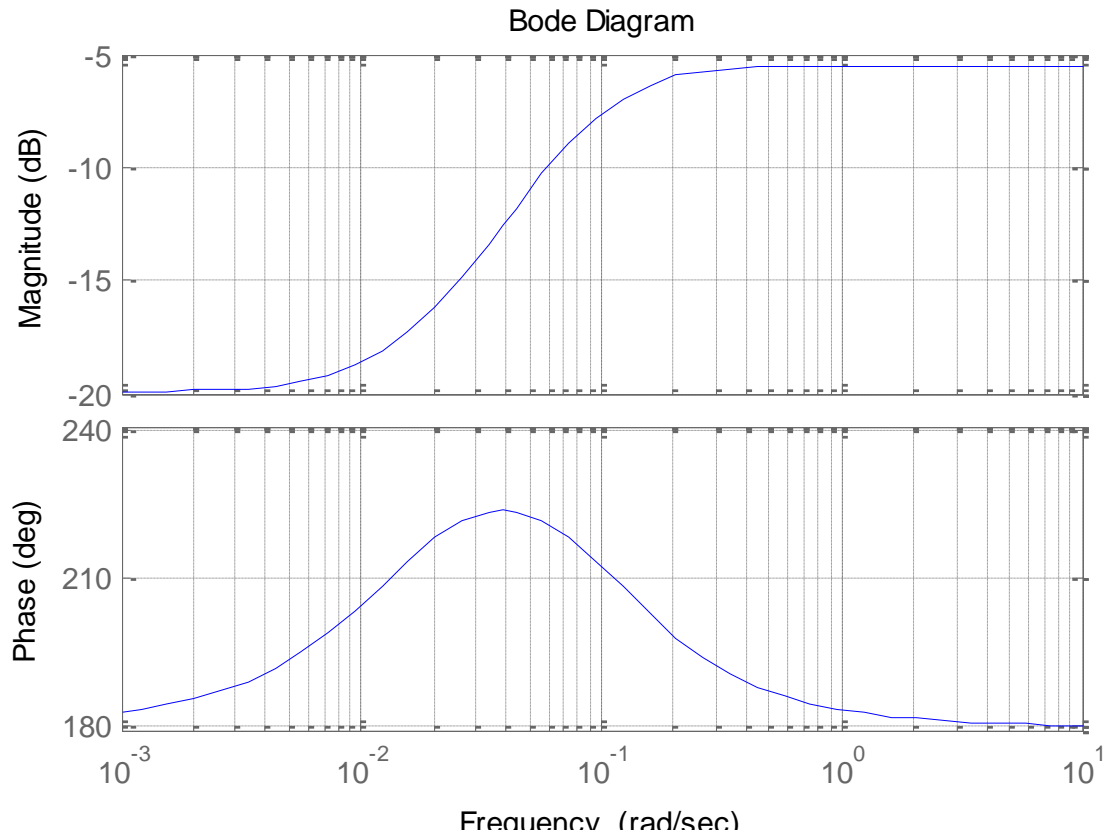


Рисунок 3.4 – Частотна характеристика регулятора при значенні $c = 0,3$

За значення $c = 3$ отримано наступний результат:

$$G(-s) = -1.7321(s - 0.2502)(s^2 - 0.101s + 0.002794). \quad (3.31)$$

$$B_{-}(s) = \frac{-12.2653(s^2 - 0.4179s + 0.05591)}{(s - 0.2502)(s^2 - 0.101s + 0.002794)}. \quad (3.32)$$

$$W_{(3)}(s) = \frac{0.083676(s + 0.25)(s + 0.01668)}{(s + 0.2479)(s + 0.03668)}. \quad (3.33)$$

Частотна характеристика регулятора показана на рис. 3.5.

