

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 другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Розробка та дослідження системи автоматичного  
регулювання температури в холодильнику сусла при  
виробництві квасу»**

Виконав здобувач ІІ курсу групи АК-24М  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Тарас СЕЛІВАНОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

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

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Селіванова Тараса Вячеславовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу

2. Керівник роботи Дідик Олександр Костянтинівич, канд. техн. наук, доцент,  
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити систему автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу 1. Огляд технології виробництва квасу; 2. Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла; 3. Проектування системи автоматичного регулювання; 4. Практична реалізація системи автоматичного регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Жесан Р.В.</i>		



## Анотація

на випускну кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Селіванова Тараса Вячеславовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу».

Випускну кваліфікаційну роботу присвячено проблемі регулювання температурного режиму в холодильнику сусла при виробництві квасу. В проекті проаналізовано АСУТП виробництва квасу. Виконано розробку структурної схеми системи автоматичного регулювання температурного режиму в холодильнику сусла та обрані її елементи. Проведено дослідження стійкості системи автоматичного регулювання та визначені запаси стійкості. Виконано синтез регулятора на основі побудови бажаної ЛАЧХ. На основі передаточної функції оптимального регулятора визначена цифрова передаточна функція та алгоритм програмної реалізації. Розроблена структурна, функціональна та принципова електрична схема цифрового регулятора. Також в проекті розглянуті заходи з охорони праці.

**Ключові слова:** виробництво квасу, холодильник сусла, система автоматичного регулювання, оптимальний регулятор.

## Summary

on final qualification work of the student of group AK-24M Taras Selivanov on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of an automatic temperature control system in a mash refrigerator during kvass production».

The final qualification work is devoted to the problem of temperature regulation in the wort cooler during the production of kvass. The project analyzed the automated process control system for kvass production. The structural diagram of the system for automatic temperature regulation in the wort cooler and its selected elements were developed. The stability of the automatic control system was studied and the stability reserves were determined. The regulator was synthesized based on the construction of the desired LAFCH. Based on the transfer function of the optimal regulator, a digital transfer function and a software implementation algorithm were determined. A structural, functional and schematic electrical diagram of a digital regulator was developed. The project also considered labor protection measures.

**Key words: kvass production, wort refrigerator, automatic control system, optimal controller.**

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1 Огляд технологічного процесу виготовлення квасу .....	5
1.1 Методи приготування квасу.....	6
2 Створення структурної схеми системи автоматичного контролю температури в холодильнику сусла під час виробництва квасу .....	14
2.1 Дослідження АСУТП у виробництві квасу.....	14
2.2 Підбір та оцінка складових системи автоматичного контролю температури в холодильнику сусла .....	21
3 Розробка системи автоматичного контролю температури в холодильнику сусла .....	27
3.1 Обчислення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої системи та формулювання її характеристичного рівняння .....	27
3.2 Побудова ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи.....	28
3.3 Оцінювання стійкості замкнутої системи та визначення її запасів стійкості .....	30
3.4 Аналіз якості регулювання замкнутої САР за допомогою ЛАЧХ розімкнутої системи .....	31
3.5 Побудова перехідної характеристики замкнутої системи.....	33
3.6 Визначення безпосередніх показників якості САР за графіком перехідного процесу та оцінка часу регулювання системи як критерію для її аналізу та проектування .....	34
3.7 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної системи за швидкодією відповідно до поставлених до неї вимог .....	34
3.8 Побудова графіка перехідного процесу для синтезованої САР.....	37
3.9 Визначення безпосередніх показників якості синтезованої САР .....	39

4	Впровадження системи автоматичного регулювання на практиці.....	40
4.1	Підбір періоду дискретизації.....	40
4.2	Обчислення Z-перетворення передаточної функції регулятора.....	42
4.3	Створення електричної структурної схеми системи.....	44
4.4	Створення електричної функціональної схеми системи.....	46
4.5	Створення електричної принципової схеми системи.....	48
	Висновки.....	55
	Список літератури.....	56
	Додаток А.....	59

## Вступ

Виробництво безалкогольних напоїв включає як періодичні, так і безперервні процеси. Використання періодичних процесів знижує продуктивність обладнання та ускладнює процес управління. Тому розробка та впровадження безперервних технологічних процесів є важливим і актуальним напрямом розвитку виробництва.

Автоматизація виробництва безалкогольних напоїв розвивається у двох основних напрямках: перший передбачає автоматизацію періодичних процесів із максимальним використанням засобів контролю та регулювання якісних показників, а другий — удосконалення систем керування безперервними процесами та створення комплексних автоматизованих систем управління (АСУ). Усі технологічні процеси, як періодичні, так і безперервні, мають переважно послідовну структуру. З точки зору динамічних характеристик, процеси у відділенні приготування безалкогольних напоїв відзначаються відносно низькою інерційністю та різною тривалістю перебування середовища в окремих апаратах — від 1 хвилини у фільтрі-пресі лінії виробництва газованих напоїв до 60 хвилин у варильній колоні приготування купажного сиропу. Ці показники значно менші, ніж у кондитерському виробництві, де, наприклад, процес коншування шоколадних мас може тривати до трьох діб.

З точки зору динамічних характеристик, процеси виробництва безалкогольних напоїв є одно- та багатоємнісними системами з транспортним запізненням і розподіленими параметрами. Для такого виробництва характерна відсутність великих буферних ємностей між окремими відділеннями, наявність рециркуляційних потоків, а також зворотних зв'язків між відділеннями, що здійснюються через обслуговуючий персонал.

Головними завданнями управління такими процесами є автоматичний контроль і регулювання основних технологічних параметрів, а також

дистанційне або автоматизоване керування операціями дозування рідких і сипучих компонентів та виконання транспортних операцій.

**Мета дослідження** полягає у підвищенні якості виробництва квасу шляхом створення системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла з використанням алгоритмів сучасної теорії управління.

Для реалізації поставленої мети дослідження були визначені та виконані такі завдання:

- .. провести аналіз об'єкта регулювання та встановити його динамічні характеристики;
- .. розробити структурну схему системи автоматичного регулювання;
- .. здійснити синтез оптимального регулятора температури в холодильнику сусла;
- .. виконати оцінку якості роботи системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла.

**Об'єктом дослідження** є методи й алгоритми, спрямовані на покращення якості регулювання температури в холодильнику сусла.

**Предметом дослідження** є система автоматичного керування температурою в холодильнику сусла.

**Методи дослідження** ґрунтуються на принципах сучасної теорії управління, математичної статистики, теорії випадкових процесів та спектрального аналізу. Для оцінки якості системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла та перевірки ефективності запропонованих підходів застосовувалося імітаційне моделювання.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що визначена структура та параметри оптимального регулятора дають інженеру-конструктору змогу приймати рішення без проведення повторних розрахунків.

## 1 Огляд технологічного процесу виготовлення квасу.

Хлібний квас — це один із найпопулярніших напоїв, що має приємний аромат свіжоспеченого житнього хліба та характерний кислуватолодкий смак. У його складі містяться продукти спиртового та молочнокислого бродіння, які надають напою освіжаючих властивостей і характерного присмаку. Енергетична цінність 1 дм<sup>3</sup> квасу становить приблизно 1000–1170 кДж (240–280 ккал).

Для виготовлення хлібного квасу використовують такі основні інгредієнти, як житній та ячмінний солод, житнє борошно, цукор та інші допоміжні продукти. Технологічний процес виробництва напою складається з кількох основних етапів: отримання житнього солоду, приготування квасного сусла, його зброджування та подальшого купажування готового квасу.

Раніше квасне сусло виготовляли настійним та раціональним методами, проте нині ці способи використовуються досить рідко.

Настійний метод передбачав вилучення розчинних речовин із подрібнених квасних хлібців шляхом дво- або триразового настоювання їх у гарячій воді. Раціональний спосіб передбачав іншу технологію: квасне сусло отримували шляхом запарювання дробленого ферментованого житнього солоду та житнього борошна під надлишковим тиском протягом двох годин. Після цього запарену масу переміщували в заторний чан, додавали ячмінний солод і проводили процес оцукрювання за визначеним технологічним режимом. Готове сусло відділяли від зернової маси (гущі) шляхом фільтрування.

Нині квасне сусло зазвичай готують із концентрату квасного сусла, концентратів різних видів квасів, збагаченого концентрату квасного сусла або екстракту окрошкового квасу. Ці концентрати виробляють на спеціалізованих підприємствах із ферментованого та неферментованого

житнього солоду, ячмінного солоду, а також із додаванням житнього, кукурудзяного та ячмінного борошна.

Під час зброджування квасного сусла застосовують змішану культуру дріжджів і молочнокислих бактерій. Дріжджі забезпечують процес спиртового бродіння, тоді як молочнокислі бактерії викликають молочнокисле. Бактерії перетворюють приблизно половину цукру на молочну кислоту, а решту — на діоксид вуглецю, оцтову кислоту та етиловий спирт. Взаємодія цих мікроорганізмів ґрунтується на відмінностях у їхньому обміні речовин, потребах до поживного середовища та швидкості розмноження. Зі зміною умов середовища змінюється і характер бродіння, який відрізняється від процесів, що відбуваються під час їх окремого розвитку. Так, у першій половині процесу бродіння внаслідок діяльності молочнокислих бактерій накопичується молочна кислота, підвищується кислотність, що створює сприятливі умови для активного росту дріжджів. У другій половині процесу підвищена кислотність, навпаки, пригнічує їх життєдіяльність, і дріжджі поступово відмирають. Продукти їх автолізу слугують поживним середовищем для молочнокислих бактерій. У присутності цих бактерій дріжджі накопичують у середовищі до 0,04% оцтоетилового ефіру, який покращує смак і аромат квасу та підвищує його стійкість під час зберігання.

Зброджений квас купажують, тобто змішують у визначених пропорціях із потрібними компонентами, зокрема із цукром, після чого ретельно перемішують та розливають у тару.

### **1.1 Методи приготування квасу**

На підприємствах із виробництва безалкогольних напоїв квасне сусло готують шляхом розведення концентрату квасного сусла водою або настійним методом із використанням квасних житніх хлібців чи сухого квасу.

Настійний спосіб приготування сусла полягає у вилученні розчинних речовин із квасних хлібців або сухого квасу за допомогою гарячої води та подальшому відділенні розчиненої маси (квасної гущі). Перед настоюванням квасні хлібці подрібнюють на дробарках і завантажують в апарати для екстрагування.

Настійний апарат — це циліндрична ємність із кришкою, всередині якої розміщено змійовик, лопатеву мішалку та декантатор для відокремлення сусла від квасної гущі. Замість змійовика або барботера доцільніше застосовувати парову сорочку.

У настійний апарат заливають гарячу воду температурою 80–90 °С у такій кількості, щоб отримати перше сусло, яке становить приблизно третину від запланованого обсягу готового квасу. Під час перемішування до води додають усю необхідну за рецептурою кількість сухого квасу. Суміш перемішують близько 30 хвилин, після чого настоюють протягом 1,5–2 годин. Відстояне перше сусло через декантатор перекачують у бродильно-купажний апарат, попередньо охолоджуючи його в теплообміннику до температури 25–30 °С.

Залишену в апараті гущу повторно заливають гарячою водою температурою 60–70 °С у кількості, що відповідає об'єму першого сусла. Суміш перемішують протягом 20 хвилин, потім настоюють 1,5 години. Отриманий декантат пропускають через теплообмінник, охолоджуючи друге сусло до 25–30 °С, після чого об'єднують його з першим суслom.

Під час третього заливу додають таку кількість води, щоб довести загальний обсяг квасного сусла до необхідного. Суміш гущі з водою перемішують близько 20 хвилин і залишають настоюватися на 1 годину. Потім охолоджене до 25–30 °С третє сусло змішують із попередніми двома.

У першому суслі вміст сухих речовин становить 1,8–2%, у другому — 1,2–1,3%, а в третьому — 0,5–0,7%. Квасне сусло, що подається на бродіння, має температуру 23–27 °С і містить не менше ніж 1,5% сухих речовин за масою.

Для приготування сусла окрошкового квасу житнє борошно заливають окропом у співвідношенні 1:10, ретельно перемішують і охолоджують до температури 55 °С. Потім додають подрібнений ячмінний і житній солод, попередньо розведений у воді, нагрітій до 70–73 °С. Подальше настоювання проводять за тією ж технологією, що й описано вище. Масова частка сухих речовин у суслі, яке надходить на зброджування, становить 1,3%, а вихід готового сусла має відповідати обсягу вироблюваного квасу.

Під час приготування сусла з концентрату квасного сусла спочатку у бродильно-купажний апарат заливають воду температурою 30–35 °С, у якій розчиняють концентрат до масової частки сухих речовин 1,4% для хлібного квасу та 1% — для окрошкового. Концентрат квасного сусла (ККС) додають у апарат поступово: дві третини використовують для приготування сусла, а решту третину додають під час купажування, що сприяє покращенню аромату готового напою.

Для приготування сусла, яке підлягає зброджуванню, застосовують розведений і пастеризований або збагачений концентрат квасного сусла. Після цього додають цукровий сироп, комбіновану закваску з дріжджів і молочнокислих бактерій або підмолочені дріжджі.

Перед розведенням концентрат квасного сусла (ККС) або його збагачену форму пастеризують, нагріваючи до температури 75–80 °С протягом 30–35 хвилин. У цьому ж температурному режимі допускається пастеризація вже розведеного концентрату. Після термічної обробки концентрат охолоджують до 26–30 °С і перекачують у циліндрично-конічний бродильно-купажний апарат (ЦКБА).

Для процесу бродіння рекомендується використовувати 70% від загального об'єму концентрату квасного сусла (ККС), а решту 30% додають під час купажування готового квасу.

Дозволяється подавати на бродіння всю передбачену рецептурою кількість концентрату квасного сусла (ККС) без подальшого купажування готового напою з концентратом.

Розведений концентрат квасного сусла з масовою часткою сухих речовин 1,4% (при використанні 70% від розрахункової кількості концентрату) або 2,2% (якщо застосовується повна кількість концентрату) перекачують у циліндрично-конічний бродильно-купажний апарат (ЦКБА).

Виробництво квасу з додаванням ячмінного солоду можна здійснювати як на спеціалізованих квасових підприємствах, так і на пивоварних заводах, замінюючи половину концентрату квасного сусла неохмеленим пивним сусликом. Якщо колір напою недостатньо насичений, частину цукру замінюють карамельним кольором.

Процес зброджування квасного сусла здійснюють у бродильних або бродильно-купажних апаратах.

Бродильно-купажний апарат — це циліндрична ємність із конічним дном і сферичною герметичною кришкою, оснащена опорами. Для підтримання потрібної температури сусла апарат має водяну сорочку. У нижній частині конуса розміщений дріжжовідокремлювач із засувкою. Перемішування сусла під час бродіння та купажування забезпечується пропелерною мішалкою.

Апарат оснащений штуцерами для відведення повітря з основної ємності та сорочки, для подачі й відведення охолоджувального розсолу, введення сусла та сиропу. Крім того, він має термометр, манометр, компенсатор, пробний краник, зливний штуцер і штуцер для встановлення датчика автоматичного контролю рівня рідини. Зовнішня поверхня апарата покрита шаром теплоізоляційного матеріалу.

Апарат виготовляють у двох варіантах — об'ємом 100 і 500 літрів, із продуктивністю відповідно 150 та 700 літрів на добу.

Бродильний апарат — це циліндричний резервуар із герметичною кришкою. Він оснащений охолоджувальним змішувачем, декантером для

відокремлення зброженого суслу від дріжджового осаду, а також штуцером для зливу промивної води та трубою для відведення вуглекислого газу.

Спочатку в бродильно-купажний апарат заливають квасне сусло та додають чверть від загальної кількості цукру, передбаченого рецептурою, у вигляді цукрового сиропу. Вміст сухих речовин у суслі для хлібного квасу має становити не менше 2,5%, а для окрошкового — 1,6%. Далі вносять комбіновану закваску, що складається з чистих культур дріжджів і молочнокислих бактерій у кількості 2–4% від об'єму сусла, або використовують розведення з висушених технічно чистих культур (0,8% дріжджів і 0,06% молочнокислих бактерій від об'єму сусла). Бродіння здійснюють при температурі 25–28 °С до зменшення масової частки сухих речовин на 1% і досягнення кислотності не менше 2 см<sup>3</sup> розчину лугу концентрацією 1 моль/дм<sup>3</sup> на 100 см<sup>3</sup> квасу. Протягом процесу стежать за температурою, не допускаючи її підвищення.

Щоб забезпечити повніше оцукрювання вуглеводів і тим самим прискорити процес бродіння, після додавання цукрового сиропу до сусла вносять подрібнений ячмінний солод із розрахунку 5 г на 1 дм<sup>3</sup> сусла. Використовуваний солод має характеризуватися коротким періодом оцукрювання — не більше 10 хвилин.

Щоб підвищити стійкість зброженого сусла (квасу), після завершення процесу бродіння його ретельно відділяють від дріжджів. Для цього напій охолоджують у бродильно-купажному апараті до температури 5–7 °С. У результаті дріжджі осідають щільним шаром у дріжджовідокремлювачі, а квас обережно, не порушуючи осаду, перекачують у купажний апарат або проводять купажування безпосередньо в тому ж апараті.

Купажування квасу в бродильному апараті забороняється.

