

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 автоматизованої системи
регулювання вологості при приготуванні формовочних
сумішей»**

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

_____ Юрій ДЗЮБА

« ____ » _____ 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**

Дзюби Юрія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей

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 вологості при приготуванні формовочних сумішей 1. Автоматизація приготування формовочних сумішей; 2. Визначення характеристик систем автоматичного керування; 3. Синтез цифрового регулятора; 4. Розробка схеми цифрового регулятора.

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 випускню кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Дзюби Юрія Анатолійовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження автоматизованої системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей».

Випускню кваліфікаційну роботу присвячено проблемі стабілізації вологості формовочних сумішей при виробництві деталей сільськогосподарських машин. В роботі виконано ідентифікацію вологості суміші в змішувачі як об'єкта управління та визначена його передаточна функція. Розроблена структурна схема цифрової системи автоматичного керування, обрані необхідні елементи та визначені їх передаточні функції. Проведений синтез цифрового регулятора методом побудови бажаної логарифмічної амплітудо-частотної характеристики ЦСАК. Розроблена схема програмної реалізації дискретного коректуючого пристрою та принципова електрична схема цифрового регулятора на базі мікроконтролера з відповідними пристроями вводу та виводу інформації, для підключення датчика та управлінням виконавчим механізмом. Також в проекті розглянуті заходи з охорони праці.

Ключові слова: формовочні суміші, виробництво деталей машин, система автоматичного регулювання, дискретний регулятор.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-24M Yurii Dziuba on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of an automated humidity control system for the preparation of molding mixtures».

The final qualification work is devoted to the problem of stabilizing the humidity of molding mixes in the production of parts of agricultural machines. In this work, the moisture content of the mixture in the mixer was identified as an object of control and its transfer function was determined. The structural scheme of the digital automatic control system is developed, the necessary elements are selected and their transfer functions are determined. The synthesis of the digital controller by the method of constructing the desired logarithmic amplitude-frequency characteristic of the DACS is carried out. The scheme of program realization of discrete correcting device and circuit diagram of digital controller based on microcontroller devices with corresponding input and output information to connect sensor and actuator control. The project also considered labor protection measures.

Key words: molding compounds, machine parts production, automatic control system, discrete controller.

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Автоматизовані процеси підготовки формувальних сумішей	6
1.1. Технологія автоматизованого приготування формувальних сумішей	6
1.2. Методи контролю та регулювання формувальної суміші під час її автоматичного приготування	14
2 Визначення характеристик систем автоматичного керування.....	16
2.1 Ідентифікація вологості як об'єкта автоматичного керування.....	16
2.2 Розробка структурної схеми цифрової системи автоматичного керування	27
3 Розробка цифрового регулятора.....	30
3.1 Визначення періоду дискретизації системи.....	30
3.2 Визначення дискретної передаточної функції зведеної неперервної частини цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК)	33
3.3 Побудова частотної передаточної функції ЗНЧ ЦСАК	38
3.4 Побудова потрібної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) ЦСАК.....	40
3.5 Процес визначення дискретної передаточної функції КМЕОМ.....	45
3.6 Розробка алгоритмічної схеми програмної реалізації дискретного коректуючого пристрою	48
3.7 Побудова перехідного процесу системи	49
4 Створення схеми цифрового регулятора.....	51
4.1 Створення структурної схеми регулятора.....	51

4.2 Розробка схеми електричних з'єднань	55
4.3 Організація шин у мікропроцесорній системі	57
4.4 Проектування адресного селектора	59
4.5 Засоби взаємодії мікропроцесора з безперервною частиною системи керування	60
Висновки	64
Список літератури	65
Додаток А	68

Вступ

Формувальні суміші, що застосовуються в ливарних цехах для виготовлення форм, включають зернисті, дрібнодисперсні та рідкі складові. Для кожного конкретного типу відливок і відповідного технологічного процесу склад суміші зазвичай визначають на основі накопиченого практичного досвіду. Проте такий емпіричний підхід не дозволяє забезпечити оптимальний склад, унаслідок чого частка браку відливань, зумовленого властивостями формувальних сумішей, може становити від 40 до 70 % від загальної кількості дефектів.

У процесі дослідного підбору суміші та її тривалого використання формуються певні кількісні залежності між фізико-механічними характеристиками матеріалу. Ці співвідношення закріплюються в технічних умовах на формувальну суміш. Будь-які відхилення від установлених значень фізико-механічних показників розглядаються як можливі джерела виникнення дефектів відливань. Водночас у більшості ливарних цехів відсутній системний аналіз браку, спричиненого формувальними матеріалами та сумішами, а допустимі межі відхилень часто встановлюються технологами без належного обґрунтування.

У переважній кількості випадків фахівці ливарного виробництва, формуючи завдання на розроблення систем автоматичного контролю та регулювання (САКР), не здатні чітко визначити вимоги, які мають висуватися до таких систем, зокрема щодо необхідної точності вимірювання чи стабільного підтримання конкретних технологічних параметрів.

Вологість формувальної суміші є одним із суттєвих чинників, що значною мірою впливає на її якісні характеристики, зокрема формованість,

газопроникність та інші показники. Зокрема, показник формованості виявляє найвищу чутливість до змін рівня зволоження суміші. Так, у діапазоні вологості 0,2–0,3 % значення формованості зменшується з 80 до 20, тобто скорочується приблизно у чотири рази.

У працях Ф. Хофмана пропонується застосовувати вологість формувальної суміші, визначену експериментальним шляхом, на рівні 3,5 %. Це значення дещо перевищує оптимальний показник вологості, за якого досягається максимальна міцність суміші у вологому стані під час стискання, а також відповідає формованості в межах 70–80 %. Альтернативно цей рівень вологості узгоджується з іншою технологічною характеристикою, введеною автором і визначеною ним як ущільнюваність.

У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні автоматизованого регулювання вологості формувальних сумішей, що є необхідною умовою підвищення їхньої якості та стабільності технологічних властивостей.

Мета дослідження полягає у підвищенні якості виготовлення деталей сільськогосподарських машин шляхом впровадження автоматизованого регулювання вологості формувальних сумішей 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 вологості формувальних сумішей;

Об'єктом дослідження є методи й алгоритми, спрямовані на покращення якості регулювання вологості формувальних сумішей.

Предметом дослідження є система автоматичного керування вологості формувальних сумішей.

Методи дослідження ґрунтуються на принципах сучасної теорії управління, математичної статистики, теорії випадкових процесів та спектрального аналізу. Для оцінки якості системи автоматичного регулювання вологості формувальних сумішей 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 Автоматизовані процеси підготовки формувальних сумішей

1.1 Технологія автоматизованого приготування формувальних сумішей

Обсяги використання формувальних і стрижневих сумішей для виготовлення форм, ливарних та стрижневих елементів коливаються від 3 до 10 т, у середньому становлячи 5–6 т на 1 т придатного литва. Конкретне значення залежить від конфігурації відливок та товщини їхніх стінок. Це становить приблизно 50 % загального вантажопотоку ливарного цеху. Через це механізація процесів приготування та транспортування сумішей має важливе як економічне, так і технологічне значення, впливаючи на якість та однорідність сумішей.

Загалом формувальна суміш утворюється з відпрацьованої, тобто вибитої з опок, формувальної суміші та освітлюючих або оновлювальних добавок, до яких входять свіжий пісок, глина або бентоніт, а також спеціальні добавки. Як відпрацьовану суміш, так і свіжі компоненти необхідно попередньо обробити або підготувати перед подачею в основний змішувальний апарат.

Свіжий пісок просіюють для видалення гальки, випадкових забруднень та сторонніх предметів, що могли потрапити під час видобутку або транспортування. При цьому просіювання не передбачає поділ на фракції, а носить лише контрольний характер і здійснюється через одне сито з досить великими осередками розміром 3–5 мм.

У типовій практиці близько половини кварцових пісків надходять до ливарних цехів достатньо сухими й легко проходять через сито без попередньої сушки. Інша половина може містити значну вологість, тому її необхідно заздалегідь сушити. Глинисті піски (худі, напівжирні та жирні)

завжди піддають сушінню перед просіюванням, оскільки вологі вони погано проходять через сито.

Під час сушіння глинисті піски злипаються в грудки, які під час просіювання залишаються на ситі. Тому просіювання таких пісків необхідно поєднувати з подрібненням грудок. Матеріал, що залишається на ситі, направляють у розминаючий апарат, після чого його знову подають на просіювання.

Кам'яне вугілля, яке зазвичай використовують як спеціальну вуглецеву протипригарну добавку у формувальні суміші для чавунного литва при формуванні по сирому, зазвичай вводять у суміш у порошкоподібному, дрібно подрібненому вигляді. Глину або бентоніт також додають переважно в сухому подрібненому стані. Подрібнення глини та вугілля проводять у два етапи: спочатку грубе дроблення, а потім тонке розмелювання. Для цих операцій у багатьох ливарних цехах використовують одне й те саме обладнання.

Глину перед розмелюванням обов'язково сушать. Оскільки сирий матеріал часто містить великі шматки, його попередньо пропускають через зубчасті вальці. Вугілля ж сушити не можна, оскільки при цьому випаровуються леткі компоненти, і воно втрачає свої властивості як протипригарна добавка.

Тому для покращення подрібнення вугілля (та глини) млини часто оснащують системою циркуляції теплого повітря, що частково підсушує матеріал під час процесу роздрібнення.

Відпрацьована суміш, що виходить із сирих форм на вибивних ґратах, розсипається при проходженні через щілини ґрат і зазвичай не потребує попереднього подрібнення грудок. Натомість після вибивання сухих форм відпрацьовану суміш необхідно попередньо пропускати через вальці для розминки грудок.

Підготовка відпрацьованої формувальної суміші включає видалення з неї металевих домішок — застиглих бризок, сплесків та інших сторонніх частин — за допомогою відокремлювачів, а також подальше просіювання через низку сит із осередками розміром 6–12 мм. Таке просіювання, аналогічно процесу для свіжого піску, має на меті лише відділення великих сторонніх включень, наприклад шматків стрижнів, літників тощо.