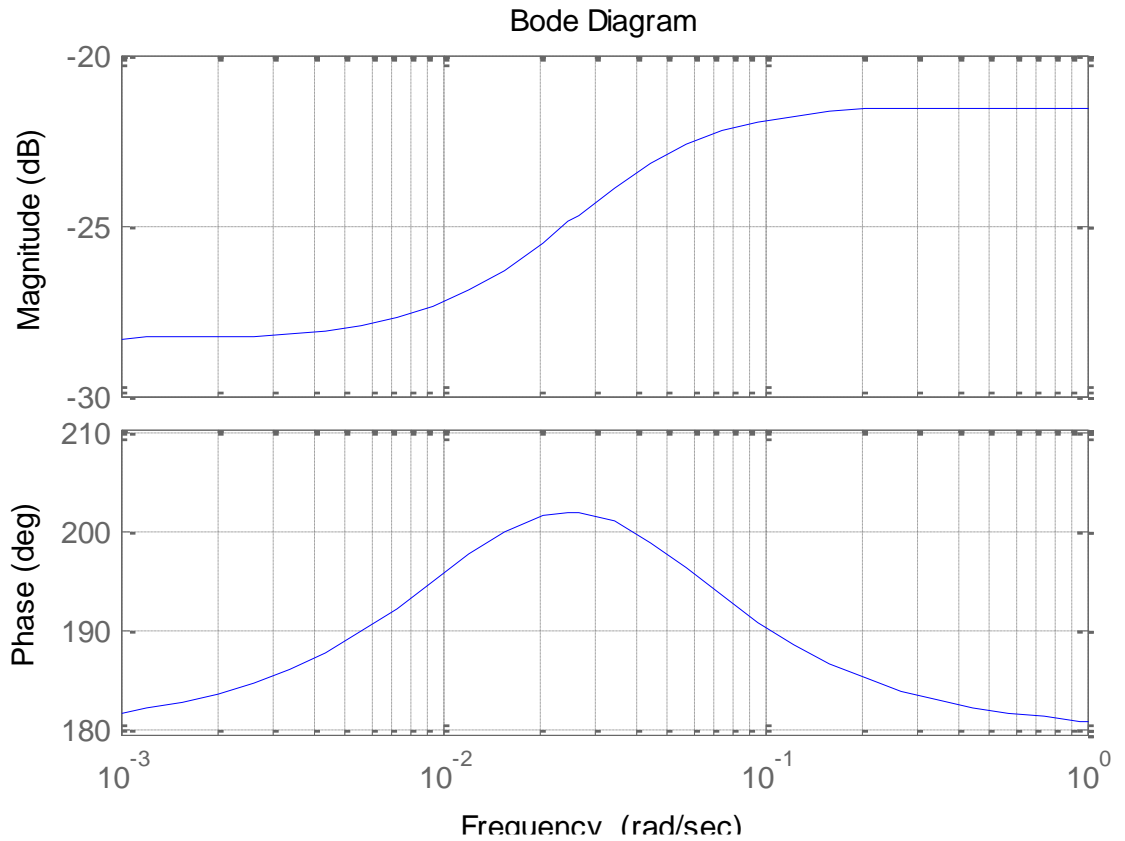


Рисунок 3.5 – Частотна характеристика регулятора при $c = 3$

За значення $c = 10$ отримано наступний результат:

$$G(-s) = -3.1623 (s - 0.02884) (s - 0.0621) (s - 0.2501). \quad (3.34)$$

$$B_{-}(s) = \frac{-7.6352 (s^2 - 0.4077s + 0.05171)}{(s - 0.2501) (s - 0.0621) (s - 0.02884)}. \quad (3.35)$$

$$W_{(10)}(s) = \frac{0.02853 (s + 0.25) (s + 0.01668)}{(s + 0.2493) (s + 0.02505)}. \quad (3.36)$$

Частотна характеристика регулятора представлена на рисунку 3.6.

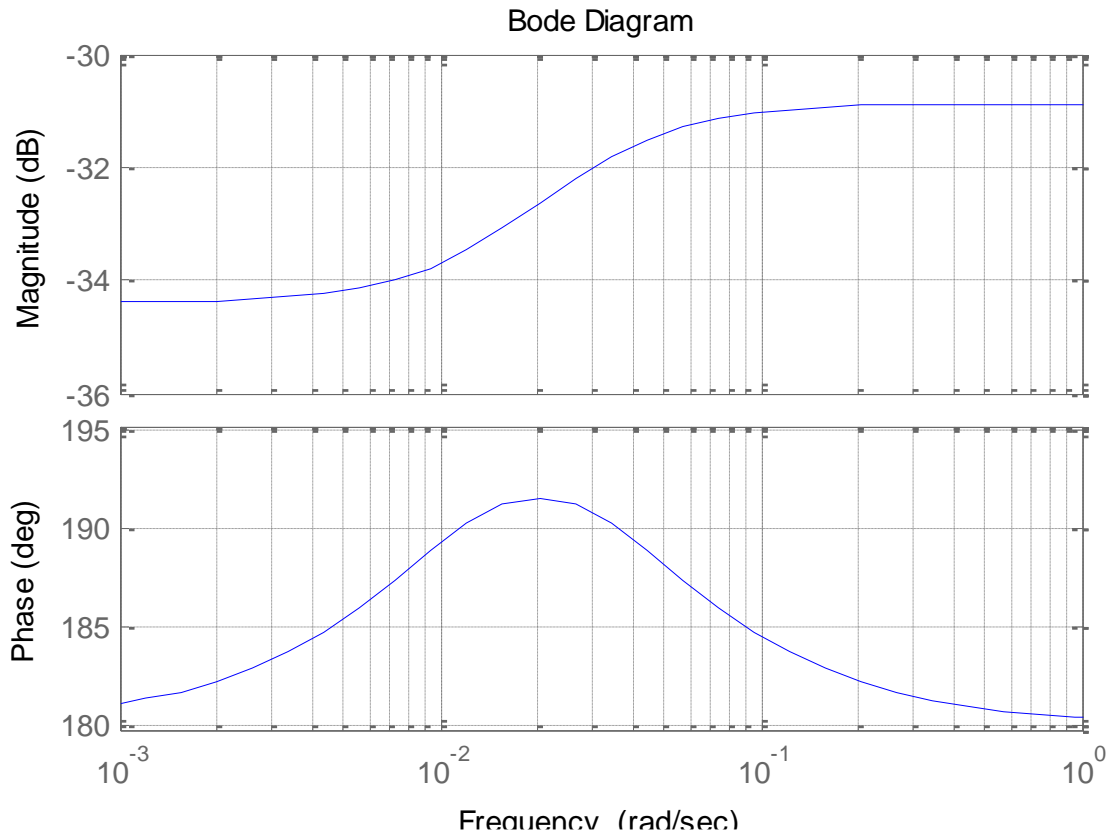


Рисунок 3.6 – Частотна характеристика регулятора при значенні $c = 10$

В результаті було отримано набір передаточних функцій регуляторів для різних значень вагового коефіцієнта c . Як показують вирази передаточних функцій та форма частотних характеристик регуляторів, структура системи залишається сталою, але деякі параметри передаточних функцій змінюються в залежності від вагового коефіцієнта. Наприклад, коефіцієнт підсилення регулятора зменшується зі збільшенням вагового коефіцієнта. Для вибору оптимальної передаточної функції регулятора серед отриманих варіантів необхідно провести аналіз якості.