Під час бродіння квасного сусла частина поживних речовин використовується для росту клітин дріжджів і молочнокислих бактерій, тоді

як основна їх кількість під дією ферментів перетворюється на нові сполуки — цукри, етиловий спирт, органічні кислоти (зокрема молочну), вуглекислий газ тощо. Зниження температури суслу сприяє кращому розчиненню CO<sub>2</sub> та насиченню ним квасу. Якщо під час виробництва спостерігається недостатнє накопичення молочної кислоти в квасі, у готове сусло до внесення цукру дозволяється додавати 4% (від об'єму) комбінованої закваски або розчину висушених культур (0,5% дріжджів і 1,5% молочнокислих бактерій). Після цього продукт витримують близько 6 годин при температурі 30–32 °С, щоб забезпечити утворення молочної кислоти. Потім додають чверть цукру за рецептурою у вигляді сиропу та проводять бродіння при 30–32 °С до зменшення вмісту сухих речовин на 1% маси.

Якщо під час попередніх циклів бродіння відзначалося недостатнє утворення спирту, дріжджі додають у сусло на кілька годин раніше, ніж молочнокислі бактерії. У цьому випадку бродіння проводять при температурі 28–30 °С до зменшення вмісту сухих речовин на 1% від загальної маси.

Під час виготовлення хлібного квасу, окрім бродильно-купажних і бродильних апаратів, застосовують також циліндроконічні бродильні апарати (ЦКБА). ЦКБА є більш удосконаленим обладнанням — це циліндрична ємність зі сферичною кришкою, оснащена охолоджувальними сорочками на циліндричній та конічній частинах корпусу для підтримання оптимальної температури під час бродіння суслу і квасу. У нижній частині апарата розташовані дріжджовідокремлювач і горизонтальна мішалка. Конструкція також передбачає трубопровід для відведення вуглекислого газу, подачі мийного розчину, а також камеру для внесення комбінованої закваски й відведення готового продукту. Апарат встановлюють на кільцевих опорах.

Апарати виготовляються з робочим об'ємом 9,4 і 25 м<sup>3</sup>. Підготовлений розведений концентрат квасного суслу з температурою 26–

30 °С подають у ЦКБА при відкритому газовому вентилі. Щоб прискорити процес бродіння, у другу порцію розведеного концентрату квасного сусла при тій самій температурі додають підмолжені хлібопекарські дріжджі або комбіновану закваску з дріжджів і молочнокислих бактерій. Для запобігання надмірному піноутворенню та зручності експлуатації апарат наповнюють суслим знизу. Після цього, перемішуючи сусли відцентровим насосом «на себе», у ЦКБА додають 25 % цукру, передбаченого рецептурою, у вигляді профільтрованого сиропу з концентрацією сухих речовин 60–65 %.

Після ретельного перемішування відбирають пробу для визначення фізико-хімічних показників сусла перед початком бродіння — зокрема масової частки сухих речовин і температури. Потім апарат герметично закривають, перекриваючи повітряний вентиль. Під час бродіння тиск у ЦКБА контролюють за допомогою шпунтапарата, при цьому він не повинен перевищувати 0,065 МПа.

Щоб зменшити час завантаження і підвищити оборотність ЦКБА, рекомендується попередньо готувати сусли у окремих збірниках, де його ретельно перемішують і доводять до потрібної щільності.

Бродіння проводять при температурі 26–30 °С до зниження масової частки сухих речовин у суслі на 1 г на 100 г готового продукту та досягнення кислотності не менше 2 см<sup>3</sup> розчину натрій гідроксиду концентрацією 1 моль/дм<sup>3</sup>, необхідного для титрування 100 см<sup>3</sup> сусла. Протягом усього процесу слід контролювати температуру квасного сусла, не допускаючи її підвищення.

Бродіння здійснюють із періодичним перемішуванням відцентровим насосом кожні 2 години протягом 30 хвилин.

#### Купажування і розлив квасу

Зброджене квасне сусли підлягає купажуванню. У зброджене квасне сусли, що перебуває в бродильно-купажному або купажному апараті, додають решту  $\frac{3}{4}$  частини цукру та колір. Якщо сусли готувалося з використанням лише 70% ККС за рецептурою, додають залишок 30%

концентрату. Отриману суміш, яка називається купажем, ретельно перемішують, насичують вуглекислим газом, перевіряють відповідність якості квасу стандартним вимогам і після цього направляють на розлив.

Якщо квасне сусло бродить у бродильних апаратах, купажування квасу проводять у купажному апараті — ємності з емальованим покриттям або виготовленій з корозійностійкої сталі, що має теплоізоляцію, мішалку та барботер для перемішування купажу за допомогою вуглекислого газу.

Після завершення бродіння квасу в ЦКБА, що визначають за зниженням вмісту сухих речовин і підвищенням кислотності, перед охолодженням включають обидві сорочки ЦКБА та, за наявності, пластинчастий холодильник, через який насосом перекачують зброджений квас. У нижній конічній частині апарата осідають дріжджі, які випускають через зливний отвір, одночасно відкриваючи повітряний вентиль. Завершення зливу дріжджового осаду контролюють візуально через оглядове скло або зливну воронку. Після цього квас охолоджують до 5–7 °С.

Після видалення дріжджового осаду квас піддають купажуванню, додаючи 75% від розрахункової кількості цукру у вигляді сиропу та 30% ККС. Потім вміст ЦКБА ретельно перемішують насосом.

## **2 Створення структурної схеми системи автоматичного контролю температури в холодильнику сусла під час виробництва квасу**

Для підприємств харчової промисловості властиві певні специфічні риси. Зокрема, при виготовленні харчових продуктів переважають неперервно-дискретні та дискретні технологічні процеси, що дозволяють обробляти швидкопсувну сировину за допомогою складних фізико-хімічних та біохімічних методів, суворо дотримуючись рецептур для збереження харчової та смакової цінності продукції. Головним завданням є забезпечення стандартної якості продуктів.

АСУТП забезпечують автоматизований збір та обробку інформації для формування керуючих впливів на об'єкт управління. У виробництві харчових продуктів через складність і недостатню вивченість технологічних процесів виробництва роль людини залишається значною.

Створення та експлуатація АСУТП має забезпечити конкретні техніко-економічні результати: знизити собівартість продукції, гарантувати її стандартну якість, забезпечити достатню кількість та широкий асортимент харчових продуктів для задоволення споживчого попиту, а також покращити умови праці обслуговуючого персоналу.

### **2.1 Дослідження АСУТП у виробництві квасу**

Сучасні системи управління підрозділами харчових підприємств середньої та великої потужності зазвичай будуються за двоярусною ієрархічною структурою (рис. 2.1).

Перший рівень включає первинні перетворювачі (датчики), сигналізатори досягнення заданих параметрів, засоби керування виконавчими механізмами та пусковою апаратурою з контролерами. Технічно перспективним є підключення інтелектуальних датчиків і виконавчих пристроїв до контролерів або ПТК за допомогою цифрової

польової шини Fieldbus H1. Для інтеграції контролерів та обладнання різних виробників доцільно використовувати стандартний HART-протокол, який інформує оператора про збої в польовій мережі, пристроях та контролерах. Локальні пульти управління технологічним процесом і обладнанням здебільшого розташовують безпосередньо на об'єкті управління.

Вибір апаратури зазвичай здійснюють, орієнтуючись на такі критерії:

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

На першому рівні АСУТП виконує такі функції:

- збір даних від перетворювачів (датчиків) щодо стану об'єкта та технологічного обладнання.

- За наявності локальних контролерів додатково здійснюються:

- первинна обробка інформації (фільтрація, лінеаризація та масштабування) вхідних аналогових сигналів;

- формування керуючих впливів для роботи виконавчих пристроїв системи;

- передача даних на другий рівень системи автоматичного керування об'єктом.

На другому рівні технічні рішення передбачають застосування програмно-технічного комплексу (ПТК), сервера бази даних, АРМ оператора-технолога та АРМ хіміка-аналітика для контролю та управління технологічним процесом.

АСУТП другого рівня виконує такі функції:

- прийом та обробку даних за допомогою ПТК, сервера СУБД і бази даних, АРМ оператора-технолога та АРМ хіміка-аналітика;
- формування керуючих впливів;
- контроль і управління технологічним процесом та виконавчими пристроями;

- передачу інформації на вищий рівень управління через мережеві структури (Fieldbus DP).

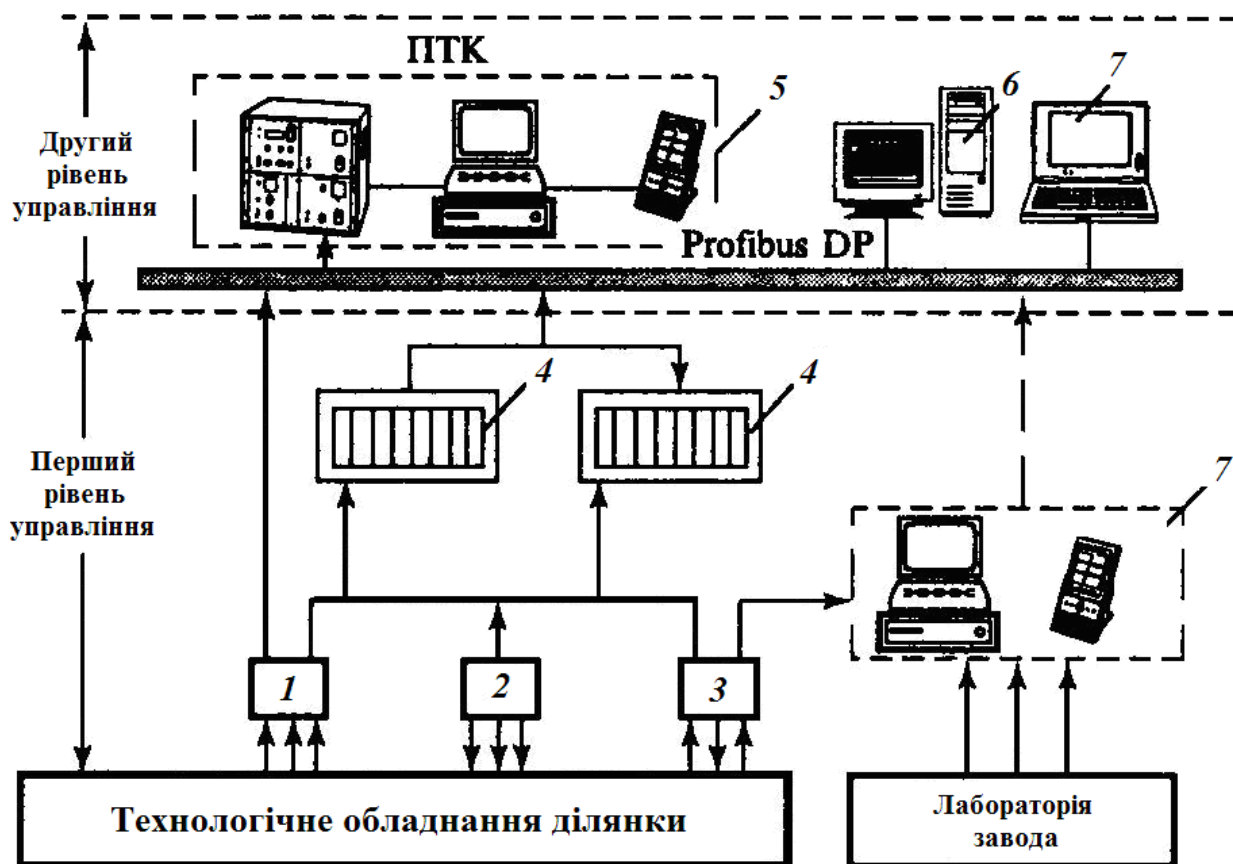


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСУТП для виробництва квасу: 1 – перетворювачі (датчики) технологічних параметрів; 2 – електропневматичні виконавчі пристрої та пускова електроапаратура; 3 – локальні пристрої управління технологічним процесом; 4 – мікропроцесорні локальні контролери; 5 – програмно-технічний комплекс (ПТК); 6 – сервер бази даних; 7 – АРМ оператора (технолога, інженера, хіміка-аналітика тощо).

Квас виробляють із солоду, житнього борошна, цукру та м'яти. Отримане квасне сусло піддають бродінню за допомогою комбінованої культури квасних дріжджів і молочнокислих бактерій.

Під час приготування квасу (рис. 2.2) хлібний екстракт насосом Н1 подається у збірник I, звідки насосом Н2 транспортується до цистерни II, а далі насосом Н3 – у збірник V, де розбавляється теплою водою. Тепла вода отримується змішуванням гарячої та холодної води. Розведений екстракт насосом Н5 подається у бродильний чан VI. У цей же чан насосом Н3

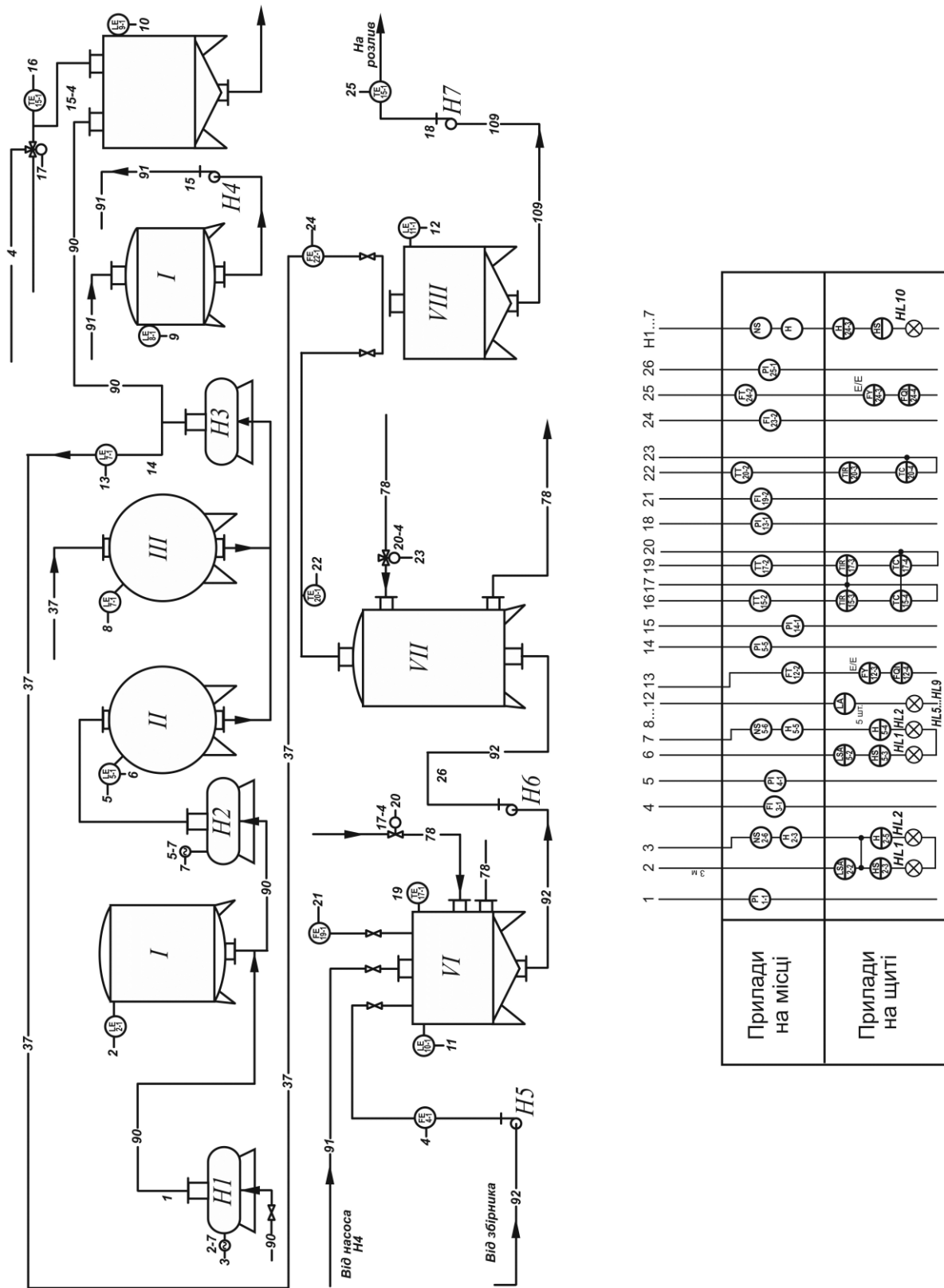


Рисунок 2.2 – Схема автоматизації виробництва квасу

додається частина цукрового сиропу, а насосом Н4 – закваска зі збірника ІV. У бродильному чані проходить процес шумування. Після його завершення сушло насосом Н6 перекачується у холодильник VII. Охолоджене сушло потрапляє в чан VIII для купажування квасу, де до нього додається залишок цукрового сиропу з цистерни III. Готовий квас потім насосом Н7 відкачується на розлив.

Схема керування виробництвом квасу забезпечує автоматичне дозування компонентів, підтримку заданих температурних режимів, контроль витрат, а також керування, блокування та сигналізацію роботи обладнання.

Систему управління технологічним процесом виробництва квасу можна реалізувати за допомогою АСУТП, що працює в режимі «Порадник», схема якої показана на рис. 2.1.

АСУТП для виробництва квасу є невеликою розподіленою системою управління (PCY), яка включає підсистеми збору та відображення інформації, автоматичного регулювання, дискретно-логічного керування, а також протиаварійного захисту та блокувань.

**Об'єкт управління** складається зі збірника хлібного екстракту 1, цистерни 2, цистерни цукрового сиропу 3, збірника закваски 4, збірника розведеного хлібного екстракту 5, бродильного чану 6, холодильника 7 та чану сушла 8.

**Основні елементи системи включають:** контролери РК-131/300 із 100%-м резервуванням — 3 шт., АРМи оператора-технолога, начальника відділення та лабораторії на базі промислових ЕОМ Pentium I з 20" моніторами, захищеними від електромагнітних впливів; мережеві засоби — 10 Мбіт Ethernet із 100%-м резервуванням; станцію архівування зі змінними магнітооптичними дисковими на 640 Мбайт; сервер БД РВ; принтери; програмні пакети Трейс Моуд; конструктивні елементи — 19" шафа RITTAL.