У потоковому, конвеєрному виробництві відпрацьована формувальна суміш не встигає охолонути і надходить у відділення підготовки суміші прямо з вибивних ґрат з середньою температурою 80–120 °С, що залежить від співвідношення маси металу до маси форми.

Робоча формувальна суміш, приготована на основі такої гарячої відпрацьованої суміші, також виходить підвищеної температури, що призводить до збільшення браку відливок через засори, викликані осипанням кромок форм. Тому в сучасних ливарних цехах сумішоприготувальні системи для автоматичних і поточкових ліній обов'язково оснащують установками для охолодження відпрацьованої суміші. Принцип їхньої роботи зазвичай базується на випарному охолодженні: гарячу суміш попередньо зволожують і гомогенізують, після чого інтенсивно продувають повітрям. Завдяки випаровуванню вологи (з використанням прихованої теплоти паротворення) суміш швидко охолоджується до температури, близької до кімнатної.

Відмагнічена, просіяна та охолоджена відпрацьована суміш вважається підготовленою і надходить у змішувач, куди одночасно додають освіжаючі компоненти — пісок, глину або бентоніт, вуглецеві та інші спеціальні добавки, а також воду для зволоження.

Змішувач виступає ключовою технологічною машиною сумішоприготувальної установки. Для полегшення дозування компонентів при подачі в основний змішувач іноді проводять попереднє змішування свіжих

формувальних матеріалів — піску, глини та кам'яновугільного пилу — в окремому змішувачі у необхідних пропорціях.

Отримують так звану освіжну суміш, яка потім подається в основний змішувач для поєднання з відпрацьованою формувальною сумішшю та отримання готової робочої суміші. Використання освіжної суміші також спрощує систему транспортування, оскільки в головний змішувач надходить лише одна суміш замість кількох окремих видів свіжих матеріалів.

Змішування компонентів піщано-глинистих формувальних сумішей зазвичай починають у сухому стані протягом певного часу, після чого в змішувач додають воду, і процес продовжується вже в зволоженому стані.

Під час приготування піщано-глинистих сумішей вологі грудки, що утворюються, зазвичай розминаються безпосередньо в змішувачі, проте частково вони можуть зберігатися в масі суміші навіть після її випуску зі змішуючого апарата. Вирівнювання вологості відбувається завдяки капілярній дії проміжків між частинками суміші протягом певного часу, який зростає зі зменшенням розміру частинок.

Оскільки глина складається з дуже дрібних частинок, час, необхідний для рівномірного зволоження, є найбільшим. Через це жирніші піщано-глинисті суміші потребують більш тривалого часу для вирівнювання вологості порівняно з худими сумішами.

Вирівнювання вологості готової суміші часто проводять у відстійних бункерах. Після приготування в змішуючому апараті суміш поміщають у бункер, розрахований на 1–3 години запасу матеріалу. Як показують деякі спостереження, після відстоювання та рівномірного просочення вологою суміш набуває більшої міцності порівняно з тією, що щойно вийшла зі змішувача.

У сучасних сумішоприготувальних системах, що обслуговують нові автоматичні лінії, зазвичай спеціальні бункери-відстійники не

використовуються. Натомість передбачені проміжні бункери великої ємності (80–100 м³) між змішувачами та наступними агрегатами, наприклад розпушувачами, де приготована суміш витримується не менше години. Загалом питання про доцільність застосування відстійних бункерів та самого відстоювання на сьогодні не має однозначного вирішення. Завершальною операцією приготування формувальної суміші є аерація або розпушування, мета якої — надати суміші легкість, що покращує однорідність ущільнення форм ливарень і їхню газопроникність. Після розпушування суміш готова до використання і подається у витратні бункери над формувальними машинами.

Глину додають у формувальну суміш у сухому подрібненому вигляді або у вигляді водної суспензії. Для приготування суспензії сирі глиняні грудки розмішують у воді за допомогою лопатевого або каткового змішувача. Іноді використовують також потрійні водно-глиняно-вуглецеві суспензії.

Використання глини у формувальних сумішах у вигляді суспензії є доцільним. По-перше, це усуває потребу у відстоюванні суміші після змішування, оскільки глина в суспензії вже знаходиться у водному середовищі і не потребує додаткового зволоження. По-друге, якщо суспензію готують із сирі глини, обладнання для її приготування виявляється простішим і дешевшим порівняно з сушильним та дробильно-розмельним устаткуванням, необхідним для отримання глини у порошковій формі.

У проекті розглянуто схему сумішоприготувальної системи автоматичної лінії ливарного цеху, яка є типовою для сучасних установок такого типу. Установа оснащена двома маятниковими змішувачами з масою замісу 2,27 т та має циклову продуктивність до 150 т/год. Тривалість циклу роботи змішувачів становить 105 с. Із змішувачів суміш вивантажується у проміжні бункери об'ємом 4 м³, оснащені рейковими (колосниковими) живильниками, що коливаються, які рівномірно подають суміш на систему

стрічкових конвеєрів. Конвеєри транспортують суміш у бункери формувальних автоматів із проміжним розпушуванням у аераторі.

Відпрацьована суміш після вибивних ґрат спочатку проходить першу магнітну сепарацію за допомогою надстрічкового сепаратора, далі проходить грубе та тонке просіювання з розминкою грудок на вібраційному ситі. Після цього суміш піддається повторній магнітній сепарації іншим надстрічковим сепаратором і потрапляє в гомогенізатор. Далі вона проходить через охолоджувач установки випарного охолодження. Підготовлена відпрацьована суміш ще раз сепарують магнітно на стрічці з кінцевим магнітним шківом і, за допомогою елеватора, піднімають у бункери об'ємом 80 м³, розташовані над змішувачами та оснащені тарілчастими живильниками діаметром 2 м.

Свіжий пісок, який надходить із заводу у готовому до використання вигляді, транспортується зі складу формувальних матеріалів за допомогою стрічкових конвеєрів та елеватора в бункери об'ємом 40 м³, розташовані над змішувачами і обладнані тарілчастими живильниками діаметром 2 м.

Відпрацьована суміш і свіжий пісок з цих бункерів надходять у ваговий бункерний дозатор об'ємом 2,5 м³, розташований над кожним змішувачем. Дозатор обладнаний тензометричними датчиками системи автоматичного зважування та щелепним затвором з пневмоприводом. Відпрацьована суміш і свіжий пісок подаються в дозатор одночасно, а кількість матеріалів, що дозуються, регулюється тривалістю роботи тарілчастих живильників.

Бентоніт і вугілля додають у суміш у вигляді бентонітно-вугільної суспензії, що містить 15–20 % бентоніту (Na-Ca) і 8–10 % вугілля, решта — вода, у кількості 1,5–3,7 % від маси замісу. Для приготування суспензії бентоніт використовують у порошковій формі, а вугілля — гранульоване з розміром зерна, що відповідає модулю дрібності AFS 52–72. На відміну від порошкоподібного вугілля, гранульоване забезпечує кращу газопроникність суміші і повільніше згоряє, що посилює його протипригарну дію.

Суспензію готують в установці з двома баками — попереднього та остаточного змішування, кожен об'ємом 6 м³ і обладнаний двома пропелерними мішалками. Потім суспензію насосами подають у витратний бак над змішувачами, також оснащений мішалками для підтримки складових у зваженому стані. З витратного бака суспензію дозують дозаторами і подають у змішувачі для приготування робочої суміші.

У сучасних ливарних цехах із потоково-масовим виробництвом і автоматичними лініями зазвичай кожна лінія оснащується власною сумішоприготувальною установкою.

Заключний та найвідповідальніший етап приготування формувальних і стрижневих сумішей полягає у змішуванні всіх компонентів, після чого формувальні суміші для сирих форм додатково піддають розпушуванню.

У сучасних сумішоприготувальних установках для змішування використовують каткові змішувачі, основними серед яких є нормальні змішувальні бігуни, здвоєні бігуни та маятникові змішувачі.

Нормальні змішувальні бігуни системи Симсона мають нерухому чашу та два гладкі катки, які котяться по шару матеріалу, завантаженого в чашу. Катки рухаються по колу навколо центрального вертикального валу і одночасно обертаються навколо власної осі. За допомогою плугів змішуваний матеріал подається під катки для ефективного перемішування.

Катки змішувальних бігунів встановлені на кривошипах, що дозволяє їм підніматися при потраплянні під них випадкових твердих грудок і пропускати їх. Кривошипи обладнані кронштейнами з наполегливими регульовальними гвинтами, які упираються в траверсу. Ці гвинти обмежують рух катків вниз, встановлюючи мінімальний зазор між катками та дном чаші, що запобігає дробленню зерен піску.

Нормальні змішувальні бігуни працюють як змішувачі періодичної дії. У безперервних сумішоприготувальних системах перед ними встановлюють бункери з дозаторами для подачі компонентів замісу. Після завершення перемішування суміш вивантажується через спеціальні отвори в днищі чаші. При цьому завантаження складових частин і вивантаження готового замісу здійснюють без зупинки обертання бігунів.

Тривалість змішування одного замісу в нормальних бігунах, включаючи час завантаження дозаторами та розвантаження суміші, становить 3–5 хвилин для однієї формувальної суміші.

Нормальні змішувальні бігуни забезпечують високу якість перемішування компонентів формувальних і стрижневих сумішей. Вони рівномірно розподіляють складові частини по всій масі суміші та добре обволікають піщані зерна вологою глиною або іншим зв'язуючим. Механізм змішування бігунів поєднує тиск катків на суміш, ковзання катків по дну чаші та додаткове перемішування плугами.

Коли катки наїжджають на суміш на дні чаші бігунів, вони тиснуть на неї власною вагою; суміш деформується і частково видавлюється з-під катків уперед та в сторони. Це призводить до взаємного переміщення зерен, завдяки чому складові частини суміші розподіляються більш рівномірно.

Щоб підвищити силу тиску катків на суміш у чаші, часто використовують конструкції з додатковим навантаженням за допомогою пружин. При цьому самі катки можуть бути легшими. Існують також бігуни з автоматично регульованою силою тиску на суміш під час перемішування замісу — наприклад, зі збільшеною силою на початку циклу або з підтримкою постійного притиску протягом усього циклу.