3.2 Оцінка ефективності вирішення задачі регулювання

Ефективність системи автоматичного регулювання визначається за значенням квадратичного функціоналу (3.3)

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle,$$

де r та c – це вагові коефіцієнти, $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ - дисперсії величин x та u .

Потрібно визначити, при яких значеннях вагових коефіцієнтів r та c функціонал досягатиме мінімального значення.

За допомогою формул (3.1 – 3.4) визначимо передаточні функції, що описують взаємозв'язок між координатами системи та зовнішніми впливами:

$$\left. \begin{aligned} x(s) &= F_x(s)\psi(s) = \frac{1}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= F_u(s)\psi(s) = \frac{W(s)}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= W(s)x(s) = F_u(s)F_x^{-1}(s)x(s), \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

Оскільки замкнута система має бути стійкою, а відповідно функції $F_x(s)$ та $F_u(s)$ повинні бути фізично реалізованими (не містити полюсів у правій півплощині комплексної площини), застосуємо перетворення Фур'є, поклавши $s = i \cdot \omega$. Тоді функціонал (2.8) можна записати у вигляді:

$$J = \frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} [rF_x(s)F_x(-s)S_\psi(s) + cF_u(s)F_u(-s)S_\psi(s)] ds. \quad (3.38)$$

Для визначення функціоналу спочатку потрібно знайти функції $F_x(s)$ та $F_u(s)$ для значень $c = 0.1; 0.3; 1; 3; 10$. Потім, використовуючи функцію `norm` в середовищі MatLab, обчислити функціонал.

$$\text{norm}\left(F(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) = \sqrt{\frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} F(s)F(-s)S_\psi(s) ds} \quad (3.39)$$

$$J = r \cdot \left(\text{norm}\left(F_x(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 + c \cdot \left(\text{norm}\left(F_u(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 \quad (3.40)$$

Обчислюємо функціонал при $c = 0,1$. Для цього необхідно знайти вирази $F_x(s)$ та $F_u(s)$ за допомогою формул (3.37)

$$F_x(s) = \frac{(s^2 + 0.3602s + 0.03348)}{(s + 0.01667)(s + 0.25)(s + 0.2561)(s^2 + 0.1707s + 0.01376)} \quad (3.41)$$

$$F_u(s) = \frac{1.1634}{(s + 0.2561)(s^2 + 0.1707s + 0.01376)} \quad (3.42)$$

Наступним кроком, використовуючи функцію `norm` в середовищі MatLab, обчислюємо середньоквадратичні відхилення вихідного та управляючого сигналів, а також загальний функціонал для оцінки якості роботи системи.

$$\sigma_x = 0.081 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_u = 0.1249 \text{ В}, J = 0.0121. \quad (3.43)$$

Обчислюємо функціонал для значення $c = 0,3$.

$$F_x(s) = \frac{(s + 0.2321)(s + 0.09434)}{(s + 0.01667)(s + 0.25)(s + 0.2522)(s^2 + 0.1409s + 0.008119)} \quad (3.44)$$

$$F_u(s) = \frac{0.52902}{(s + 0.2522)(s^2 + 0.1409s + 0.008119)} \quad (3.45)$$

Наступним кроком, за допомогою функції `norm` у середовищі MatLab, визначаємо середньоквадратичні відхилення вихідного та управляючого сигналів, а також обчислюємо загальний функціонал якості роботи системи.

$$\sigma_x = 0.089 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_u = 0.0858 \text{ В}, J = 0.0101. \quad (3.46)$$

Обчислюємо функціонал для значення $c = 1$.

$$F_x(s) = \frac{(s + 0.2442)(s + 0.0561)}{(s + 0.01667)(s + 0.25)(s + 0.2507)(s^2 + 0.1163s + 0.004569)} \quad (3.47)$$

$$F_u(s) = \frac{0.20887}{(s + 0.2507)(s^2 + 0.1163s + 0.004569)} \quad (3.48)$$

Наступним кроком за допомогою функції `norm` в середовищі MatLab обчислюємо середньоквадратичні відхилення вихідного та керуючого сигналів, а також загальний функціонал, що оцінює якість роботи системи:

$$\sigma_x = 0.0989 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_u = 0.0615 \text{ В}, J = 0.0136. \quad (3.49)$$

Обчислюємо функціонал для значення $c = 3$.

$$F_x(s) = \frac{(s + 0.2479)(s + 0.03668)}{(s + 0.01667)(s + 0.25)(s + 0.2502)(s^2 + 0.101s + 0.002794)} \quad (3.50)$$

$$F_u(s) = \frac{0.083676}{(s + 0.2502)(s^2 + 0.101s + 0.002794)} \quad (3.51)$$

Наступним кроком за допомогою функції `norm` в середовищі MatLab обчислюємо середньоквадратичні відхилення для вихідного та управляючого сигналів, а також визначаємо загальний функціонал якості роботи системи:

$$\sigma_x = 0.1083 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_u = 0.0547 \text{ В}, J = 0.0223. \quad (3.52)$$

Обчислюємо функціонал при значенні $c = 10$.

$$F_x(s) = \frac{(s + 0.2493)(s + 0.02505)}{(s + 0.01667)(s + 0.02884)(s + 0.0621)(s + 0.25)(s + 0.2501)} \quad (3.53)$$

$$F_u(s) = \frac{0.02853}{(s + 0.2501)(s + 0.0621)(s + 0.02884)} \quad (3.54)$$

Потім за допомогою функції `norm` в середовищі MatLab визначаємо середньоквадратичні відхилення вихідного та управляючого сигналів, а також загальний функціонал, який оцінює якість роботи системи:

$$\sigma_x = 0.1255 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_u = 0.0421 \text{ В}, J = 0.0335. \quad (3.55)$$