Інформаційна ємність АСУТП (рис. 2.1) становить загалом 52 сигнали, з яких 26 вхідних і 26 вихідних. Серед них: контрольовані аналогові параметри (рівень, температура, тиск, витрата) — 21; контрольовані дискретні сигнали (включно із запірною арматурою) — 5; дискретні керуючі сигнали — 9; контури регулювання — 3; запірна арматура — 3. Протиаварійні захисти та блокування (з 100%-м резервуванням) охоплюють 41 сигнал: 21 аналоговий параметр, 5 вхідних дискретних і 15 вихідних дискретних сигналів. Система управління реалізована з «гарячим» резервуванням у трьох комплектах.

Динамічні характеристики АСУТП: максимальний період опитування датчиків контролером становить 100 мкс для дискретних входів і 1 мс для аналогових входів; час реагування на аварійні сигнали — 20–100 мс при обробці на рівні контролера в ланцюгах аварійного захисту, 200 мс при передачі сигналів на пульти операторів. Цикл оновлення даних на пульті при 200 динамічних елементах у кадрі складає 0,2–1,0 с, цикл зміни кадрів — 0,2–1,5 с. Мінімальний час реакції на команду оператора становить 0,2 с. Час повного перезапуску системи після відключення живлення — 30 с, контролерів — 20 с.

Інформаційна ємність контролера РК-130/300 складає: 60 аналогових та 96 дискретних входів/виходів, а також 16 контурів регулювання. На практиці задіяно: 21 аналоговий вхід і 21 аналоговий вихід, 5 дискретних входів і 15 дискретних виходів, а також 3 контури регулювання.

Середній час безвідмовної роботи контролера становить 60 000 годин, а в дубльованому варіанті — 120 000 годин.

Автоматичне дозування компонентів проводиться об'ємним способом через проміжні ємності: збірник і цистерну для екстракту та збірник для закваски. Досягнення необхідного рівня екстракту у збірнику контролюється системою автоматичного регулювання (САР), яка включає датчик верхнього рівня (2-1). Його нормований сигнал надходить на АЦП (ADAM-5017) і логіко-програмний канал РК-131/300 (2-2), який через ЦАП

(ADAM-5024) і магнітний пускач (2-6) керує електродвигуном насоса НІ (2-7). При досягненні верхнього рівня запалюється світлове табло НЛ1 на пульті ПТК та АРМ технолога. Контроль роботи насоса НІ здійснюється за показаннями манометра (1-1). Перемикання з автоматичного на ручний режим відбувається за допомогою ключа (2-3) на пульті ПТК або АРМ технолога, а керування електродвигуном — кнопками (2-4) або (2-5). Аналогічно працює контур регулювання рівня в цистерні екстрактора ІІ. Сигналізація верхнього рівня у цистерні ІІІ, збірниках ІV і V, а також у чанах VI і VIII забезпечується ємнісними рівнемірами, АЦП (ADAM-5017H) і логічним каналом контролера РК-131/300, з виходом на світлові табло НЛ3 і НЛ7 та пульт ПТК через ЦАП (ADAM-5024).

Регулювання температурних режимів здійснюється у збірниках розведеного екстракту, бродильному чані та холодильнику сусла. Температура у збірнику розведеного екстракту визначається температурою суміші гарячої та холодної води. Температуру теплої води вимірює термоопір ТСМ, сигнал від якого надходить на АЦП (ADAM-5017) або модуль (ADAM-5013) (15-1). Далі нормований сигнал передається на відображення та реєстрацію (телемонітор і АЦПУ) (15-2), а також на вхід регулюючого каналу РК-131/300 (15-3), який через ЦАП (ADAM-5024) керує регулювальним клапаном (15-4) на лінії подачі гарячої води. Подібна система автоматичного регулювання (САР) використовується для підтримання температури у бродильному чані (контур 17) і холодильнику (контур 20).

Контроль обсягу сиропу, що подається у бродильний і купажний чани, здійснюється за допомогою шестеренних лічильників рідини (19-1) і (22-1). Витрати екстракту та квасу на розлив відстежуються індукційними витратомірами (12-1) і (24-1), сигнали від яких передаються на нормуючі перетворювачі (12-2) і (24-2). Після нормування сигнал направляється на відображення та підсумовуючі пристрої (телемонітор і підсумовуючий

пристрій) (12-3) і (24-3) на пульт ПТК та АРМ технолога, що дозволяє визначати загальний обсяг використаних рідин.

Контроль роботи насосів Н2 і Н7 проводиться за допомогою показуючих диференціальних манометрів (3-1, 4-1, 13-1, 14-1, 16-1, 25-1), сигнали з яких через ЦАП (ADAM-5024) передаються на систему сигналізації на пульт ПТК та АРМ технолога.

## **2.2 Підбір та оцінка складових системи автоматичного контролю температури в холодильнику сусла**

Розглянемо контур контролю температури в холодильнику сусла VI (рис. 2.2). У цій АСУТП виробництва квасу для даного контуру застосовується пропорційний закон керування, реалізований через логіко-програмний канал КР-300. Такий закон забезпечує стабільність роботи системи регулювання, однак рівень якості контролю залишає бажати кращого. Покращити якість регулювання можливо шляхом впровадження системи автоматичного керування з використанням оптимального регулятора.

В цій системі автоматичного регулювання об'єктом виступає холодильник сусла, у якому необхідно підтримувати задану температуру. Регулювання здійснюється шляхом подачі гарячої води у сорочку холодильника. Показником ефективності процесу є температура  $t_{II}''$  сусла всередині холодильника, а основною метою регулювання є утримання цієї температури на встановленому рівні.

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

Вирішуючи це рівняння відносно  $t_{II}''$ , отримуємо:

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

Розхід продукту  $G_{II}$  задається іншими технологічними процесами, а не процесом нагрівання, тому його не можна стабілізувати і використати для регулюючого впливу; при зміні  $G_{II}$  у теплообмінник надходять значні збурення. Температури  $t_{II}', t_T'$ , а також питома теплоємність  $c_{II}$  та  $c_T$ ) визначаються режимами інших технологічних процесів, тому їх стабілізувати під час нагрівання неможливо. До неможливих для усунення збурень відносяться також коливання температури навколишнього середовища, зміни властивостей теплопередаючої стінки через відкладення солей і корозію.

Аналіз об'єкта регулювання показав, що більшість збурюючих впливів усунути неможливо. Тому в якості регульованого параметра слід використовувати температуру  $t_{II}''$ , а регулююче діяння реалізувати шляхом зміни витрати теплоносія  $G_T$ .

Теплообмінники, як об'єкти температурного регулювання, характеризуються великими запізненнями, тому особливу увагу слід приділяти правильному розташуванню датчика та вибору закону регулювання.

В якості контрольованих параметрів доцільно обрати витрату теплоносія, його початкову та кінцеву температуру, а також тиск. Поточні значення цих параметрів необхідні для коректного запуску, налаштування та експлуатації процесу.

Через складність процесу теплообміну та неможливість врахувати всі його особливості в математичній моделі, зазвичай використовують спрощену модель, яка враховує питомі теплоємності як постійні часу, а передаточну функцію об'єкта регулювання описують у вигляді:

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

В АСУТП для контролю температури застосовують термоперетворювачі опору (ТС). Вони призначені для вимірювання температури твердих тіл, рідин, газів та сипучих матеріалів і можуть використовуватися як у нейтральних, так і в агресивних середовищах. ТС виготовляються з чутливими елементами з платини (ТСП) або міді (ТСМ).

ТС — це пристрій, що реагує на зміну температури, який включає чутливий елемент у захисній оболонці, внутрішні з'єднувальні проводи та зовнішні виводи для підключення до електричних вимірювальних приладів.

У даній АСУТП виробництва квасу для контролю температури застосовується термоперетворювач опору ТСМ-0295/1. Детальні характеристики цього приладу наведені в таблиці 2.1.

Згідно з таблицею 2.1, застосовуються п'ять різних схем підключення датчика (див. рис. 2.3).

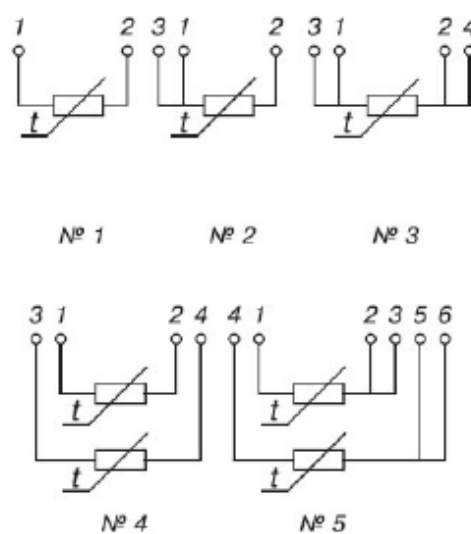


Рисунок 2.3 – Варіанти підключення датчика ТСМ-0295/1

Таблиця 2.1 – Ключові технічні характеристики ТСМ-0295/1

Параметри	Значення
НСХ	50П, 100П, 50М, 100М, Pt100
Діапазон вимірювання	-50...+200 °С; -50...+180 °С
Клас допуску	А; В; С
Кількість чутливих елементів	1;2
Схема підключення	1; 2; 3; 4; 5
Довжина монтажної частини	100, 140, 160, 200 мм
Показник теплової інерції	6 с
Умовний тиск	0,4 Па
Матеріал захисного чохла	Цільна труба 12Х18Н10Т
Кліматичні умови	Група виконання ДЗ: -50...+50 °С
Степінь захисту	IP54
Середній наробіток на відмову	15000 годин
Середній строк служби	6 років
Міжповірочний інтервал	2 роки

Передавальна функція температурного датчика, який є аперіодичною ланкою першого порядку, має наступний вигляд

$$W_{дг}(p) = k_1. \quad (2.4)$$

В якості виконавчого елемента застосовується електромагнітний клапан, що регулює подачу гарячої води. Електромагнітний бронзовий клапан 15-Б-859-П (рис. 2.4) призначений для дистанційного керування та використовується як запірний пристрій на трубопроводах різних систем. Для цього виконавчого механізму приймається наступна передаточна функція:

$$W_{вм}(p) = \frac{k_2}{T_1 \cdot p + 1} \quad (2.5)$$

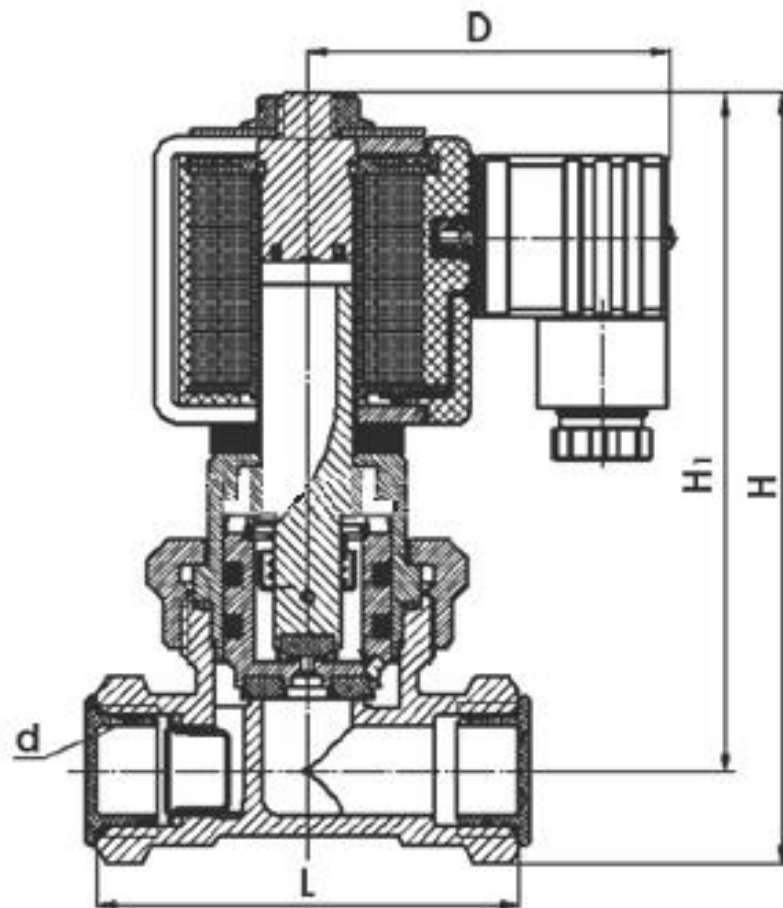


Рисунок 2.4 – Електромагнітний клапан моделі 15-Б-859-П

У системі автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла електромагнітний клапан може функціонувати в імпульсному режимі. Для цього регулятор формує керуючі сигнали для виконавчого механізму у вигляді широтно-імпульсної модуляції. Відповідно, тривалість імпульсу у відсотках визначає потрібний розхід гарячої води в сорочку холодильника сусла.

На основі проведеного аналізу елементів системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла можна побудувати її структурну схему (рис. 2.5).

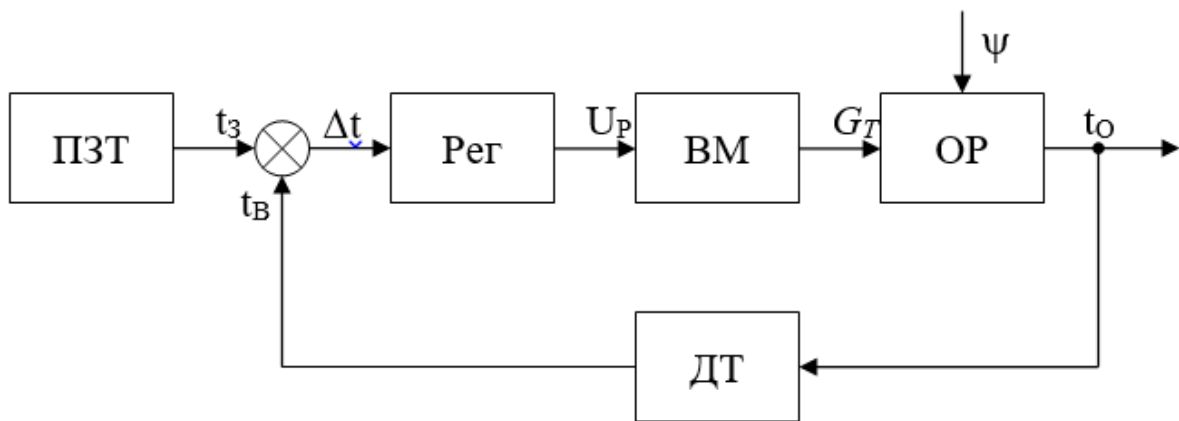


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла

Об'єктом регулювання у цій схемі є холодильник сусла, де необхідно підтримувати температуру на заданому рівні. Температура об'єкта  $t_O$  контролюється датчиком (ДТ), сигнал якого оцифровується до значення  $t_B$  і порівнюється з програмною температурою  $t_3$  від програмного задавача температури (ПЗТ). Відхилення  $\Delta t$  від заданого значення надходить на регулятор (Рег), який відповідно до обраного закону регулювання формує керуючий сигнал  $U_P$  для виконавчого механізму (ВМ). Виконавчим механізмом є електромагнітний клапан, що контролює подачу гарячої води  $G_{II}$  у сорочку холодильника сусла.

### 3 Розробка системи автоматичного контролю температури в холодильнику суслу

#### 3.1 Обчислення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої системи та формулювання її характеристичного рівняння

Для проведення розрахунків беремо такі вихідні дані:

$$T_0 = 25 \text{ с}; T_1 = 0,4 \text{ с}; k_0 = 8,2 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{с}/\text{м}^3; k_1 = 1,2 \text{ В}/^\circ\text{C}; k_2 = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{В}.$$

Оскільки елементи структурної схеми САР з'єднані послідовно, передаточну функцію розімкнутої системи отримують шляхом множення передаточних функцій усіх її елементів:

$$W_p(p) = W_{OK}(p) \cdot W_{BM}(p) \cdot W_{II}(p) \cdot W_{DT}(p) = \frac{k_0 k_1 k_2}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.1)$$

Для зручності запису введемо умовні позначення:

$$k = k_0 k_1 k_2. \quad (3.2)$$

У такому разі передаточна функція розімкнутої системи буде мати наступний

вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.3)$$

Передаточну функцію замкнутої системи, враховуючи, що  $W_{зз}(p) = 1$ , обчислюють за наступною формулою:

$$W_з(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (3.4)$$

Характеристичне рівняння записується у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k &= 0, \\ 10 p^3 + 25,4 p^2 + p + 2,46 &= 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

## 3.2 Побудова ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи

3.2.1 Побудова амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи.

Щоб побудувати ЛАЧХ методом асимптот, спочатку необхідно визначити спряжені частоти, використовуючи сталі часу динамічних ланок.

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці}.$$

Отримані спряжені частоти наносять на вісь частот у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при  $\omega < \omega_0$  малих значеннях частоти являє собою пряму з нахилом  $-20$  дБ/дек, оскільки в системі присутня інтегруюча ланка. У точці частоти  $\omega = 1$  ця пряма (або її продовження) повинна мати ординату  $20 \lg k = 17,06$  дБ, де  $k = 7,128$  — коефіцієнт підсилення розімкнутої системи.

Після проходження кожної зі спряжених частот нахил характеристики  $L(\omega)$  зменшується на  $20$  дБ/дек порівняно з попереднім, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним ланкам першого порядку. На високих частотах, тобто при значеннях частоти, що перевищують останню спряжену, асимптота ЛАЧХ  $\omega_1$  набуває нахилу  $-60$  дБ/дек.