1.2 Методи контролю та регулювання формувальної суміші під час її автоматичного приготування

Розглянемо питання про методи контролю і регулювання ступеня зволоження формочних сумішей при їх автоматичному приготуванні в його розвитку.

Системи програмного управління циклом роботи змішувачів періодичної дії були розроблені та впроваджені у промисловість приблизно до 1950 року. Проте вже на початковому етапі експлуатації таких автоматизованих змішувачів виявилось, що доза води, передбачена програмою циклу, потребує оперативного коригування. Це було пов'язано з тим, що відпрацьована суміш, яка входить до складу формувальної суміші у значній кількості (до 90%), у практичних умовах виробництва мала змінну вологість, оскільки тоді ще не існувало установок для її гомогенізації та охолодження. Саме це спричинило початок другого етапу розвитку автоматичних сумішоприготувальних систем — розробку і застосування автоматичних пристроїв, які компенсують коливання вологості відпрацьованої суміші та забезпечують підтримку заданого рівня вологості готового замісу. Цей етап тривав практично протягом усього десятиліття 1950-х років.

Було розроблено дві системи регулювання вологості: система кінцевого стану (СКС) та система попередньої калькуляції (СПК).

У системі кінцевого стану (СКС) вологість замісу регулюють до заданого значення за допомогою датчика, який безперервно контролює вологість суміші в чаші змішувача. Для подачі води використовуються дві труби — одна великого, інша малого діаметра. На початковому етапі зволоження суміші працюють обидві труби, що забезпечує швидке зростання вологості. Коли датчик фіксує наближення вологості до заданого

значення на певну невелику заздалегідь встановлену величину, труба великого діаметра автоматично перекривається, а подача води продовжується лише через трубу малого діаметра, забезпечуючи тонкий струмінь води. подача води повністю припиняється, коли датчик фіксує досягнення заданого рівня вологості замісу.

Система регулювання попередньої калькуляції (СПК) полягає у контролі вологості та температури дози обробленої суміші в дозаторі, підготовленої для наступного замісу. На основі цих даних автоматично відмірюється необхідна кількість води, яка потрапляє у спеціальний бачок. Під час приготування чергового замісу ця вода подається у масу суміші змішувача за командою автоматики, що керує циклом приготування.

Обрана система кінцевого стану (СКС) забезпечує вищу точність регулювання порівняно з системою попередньої калькуляції (СПК), проте вимагає використання більш точних елементів керування.

2 Визначення характеристик систем автоматичного керування

2.1 Ідентифікація вологості як об'єкта автоматичного керування

Перед розробкою системи автоматичного регулювання необхідно визначити її структуру, передаточну функцію об'єкта керування та характеристики інших складових елементів САК.

З цією метою було проведено наступне дослідження:

1. Зафіксовано покази датчика вологості, встановленого в змішувачі під час приготування суміші.
2. Побудовано графік перехідного процесу на основі отриманих даних.
3. Виконано ідентифікацію об'єкта керування за допомогою програми MATLAB.

Таблиця 2.1. Значення вологості формувальної суміші (у %) за показами датчика. Дослід №1

0	0.4982	3.482	3.3421	3.8129
0	0.8031	3.4015	3.3054	3.8718
0	1.1746	3.3569	3.3452	3.8221
0	1.3057	3.3441	3.3896	3.8042
0	1.5038	3.3968	3.3269	3.8205
0	1.6503	3.3816	3.3614	3.6938
0	1.7154	3.4049	3.3548	3.6541
0	1.7348	3.4271	3.3842	3.6183
0.0055	1.8451	3.3134	3.4329	3.6682
0.0255	1.8327	3.3218	3.4065	3.6627
0.0240	1.8876	3.2291	3.3894	3.6974
0.0456	1.8682	3.2029	3.3345	3.7201

0.0491	1.9494	3.1843	3.3621	3.6509
0.1130	1.9098	3.3095	3.3048	3.6993
0.1889	1.9035	3.2328	3.3617	3.7026
0.1872	1.9469	3.2435	3.4218	3.7189
0.2273	2.0617	3.1608	3.4012	3.6398
0.2719	2.0983	3.1307	3.3251	3.7346
0.2598	2.1746	3.0458	3.3017	3.6885
0.2186	2.2205	3.0824	3.3861	3.6991
0.1967	2.2517	3.1896	3.4508	3.7433
0.1508	2.3184	3.2435	3.4417	3.7612
0.1234	2.3389	3.2297	3.3892	3.8724
0.2109	2.3996	3.1349	3.4248	3.7429
0.2463	2.3564	3.1778	3.3146	3.8041
0.248	2.4157	3.1284	3.2849	3.7288
0.3229	2.4918	2.9987	3.2596	3.8617
0.3078	2.5936	3.0524	3.2228	3.6419
0.1776	2.8143	3.0671	3.2692	3.6934
0.1425	2.9156	3.1026	3.2285	3.8126
0.1467	3.0275	3.0837	3.2541	3.7329
0.1528	3.1596	3.1894	3.2179	3.6462
0.2093	3.3447	3.1218	3.3265	3.6214
0.2649	3.4628	3.1587	3.4019	3.7086
0.3442	3.4336	3.2918	3.4432	3.7839
0.4223	3.5339	3.3184	3.4137	3.9028
0.5281	3.4912	3.4967	3.3701	3.9198
0.5534	3.4826	3.4721	3.4647	3.9551
0.5426	3.4584	3.4479	3.3512	4.0017
0.5579	3.5498	3.3559	3.3726	3.9568
0.5163	3.5692	3.3498	3.4561	
0.4989	3.5554	3.3651	3.5117	

0.4912	3.5814	3.3186	3.6742
0.5346	3.5499	3.4583	3.7265
0.5872	3.5038	3.5067	3.8246
0.6103	3.4952	3.4604	3.8411
0.6689	3.4986	3.4267	3.8839
0.6598	3.6127	3.4026	3.8321
0.5709	3.5578	3.4619	3.8796
0.5038	3.5669	3.3387	3.8824

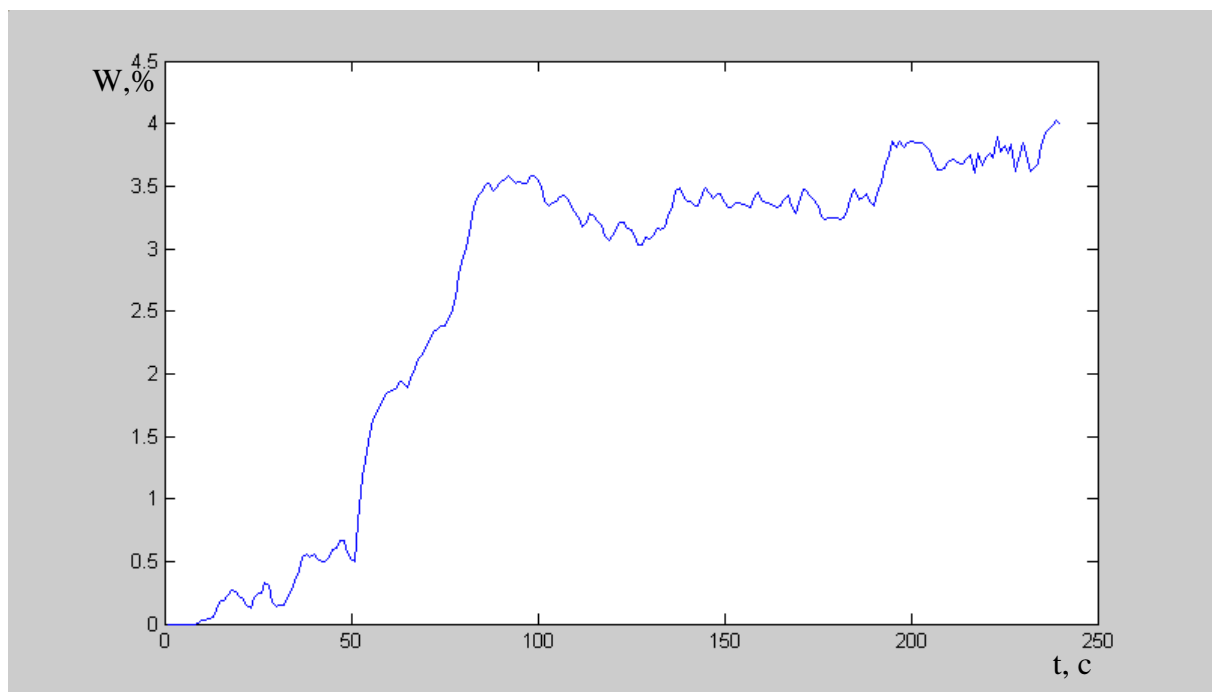


Рисунок 2.1 – Графік зміни вологості формувальної суміші за результатами дослід №1

Таблиця 2.2. Значення вологості формувальної суміші (у %) за показами датчика. Дослід №2

0	0.8011	2.7316	3.5618	3.8124
0	0.8028	2.7593	3.5014	3.8719
0	1.1749	2.8587	3.5189	3.8216
0	1.3051	2.9168	3.4961	3.8032
0	1.5027	3.0314	3.4479	3.8186
0	1.6498	3.1437	3.4546	3.6905