З результатів дослідження якості регулювання встановлено, що функціонал досягає мінімального значення $J = 0.0101$ при ваговому коефіцієнті $c = 0.3$. У цьому випадку середньоквадратичне відхилення вихідної координати системи становить $\sigma_x = 0.089 \text{ }^\circ\text{C}$, а координати регулятора $\sigma_u = 0.0858 \text{ В}$. Таким чином, передаточна функція регулятора має наступний вигляд.

$$W_P(s) = \frac{0.52902(s + 0.25)(s + 0.01667)}{(s + 0.2321)(s + 0.09434)} \quad (3.56)$$

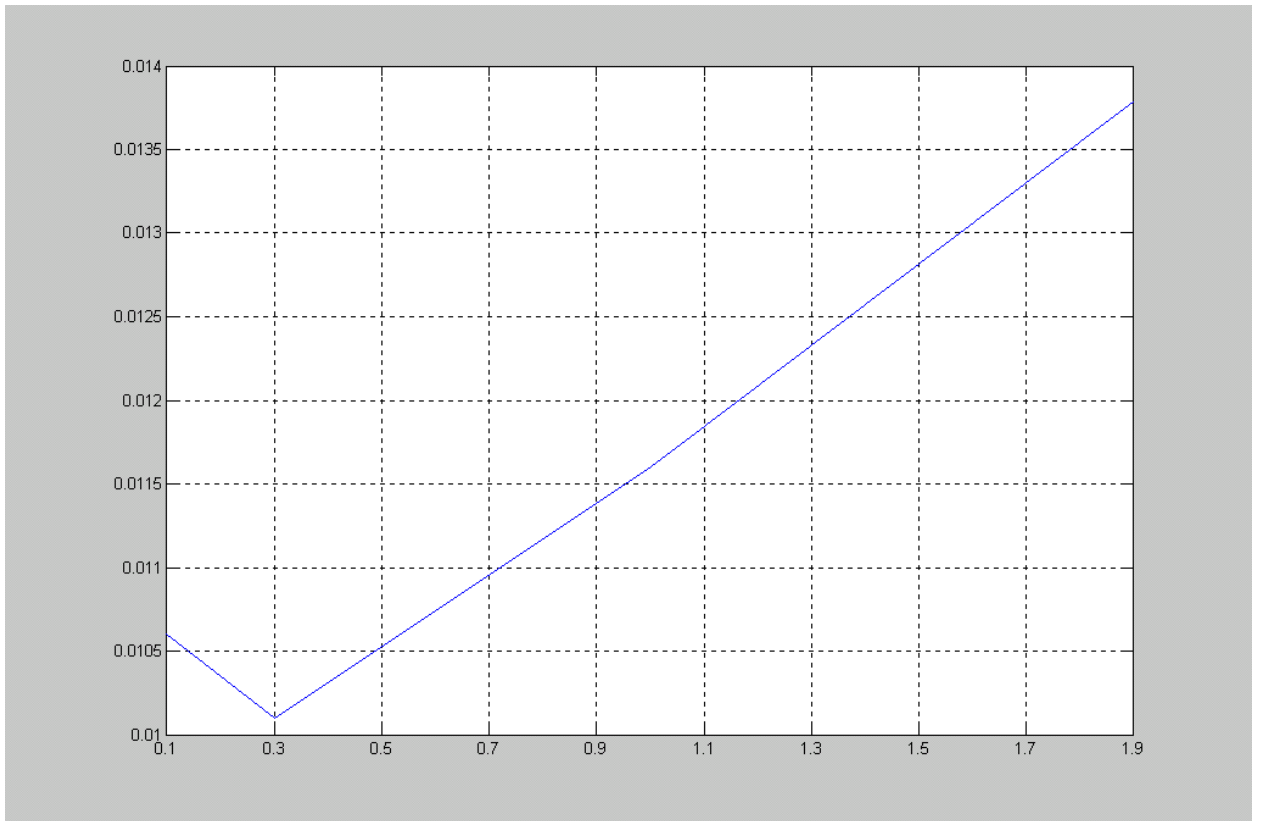


Рисунок 3.7 – Графік залежності функціоналу J від вагового коефіцієнту c

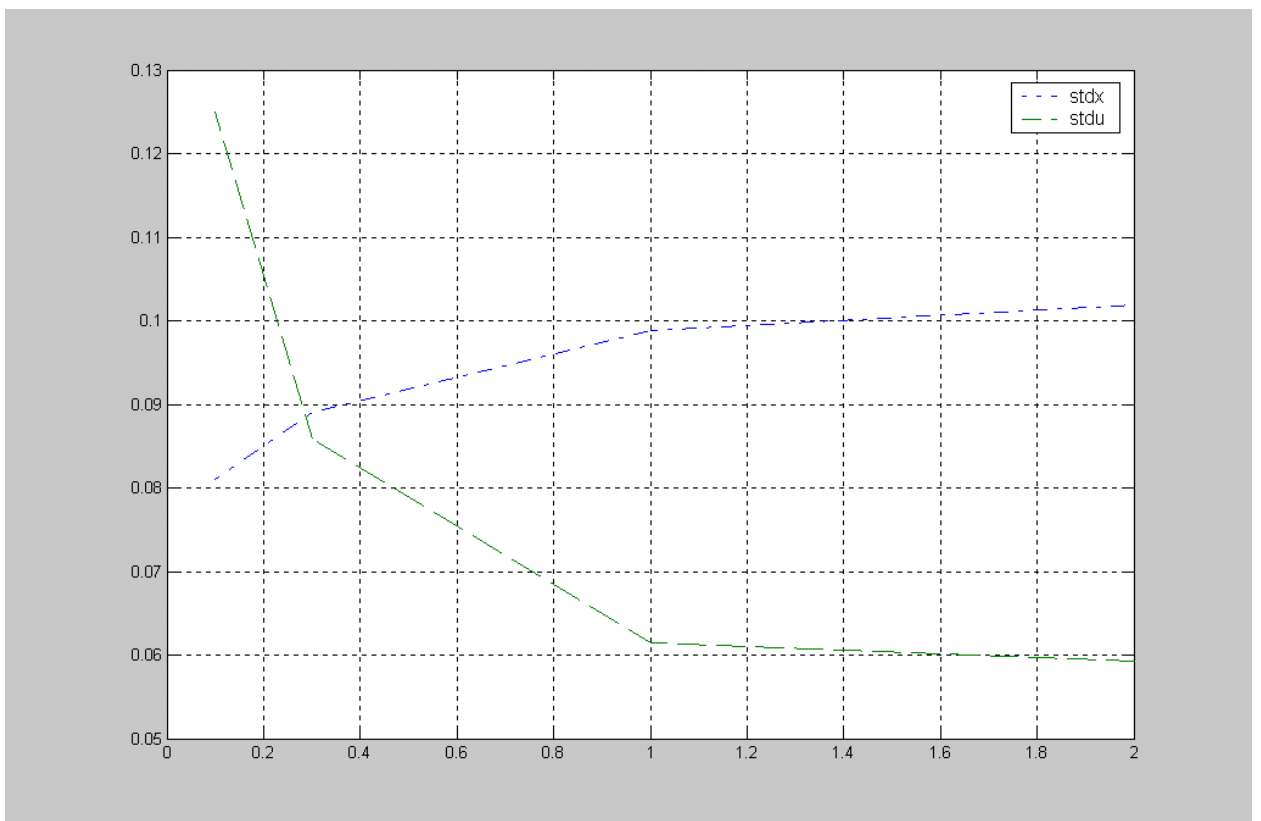


Рисунок 3.8 – Графік залежностей σ_x та σ_u від c

4 Практичне впровадження системи автоматичного регулювання

4.1 Встановлення періоду дискретизації

Процес перетворення неперервних сигналів у дискретні обумовлений наявністю в системі дискретного елемента, що формує послідовність імпульсів на виході. Таким елементом може виступати ключ K' , який замикається через кожен інтервал квантування T .

Проблема вибору оптимального періоду квантування T є однією з ключових у питанні раціонального використання машинного часу під час реалізації систем цифрового керування. Зменшення T підвищує точність керування та навантаження на мікроЕОМ, але водночас призводить до неефективного використання машинного часу. З іншого боку, збільшення T погіршує якість керування системою. Тому необхідно знайти компромісне рішення, яке б задовольнило ці суперечливі вимоги $\Theta(t)$. Вибір T здійснюється відповідно до спектра неперервної функції, спираючись на теорему Котельникова.

Теорема Котельникова стверджує: функція часу $\Theta(t)$, яка не має гармонічних складових із частотами ω_{\max} , вищими за частоту, може бути повністю відновлена за її значеннями в моменти часу nT , розташованими один від одного через рівні інтервали.

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

інакше кажучи, частоту квантування необхідно вибирати так, щоб виконувалась умова $\omega \geq \omega_{\max}$. За такого підходу дискретна імпульсна функція точно відтворюватиме неперервну функцію