3.2.2 Побудова логарифмічної фазо-частотної характеристики (ЛФЧХ) розімкнутої системи.

Логарифмічна фазо-частотна характеристика одноконтурної розімкнутої системи визначається шляхом додавання ординат фазових характеристик окремих типових ланок.

$$\phi(\omega) = \left( -\arctg(\omega T_0) - \left( \frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3.6)$$

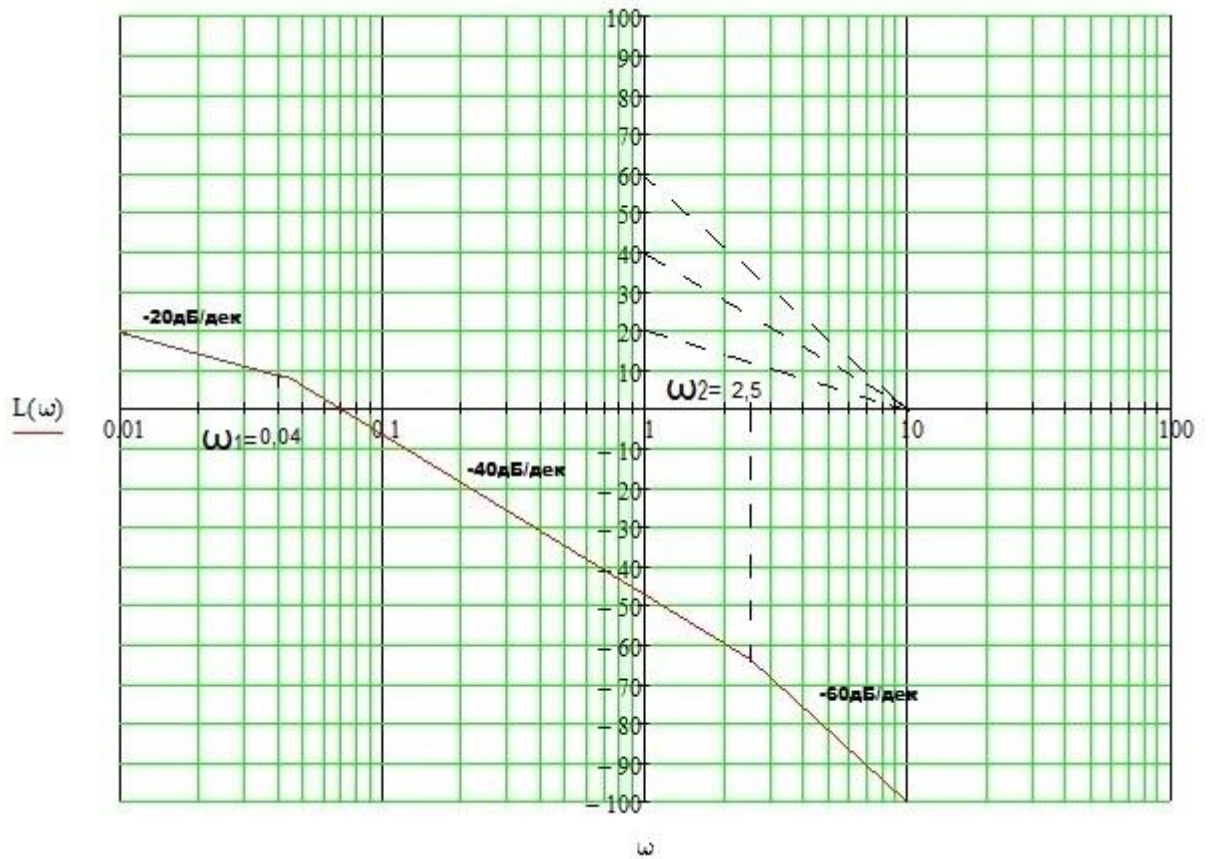


Рисунок 3.1 - ЛАЧХ розімкненої системи

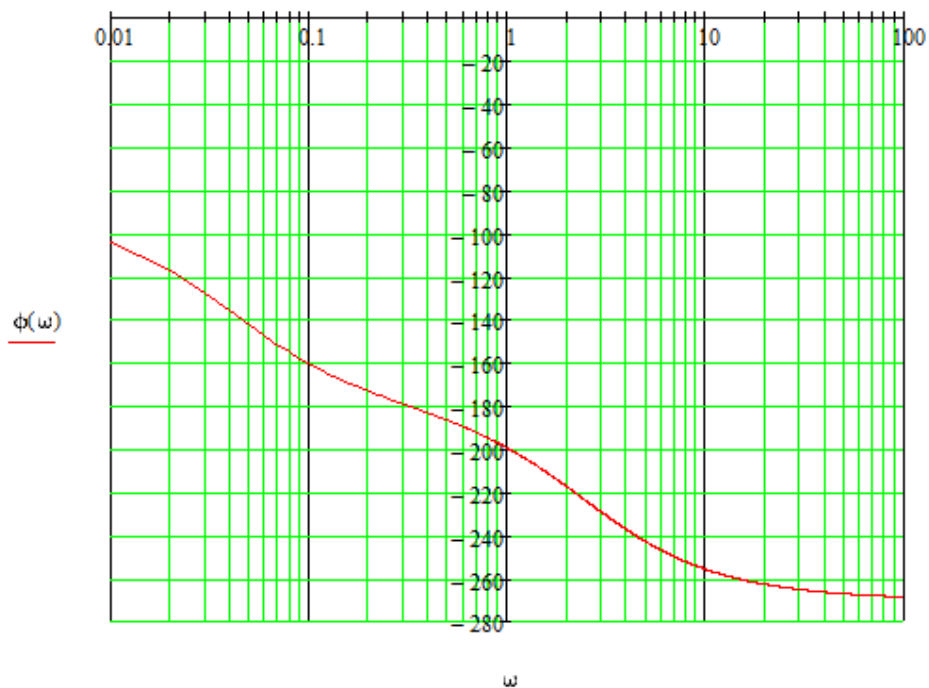


Рисунок 3.2 - ЛФЧХ розімкнутої системи

### 3.3 Оцінювання стійкості замкнутої системи та визначення її запасів стійкості.

#### 3.3.1 Аналіз стійкості системи за критерієм Гурвіца.

Алгебраїчний критерій Гурвіца дозволяє оцінити стійкість систем автоматичного регулювання високого порядку, проте його застосування залишається відносно простим лише для рівнянь до п'ятого порядку, оскільки для вищих порядків обчислення значно ускладнюються.

Відповідно до цього критерію умови стійкості формулюються наступним чином.

Усі корені характеристичного рівняння  $T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0$  матимуть від'ємні дійсні частини, якщо при додатних коефіцієнтах головний визначник Гурвіца  $\Delta_2 > 0$  та всі його діагональні мінори будуть більші за нуль. Підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримуємо:

$$10 p^3 + 25,4 p^2 + p + 2,46 = 0.$$

$$\Delta_2 = \left| \begin{pmatrix} 25.4 & 2.46 \\ 10 & 1 \end{pmatrix} \right| = 0.8$$

Оскільки головний визначник  $\Delta_2 = 0,8 > 0$ , всі коефіцієнти додатні, а визначники Гурвіца побудовані за правилом, можна зробити висновок, що система за критерієм Гурвіца є стійкою.

#### 3.3.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм, стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання оцінюють за амплітудно-фазовою частотною характеристикою розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається виключно зі стійких динамічних ланок і містить не більше однієї інтегруючої ланки. За умови, що розімкнута

система стійка, замкнута система буде стійкою тоді і лише тоді, коли амплітудно-фазова характеристика (АФХ) розімкнутої системи не охоплює точку з координатами  $(-1; j0)$  при зміні частоти від 0 до  $\infty$ .

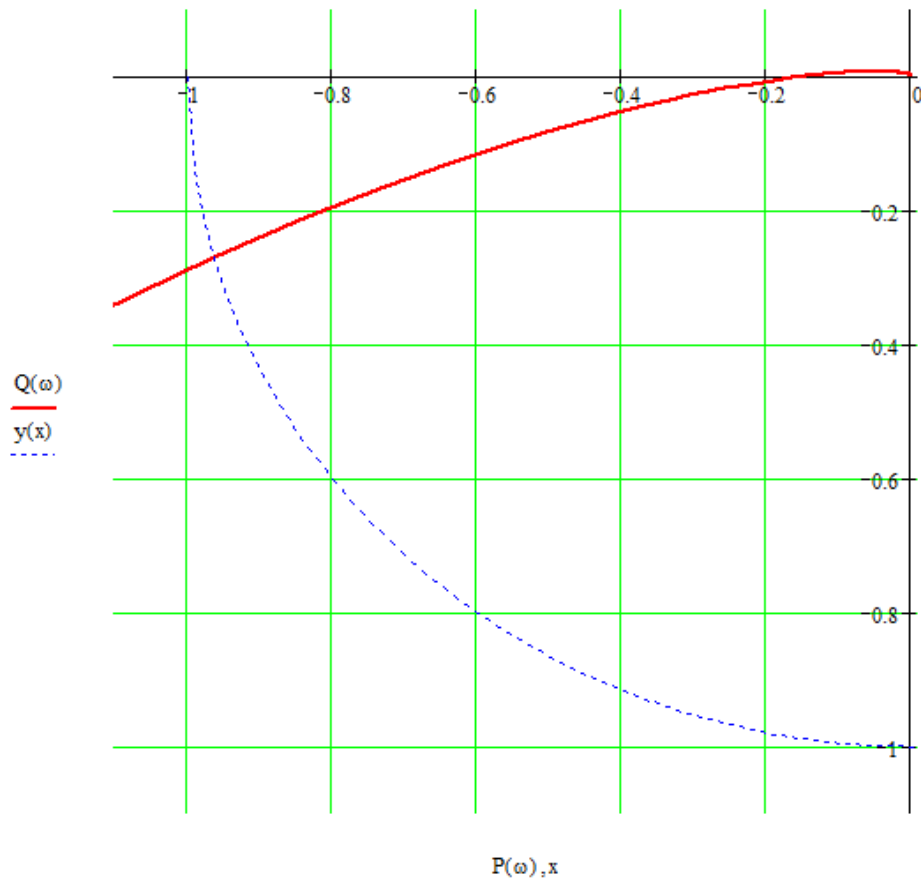


Рисунок 3.3 – Оцінка запасів стійкості за амплітудою та фазою з використанням частотного критерію Найквіста–Михайлова

Отже, згідно з критерієм Найквіста–Михайлова, система є стійкою, причому запас стійкості за амплітудою становить  $Z_M=0.84$ ; за фазою  $Z_\phi=14^\circ$ .

### 3.4 Аналіз якості регулювання замкнutoї САР за допомогою ЛАЧХ розімкнутої системи

Аналіз якості регулювання замкнutoї САР включає визначення запасу стійкості за модулем і фазою, а також частоти зрізу. Для цього будують ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи та здійснюють їх взаємне розташування.

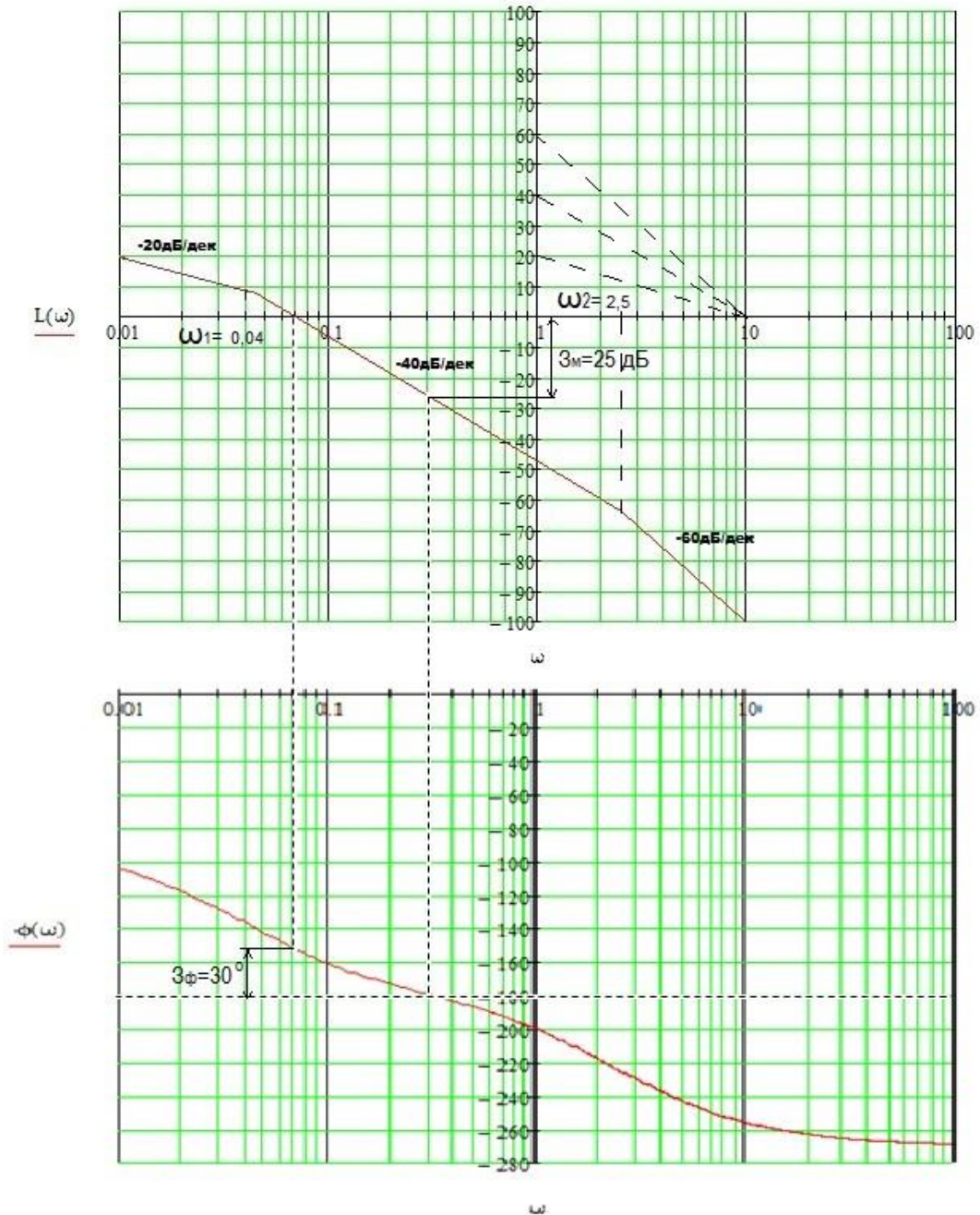


Рисунок 3.4 – Аналіз якості регулювання замкнутої САР за ЛАЧХ розімкнутої системи

З цієї побудови можна отримати такі параметри: частота зрізу  $\omega_z = 0,07$   $\text{с}^{-1}$ , з якої, при жорстких умовах системи, визначається час регулювання  $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} \approx 89,8$  с; запас стійкості за амплітудою  $Z_M \approx 25$  дБ; запас стійкості за фазою  $Z_\phi \approx 30^\circ$ .

### 3.5 Побудова перехідної характеристики замкнутої системи

Часова зміна регульованої величини при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого впливу описується наступною залежністю.

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.7)$$

Після підстановки відповідних значень будується наступний графік (рис. 3.5).

З аналізу графіка видно, що перехідний процес носить коливальний характер і відбувається з постійним періодом коливань.

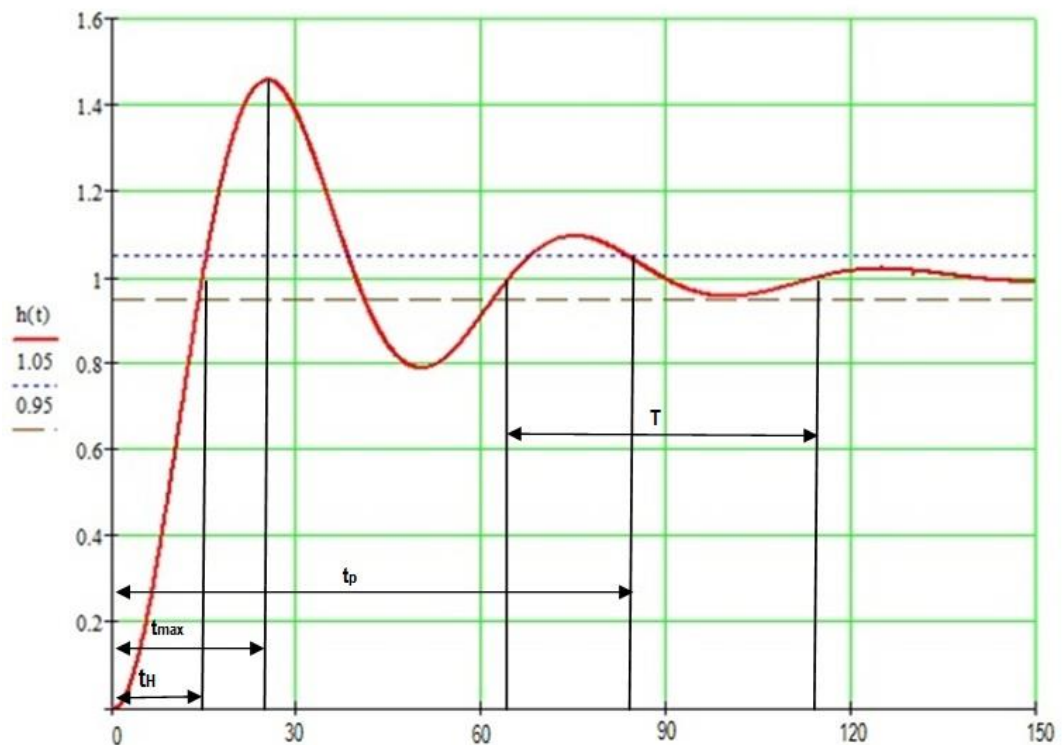


Рисунок 3.5 – Графічне зображення перехідного процесу вихідної системи

### **3.6 Визначення безпосередніх показників якості САР за графіком перехідного процесу та оцінка часу регулювання системи як критерію для її аналізу та проєктування**

З аналізу побудованого перехідного процесу можна виділити такі безпосередні показники якості САР:

1) Час регулювання  $t_p \approx 83$  с визначається як інтервал від початку впливу вхідного сигналу до входження системи в область  $2\Delta$ . Він залежить від швидкодії динамічних ланок та їх кількості в головному контурі. Через суворі вимоги до системи, цей параметр для аналізу та синтезу САР приймається зменшеним на 25% від отриманого значення і складає  $t_p \approx 62,3$  с.