0	1.7158	3.1796	3.4589	3.7849
0	1.7314	3.4119	3.3812	3.7384
0.0055	1.8129	3.4128	3.4789	3.7351
0.0501	1.8662	3.3734	3.4667	3.7415
0.0481	1.8865	3.2308	3.4683	3.6887
0.0899	1.8953	3.2416	3.4329	3.7241
0.1006	1.9164	3.1898	3.3664	3.6468
0.2229	1.9372	3.3124	3.3025	3.7992
0.3847	1.8716	3.3309	3.3647	3.6975
0.3689	1.8783	3.2964	3.4261	3.7193
0.4554	2.0617	3.2618	3.3982	3.7898
0.5339	2.1004	3.3325	3.3196	3.8281
0.5201	2.1746	3.3347	3.3072	3.7924
0.4443	2.1896	3.4335	3.3876	3.7963
0.3932	2.2531	3.4926	3.4469	3.8021
0.2964	2.3547	3.4982	3.4418	3.8649
0.2423	2.3724	3.4476	3.4389	3.8137
0.4217	2.3961	3.4573	3.3679	3.8738
0.2472	2.3563	3.4749	3.3118	3.7996
0.4899	2.4562	3.5326	3.2861	3.8199
0.4472	2.4618	3.5004	3.2594	3.8614
0.4147	2.5907	3.4558	3.2236	3.8359
0.3551	2.8169	3.3608	3.2699	3.6918
0.2851	2.7687	3.4051	3.2327	3.8166
0.2934	2.7516	3.5289	3.2116	3.7312
0.3051	2.7891	3.4917	3.2651	3.7426
0.4253	2.9057	3.5491	3.3304	3.7119
0.4301	3.0416	3.5236	3.4619	3.8136
0.4788	2.9811	3.4529	3.4448	3.7548
0.5327	3.0251	3.4756	3.4131	3.8075

0.6049	3.0728	3.3994	3.3702	3.7816
0.6521	3.1008	3.4557	3.4623	3.7284
0.6915	2.9936	3.3989	3.3448	3.6741
0.7598	3.0517	3.4024	3.3206	3.8145
0.8296	3.1489	3.4487	3.4582	
0.7579	3.1556	3.4702	3.5034	
0.7104	2.7851	3.4119	3.6815	
0.7643	2.6484	3.3587	3.7209	
0.8463	2.6914	3.5498	3.8207	
0.6381	2.6117	3.5471	3.8468	
0.6288	2.6083	3.4926	3.8884	
0.6851	2.7658	3.5547	3.8369	
0.6627	2.7062	3.5034	3.8236	
0.7209	2.7289	3.5662	3.8219	

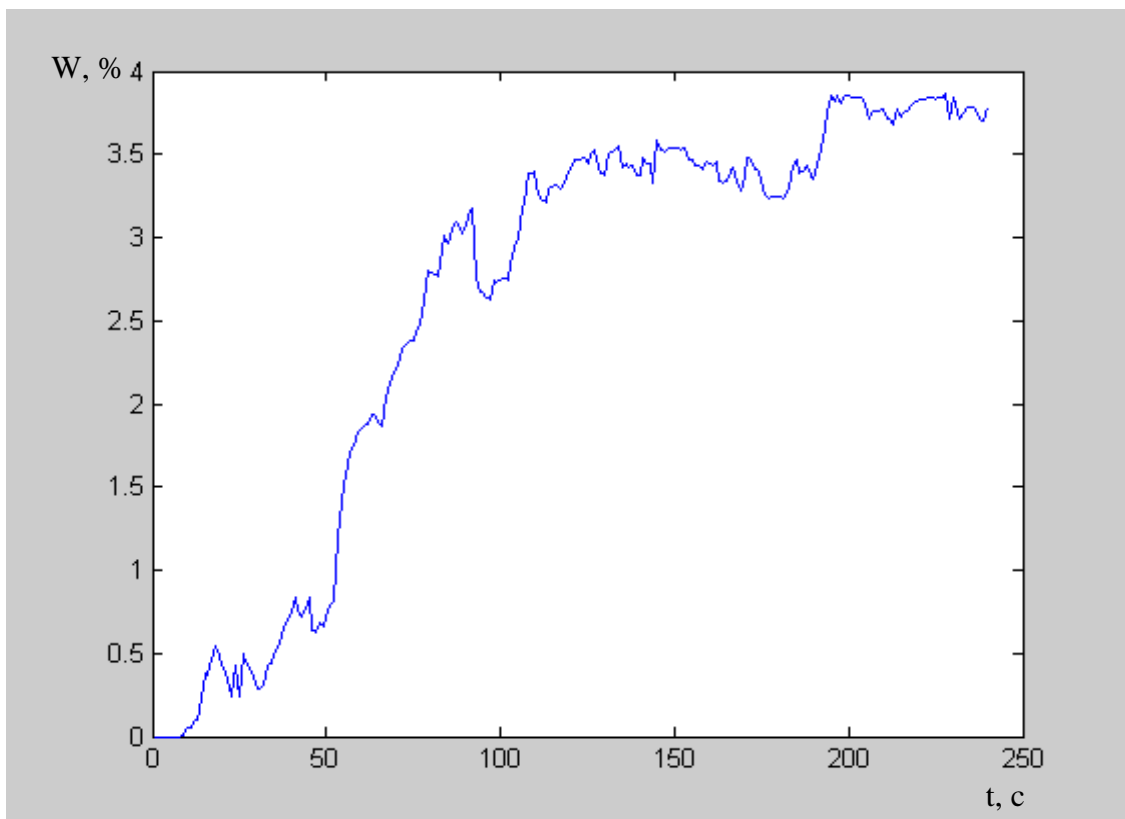


Рисунок 2.2 – Графік зміни вологості формувальної суміші за результатами дослідів №2

Таблиця 2.3. Значення вологості формувальної суміші (у %) за показами датчика. Дослід №3

0	0.7993	2.7278	3.4257	3.6189
0	0.8034	2.7611	3.4063	3.7112
0	1.1758	2.8576	3.3819	3.6724
0	1.3069	2.9154	3.3614	3.6049
0	1.5026	3.0308	3.2768	3.7034
0	1.6489	3.1446	3.2741	3.6928
0	1.6917	3.2234	3.1589	3.7871
0	1.7608	3.3591	3.2316	3.7365
0.0055	1.8449	3.3614	3.3092	3.7926
0.0502	1.8673	3.3748	3.2315	3.7436
0.0481	1.8869	3.2287	3.2431	3.6954
0.0914	1.8649	3.2356	3.1714	3.7288
0.0986	1.9483	3.1886	3.1249	3.6487
0.2261	1.9048	3.3119	3.0338	3.8042
0.3779	1.9016	3.2824	3.0837	3.7029
0.3684	1.8772	3.3465	3.4268	3.7196
0.4619	2.0287	3.3125	3.3967	3.7331
0.4698	2.1339	3.2786	3.3168	3.8245
0.4567	2.1448	3.3864	3.3059	3.7894
0.4371	2.6428	3.3741	3.3346	3.8256
0.3928	2.7571	3.4962	3.4529	3.7448
0.2971	2.8856	3.4458	3.4934	3.7759
0.2461	2.7994	3.5009	3.3867	3.7641
0.4209	2.8076	3.4602	3.4179	3.6578
0.2479	2.7128	3.4718	3.3112	3.6934
0.4894	2.7804	3.4849	3.2364	3.6208
0.4549	2.7346	3.5507	3.2609	3.7121

0.4142	2.7228	3.4583	3.2265	3.6284
0.3567	2.7673	3.3619	3.2704	3.6951
0.2854	2.8048	3.3527	3.2725	3.6178
0.2926	2.8151	3.5306	3.2108	3.6334
0.3054	2.8932	3.4847	3.2652	3.6429
0.4248	2.9096	3.5534	3.2758	3.6712
0.4305	3.0449	3.5231	3.4536	3.8584
0.4859	2.9396	3.4597	3.4462	3.7493
0.4343	3.0717	3.4729	3.3608	3.8065
0.3978	3.0026	3.4015	3.4254	3.7196
0.4517	2.7971	3.4549	3.4628	3.8726
0.4993	2.7958	3.3449	3.4028	3.8337
0.5489	2.9124	3.4038	3.3216	3.7875
0.6104	2.9898	3.5051	3.4657	
0.7486	3.0481	3.4149	3.5682	
0.7184	2.9384	3.4715	3.6158	
0.7718	2.7954	3.3078	3.7234	
0.8356	2.8351	3.5184	3.8802	
0.6462	2.7296	3.5258	3.7886	
0.6209	2.7593	3.3529	3.8937	
0.6862	2.9276	3.3149	3.8362	
0.6701	2.8527	3.3934	3.7126	
0.7208	2.7254	3.3531	3.6839	

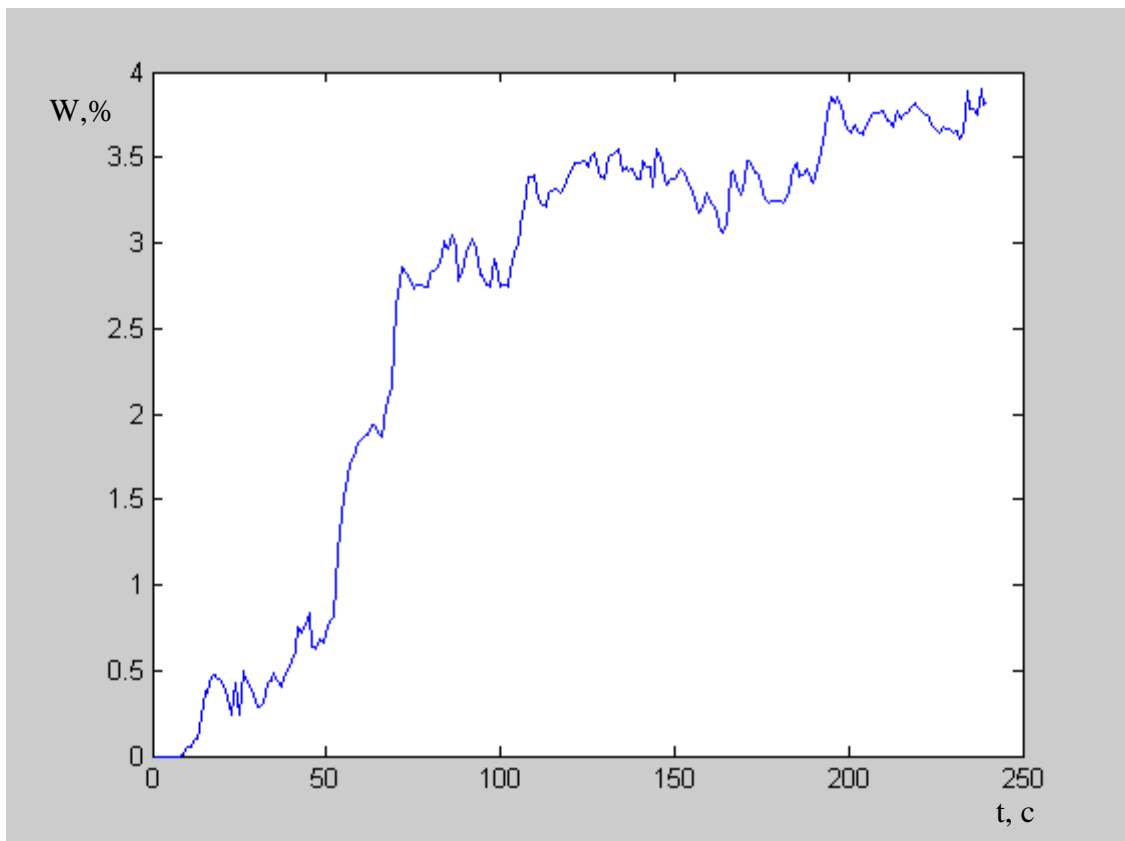


Рисунок 2.3 – Графік зміни вологості формувальної суміші за результатами досліду №3