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

і під час квантування інформація не буде втрачена.

Найбільшу частоту ω_{\max} у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$ відповідно до амплітудно-частотної характеристики замкненої системи цифрового керування можна встановити, використовуючи критерій Джурі. Якщо на вхід регулятора подати гармонічний одиничний сигнал $\alpha(t) = \sin \omega t$, тоді вихідний сигнал замкненої системи можна виразити у вигляді функції, тобто

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

З цього випливає, що частоту ω_{\max} , при якій $|\beta(j\omega)|$ набуває малого значення, Θ_{Om} можна визначити, оскільки замкнена система пригнічує високочастотні компоненти сигналу. Значення Θ_{Om} визначає рівень точності, який необхідно досягти на виході системи.

Використовуючи задані вихідні дані, обчислюємо оптимальне значення періоду квантування сигналів для цифрової системи.

Частотна передаточна функція об'єкта регулювання задається наступним рівнянням

$$W_{OK}(p) = \frac{0.0011}{(s + 0.01667)(s + 0.06667)(s + 0.25)} \quad (4.4)$$

Частотна передаточна функція регулятора визначається наступним рівнянням

$$W_P(s) = \frac{0.52902(s + 0.25)(s + 0.01667)}{(s + 0.2321)(s + 0.09434)} \quad (4.5)$$

У цьому випадку необхідна точність керування об'єктом в сталому стані $\Theta_{om} = 0.1$.

Частотна передаточна функція замкненої системи задається рівнянням:

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

Підставивши вирази (4.4, 4.5) у (4.6), отримаємо:

$$\frac{0.00056}{(0.06667 \cdot j\omega + 1)(0.2321 \cdot j\omega + 1)(0.09434 \cdot j\omega + 1) + 0.00056} = 0,1 \quad (4.7)$$

Розв'язуючи це рівняння, визначаємо частоту $\omega_{max} = 0,96$

Оптимальний період квантування сигналу для розрахунків

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{max}} = \frac{\pi}{0,96} = 3,27c \quad (4.8)$$

Приймаємо $T < T_{роз}$ $T_d = 0,1c$

Ми обираємо цей період дискретизації, оскільки для нас критично важливо досягти максимальної точності роботи системи.