2) Перерегулювання  $\delta=45\%$ ;

3) Частота коливань  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,2 \text{ с}^{-1}$ , де  $T=47$  с – період коливань;

4) Число коливань перехідного процесу  $n=2$ ;

5) Час настання першого піку перехідного процесу  $t_{max1}=24$  с;

6) Час наростання перехідного процесу  $t_n=14$  с — це тривалість, за яку вихідна величина досягає сталого значення.

7) Декремент затухання перехідного процесу характеризує ступінь його загасання і визначається як відношення амплітуд двох послідовних коливань  $d=3,8$ .

### **3.7 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкненої оптимальної системи за швидкодією відповідно до поставлених до неї вимог.**

Вимоги до розроблюваної САР такі: час регулювання ( $t_r = 62,3$ ) с; максимальне перерегулювання  $\delta = 25 \%$ ; запас стійкості за амплітудою не менше 15 дБ; запас стійкості за фазою не менше  $30^\circ$ . Для синтезу САР

необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коригуючого пристрою.

Процес побудови бажаної ЛАЧХ здійснюється поетапно.

Побудова ЛАЧХ у низькочастотній області проводиться аналогічно побудові ЛАЧХ постійної системи, тобто проводиться асимптота з нахилом -20 дБ/дек, яка проходить через точку з координатами  $20 \lg k=7,82$  дБ.

Побудова ЛАЧХ у середньочастотній області є найвідповідальнішою ділянкою.

У середньочастотному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими параметрами перерегулювання та тривалості перехідного процесу. Щоб реальний процес максимально наблизити до оптимального за швидкістю, нахил середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ приймають рівним -20 дБ/дек. Частоту зрізу  $\omega_z$  (де ЛАЧХ перетинає вісь частот) визначають виходячи з певної нерівності: для забезпечення якості системи  $\omega_z$  повинна бути менше частоти, обчисленої за максимальним прискоренням координати та величиною керуючого ступінчастого сигналу, і водночас більша за частоту, визначену за значенням максимального перерегулювання та часом регулювання. За заданим значенням часу регулювання, використовуючи номограми, визначають відповідні параметри системи. Потім частоту зрізу встановлюють рівною  $\omega_{z \min}=0,2 \text{ с}^{-1}$  і наносять на графік. Після цього середньочастотну асимптоту проводять через цю точку з нахилом -20 дБ/дек.

Використовуючи відоме значення  $P_{z \max}= 1,18$  дійсної частини характеристики, визначаємо мінімальне значення  $P_{z \min}$  за допомогою наближеного співвідношення для типової дійсної частотної характеристики.

$$P_{z \min}=1-P_{z \max}=-0,18$$

Щоб забезпечити потрібний запас стійкості системи за амплітудою та фазою, середньочастотну асимптоту необхідно продовжити вліво і вправо на певну величину. Запаси стійкості визначаються за номограмами  $L(\omega) = f(\varphi)$  при постійному значенні  $P_z$ , що представляє собою колові діаграми

дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Відповідно до номограми визначаються лінії для  $P_{\text{max}} = 1.47$  і  $P_{\text{min}} = -0.47$ , симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості за амплітудою визначається проведенням горизонтальних дотичних до цих кривих та зчитуванням значень на осі ординат:  $L_1 = 17$  дБ,  $L_2 = -17$  дБ. Середньочастотну асимптоту слід продовжити до цих ординат ліворуч і праворуч, після чого її можна поєднувати з сусідніми ділянками.

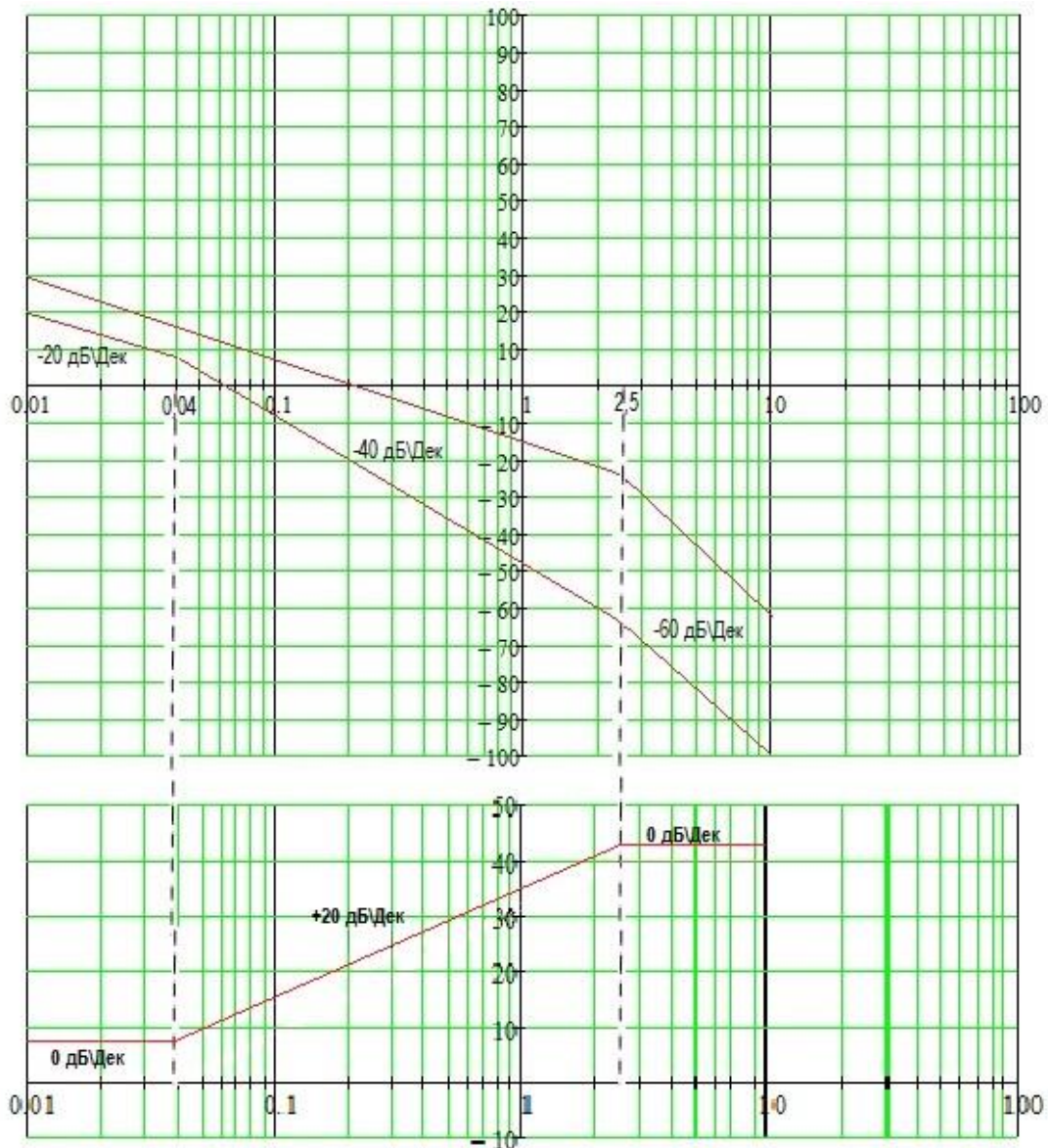


Рисунок 3.6 – Формування бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коригуючого пристрою

Запас стійкості по фазі визначають шляхом проведення вертикальних дотичних до кривих  $P_{\max} = 1,18$  та  $P_{\min} = -0,18$  і відрахування кута в градусах від дотичної до лінії  $-180^\circ$ . У цьому випадку він дорівнює  $\Phi_{\phi} = 49^\circ$ .

ЛАЧХ корегуючого пристрою отримують як різницю між бажаною та вихідною ЛАЧХ  $L_k = L_b(\omega) - L_n(\omega)$  (рис. 3.6).

Передаточна функція коректуючого пристрою у загальному вигляді має

такий вигляд:

$$W_{\text{кп}} = \frac{k_3(T_0 p + 1)}{(T_1 p + 1)} \quad (3.8)$$

$$20 \lg k = 8 \text{ дБ};$$

$$\lg k = 8/20 = 0,4;$$

$$k = 2^{0,4} = 1,32.$$

Таким чином, передаточна функція коректуючого пристрою має вигляд:

$$W_{\text{кп}} = \frac{1,32(25 p + 1)}{0,4 p + 1}$$

### 3.8 Побудова графіка перехідного процесу для синтезованої САР

Складемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи.

$$W_{\text{зк}}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (3.9)$$

Підставивши  $p = j\omega$ , визначимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови її дійсної частотної характеристики.

$$P_z(\omega) = \frac{k \cdot T_2 \omega ((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0T_3)\omega^3) + k(T_1T_0T_3\omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k)}{(T_1T_0T_3\omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k)^2 + ((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0T_3)\omega^3)^2} \quad (3.10)$$

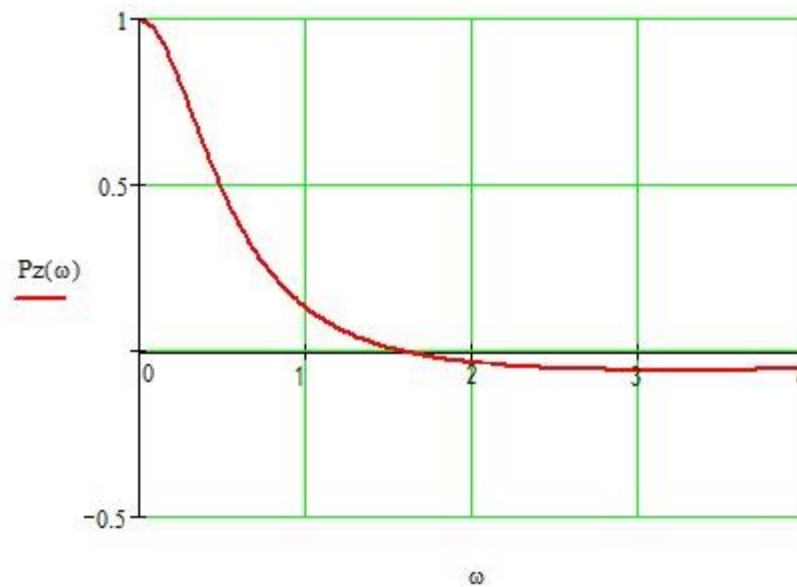


Рисунок 3.7 – Дійсна частотна характеристика скорегованої замкнутої системи

Побудова графіка перехідного процесу скоригованої САР.

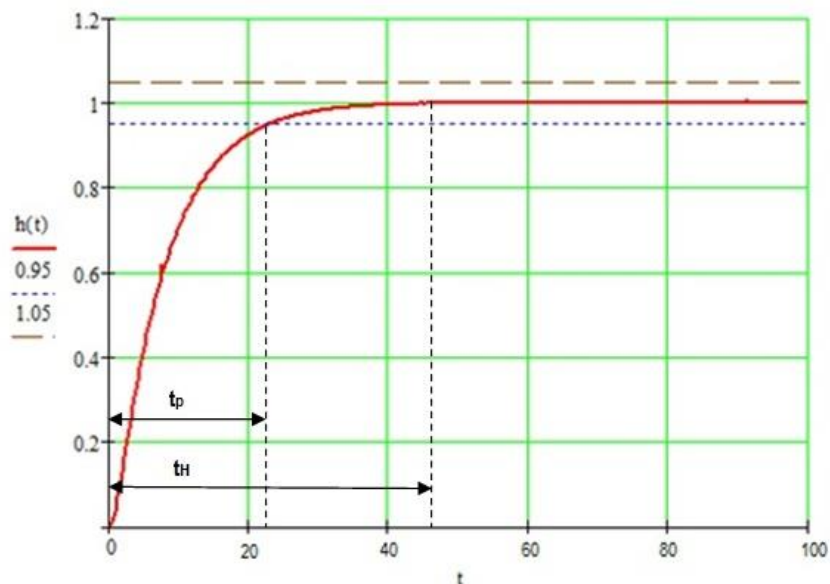


Рисунок 3.8 – Графік перехідного процесу системи після синтезу для її корекції

### 3.9 Визначення безпосередніх показників якості синтезованої САР

З графіка побудованого перехідного процесу можна визначити такі безпосередні показники якості синтезованої САР:

- час регулювання  $t_p=24$  с;
- перерегулювання  $\delta=0\%$
- час наростання перехідного процесу  $t_H=46$  с.

За формою крива перехідного процесу є монотонною.

Результати роботи системи автоматичного регулювання відповідають заданим вимогам: час регулювання скоротився з 83 с до 24 с, перерегулювання  $\delta$  зменшилося з 45% до 0%, а час наростання перехідного процесу  $t_H$  змінився з 14 с до 46 с.

## 4 Впровадження системи автоматичного регулювання на практиці

### 4.1 Підбір періоду дискретизації

Перетворення безперервних сигналів у дискретні здійснюється за допомогою дискретного елемента, на виході якого формується послідовність імпульсів. Таким елементом може виступати ключ К', який замикається через кожний період квантування Т.

Питання вибору оптимального періоду квантування Т є однією з ключових проблем ефективного використання машинного часу при реалізації систем цифрового керування. Зменшення Т підвищує точність керування та завантаження мікроЕОМ, проте при цьому витрачається більше машинного часу. Навпаки, збільшення Т погіршує якість керування системою. Тому виникає задача пошуку компромісного рішення для задоволення цих суперечливих вимог. Вибір Т залежить від спектра неперервної функції  $\Theta(t)$  і здійснюється на основі теореми Котельникова.

Теорема Котельникова. Якщо функція часу  $\Theta(t)$  не містить гармонічних складових із частотами, що перевищують  $\omega_{\max}$ , то вона повністю відтворюється зі своїх значень у моменти часу  $nT$ , розташовані через рівні інтервали Т

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

Іншими словами, частота квантування повинна обиратися відповідно до умови, щоб дискретна решітка точно відтворювала неперервну функцію

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

і при цьому інформація не буде втрачатися під час квантування.

Максимальну частоту  $\omega_{\max}$  у спектрі вихідного сигналу  $\beta(j\omega)$  замкнутого контуру цифрового керування можна визначити за допомогою критерію Джурі. Якщо на вхід регулятора подати гармонічний одиничний сигнал  $\alpha(t) = \sin \omega t$ , то вихідний сигнал замкнутого контуру можна представити у вигляді функції:

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

З цього можна визначити частоту  $\omega_{\max}$ , при якій  $|\beta(j\omega)|$  буде мати невелике значення, оскільки замкнута система пригнічує високочастотні складові сигналу. Це значення  $\Theta_{om}$  визначає точність, яку необхідно забезпечити на виході системи.

Виходячи з наявних даних, визначаємо оптимальний період квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передаточна функція керованого об'єкта задається рівнянням

$$W_{ok}(p) = \frac{2,46}{p(0,4p + 1)(25p + 1)} \quad (4.4)$$

Частотна передаточна функція регулятора задається рівнянням

$$W_p(p) = \frac{1,32(25p + 1)}{(0,4p + 1)} \quad (4.5)$$

У цьому випадку необхідно забезпечити точність керування об'єктом у встановленому режимі  $\Theta_{o.m} = 0.1$ .

Частотна передаточна функція замкнутої системи визначається за формулою:

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

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

$$\frac{2,46 \cdot 1,32}{j\omega(0,4 \cdot j\omega + 1)(0,4 \cdot j\omega + 1) + 2,46 \cdot 1,32} = 0,1 \quad (4.7)$$

Вирішуючи це рівняння, визначаємо частоту  $\omega_{\max} = 1,96$

Обчислений оптимальний період квантування сигналів

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{\pi}{1,96} = 1,6с \quad (4.8)$$

Приймаємо  $T < T_{роз}$   $T_d = 0,01 с$

Ми обираємо цей період дискретизації, оскільки для нас пріоритетом є досягнення максимальної точності системи.

## 4.2 Обчислення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи керування потрібно здійснити Z-перетворення передаточної функції регулятора, отриманої при синтезі у розділі 3:

$$W_P(p) = \frac{1,32(25p + 1)}{(0,4p + 1)} \quad (4.9)$$

Розділимо передаточну функцію регулятора на прості дроби:

$$W_P(p) = 82,5 - \frac{81,16}{(0,4p + 1)}. \quad (4.10)$$

Далі проведемо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab при дискретизаційному інтервалі  $T_0 = 0,01$  с.

$$W_P(z) = 82,5 - \frac{2}{z - 0,9753}. \quad (4.11)$$

$$W_P(z) = 82,5 - \frac{2 \cdot z^{-1}}{1 - 0,9753 \cdot z^{-1}} \quad (4.12)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора формуємо відповідні різницеві рівняння.