В середовищі MATLAB ідентифікація системи проводиться методом порівняння з параметричними моделями. Обирається та модель, графік якої найкраще відповідає експериментальним даним, після чого визначається передаточна функція об'єкта керування

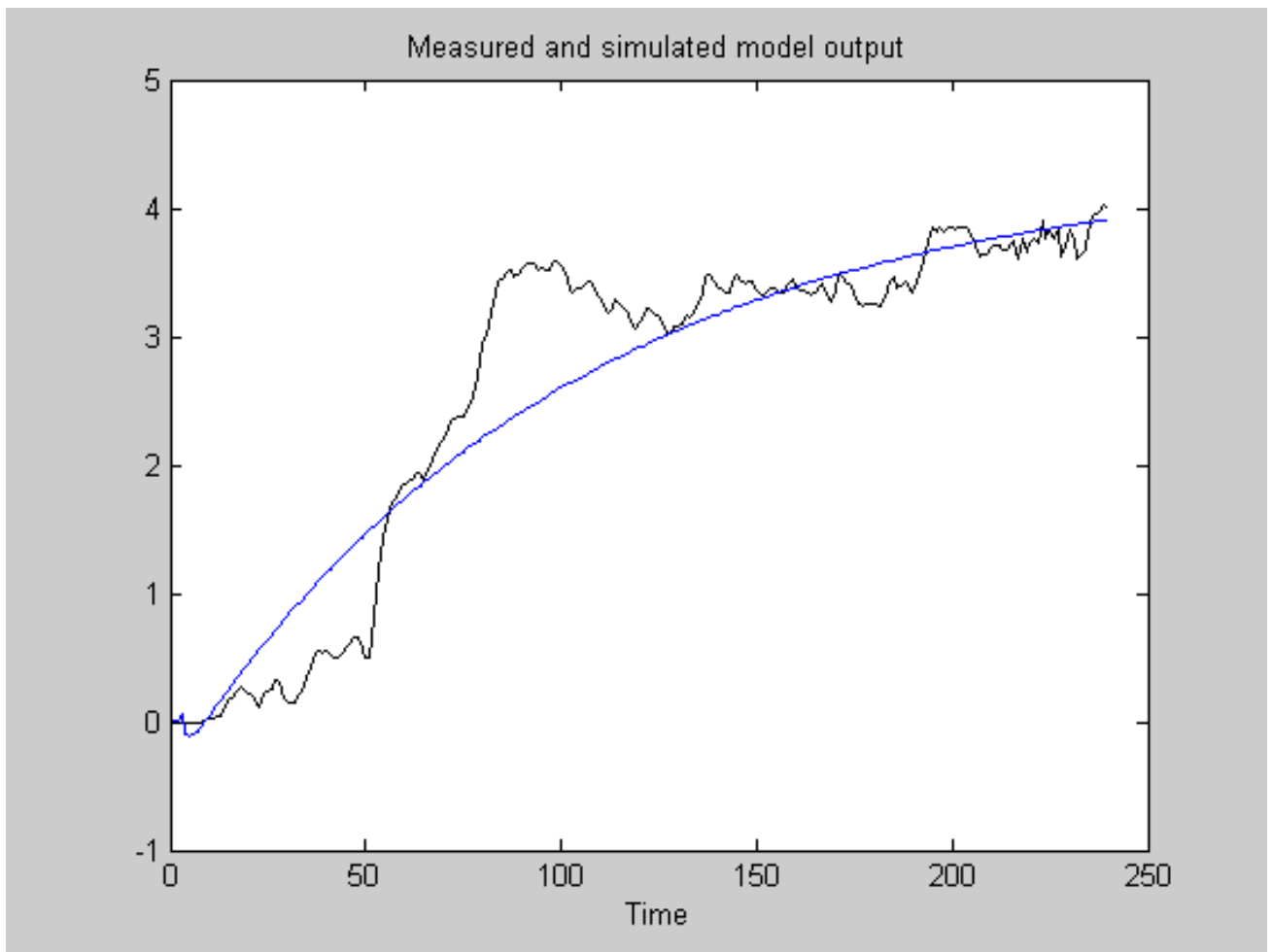


Рисунок 2.4 – Порівняння графіка вологості формувальної суміші за результатами дослідів №1 з параметричною моделлю, побудованою в MATLAB

Відсоток відповідності між експериментальним графіком та параметричною моделлю становить 76 %.

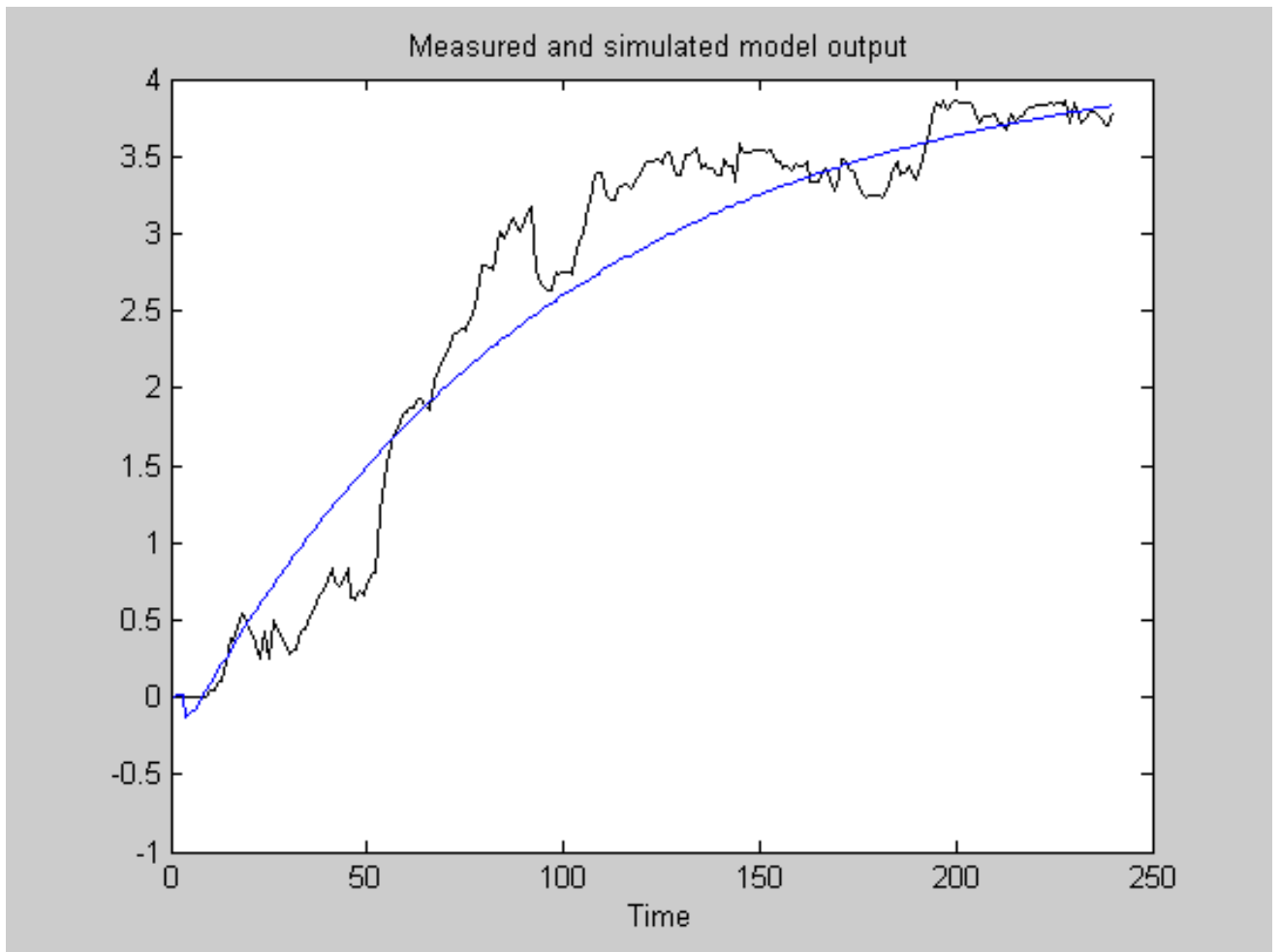


Рисунок 2.5 – Порівняння графіка вологості формувальної суміші за результатами дослідів №2 з параметричною моделлю, побудованою в MATLAB

Відсоток відповідності між експериментальним графіком та параметричною моделлю становить 71 %