4.2 Визначення Z-перетворення передатної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи регулювання необхідно здійснити Z-перетворення передаточної функції регулятора, отриманої в процесі синтезу в розділі 3:

$$W_P(s) = \frac{0.52902 (s + 0.25) (s + 0.01667)}{(s + 0.2321) (s + 0.09434)} \quad (4.9)$$

Здійснимо розкладання передаточної функції регулятора на елементарні дроби:

$$W_P(p) = 0.529 + \frac{0.0148}{s + 0.2321} - \frac{0.0464}{s + 0.09434}. \quad (4.10)$$

Тепер проведемо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab при дискретизаційному часі $T_0 = 0,1$ с.

$$W_P(z) = 0.529 + \frac{0.00146}{z - 0.9771} - \frac{0.00462}{z - 0.9906}, \quad (4.11)$$

$$W_P(z) = 0.529 + \frac{0.00146 \cdot z^{-1}}{1 - 0.9771 \cdot z^{-1}} - \frac{0.00462 \cdot z^{-1}}{1 - 0.9906 \cdot z^{-1}}. \quad (4.12)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора складаємо різницеві рівняння:

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

$$u_1[n] = 0,529 x[n];$$

$$u_2[n] = 0,00146 x[n-1] + 0,9771 u_2[n-1];$$

$$u_3[n] = - 0,00462 x[n-1] + 0,9906 u_3[n-1].$$

Схему програмної реалізації показано на рисунку 4.1, де коефіцієнти мають такі значення:

$$a = 0,529; b_1 = 0,00146; b_2 = 0,9771; c_1 = 0,00462; c_2 = 0,9906.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації потрібно розробити регулятор за допомогою мікропроцесора.

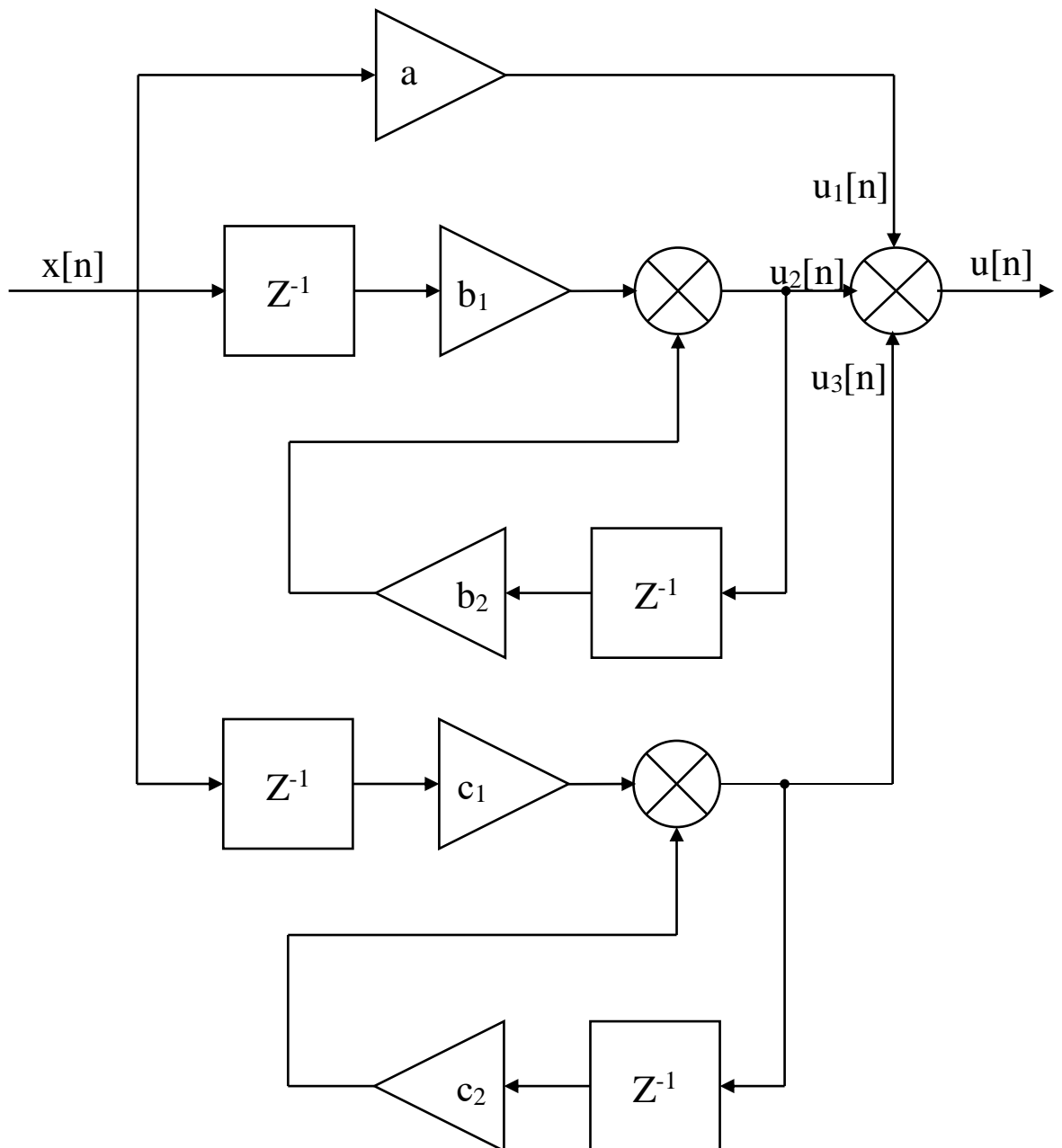


Рисунок 4.1 – Схема алгоритму програмного виконання регулятора

4.3 Створення електричної структурної схеми системи

Електрична структурна схема системи включає в себе:

- сенсор температури збірника какао тертого (СТЗКТ);
- сенсор витрати теплоносія (СВТ);
- сенсор початкової температури теплоносія (СПТТ);
- сенсор кінцевої температури теплоносія (СКТТ);
- сенсор тиску теплоносія (СТТ);
- регулятор температури збірника какао тертого (РТЗКТ);
- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП);
- однокристальна мікро-ЕОМ (ОМЕОМ);
- індикаційний блок (ІБ).

Розроблена в цьому проекті система призначена для автоматичного регулювання температури в збірнику какао тертого та моніторингу кількох параметрів: витрати теплоносія, початкової та кінцевої температури теплоносія, а також тиску теплоносія. Для вимірювання цих параметрів використовуються відповідні сенсори температури, витрати та тиску. Важливо знати поточні значення контрольованих параметрів для коректного запуску, налаштування та експлуатації процесу. Для встановлення необхідної температури збірника какао тертого використовується пристрій задавання температури.

Аналогові сигнали від датчиків температури (ДТЗКТ, ДПТТ, ДКТТ), розходу (ДРТ), тиску (ДТТ) та датчика температури (ЗТЗКТ) надходять на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), який входить до складу блока контролера і використовується для перетворення аналогових сигналів з датчиків у цифровий формат, зручний для подальшої обробки. Цифровий сигнал, що виходить з АЦП, передається на однокристальну мікро-ЕОМ (ОМЕОМ), яка в системі здійснює функції збору та обробки інформації, прийняття рішень і формування відповідного сигналу управління згідно з

алгоритмом роботи. Управління АЦП (вибір каналу, запуск перетворення, тактування тощо) також здійснюється за допомогою ОМЕОМ.

Для відображення інформації про поточні та встановлені значення в систему введено блок індикації (БІ), який управляється мікро-ЕОМ. На цифрових індикаторах відображається інформація про значення параметрів технологічного процесу. Також на блок індикації виводяться сигнали, що відображають стан теплоносія, які формуються мікро-ЕОМ.

Сигнал управління від мікро-ЕОМ направляєється на електромагнітний клапан.

4.4 Розробка принципової електричної схеми системи

Сигнал від датчика надходить на вхід активного фільтра, який реалізує низькочастотний фільтр 2-го порядку. Схему фільтра було обрано з офіційного сайту виробника і вона є типовим варіантом для цього підсилювача. Для підсилення використано здвоєний підсилювач типу МСР602 компанії National Semiconductor. Одна частина підсилювача застосована в фільтрі як DA1.1, а інша – DA1.2, використовується як неінверсуючий підсилювач напруги. Коефіцієнт підсилення для DA1.2 визначається співвідношенням опорів R4 та R3. Усі канали для вимірювання температури є однаковими.

Напруга від датчика температури подається через роз'єм ХР6 і додатково фільтрується за допомогою конденсатора С21.

Задатчик температури є перетворювачем «опір-напруга», тобто змінним резистором типу СП5-19, який через роз'єм підключений до дільника напруги, що складається з резисторів R21 та R22. Резистори R21 та R22 виконують функцію обмеження.

Після фільтрації та підсилення сигнали з температурних сенсорів надходять на входи IN0–IN4 аналого-цифрового перетворювача DD1. На вхід IN5 подається сигнал від температурного задавача. Як АЦП

застосовано восьмирозрядний восьмиканальний пристрій типу ADC0809 виробництва National Semiconductor.

Вибір потрібного каналу аналого-цифрового перетворювача здійснюється мікропроцесорною системою DD2, яка формує двійкові сигнали вибору на виходах P2.0–P2.2. Ці сигнали подаються на адресні входи AD0–AD2 вбудованого дешифратора АЦП. Закріплення вибраного номера каналу в АЦП відбувається за фронтом сигналу LE (Latch Enable) від високого до низького рівня, що генерується програмно на виході P3.6 мікро-ЕОМ. Тактування АЦП забезпечується сигналом ALE, який формується мікропроцесором у кожному машинному циклі та подається на вхід CLK АЦП. Після встановлення номера каналу АЦП переходить у режим готовності до перетворення.

Для ініціації перетворення мікро-ЕОМ DD2 програмно формує сигнал на виводі P3.4, який подається на вхід STCNV (Start Converting) АЦП. Перетворення розпочинається по передньому фронту цього сигналу та триває протягом восьми тактових імпульсів. По завершенні перетворення АЦП генерує сигнал високого рівня на виході EOC (End of Converting), який подається на вхід INT0 запиту на переривання мікро-ЕОМ DD2. Оскільки INT0 активується низьким рівнем, у схемі використовується інвертор на елементі DD3.1. У відповідь мікро-ЕОМ встановлює високий рівень на виводі P3.7, який надходить на вхід OE (Output Enable) АЦП, що забезпечує підключення внутрішніх регістрів АЦП до шин даних D0–D7. Після цього мікро-ЕОМ DD2 зчитує цифрові дані по лініях P0.0–P0.7.