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

$$u_1[n] = 82,5 x[n];$$

$$u_2[n] = -2 x[n-1] + 0,9753 u_2[n-1];$$

Програмну реалізацію системи наведено на рисунку 4.1, причому коефіцієнти мають такі значення:

$$a = 82,5; b_1 = -2; b_2 = 0,9753.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації слід створити регулятор із застосуванням мікропроцесора.

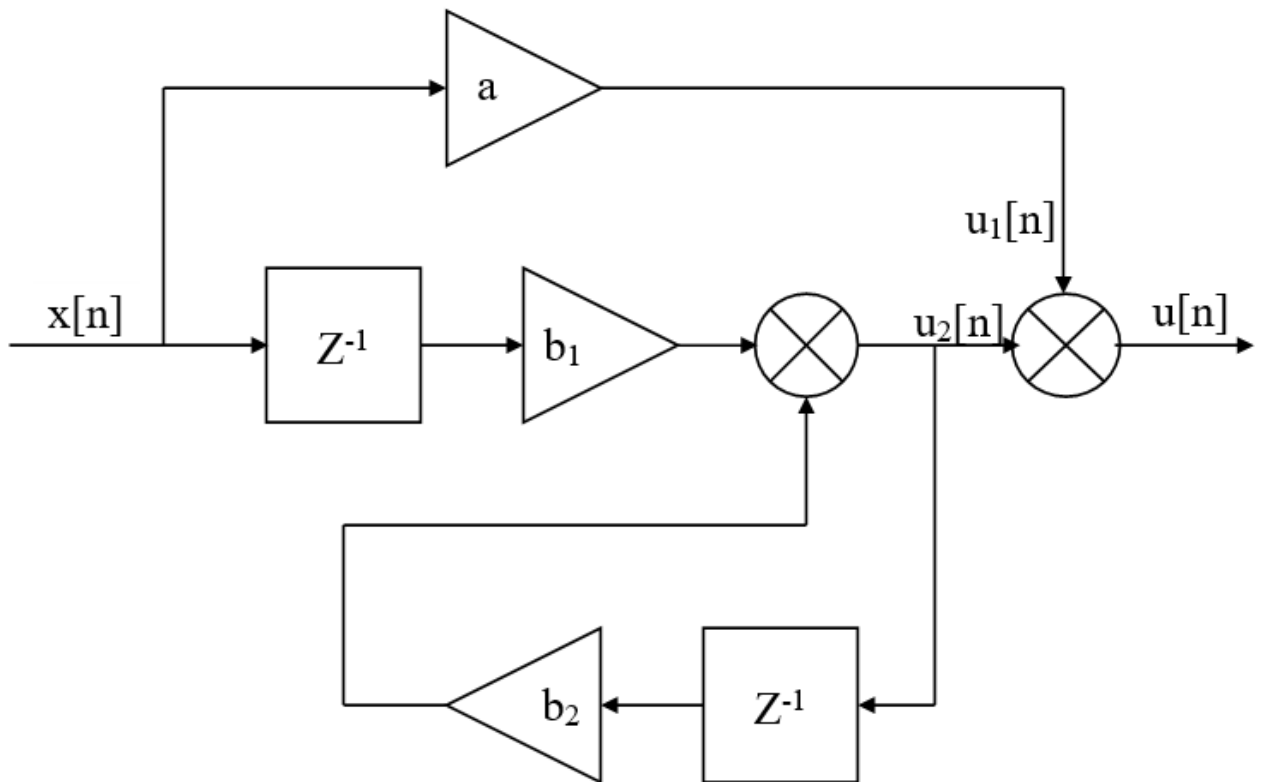


Рисунок 4.1 – Програмна схема реалізації регулятора

### 4.3 Створення електричної структурної схеми системи

До складу електричної структурної схеми системи входять такі основні елементи:

- датчик температури сусли (ДТС);

- датчик температури води на подачі (ДТВП);
- датчик температури води на виході (ДТВВ);
- датчик витрати води (ДВВ);
- датчик тиску води (ДТВ);
- задатчик температури суслу (ЗТС);
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- однокристальна мікроЕОМ (ОМЕОМ);
- блок індикації (БІ).

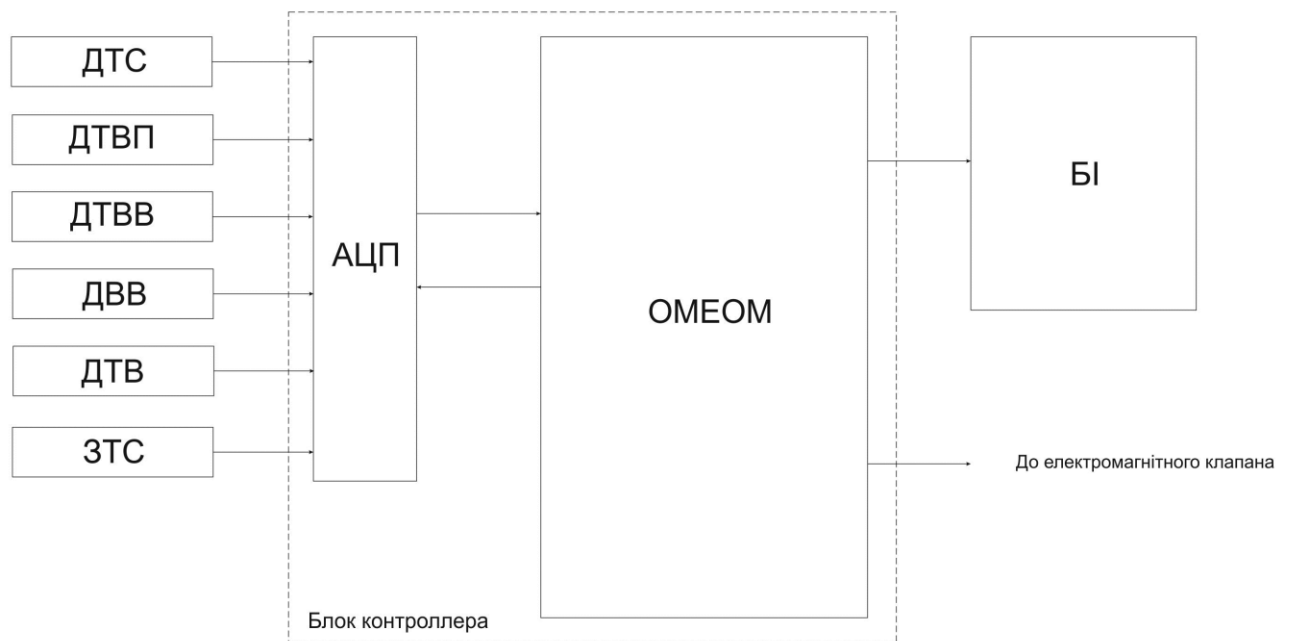


Рисунок 4.2 – Структурна електрична схема цифрового регулятора

Розроблена в цьому проекті система призначена для підтримання температури в холодильнику суслу та одночасного контролю кількох параметрів: температури води на вході в сорочку, температури води на виході з неї, витрати та тиску води. Для вимірювання цих параметрів застосовуються відповідні датчики температури, витрати й тиску, а необхідна температура суслу задається за допомогою спеціального температурного задатчика.

Аналогові сигнали від датчиків температури (ДТС, ДТВП, ДТВВ), витрати води (ДВВ), тиску (ДТВ) та температурного задатчика (ЗТС)

надходять на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що входить до складу блока контролера. АЦП перетворює ці аналогові сигнали у цифрову форму, зручну для подальшої обробки. З виходу АЦП цифрові сигнали надходять на однокристальну мікро-ЕОМ (ОМЕОМ), яка в системі виконує функції збору та аналізу інформації, прийняття рішень та формування відповідних керуючих сигналів згідно з алгоритмом роботи. Крім того, ОМЕОМ здійснює керування АЦП, включаючи вибір каналу, запуск перетворення та тактування.

Для відображення поточних і заданих значень у систему включено блок індикації (БІ), яким керує мікро-ЕОМ. На цифрових індикаторах показуються параметри технологічного процесу, а також сигнали про стан холодильника сушла, які формуються мікро-ЕОМ.

Сигнал керування від мікро-ЕОМ надходить на електромагнітний клапан.

#### **4.4 Створення електричної функціональної схеми системи**

Датчики температури виконані у вигляді інтегральних перетворювачів типу «температура–напруга». Датчик витрати представлений магнітно-індуктивним витратоміром, який формує вихідний сигнал у вигляді напруги. З виходів датчиків аналогова напруга, пропорційна вимірюваному параметру, надходить на активні низькочастотні фільтри 7–11, призначені для усунення промислових перешкод. Після фільтрів сигнали подаються на підсилювачі 12–16 для підвищення рівня сигналів до необхідних значень. З виходів підсилювачів фільтровані та підсилені сигнали направляються на входи IN0–IN4 АЦП 17 відповідно. На вхід IN5 АЦП 17 подається сигнал від задатчика температури 6, який є перетворювачем «опір–напруга» — змінним резистором, включеним у дільник напруги.

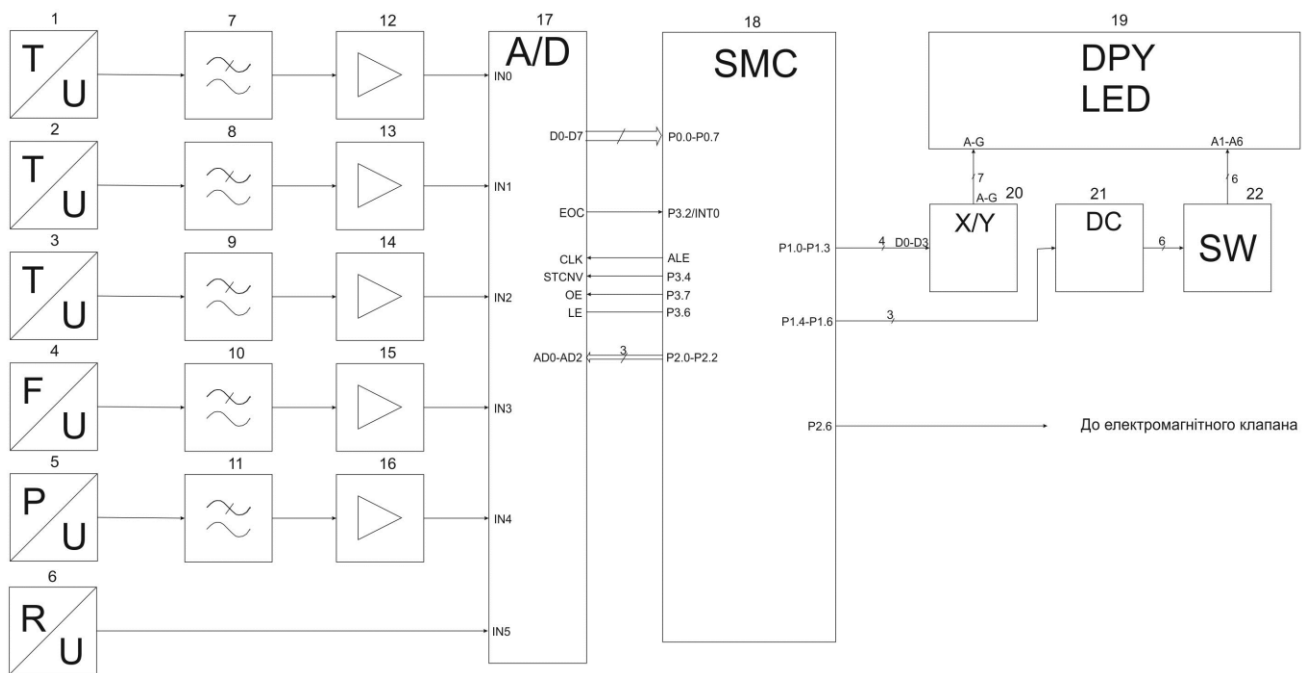


Рисунок 4.3 – Електрична функціональна схема цифрового регулятора

Вибір потрібного каналу АЦП 17 здійснюється за допомогою мікро-ЕОМ 18, на виходах P2.0–P2.2 якої генеруються сигнали вибору каналу у двійковому коді. Номер каналу подається на адресні входи AD0–AD2 вбудованого дешифратора АЦП. Двійковий код фіксується в АЦП 17 за допомогою сигналу LE (Latch Enable), який формується на виводі P3.6 мікро-ЕОМ 18. Синхронізація АЦП забезпечується сигналом ALE, який мікро-ЕОМ подає на вхід CLK АЦП у кожному машинному циклі.

Для ініціювання перетворення АЦП 17 мікро-ЕОМ 18 формує сигнал на виводі P3.4, який подається на вхід STCNV (Start Converting) АЦП. Після завершення перетворення АЦП генерує сигнал на виводі EOS (End of Converting), що подається на вхід запиту переривання INT0 мікро-ЕОМ 18. У відповідь мікро-ЕОМ формує сигнал на виводі P3.7, який подається на вхід OE (Output Enable) АЦП, підключаючи внутрішні регістри до виходів D0–D7. Мікро-ЕОМ зчитує перетворені дані по лініях P0.0–P0.7.

Порт P1 мікро-ЕОМ 18 застосовується для керування 6-розрядним цифровим світлодіодним індикатором 19, на якому відображаються

поточні або задані значення температури. У схемі реалізовано принцип програмної динамічної індикації: у певний момент через лінії порту P1 подаються дані та номер першого розряду, у наступний момент — дані та номер другого розряду і так далі по циклу, кількість циклів відповідає числу розрядів індикатора. Дані у двійковій формі подаються через лінії P1.0–P1.3 на входи перетворювача кодів 20, який перетворює двійковий код у код для семисегментного цифрового індикатора. Виходи перетворювача підключені до індикатора 19.

З виходів P1.4 і P1.5 у двійковому коді передається номер активного в даний момент розряду, який надходить на входи дешифратора 21. Дешифратор перетворює двійковий код у позиційний, і на його виході з'являється сигнал включення відповідного розряду. Цей сигнал передається на блок ключів 22, який активує потрібний ключ та вмикає відповідний розряд індикатора 19.

У наступному циклі інші дані виводяться на наступний розряд. Таким чином, дані послідовно та циклічно відображаються на всіх розрядах індикатора.

Сигнал керування для електромагнітного клапана формується на виході P2.6.

#### **4.5 Створення електричної принципової схеми системи.**

Оскільки система побудована з окремих блоків, доцільно розглядати кожен блок індивідуально.

##### Модуль датчиків та задатчиків.

Для вимірювання температури пропонується застосовувати прилади серії «SITRANS T» від фірми SIEMENS — вгвинчувані термометри опору низького тиску зі сполучною головкою, без консолі.

Вгвинчуваний термометр опору низького тиску зі сполучною головкою (без консолі) призначений для вимірювання температур у

діапазоні від -50 до +200 °С і може постачатися з інтегрованим температурним перетворювачем. У цьому датчику вимірювальні резистори розташовані всередині керамічного корпусу.

Пропонується застосувати термометр опору з одним вимірювальним резистором Pt100, який у цьому випадку буде підключено за трьохпровідною схемою.

Оскільки на цьому виробництві немає жорстких вимог до вибухобезпеки, обраний термометр опору матиме вимірювальну вставку без вибухозахисту та монтажну довжину 360 мм.

Термометр опору призначений для встановлення в резервуарах і трубопроводах для вимірювання температури з урахуванням гігієнічних вимог. Завдяки міцній конструкції його можна застосовувати в різних технологічних процесах харчової, фармацевтичної та біотехнологічної промисловості. Також термометр опору може постачатися з вбудованим вимірювальним перетворювачем, для чого доступна серія перетворювачів із головками різної конструкції.

Для вимірювання витрати застосовуються магнітно-індуктивні витратоміри серії MAGFLO від фірми SIEMENS, які призначені для контролю витрати електропровідних рідин.

Магнітно-індуктивні витратоміри призначені для вимірювання більшості електропровідних рідин, суспензій та паст.

Єдиною вимогою є мінімальна електропровідність рідини не менше 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . При цьому температура, тиск, в'язкість та щільність не впливають на точність вимірювання.

Магнітно-індуктивні витратоміри застосовуються переважно в таких галузях:

- \* водопостачання та очищення стічних вод;
- \* хімічна та фармацевтична промисловість;
- \* харчова промисловість і виробництво безалкогольних напоїв;

\* гірничодобувна промисловість, цементна та видобуток корисних копалин;

\* виробництво целюлози та паперу;

\* металургія;

\* енергетика та системи холодного водопостачання.

Модульна система завдяки різноманіттю конструкцій і конфігурацій дозволяє оптимально підбирати пристрій під будь-яке вимірювальне завдання.

При вимірюванні витрати параметрів, зазначених у попередньому підрозділі, доцільно використовувати магнітно-індуктивний датчик MAGFLO MAG 1100 Food, який спеціально розроблений для застосування у харчовій та безалкогольній пивоварній промисловості.

Головними галузями застосування магнітно-індуктивних датчиків SITRANS F M MAGFLO є:

- харчова промисловість;
- виробництво пива та безалкогольних напоїв;
- фармацевтична промисловість.

Принцип вимірювання витрати заснований на законі електромагнітної індукції Фарадея: вимірювальний датчик перетворює швидкість потоку рідини на електричну напругу, пропорційну витраті.

Для цього застосовуються витратоміри з діаметрами від 10 до 100 мм, причому для вимірювання витрати вибрано діаметр 80 мм. Крім того, доцільно замовити вимірювальний датчик із вбудованим перетворювачем MAG 6000 I. Таке модульне виконання забезпечує роботу при температурі навколишнього середовища від  $-20$  до  $+60$  °C.