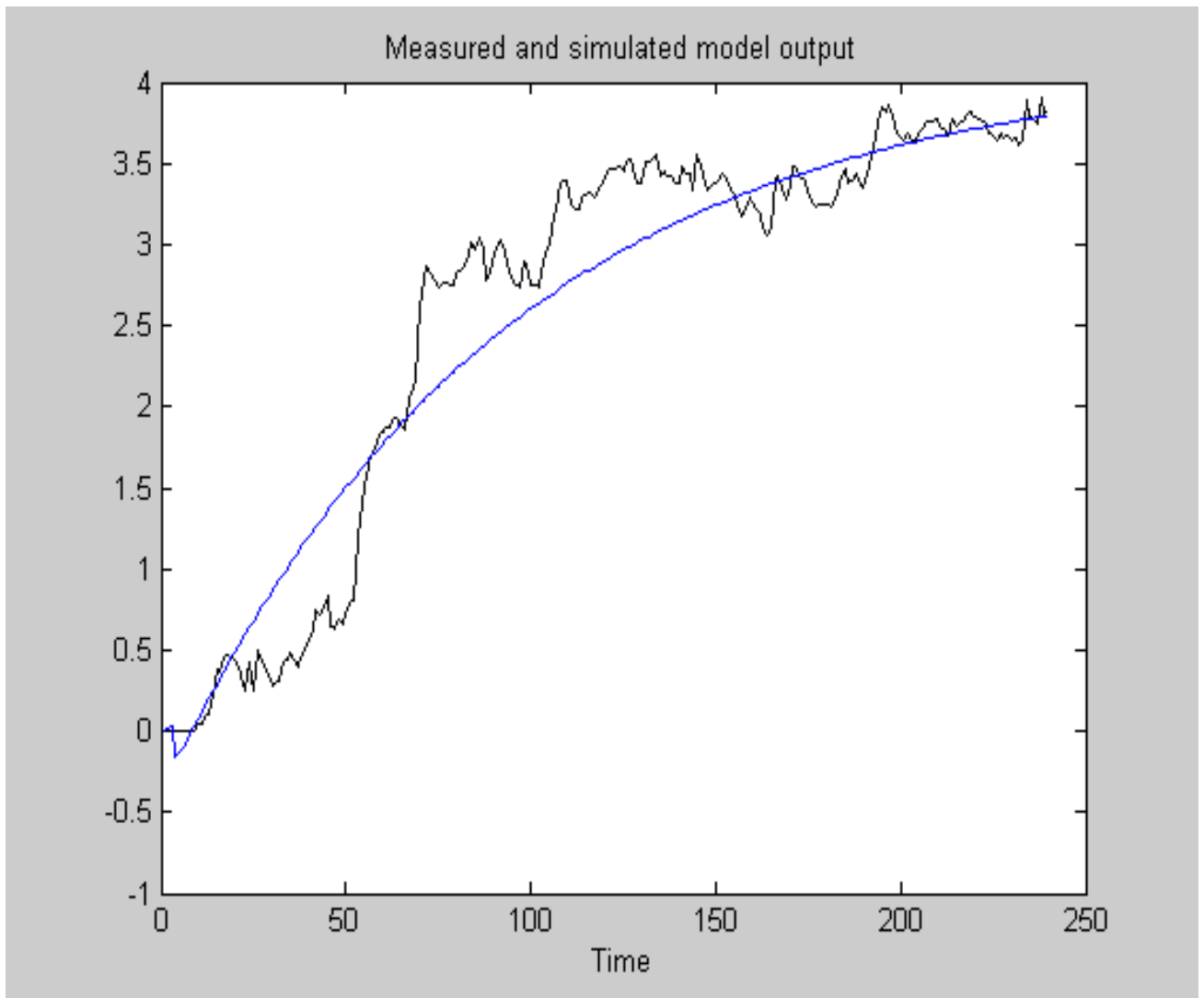


Рисунок 2.6 – Порівняння графіка вологості формувальної суміші за результатами дослідів №3 з параметричною моделлю, побудованою в MATLAB

Відсоток відповідності між експериментальним графіком та параметричною моделлю становить 73 %

На основі цього графіка в MATLAB була підібрана параметрична модель з найкращим співпадінням, після чого була визначена передаточна функція об'єкта керування:

$$W_{ok}(p) = e^{-0.289p} \cdot \frac{0.002285 p + 0.004615}{p^2 + 0.05339 p + 0.001306}$$

2.2 Розробка структурної схеми цифрової системи автоматичного керування

До складу нашої цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) входять такі елементи: ємнісний датчик, об'єкт керування, цифровий регулятор (контролер) та виконавчий механізм (двигун постійного струму). З'єднавши ці типові динамічні ланки відповідно до принципу передачі впливів, отримуємо структурну схему системи автоматичного регулювання вологості:

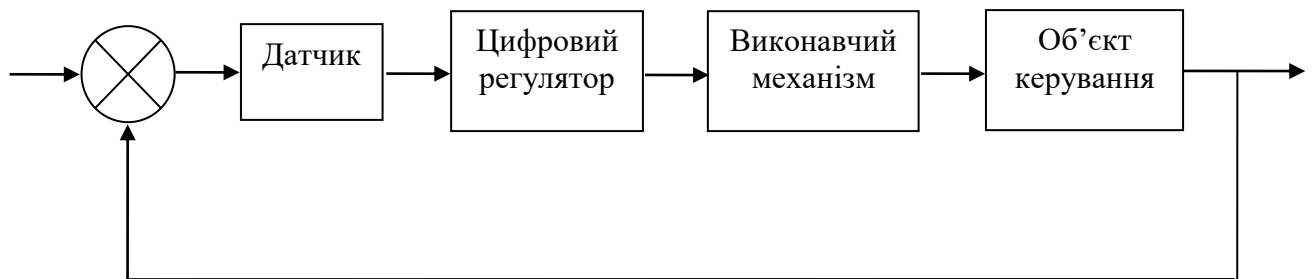


Рисунок 2.7 – Функціональна схема цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК)

Передаточні функції ланок системи:

1. Об'єкта керування:

$$W_{ок}(p) = \frac{\kappa_{ок} \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot e^{-\tau}}{(T_2^2 \cdot p^2 + 2dT_2 \cdot p + 1)}$$

Передаточна функція об'єкта керування була визначена експериментально.

2) Датчика:

$$W_D(p) = \kappa_D$$

Передаточна функція датчика була визначена на основі його статичної характеристики. Оскільки статична характеристика на робочій ділянці майже лінійна, коефіцієнт передачі датчика становить $\kappa_D=0.05$.

3) Виконавчого механізму (двигуна постійного струму):

$$W_{BM}(p) = \frac{\kappa_{BM}}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}$$

Передаточна функція виконавчого механізму була визначена на основі пускової характеристики двигуна.

Після підстановки всіх передаточних функцій ланок структурна схема цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) набуває наступного вигляду:

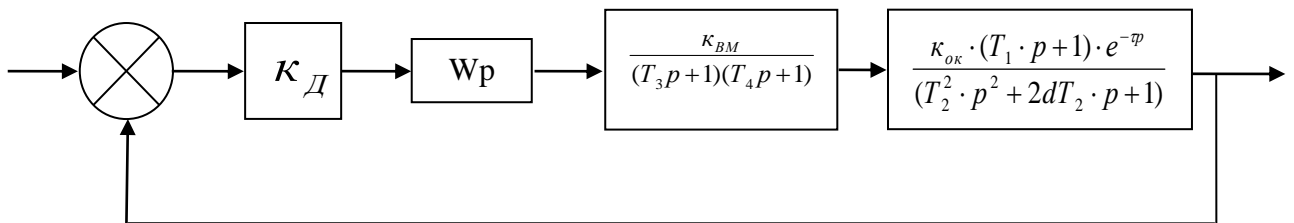


Рисунок 2.8 – Структурна схема цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК)

Передаточна функція цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) матиме наступний вигляд:

$$W_0(p) = \frac{W_p \cdot \kappa_{ок} \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot e^{-p}}{(T_2^2 \cdot p^2 + 2dT_2 \cdot p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}$$

Таким чином, для проектування цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК) необхідно здійснити синтез цифрового регулятора, який забезпечував би корекцію системи та підтримання заданого рівня вологості з високою точністю.

3 Розробка цифрового регулятора

3.1 Визначення періоду дискретизації системи

Перетворення неперервних сигналів у дискретні здійснюється за рахунок введення в систему дискретного елемента, на виході якого формується послідовність імпульсів. Такою дискретною ланкою може виступати ключ (К'), який замикається через кожний період квантування (Т) (рис. 3.1).

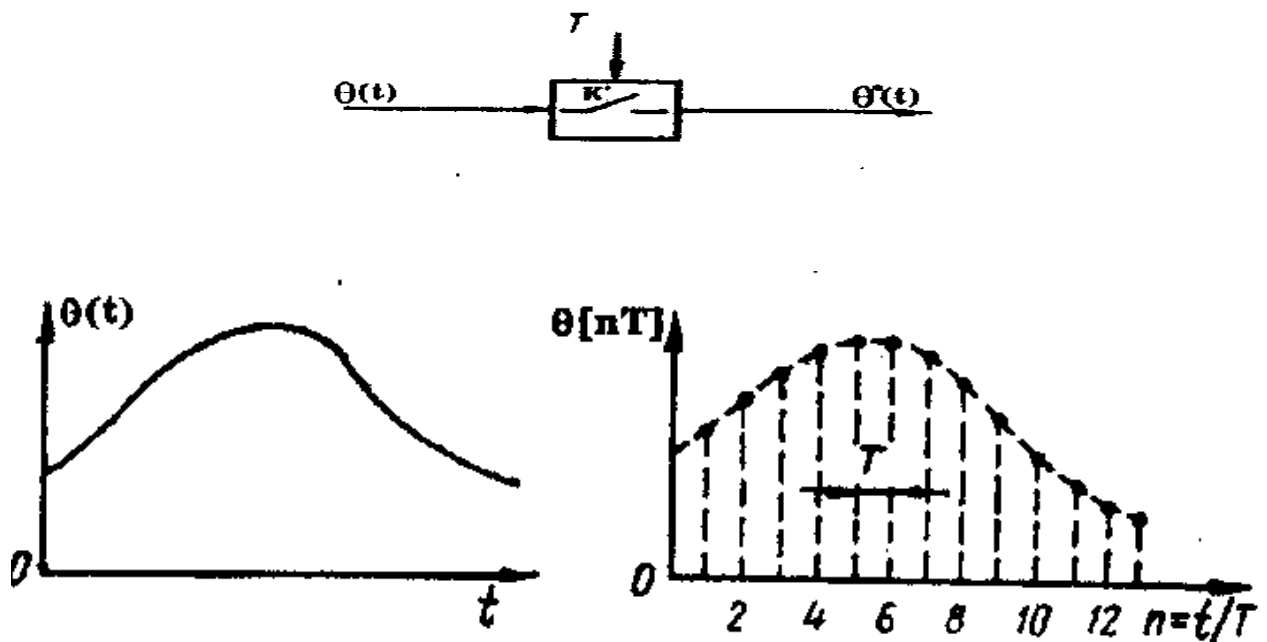


Рисунок 3.1 – Дискретний елемент системи: ключ та відповідні йому часові діаграми

Вибір оптимального періоду квантування (Т) є однією з ключових задач щодо раціонального використання машинного часу при реалізації систем цифрового керування. Зменшення (Т) підвищує точність керування та навантаження мікроЕОМ, проте призводить до неекономного витрачання ресурсів. Зі збільшенням (Т) якість керування знижується. Тому необхідно знайти компромісне рішення, яке задовольняло б обидві протилежні вимоги.