Центральним елементом системи є однокристальна мікро-ЕОМ DD2, яка відповідає за збір і обробку інформації, прийняття рішень та генерацію керуючих сигналів відповідно до заданого алгоритму роботи. У схемі застосовано мікроконтролер типу AT89S51 виробництва компанії Atmel. Його тактування здійснюється за допомогою вбудованого генератора, до якого підключено зовнішній частотоподавальний контур на елементах C28,

C29 і кварцовому резонаторі ZQ1. Апаратне скидання мікроконтролера при подачі живлення забезпечується диференціюючим колом на елементах R25 і C30, яке формує короткий імпульс скидання на вході Reset. Для вибору режиму роботи з внутрішньою пам'яттю програм на вхід DEMA через резистор R24 подається логічна одиниця.

Керування цифровим індикатором здійснюється за допомогою з'єднання через роз'єм XS10, розташований на блоці контролера.

Для програмування однокристальної мікро-ЕОМ у схемі передбачено роз'єм XS9, через який за допомогою спеціального програматора та інтерфейсу SPI виконується запис програми.

Живлення блока контролера здійснюється від джерела з напругою +12 В, яка подається через роз'єм XP7. Для забезпечення гальванічної розв'язки між цифровою та аналоговою частинами блока в схемі застосовано перетворювачі DA6 і DA7 типу P610U-1205ELF виробництва компанії Реак. Ці модулі перетворюють вхідну постійну напругу +12 В у стабілізовану напругу +5 В. На їх виходах встановлені згладжуючі конденсатори C22–C27 для фільтрації пульсацій.

Блок індикації.

Порт P1 мікроконтролера передає керуючі сигнали до індикатора через роз'єм XS10. У схемі реалізовано принцип програмної динамічної індикації, суть якого полягає у поетапному виведенні через лінії порту P1 даних і адреси відповідного розряду індикатора. У кожен момент часу передаються дані та номер одного розряду, а згодом — наступного, і так далі по колу, відповідно до кількості розрядів. Через лінії P1.0–P1.3 передаються дані у двійковому форматі, які надходять на входи перетворювача кодів DD1 типу KP514ИД2. Цей перетворювач виконує функцію трансляції двійкового коду у код для семисегментного індикатора. Його виходи підключені до катодів індикаторів HG2, HG3, HG5 і HG6 типу A551. Незважаючи на наявність шести індикаторів у схемі, фактично реалізовано чотирирозрядну індикацію. Індикатори HG1

та HG4 задіюються лише для відображення чисел, більших за 100. У такому випадку вони працюють синхронно з HG2 та HG5, а їх сегменти В і С постійно з'єднані із "землею" через ключовий транзистор VT3, що відповідає відображенню цифри «1». При необхідності виводу числа більше 100, на лінії P3.6 встановлюється логічна «1», яка посилюється інверторами DD2.4 і DD2.3, відкриваючи VT3 та забезпечуючи виведення цифри 1 на індикаторах HG1 і HG4.

Із виходів P1.4 та P1.5 через роз'єм XS7 від блока контролера передається двійковий код номера активного розряду, який надходить на входи дешифратора DD3 типу К555ИД4. Дешифратор виконує перетворення цього коду у позиційний формат, у результаті чого на відповідному виході з'являється сигнал активації розряду. Цей сигнал подається на ключовий каскад, реалізований на транзисторах VT4–VT7, які з'єднують анод відповідного індикатора з джерелом живлення, забезпечуючи активацію потрібного розряду.

У наступному циклі дані будуть виводитись у наступний розряд. Таким чином, з часом дані циклічно з'являтимуться у всіх розрядах індикатора.

Коли відкриваються ключі в блоці контролера, сигнали з них передаються через роз'єм XS10 на світлодіодні індикатори HL2 та HL3, які, вмикаючись, сигналізують про відхилення температури від встановлених меж. Світлодіод HL1 показує наявність живлення, яке надходить на блок індикації через роз'єм XS10.

Сигнал аварії надходить на блок індикації через роз'єм XS10, проходить через інвертор DD2.1 і активує світлодіод HL4, який вказує на аварійну ситуацію. Одночасно цей сигнал передається через інвертор DD2.2 та електронний ключ, побудований на транзисторах VT1 і VT2. При активації ключа включається звуковий оповіщувач, який підключається до клем AL+ та AL- блоку індикації.

Висновки

1. У роботі розглянуто технологію виробництва шоколаду, а також характеристики продукції, сировини та напівфабрикатів, зокрема визначено основні етапи виробничого процесу.
2. Здійснено аналіз автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва шоколадної маси, визначено її структуру та основні складові.
3. Розроблено структурну схему системи регулювання температури в збірнику какао тертого, проведено аналіз її елементів та визначено завдання автоматизації.
4. В результаті синтезу системи регулювання температури в збірнику какао тертого отримано набір регуляторів для різних значень вагового коефіцієнта функціоналу якості.
5. Проведений аналіз якості системи регулювання температури дозволив визначити регулятор, який мінімізує квадратичний функціонал якості при ваговому коефіцієнті $c = 0,3$, а також розрахувати показники якості функціонування системи.
6. У проекті розроблено структурну та принципову схеми оптимального цифрового регулятора та блоку індикації, 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. 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.
3. 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.
4. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрьюменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
5. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
6. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
7. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусев, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
8. 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.
9. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.

10. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.
11. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
12. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
13. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
14. Ткаченко Р. Ю. Теоретичні та прикладні аспекти розробки комп'ютерних систем //Технології проектування і розробки інформаційних систем, 2018 – С. 234.
15. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
16. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
17. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
18. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.