Для контролю тиску води буде застосовано датчик тиску серії «SITRANS P» від фірми SIEMENS. Цей датчик призначений для вимірювання тиску як неагресивних, так і агресивних газів, парів і рідин. Діапазон вимірювань становить від 0,03 до 400 бар. Вихідним сигналом є постійний струм 4–20 мА, який лінійно відповідає прикладеному тиску..

Датчики під'єднуються до мікроконтролера через роз'єми ХР1–ХР5. Через ці роз'єми також подається живлення на датчики, яке додатково проходить фільтрацію за допомогою конденсаторів С1, С5, С9, С13 і С17 у блоці контролера.

#### Блок контролера.

Сигнал з датчика надходить на вхід активного низькочастотного фільтра другого порядку. Схема фільтра взята з офіційного сайту виробника і є типовим застосуванням для цього підсилювача. У якості підсилювача використаний подвійний підсилювач МСР602 компанії National Semiconductor: одна його половина застосована у фільтрі DA1.1, а друга, DA1.2 — як неінверсний підсилювач напруги. Коефіцієнт підсилення DA1.2 визначається співвідношенням резисторів R4 і R3. Всі вимірювальні канали виконані однаково.

Напруга від задатчика температури подається через роз'єм ХР6 і додатково фільтрується конденсатором С21.

Задатчик температури є перетворювачем «опір–напруга», тобто змінним резистором типу СП5-19, який через роз'єм включено в дільник напруги, сформований резисторами R21 та R22. Резистори R21 і R22 виконують функцію обмежувачів.

З виходів підсилювачів фільтровані та підсилені сигнали з датчиків подаються на входи IN0–IN4 АЦП DD1, а на вхід IN5 надходить сигнал від задатчика температури. Для цих цілей застосовано 8-розрядний 8-канальний АЦП типу ADC0809 компанії National Semiconductor.

Вибір потрібного каналу АЦП здійснюється мікро-ЕОМ DD2, причому на її виходах P2.0–P2.2 формуються двійкові сигнали вибору каналу. Номер обраного каналу подається на адресні входи AD0–AD2 вбудованого дешифратора АЦП. Двійковий код фіксується в АЦП сигналом LE (Latch Enable), що змінюється з «1» на «0», який програмно генерується на виводі P3.6 мікро-ЕОМ. Тактування АЦП виконується сигналом ALE, що формується мікро-ЕОМ у кожному машинному циклі

та подається на вхід CLK АЦП. Після встановлення номера каналу АЦП готовий до початку перетворення.

Для запуску перетворення АЦП мікро-ЕОМ DD2 програмно генерує сигнал на виводі P3.4, який подається на вхід STCNV (Start Converting) для початку роботи АЦП. Перетворення стартує по наростаючому фронту сигналу та триває 8 тактових циклів. Після завершення перетворення АЦП формує сигнал EOC (End of Converting) з активним рівнем «1», який подається на вхід запиту на переривання INT0 мікро-ЕОМ DD2. Оскільки для виклику переривання потрібен активний рівень «0», у схему введено інвертор DD3.1. У відповідь мікро-ЕОМ подає сигнал «1» на вивід P3.7, що активує вхід OE (Output Enable) АЦП, підключаючи його внутрішні регістри до виходів D0–D7. Після цього мікро-ЕОМ DD2 зчитує дані з АЦП через лінії P0.0–P0.7.

Основою системи є однокристална мікро-ЕОМ DD2, яка відповідає за збір та обробку інформації, прийняття рішень та формування відповідних сигналів керування згідно з заданим алгоритмом. У схемі використано мікро-ЕОМ типу AT89S51 компанії Atmel. Тактування здійснюється через вбудований генератор тактових імпульсів, до якого підключено зовнішній частото задаючий ланцюг на елементах C28, C29 та ZQ1. Апаратний скидання контролера при подачі напруги живлення забезпечується диференційним ланцюгом на R25 і C30, який формує короткий імпульс на вході Reset. Для вибору режиму роботи з внутрішньою пам'яттю програм ДЕМА на відповідний вхід через резистор R24 подається логічна «1».

Цифровий індикатор керується через роз'єм XS10 блока контролера.

У схемі передбачено роз'єм XS9 для програмування ОМЕОМ. Завантаження програми здійснюється через інтерфейс SPI за допомогою спеціального програматора.

Живлення блока контролера здійснюється напругою +12 В через роз'єм ХР7. Для гальванічної розв'язки цифрової та аналогової частин блока використані перетворювачі DA6 і DA7 типу P610U-1205ELF компанії Реак, які перетворюють +12 В постійної напруги у +5 В. На виходах перетворювачів встановлені згладжуючі (блокуючі) конденсатори С22–С27.

Для підтримки температурного режиму в холодильнику суслу застосовується електромагнітний клапан з вхідним сигналом 4...20 мА, який регулює подачу гарячої води у сорочку.

#### Блок індикації.

Порт P1 мікро-ЕОМ через роз'єм XS10 передає сигнали для управління цифровим індикатором. У схемі реалізовано принцип програмної динамічної індикації: в певний момент часу через лінії порту P1 в одному байті виводяться дані та номер першого розряду, а в наступний момент — дані та номер другого розряду і так далі по циклу. Кількість таких циклів відповідає кількості розрядів індикатора. Через лінії P1.0–P1.3 передаються дані у двійковому коді, які надходять на входи перетворювача кодів DD1 типу КР514ИД2. Перетворювач перетворює двійковий код на код семисегментного цифрового індикатора. Виходи перетворювача підключені до катодів індикаторів HG2, HG3 та HG5, HG6 типу А551. Хоча в схемі передбачено шість індикаторів, фактично використовується чотирьохрозрядна індикація. Індикатори HG1 та HG4 активуються лише при відображенні чисел більше 100. У цьому випадку вони працюють паралельно з HG2 та HG5, причому їхні катоди В і С завжди підключені через ключовий транзистор VT3 до землі, що відповідає відображенню цифри «1». При виведенні чисел більше 100 на лінії P3.6 формується сигнал «1», який через інвертори DD2.4 та DD2.3 відкриває VT3 і відображає цифру «1».

З виходів P1.4, P1.5 через роз'єм XS7 з блока контролера у двійковій формі передається номер активного в даний момент часу

розряду, який поступає на входи дешифратора DD3 типу К555ИД4. Дешифратор перетворює вхідний двійковий код у позиційний. Таким чином, на виході дешифратора, номер якого відповідає номеру активного розряду з'являється сигнал включення розряду. Цей сигнал поступає на блок ключів на транзисторах VT4-VT7, які підключають анод індикатора до напруги живлення, активуючи потрібний розряд індикатора.

У наступному циклі нові дані виводяться на наступний розряд індикатора. Таким чином, дані послідовно і циклічно відображаються у всіх розрядах індикатора.

При замиканні ключів у блоці контролера сигнали передаються через роз'єм XS10 на світлодіодні індикатори HL2 та HL3, які при включенні показують відхилення температури від заданих меж. Світлодіод HL1 сигналізує про подачу живлення на блок індикації через той же роз'єм XS10.

Сигнал аварії передається на блок індикації через роз'єм XS10. Через інвертор DD2.1 він подається на світлодіод HL4, який сигналізує про аварійну ситуацію. Одночасно сигнал надходить через інвертор DD2.2 на електронний ключ, виконаний на транзисторах VT1 і VT2. При відкритті ключа активується звуковий оповіщувач, підключений до клем AL+ та AL- блока індикації.

## Висновки

1. У ході магістерської роботи була досліджена технологія виробництва квасу та проведено аналіз усіх її етапів.
2. Проаналізовано автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУТП) виробництва квасу, розглянуто основні контури регулювання, контролю та захисту. Об'єктом регулювання обрано холодильник сусла, поставлено задачу підтримки заданого температурного режиму.
3. Розроблено структурну схему системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла та визначено склад її елементів.
4. Проведено аналіз роботи системи автоматичного регулювання, визначено запаси стійкості, час регулювання та інші параметри системи без регулятора.
5. Методом синтезу визначено передаточну функцію регулятора та оцінено показники якості роботи скоректованої системи: час регулювання  $t_p = 24$  с, перерегулювання  $\delta = 0$  %, перехідний процес має монотонний характер.
6. Розроблено структурну, функціональну та принципову схеми системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла, а також алгоритм її програмної реалізації.

## 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. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
4. 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.
5. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.
6. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
7. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
8. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
9. Ткаченко Р. Ю. Теоретичні та прикладні аспекти розробки комп'ютерних систем //Технології проектування і розробки інформаційних систем, 2018 – С. 234.
- 10.Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
- 11.Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
- 12.Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.

13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. Львів : Афіша, 2005. 350 с.
14. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. 3-є вид., стереотипн. Львів : «Новий Світ – 2000». 2006. 232 с.
15. 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.
16. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
17. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 21.10.2024).
18. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.11.2024).
19. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.11.2024).
20. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 29.10.2024).
21. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 24.10.2024).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 17.11.2024).
23. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 07.10.2024).
24. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ :

Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

25. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2024).
26. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
27. Іванов В. Г., Дзюндзюк Б. В., Олександров Ю. М. Охорона праці в електроустановках : навч. посіб. / за ред. В. Г. Іванова. Київ : Око, 1994. 226 с.

## ДОДАТОК А

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### **А.1 Законодавчі та нормативні акти з питань охорони праці в Україні**

Охорона життя та здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, створення безпечних та нешкідливих умов праці – одне з найважливіших державних завдань. Система юридичних актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці в комплексі утворюють поняття *охорона праці* (ОП) [13, 14, 15].

Правовими актами, що визначають у нашій країні основні положення з ОП, є загальні Закони України, а також спеціальні юридичні акти [13, 14, 15].

До загальних законів, які відображають основні базові положення з ОП відносяться: Конституція України, Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про систему громадського здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», а також Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ) і Кодекс законів про працю України (КЗпП).

Закони України доповнюються спеціальними юридичними актами в галузі ОП, серед яких можна виділити: Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), різноманітні санітарні норми і правила, Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), Державні будівельні норми (ДБН), всілякі норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [13, 14, 15].

В Основному Законі – Конституції України, питанням ОП присвячено статті 43, 45 та 46 [13, 15, 16].

У статті 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає»,

«Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом» [16].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (стаття 45 Конституції України) [13, 14, 15, 16]. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час.

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, яке включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття, з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом [13, 16].

Закон України «Про охорону праці» [17], прийнятий Верховною Радою України 14.10.1992 р., був переглянутий і затверджений Президентом України в новій редакції 21.11.2002 р. Він складається з преамбули та 9 розділів. Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за участю відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи і організації, або уповноваженим ним органом, і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні. Його дія поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах. В ньому однозначно закріплено за державою функції управління ОП.

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці», за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок, винні працівники притягаються до дисциплінарної, адміністративної або кримінальної відповідальності, згідно із законодавством [17].

В системі законодавства щодо охорони здоров'я та гігієни праці ключове місце займають Закони України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [18] та «Про систему громадського здоров'я» [19]. Вони передбачають розробку й реалізацію адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення, в необхідних випадках, лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події чи ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам та іншим громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення медико-санітарного законодавства.

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [20] регламентує заходи з ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи й запобігання подібним ситуаціям в майбутньому, встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, фіксує правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії.

Основні принципи соціального страхування від нещасного випадку закріплені у Законі України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [21]:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав тощо.

Функції забезпечення протипожежних заходів на виробництві та в побуті від Закону України «Про пожежну безпеку», що діяв раніше, перейняв на себе КЦЗ України, від 02.10.2012 р. [22]. Він також регулює відносини, пов'язані із

захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій, незалежно від форми власності.

КЗпП України [23], який діє ще з 10.12.1971 р., трактує вимоги до трудової діяльності громадян в Україні і врегульовує всі ситуації, які виникають у трудових відносинах між працівником і роботодавцем (прийом на роботу та звільнення; режим, умови роботи і оплати праці; відпустки; заохочення та покарання; обчислення трудового стажу; компенсації за надурочну роботу чи роботу у шкідливих та небезпечних умовах, за ушкодження здоров'я тощо). Кодекс законів спрямований на охорону трудових прав працюючих.

В КЗпП зазначені наступні положення: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (стаття 176), а також осіб молодших 18 років (стаття 192); забороняється застосовувати праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (стаття 174) [23].

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [13, 14, 15]. Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Дія НПАОП поширюються на всі підприємства, установи й організації, незалежно від підпорядкування та форми власності, на підприємців, фермерів та інших юридичних і фізичних осіб, які займаються виробництвом товарів та наданням послуг.

Національні державні стандарти – ДСТУ, які поступово вводилися замість Міждержавних стандартів у рамках СНД (Державних стандартів колишнього СРСР) почали розроблятися з 1992 року [13, 14, 15]. З 2022 року в

усіх галузях економіки України, в т. ч. в сфері ОП діють виключно ДСТУ.

У будівництві важливу роль відіграють ДБН – нормативні акти технічного характеру, що встановлюють обов'язкові вимоги до об'єкта нормування в будівництві. Об'єктами нормування в будівництві є: планування та забудова території, об'єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об'єктів будівництва, містобудування та архітектури [14, 15].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (до них відносяться, стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [13, 14, 15]. Слід зазначити, що перелічені різновиди нормативно-правових документів – це фактично однотипні юридичні акти, просто прийняті різними складами Верховної Ради України у різні роки.

Доповнюють право у в галузі пожежної безпеки «Правила пожежної безпеки в Україні», постанови Верховної Ради України, укази і розпорядження Президента України, декрети, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, рішення органів державної виконавчої влади, місцевого та регіонального самоврядування, прийняті в межах їх компетенції [13, 14, 15].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [24].

На основі НПАОП, власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи розробляють і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [13, 14, 15]. При цьому відхилення вимог щодо ОП в нормативних актах підприємства від НПАОП допускається тільки у бік

покращення умов для працівника [13, 14, 15].

До основних нормативних актів підприємства належать [13, 14, 15]:

- Положення про систему управління охороною праці на підприємстві;
- Положення про службу охорони праці підприємства;
- Положення про комісію з питань охорони праці підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань охорони праці;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони праці;
- Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативних актів про охорону праці;
- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;
- Положення про санітарну лабораторію підприємства;
- Інструкції з охорони праці для працюючих за професіями і видами робіт;
- Інструкції про порядок зварювання і проведення інших вогневих робіт на підприємстві;
- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;
- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом,

спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Цей перелік може змінюватись і доповнюватись, залежно від специфіки кожного конкретного підприємства.

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

## **А.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури в холодильнику суслу при виробництві квасу**

На здоров'я людини, її життєдіяльність і життєздатність великий вплив мають небезпечні та шкідливі фактори.

*Небезпека* – це наслідок такої дії певних факторів на людину, яка при їх невідповідності фізіологічним характеристикам людини зумовлює феномен самої небезпеки [13, 15].

*Шкідливий виробничий фактор* – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника [13].

*Небезпечний виробничий фактор* – виробничий фактор, дія якого за певних умов може привести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника [13].

До визначаючих ознак небезпечних і шкідливих факторів відносяться: можливість безпосередньої негативної дії на організм людини; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникнути аварії, вибухи, пожежі, травми.

Матеріальними носіями шкідливих і небезпечних факторів є об'єкти, що формують трудовий процес і які входять в нього, а також загальножиттєві

фактори оточуючого середовища; предмети праці; засоби праці (машини, інструменти, споруди, приміщення, земля, шляхи, канали і т. п.); продукти праці; технологія, операції, дії.

Небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи [13, 14, 15]:

- фізичні;
- хімічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Конкретні умови діяльності істотно впливають на психічні та життєво важливі функції людини. Якщо вплив факторів (з врахуванням їх взаємодії) в конкретних умовах діяльності такий, при якому забезпечується нормальне здійснення психічних та життєво важливих функцій організму, не виникає високого напруження компенсаторних систем організму і вдало виконується задана трудова діяльність, то такі умови можуть бути визначені як сприятливі, або комфортні, а в найкращих умовах – як оптимальні. Коли в силу дії факторів виникає високе напруження компенсаторних систем організму, то такі умови визначаються як несприятливі, або дискомфортні, а при вираженому несприятливому ефекті – як екстремальні [13, 15].

*Можливість механічного травмування.* Під час механізованих виробничих процесів на будь-якому виробництві існує вірогідність отримання фізичних ушкоджень, травм і, навіть, смерті від рухомих частин обладнання, виробничого транспорту, а також устаткуванням та механізмами під час навантажувально-розвантажувальних робіт, при недотриманні інструкцій з безпеки та ОП.

*Шум та вібрація.* Змінювані в часі напруження, викликані вібрацією, сприяють накопиченню пошкоджень в матеріалах, появі тріщин та руйнуванню. Найчастіше і досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах за умов резонансу. Вібрації викликають також й відмови машин, приладів. Вібрації виникають при роботі машин та механізмів, які мають невірноважені

та незбалансовані частини, що обертаються чи здійснюють зворотно-поступальний рух.

Вібрація призводить до порушень фізіологічного та функціонального станів людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни називають вібраційною хворобою. Симптоми вібраційної хвороби проявляються у вигляді головного болю, заніміння пальців рук, болю в кистях та передпліччі виникають судоми, підвищується чутливість до охолодження, з'являється безсоння. При вібраційній хворобі виникають патологічні зміни спинного мозку, серцево-судинної системи, кісткових тканин та суглобів змінюється капілярний кровообіг.

Шумом є різні звуки, що заважають нормальній діяльності людини і викликають неприємні відчуття. Дія шуму може спричинити нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обмінних процесів та функціонування органів слуху тощо. Змінюються нормальні процеси вищої нервової діяльності.

*Параметри мікроклімату.* Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під яким розуміють клімат внутрішнього середовища, що визначається діючою на організм людини сукупністю температури, вологості, руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь.