Вибір періоду (T) визначається залежно від спектра неперервної функції $\Theta(t)$ відповідно до теореми Котельникова.

Теорема Котельникова стверджує, що функція часу $\Theta(t)$, яка не містить гармонічних складових із частотами, вищими за певну граничну частоту ω_{\max} , повністю визначається своїми значеннями у дискретні моменти часу (nT), що розташовані через рівні проміжки часу, рівні періоду (T).

$$T = \frac{\pi}{\omega_{\max}}$$

Отже, частота квантування повинна обиратися відповідно до умови $\omega \geq \omega_{\max}$. У такому випадку дискретна решітчаста функція точно відтворює неперервну функцію,

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

і при її квантуванні не виникає втрат інформації.

Максимальну частоту ω_{\max} у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$ за амплітудно-частотною характеристикою замкненого 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 замкненого контуру можна виразити як функцію:

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

З цього можна визначити частоту ω_{\max} , при якій $|\beta(j\omega)|$ амплітуда вихідного сигналу стає малою, оскільки замкнена система згладжує високочастотні складові сигналу. Значення Θ_{om} визначає точність, яку необхідно забезпечити на виході системи.

Використовуючи отримані вихідні дані, визначають оптимальний період квантування сигналів у цифровій системі, який забезпечує достатню точність керування при мінімальних витратах обчислювальних ресурсів.

Частотна передаточна функція об'єкта керування описується рівнянням:

$$W_0(p) = \frac{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot e^{-\tau p}}{(T_2^2 \cdot p^2 + 2dT_2 \cdot p + 1)(T_3p + 1)(T_4p + 1)}$$

Де $\kappa_o=54,08$; $T_1=0.49$ с; $T_2=27,4$ с; $d=1,2$; $T_3=0.3$ с; $T_4=0.05$ с; $\tau = 0,29$, для виконання початкових розрахунків $\kappa_p=1$.

При цьому необхідно забезпечити задану точність керування об'єктом у сталому режимі $\Theta_{om} = 0.1$

Частотна передаточна функція замкнутого контуру системи визначається виразом:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} = \frac{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (\cos\omega\tau - j \sin \omega\tau)}{(T_2^2 \cdot (j\omega)^2 + 2dT_2 \cdot j\omega + 1)(T_3j\omega + 1)(T_4j\omega + 1)} =$$

$$= \frac{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (\cos\omega\tau - j \sin \omega\tau)}{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (\cos\omega\tau - j \sin \omega\tau) + (T_2^2 \cdot (j\omega)^2 + 2dT_2 \cdot j\omega + 1)(T_3j\omega + 1)(T_4j\omega + 1)} = \Theta$$

$$(99\kappa_0(T_1 p + 1)(\cos(\omega\tau) + \sin(\omega\tau)))^2 - (T_2^2 T_3 T_4 \omega^4 - (2dT_2 T_3 T_4 - T_2^2(T_3 - T_4))\omega^3 - (T_3 T_4 - 2dT_2(T_3 - T_4) - T_2^2)\omega^2 + ((T_3 - T_4) - 2dT_2)\omega + 1)^2 = 0$$

Розв'язуючи це рівняння, визначаємо частоту $\omega_{\max} = 1,76$

Оптимальний розрахунковий період квантування сигналів визначається як:

$$T_{\text{роз}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{\pi}{19,5} = 1,79$$

Приймаємо $T < T_{\text{роз}}$ $T = 0.1\text{c}$

Ми обираємо цей період дискретизації, оскільки для нас критично важливо забезпечити максимальну точність роботи системи.

3.2 Визначення дискретної передаточної функції зведеної неперервної частини цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК).

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та екстраполятор нульового порядку разом із неперервною частиною ЦСАК, тобто передаточною функцією $W_o(p)$, формують зведену передаточну функцію неперервної частини (ЗНЧ), яка визначається виразом:

$$W_n(p) = k_{\text{АЦП}} \cdot k_{\text{ЦАП}} \cdot \frac{1 - e^{-pT}}{p} \cdot W_o(p) = \frac{1}{\delta_{\text{ЦФП}}} \cdot \delta_{\text{АЦП}} \cdot \frac{1 - e^{-pT}}{p} \cdot W_o(p)$$

У випадку, коли значення молодших розрядів АЦП та ЦАП збігаються, передаточна функція зведеної неперервної частини спрощується, оскільки вплив квантуючих помилок стає мінімальним і дискретизація практично не погіршує точність відтворення сигналу. Тобто вихід дискретного елемента майже точно відображає вхід неперервної частини системи:

$$W_n(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p} \cdot W_0(p)$$

Дискретна передаточна функція зведеної неперервної частини (ЗНЧ) ЦСАК отримується шляхом застосування Z-перетворення до передаточної функції неперервної частини $G(s)$. Формально це можна записати так:

$$W_n(z) = \frac{\beta(z)}{\Theta(z)} = Z\{W_n(p)\} = \frac{z-1}{z} Z\left\{\frac{W_0(p)}{p}\right\}$$

Де $Z\left\{\frac{W_0(p)}{p}\right\}$ визначення здійснюють із використанням програмного пакета MATLAB, попередньо розклавши вираз на прості дроби $W_0(p)/p$

Об'єкт керування описується неперервною передаточною функцією, яка відображає динамічні властивості системи і дозволяє моделювати її реакцію на вхідні впливи:

$$W_0(p) = W_B(p)W_3(p) = \frac{\beta(p)}{x(p)} = \frac{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot e^{-p\tau}}{(T_2^2 \cdot p^2 + 2dT_2 \cdot p + 1)(T_3p + 1)(T_4p + 1)}$$

Розкладання виразу $W_0(p)/p$ на суму простих дробів здійснюється шляхом представлення раціональної дроби

Згідно з формулами, наведеними в таблиці довідника [7], визначаються значення

$$D_{01} = \frac{\alpha \cdot r}{a \cdot c \cdot d};$$

$$D_1 = \alpha \cdot \frac{a \cdot (b - c - d) + r \cdot (a + b) \cdot c + (b - c) \cdot d - b^2}{a \cdot (a - b \cdot c + c^2) \cdot (a - b \cdot d + d^2)};$$

$$D_2 = \alpha \cdot \sqrt{B} \cdot \frac{(a + \frac{b}{2} \cdot (c + d) - c \cdot d - \frac{b^2}{2}) \cdot \frac{1}{\lambda} \sin(\lambda \cdot h) + (b - c - d) \cdot \cos(\lambda \cdot h)}{(a - b \cdot c + c^2)(a - b \cdot d + d^2)} +$$

$$+ \alpha \cdot r \cdot \frac{\sqrt{B} \cdot ((a - \frac{b^2}{2})(c + d) - \frac{b}{2} \cdot (3 \cdot a - b^2 - c \cdot d)) \cdot \frac{1}{\lambda} \sin(\lambda \cdot h)}{(a - b \cdot c + c^2)(a - b \cdot d + d^2)} +$$

$$+ \alpha \cdot r \cdot \sqrt{B} \cdot \frac{(a + b \cdot c + (b - c) \cdot d - b^2) \cdot \cos(\lambda \cdot h)}{(a - b \cdot c + c^2)(a - b \cdot d + d^2)};$$

$$D_3 = \frac{\alpha \cdot (c - r)}{c \cdot (d - c)(a - b \cdot c + c^2)};$$

$$D_4 = \frac{\alpha \cdot (d - r)}{d \cdot (c - d)(a - b \cdot d + c^2)};$$

де:

$$a = \frac{1}{T_2^2} = 0,0013;$$

$$b = \frac{2d}{T_2} = 0,088;$$

$$c = \frac{1}{T_3} = 3,3;$$

$$d = \frac{1}{T_4} = 20;$$

$$\lambda = \sqrt{a - \frac{b^2}{4}} = 0,02;$$

$$h = T = 0,1;$$

$$B = e^{-b \cdot h} = 0,994$$

$$\alpha = k_o = 54,08;$$

$$r = \frac{1}{T_1} = 2,04.$$

Внаслідок цього коефіцієнти набувають таких значень:

$$D_{01} = 1,2 \cdot 10^3;$$

$$D_1 = -5 \cdot 10^5;$$

$$D_2 = -89;$$

$$D_3 = 0,12;$$

$$D_4 = -7,3 \cdot 10^{-3}$$

Після підстановки отримаємо такий вираз:

$$\begin{aligned} \frac{W_B(p)}{p} &= \frac{\kappa_p \cdot \kappa_o \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{p(T_2^2 \cdot p^2 + 2dT_2 \cdot p + 1)(T_3p + 1)(T_4p + 1)} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 10^3}{p} + \frac{5 \cdot 10^5}{(\cdot p^2 + \frac{2d}{T_2} \cdot p + \frac{1}{T_2^2})} - \frac{89}{(p + \frac{1}{T_3})} + \frac{0,12}{(T_4p + \frac{1}{T_4})} + \\ &+ (-7,3 \cdot 10^{-3}(p + \frac{1}{T_1})) \end{aligned}$$

Дискретна передаточна функція приймає наступний вигляд ЗНЧ $W_n(z)$.