Мікроклімат виробничих приміщень, в основному впливає на тепловий стан організму людини та її теплообмін з навколишнім середовищем. Параметри мікроклімату справляють безпосередній вплив на самопочуття людини та її працездатність. Зниження температури призводить до зростання тепловіддачі шляхом конвекції та випромінювання і може зумовити переохолодження організму. Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє підсиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі та випаровуванні поту. При підвищенні температури повітря мають місце зворотні явища. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати. За такої високої температури та вологості практично все тепло, що виділяється, віддається у навколишнє середовище при

випаровуванні поту. Недостатня вологість призводить до інтенсивного випаровування волого зі слизових оболонок, їх пересихання та розтріскування, забруднення хвороботворними мікробами. Вода та солі, котрі виносяться з організму з потом, повинні заміщуватись, оскільки їх втрата призводить до згущення крові та порушення діяльності серцево-судинної системи. Тривалий вплив високої температури у поєднанні зі значною вологістю може призвести до накопичення теплоти в організмі і до гіпертермії. За зниженої температури, значної рухомості та вологості повітря виникає переохолодження організму (гіпотермія).

*Дія електричного струму на людину.* Дія електричного струму на організм людини своєрідна та несе різнобічний характер. Всі види дії електричного струму на організм людини можна об'єднати в два основних: електричні травми та електричні удари.

*Пожежо- та вибухонебезпеки.* При недостатній увазі до особливостей виробничого обладнання та технологічного процесу, а також неправильному зберіганні горючих та вибухонебезпечних речовин вони можуть стати джерелом пожежі або вибуху. На харчових підприємствах пожежі часто виникають через порушення правил пожежної безпеки (неправильне поводження з вогнем, паління, несправне електрообладнання та техніки), порушення технологічних процесів (наприклад, у процесі сушіння, смаження, кип'ятіння, випаровування), самозаймання складованих горючих матеріалів (солод, борошно, шрот) та статичну електрику, а також природні фактори (блискавка, висока температура повітря), які посилюються наявністю легкозаймистих речовин і горючих продуктів (пил різноманітного походження, жири, олії, аміак у холодильних установках), а також великої кількості пакувальних матеріалів (папір, картон, поліетилен, полістирол тощо) [25].

*Наявність хімічних та біологічних факторів впливу* на підприємствах харчової промисловості може призвести до масових харчових отруєнь та алергічних реакцій. Серед хімічних шкідливостей та небезпек можна виділити спиртові суміші, залишки миючих засобів та дезінфектантів, а також сторонні

домішки, через порушення технології (пластик, метал, скло). У повітрі робочої зони та на поверхнях оточуючих предметів завжди присутні певні біологічні компоненти – мікроорганізми (дріжджі, бактерії, пліснява) та їх токсини; макроорганізми (комахи, гризуни, птахи); алергени (пилки рослин, ячмінний пил і борошно).

*Психофізіологічні фактори виробництва* – фізичні і нервово-психічні перевантаження. Неправильний розподіл робочого часу, надмірна тривалість робочих змін, тривале зосередження уваги на певних діях можуть викликати нервово-психічні перевантаження, що поступово переходять у фізичні, і можуть викликати помилкові дії працівника, які здатні призвести до травми.

*Недостатнє освітлення* викликає передчасну втому, притупляє увагу працюючого, знижує продуктивність праці, погіршує якісні показники та може стати причиною нещасного випадку.

Серед факторів зовнішнього середовища, що впливають на організм людини в процесі праці, світло займає одне з перших місць [13, 14, 15]. Під час здійснення будь-якої трудової діяльності втомлюваність очей, в основному, залежить від напруженості процесів, що супроводжують зорове сприйняття. Погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції.

### **А.3 Заходи з усунення чи зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва при експлуатації системи автоматичного регулювання температури в холодильнику суслу при виробництві квасу**

Безпечність виробничого устаткування – це властивість виробничого устаткування відповідати вимогам безпеки праці під час монтажу (демонтажу) і експлуатації в умовах, установлених нормативною документацією.

Для усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів

на підприємстві слід дотримуватись основних правил техніки безпеки та виробничої санітарії:

- територія підприємства має бути огорожена і доступ до неї стороннім особам заборонений;
- у місцях проведення вантажно-розвантажувальних робіт територія повинна бути спланована і мати тверде покриття. Нахил площ повинен бути не більше 3°;
- на залізничних шляхах мають бути встановлені попереджувальні знаки, вивішені плакати, які забороняють переходити шляхи в невстановленому місці;
- під час роботи всі працівники мають дотримуватись засобів колективної та особистої гігієни і виробничої санітарії.

Загальні вимоги до виробничого устаткування, його безпечність забезпечується правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування; застосуванням у конструкції засобів захисту; дотриманням ергономічних вимог; включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації; ремонту; транспортування та зберігання устаткування; використанням у конструкції устаткування безпечних та нешкідливих матеріалів.

При проектуванні устаткування необхідно враховувати умови його експлуатації з тим, щоб при дії на нього вологи, сонячної радіації, механічних коливань, високих та низьких тисків і температур, агресивних речовин і т. п. Устаткування не ставало небезпечним.

*Для запобігання механічному травматизму від рухомих частин обладнання та нагрітих елементів конструкцій застосовуються різноманітні капоти, екрани, огороження, що унеможливають безпосередній контакт устаткування із частинами тіла працівника. Для того, щоб запобігти виникненню небезпеки при раптовому вимкненні джерел енергії всі робочі органи, а також пристрої, які використовуються для захоплення, затискування та підймання повинні*

оснащуватись спеціальними захисними пристосуваннями. Причому необхідно унеможливити самовільне вмикання робочих органів при відновленні подачі енергії.

*Для зниження рівня шумів і вібрацій застосовується раціональне планування приміщення, при якому джерело шуму або ізольоване звукопоглинальними кожухами і капотами, або відокремлене від працівників пересувними звукопоглинальними перегородками. Крім того стіни приміщень обладнуються звукопоглинальним личкуванням. електродвигуни та інше вібруюче обладнання має бути встановлене на гумових або пружинних підкладках-амортизаторах; з'єднання вентиляторів і повітропроводів на гнучких вставках.*

*Заходи з оптимізації параметрів мікроклімату.* Параметри мікроклімату справляють безпосередній вплив на самопочуття людини та її працездатність. Зниження температури за всіх інших однакових умов призводить до зростання тепловіддачі шляхом конвекції та випромінювання і може зумовити переохолодження організму. Підвищення швидкості руху повітря погіршує самопочуття, оскільки сприяє підсиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі при випаровуванні поту. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати [13]. Тривалий вплив високої температури, у поєднанні зі значною вологістю, може призвести до накопичення теплоти в організмі і до гіпертермії – стану, при якому температура тіла піднімається до 38...40°C [26].

Відповідно до діючих санітарних норм [15], оптимальні величини показників мікроклімату повинні відповідати:

- температура повітря 16...25°C;
- температура поверхонь 17...25°C;
- відносна вологість повітря 60...40 %;
- швидкість руху повітря 0,1...0,3 м/с.

Проблема підвищених рівнів температур та вологості повітря робочої зони може бути вирішена застосуванням як загальної системи вентиляції, так і

локальних (місцевих) систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Конструкції устаткування повинні забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, запобігати накопиченню статичної електрики в небезпечних кількостях. Для захисту від ураження природною електрикою виробничих споруд, обладнання та людей обов'язково створюється система блискавковідводів. Устаткування повинно бути оснащено засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках (аваріях, небезпечних пошкодженнях, режимах близьких до небезпечних) – засобами автоматичної зупинки, гальмуванні та вимкненні від джерела енергії.

Заходи по захисту від електротравматизму забезпечують недоступність струмопровідних частин для випадкового дотику; понижена напруга; заземлення та занулення установок; автоматичне відключення; індивідуальний захист та інше.

Усі ремонтні і профілактичні роботи в електричних приладах і апаратах повинні проводитися при повній відсутності напруги. При цьому підвідні клема мають бути заземлені за допомогою переносного заземлення. Біля пускових пристроїв вивішують табличку з написом: «Не вмикати! Працюють люди!». Для запобігання враженню людей електричним струмом необхідно закрити доступ до струмопровідних вузлів усім особам, за винятком спеціально виділених електромонтерів. Якщо напругу відключити повністю не вдається, то персонал зобов'язаний працювати в діелектричних калошах або стояти на ізолюючій основі. Необхідно користуватися інструментом з ізольованим руків'ям або діелектричними рукавичками. При цьому сусідні струмопровідні частини мають бути захищені. При роботах під напругою не допускається застосовувати напилки, ножівки, металеві метри тощо. Для оглядів і інших робіт персонал повинен користуватися переносними лампами напругою не вище 36 В. Переносний електроінструмент має бути надійно заземлений.

*Протипожежна та противибухова профілактика* передбачає заходи по попередженню загорянь і ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери

розповсюдження вогню й забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять. Мають суворо виконуватись інструкції зі складування сировини, напівфабрикатів і готової продукції та з виконання завантажувально-розвантажувальних робіт. Не повинні допускатись «злежування» та самозаймання природних матеріалів у штабелях, а також утворення аерозолів і повітряно-пилових сумішей.

Всі виробничі приміщення обладнуються протипожежними щитами, засобами пожежогасіння планами евакуації, інструкціями та знаками безпеки. При розробці планів ліквідації аварій має бути зроблений розрахунок і прийнятий режим вентиляції, що сприяє, у випадку виникнення пожежі, запобіганню перекидання вентиляційного струменя і поширенню газоподібних продуктів горіння, зниженню активності пожежі, створенню сприятливих умов для його гасіння й попередження вибухів горючих газів.

Регулярно повинні проводитися інструктажі з протипожежної безпеки і об'єктові тренування з евакуації та уміння використовувати засоби пожежогасіння.

*Боротьба з хімічними та біологічними небезпеками та шкідливостями* полягає, в основному, в нейтралізації та виведенні з виробничих приміщень хімічних речовин і сполук та біологічних компонентів. У виробничих приміщеннях створюють належні санітарно-гігієнічні умови, встановлюють аспіраційне та вентиляційне обладнання. Основна роль тут належить припливно-витяжній системі вентиляції. На неї ж покладають обов'язок боротьби з запиленням повітря робочої зони та його підвищеною температурою.

Захист від небезпечної дії аміаку, використовуваного у холодильних установках, включає комплекс заходів, виконання яких є обов'язковим. Необхідно ретельно стежити за щільністю фланцевих з'єднань і сальникових ущільнень. Виявлена теча повинна негайно усуватися. Для виявлення місць витоку аміаку дозволяється користуватися тільки спеціальними хімічними засобами. Застосовувати для цієї мети запалений сірчаний шнур забороняється. Прилади і пристрої, дотичні до аміаку, можна відкривати тільки після повного

видалення з них аміаку і масла. При цьому персонал повинен користуватися аміачним протигазом. Проводити зварювальні роботи на апаратах або трубопроводах, не звільнених повністю від аміаку, забороняється.

Згідно затверджених планів, мають здійснюватись гігієнічні заходи з дератизації, дезінсекції, дезінфекції та знезараження приміщень. Регулярно повинні проводитись сухі та вологі прибирання.

Найбільш дієвим способом *захисту від психофізіологічних небезпечних і шкідливих впливів* на працівника є правильна організація його робочого часу та місця роботи. Мають бути раціонально сплановані робочі зміни і час відпочинку, надаватись технологічні та гігієнічні перерви, створюватись позитивний моральний клімат у трудовому колективі, не припустимі грубі показові «виволочки» та некоректні зауваження від керівництва до підлеглих.

Для *запобігання шкідливим результатам недостатнього освітлення* необхідна наявність раціонального освітлення приміщень та робочих місць. При проектуванні природного та штучного освітлення в виробничих та допоміжних будівлях та приміщеннях, а також штучного освітлення на території підприємства необхідно враховувати вимоги ДБН та положення галузевих норм щодо проектування природного і штучного освітлення, у відповідності із встановленим порядком.

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути: природним, що створюється прямими сонячними променями та розсіяним світлом небосхилу; штучним, що створюється електричними джерелами світла та суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним.

Має бути обґрунтовано обране штучне освітлення. При проектуванні штучного освітлення необхідно вирішити наступне: вибрати систему освітлення, тип джерела світла, тип світильників, визначити розташування світлових приладів, виконати розрахунки штучного освітлення та визначити потужності світильників та ламп. Вибираючи джерела світла, слід надавати перевагу люмінесцентним лампам, які енергетично більш економічні. Окрім того, вони за

спектральними характеристиками максимально наближаються до природного світла, що важливо при використанні суміщеного освітлення.

Розрахуємо систему штучного виробничого освітлення у приміщенні оператора системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу.

#### **А.4 Розрахунок системи штучного виробничого освітлення у приміщенні оператора системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу**

##### Початкові дані

Розрахувати систему загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для виробничого приміщення оператора системи вимірювання маси рухомого залізничного транспорту, в якому виконуються зорові роботи високої точності (розряд Ш<sub>в</sub>).

Розміри приміщення:

- довжина  $a = 12$  м;
- ширина  $L = 5$  м;
- висота  $H = 3,2$  м.

Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття  $\rho_{стелі} = 70$  %;  
 $\rho_{стін} = 50$  %.

Висота робочих поверхонь (столів)  $h_p = 0,7$  м.

Для освітлення використати світильники типу УПМ-15, які підвішуються до стелі; відстань від світильника до стелі  $h_c = 0,5$  м.

Мінімальна освітленість, за нормами,  $E = 200$  лк.

##### Розрахунок

Розрахунок проведемо за методикою, викладеною у [26].

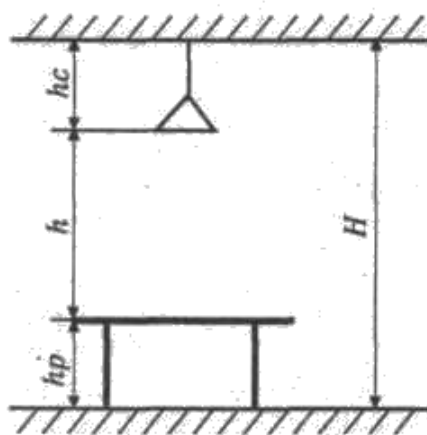
Визначаємо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_o = H - h_c = 3,2 - 0,5 = 2,7 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення, з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою, відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [15], повинна бути 2,5...4,0 м, залежно від характеристики світильника. В нашому випадку  $h_o$  відповідає цій вимозі.

Висота підвісу світильника над робочою поверхнею (рис. А.1) дорівнює:

$$h = h_o - h_p = 2,7 - 0,7 = 2,0 \text{ м.}$$



**Рисунок А.1 – Схема визначення висоти підвісу світильника**

Показник приміщення і становить:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{12 \cdot 5}{2 \cdot (12 + 5)} = 1,76.$$

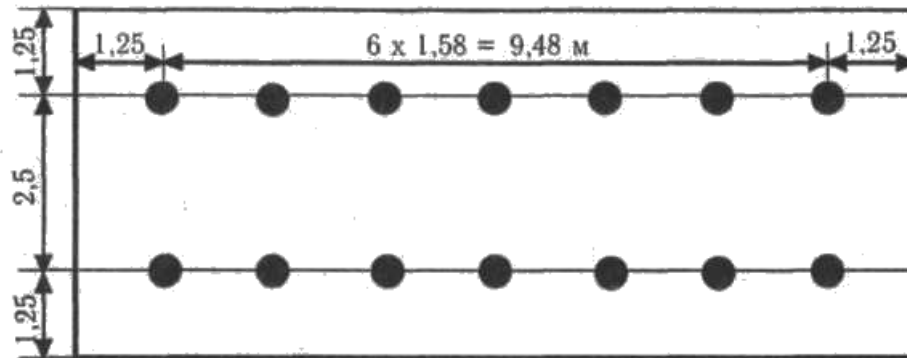
Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками  $L$  і висоти їх підвісу  $h$ . Визначимо рекомендовану відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2 = 1,4 \text{ м.}$$

Необхідна кількість світильників становить:

$$N = \frac{a \cdot b}{2 \cdot L^2} = \frac{12 \cdot 5}{2 \cdot 1,4^2} = 13,3 \text{ шт.}$$

Приймаємо 14 світильників. Враховуючи розміри приміщення, розташовуємо їх у два ряди по 7 штук (рис. А.2).



**Рисунок А.2 – Схема розташування світильників УПМ-15 у приміщенні оператора системи автоматичного регулювання температури в холодильнику сусла при виробництві квасу**

За табл. 3.25 [26] знаходимо коефіцієнт використання  $\eta = 0,58$  для світильника УПМ-15, при  $i = 1,75$ ,  $p_{стелі} = 70 \%$ ,  $p_{стін} = 50 \%$ .

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику встановлюється лише одна лампа, дорівнює

$$\Phi_{л} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 60 \cdot 1,3 \cdot 1,15}{14 \cdot 0,8} = 2209 \text{ лм,}$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу, що враховує запорошення світильників та знос джерел світла в процесі експлуатації ( $K_3 = 1,4 \dots 1,5$ , за умови чищення світильників не рідше двох разів у рік);

$S$  – освітлювальна площа, що, м<sup>2</sup>;

$Z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення ( $Z = 1,1 \dots 1,2$ );

$\eta$  – коефіцієнт затінення (запроваджується для помешкань із фіксованим положенням працюючих і приймається рівним  $\eta = 0,8 \dots 0,9$ );

За табл. 3.27 [26] обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 5 % менше розрахункового,

однак не перевищує встановлену норму<sup>^</sup>

$$-10 \% < \Delta\Phi_l < +20 \%$$

Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні складає:

$$\sum P_{ce} = P_{ce} \cdot N = 150 \cdot 14 = 2100 \text{ Вт.}$$