Оскільки передаточна функція містить затримку, її слід помножити на відповідний член затримки, який зазвичай виражається у вигляді

$$z^{-\frac{\tau}{T}} = z^{-\frac{0,29}{0,1}} = z^{-3}$$

$$\begin{aligned} W_n(z) &= \frac{z-1}{z} Z\left\{\frac{W_0(p)}{p}\right\} = \frac{z-1}{z} \cdot \frac{-1,36 \cdot (z+6,7)(z-0,98)(z+0,64)(z+0,06)}{z^3(z-1)(z-0,997)(z-0,95)(z-0,72)(z-0,14)} = \\ &= \frac{-1,36z^5 - 7,34z^4 + 4z^3 + 10,6z^2 - 5,45z - 0,35}{z^9 - 4,7z^8 + 5,4z^7 - 4,78z^6 + 0,75z^5 - 0,1z^4} \end{aligned}$$

$$W_n(z) = \frac{\beta(p)}{x(p)} = \frac{0,35z^{-9} + 5,45z^{-8} - 10,6z^{-7} - 4z^{-6} + 7,34z^{-5} - 1,36z^{-4}}{0,1z^{-5} - 0,75z^{-4} + 4,78z^{-3} - 5,4z^{-2} + 4,7z^{-1} - 1}$$

Для спрощення подальших обчислень введемо позначення коефіцієнтів при степенях z літерами

$C_1=0,35$; $C_2=5,45$; $C_3= -10,6$; $C_4= -4$; $C_5=7,34$; $C_6= -1,36$ – коефіцієнти чисельника;

$d_1= 0,1$; $d_2= -0,75$; $d_3= 4,78$; $d_4= -5,4$; $d_5= 4,7$ – коефіцієнти знаменника.

3.3 Побудова частотної передаточної функції ЗНЧ ЦСАК

Частотну передаточну функцію дискретної системи можна отримати шляхом застосування білінійного перетворення:

$$z = (1 + w)/(1 - w)$$

звідки

$$w = (z - 1)/(z + 1)$$

Підставивши в (10) $z = e^{j\omega T}$ матимемо:

$$w = (e^{j\omega T} - 1)/(e^{j\omega T} + 1) = j \operatorname{tg}(\omega T / 2)$$

Після поетапного підставляння білінійного перетворення у дискретну передаточну функцію отримуємо відповідну частотну передаточну функцію, за допомогою якої визначають амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики неперервної ЦСАК.-

Побудову цих характеристик можна полегшити, замінивши циклічну частоту ω на псевдочастоту λ , яка обчислюється за формулою:

$$\lambda = (2/T) \operatorname{tg}(\omega T / 2)$$

З формул (11) та (12) випливає:

$$w = j\lambda T / 2$$

Якщо дотримуватися умови $\omega < 2/T$, де (T) — період квантування, псевдочастота $\text{tg}(\omega \cdot T / 2) \approx \omega \cdot T / 2$ буде близька до циклічної частоти $\lambda \approx \omega$. У такому разі логарифмічні частотні характеристики як функції $\omega < 2/T$ та у частотній області $\omega < 2/T$ практично співпадатимуть. Це дозволяє при проектуванні ЦСАК застосовувати методи розрахунку неперервних систем.

$$W_n(z) = \frac{\beta(p)}{x(p)} = \frac{C_1 z^{-9} + C_2 z^{-8} + C_3 z^{-7} + C_4 z^{-6} + C_5 z^{-5} + C_6 z^{-4}}{d_1 z^{-5} + d_2 z^{-4} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-2} + d_5 z^{-1} - 1}$$

$$= \frac{C_1 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^9 + C_2 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^8 + C_3 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^7 + C_4 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^6 + C_5 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^5 + C_6 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^4}{d_1 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^5 + d_2 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^4 + d_3 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^3 + d_4 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^2 + d_5 \left(\frac{1-w}{1+w}\right)^1 - 1}$$

Після виконання необхідних перетворень передаточна функція набуде такого вигляду:

$$W_n(z) = \frac{c_1 + (c_2 - 4c_1)w + (6c_1 - 4c_2 + c_3)w^2 + (-4c_1 + 6c_2 - 4c_3 + c_4)w^3 + (c_1 - 4c_2 + 6c_3 - 4c_4 + c_5)w^4 + (c_2 - 4c_3 + 6c_4 - 4c_5 + c_6)w^5 + (c_3 - 4c_4 + 6c_5 - 4c_6)w^6 + (c_4 - 4c_5 + 6c_6)w^7 + (D_1 + 4D_2 + 6D_3 + 4D_4 + D_5)w^4 + (D_2 - 4D_3 + 6D_4 - 4D_5 + D_6)w^5 + (D_3 - 4D_4 + 6D_5 - 4D_6)w^6 + (c_5 - 4c_6)w^8 + c_6 w}{D_1 + (D_2 + 4D_1)w + (6D_1 + 4D_2 + D_3)w^2 + (4D_1 + 6D_2 + 4D_3 + D_4)w^3 + (D_4 - 4D_5 + 6D_6)w^7 + (D_5 - 4D_6)w^8 + D_6 w^9}$$

де :

$$\begin{aligned}
c_1 &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 = 0,35 + 5,45 - 10,6 - 4 + 7,34 - 1,36 = -2,82; \\
c_2 &= 5C_1 + 3C_2 - C_3 + C_4 + 3C_5 + 5C_6 = 1,75 + 16,35 + 10,6 - 4 + 22,02 - 3,64 = 43,1; \\
c_3 &= 10C_1 + 2C_2 - 2C_3 - 2C_4 + 2C_5 + 10C_6 = 3,5 + 37,2 + 21,2 + 8 + 14,68 - 13,6 = 71; \\
c_4 &= -10C_1 + 2C_2 + 2C_3 - 2C_4 - 2C_5 + 10C_6 = -3,5 + 10,9 - 21,2 + 8 - 14,68 - 13,6 = -34,1; \\
c_5 &= 5C_1 - 3C_2 + C_3 + C_4 - 3C_5 + 5C_6 = 1,75 - 16,35 - 10,6 - 4 - 22,02 - 6,8 = -58,02; \\
c_6 &= -C_1 + C_2 - C_3 + C_4 - C_5 + C_6 = -0,35 + 5,45 + 10,6 - 4 - 7,34 - 1,36 = 3; \\
D_1 &= d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + 1 = 0,1 - 0,76 + 4,78 - 5,4 + 4,7 = 3,42; \\
D_2 &= 5d_1 + 3d_2 - d_3 + d_4 + 3d_5 + 5 = 0,5 - 2,28 - 4,78 - 5,4 + 14,1 + 5 = 7,1; \\
D_3 &= 10d_1 + 2d_2 - 2d_3 - 2d_4 + 2d_5 + 10 = 1 - 1,52 - 9,6 + 10,8 + 10 = 10,67; \\
D_4 &= -10d_1 + 2d_2 + 2d_3 - 2d_4 - 2d_5 + 10 = -1 - 1,52 + 9,6 - 10,8 - 10 = -13,7; \\
D_5 &= 5d_1 - 3d_2 + d_3 + d_4 - 3d_5 + 5 = 0,5 + 2,28 + 4,78 - 5,4 - 14,1 + 5 = -6,94.
\end{aligned}$$

Після підстановки визначених коефіцієнтів передаточна функція приймає наступну форму:

$$\begin{aligned}
W_n(z) &= \frac{3 \cdot w^9 - 70,02 \cdot w^8 + 216 \cdot w^7 + 217 \cdot w^6 + 45,2 \cdot w^5 - 54,2 \cdot w^4 + 207,4 \cdot w^3 -}{w^9 - 2,34 \cdot w^8 - 35,5 \cdot w^7 - 81,8 \cdot w^6 - 59,2 \cdot w^5 + 34,1 \cdot w^4 + 85,3 \cdot w^3 + 59,6 \cdot w^2 +} \\
&\frac{-182,2 \cdot w^2 + 54,4 \cdot w - 2,82}{+ 59,6 \cdot w^2 + 20,8 \cdot w + 3,42}
\end{aligned}$$

3.4 Побудова потрібної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) ЦСАК

При побудові бажаної ЛАЧХ автоматичних систем керування слід дотримуватись таких правил:

- порядок астатизму ЦСАК, як і для неперервних систем, не перевищує двох;
- ЛАЧХ стійкої розімкненої ЦСАК перетинає вісь ($L = 0$) з нахилом 20дБ/дек;
- високочастотна асимптота ЛАЧХ має нульовий нахил.

Послідовність побудови бажаної ЛАЧХ ЦСАК:

1. обчислюємо першу частоту спряження за формулою:

$$\lambda_1 = \frac{\ddot{\alpha}}{\dot{\alpha}} = \frac{0,7}{1,1} = 0,6$$

2. визначаємо необхідне значення добротності системи відповідно до заданої швидкодії:

$$\kappa_1 = \frac{\dot{\alpha}}{\Theta_{om}} = \frac{1,1}{0,01} = 110$$

3. будуємо першу низькочастотну асимптоту бажаної ЛАЧХ з частотою спряження λ_1 і нульовим нахилом (0 дБ/дек).

4. обчислюємо базову частоту забороненої зони за відповідною формулою:

$$\lambda_0 = \sqrt{k_2} = \sqrt{\frac{\ddot{\alpha}}{\Theta_{om}}} = \sqrt{\frac{0,9}{0,01}} = 9,4$$

2. використовуючи заданий показник коливальності, визначаємо другу частоту спряження бажаної ЛАЧХ, тобто

$$\lambda_2 = \lambda_0 \cdot \sqrt{\frac{(M-1)}{M}} = 8,4 \cdot \sqrt{\frac{1,2-1}{1,2}} = 3,4$$

3. будуємо другу низькочастотну асимптоту бажаної ЛАЧХ з нахилом -40 дБ/дек до частоти спряження, а також третю асимптоту з нахилом -20 дБ/дек до тієї ж частоти, дотримуючись умови $\lambda_{зр} < 2/T$.

4. Вибираємо третю частоту спряження для бажаної ЛАЧХ так, щоб $\lambda_3 = \lambda = 2/T$, оскільки передаточна функція ЦСАК з екстраполятором нульового порядку завжди містить у чисельнику множник виду $(1 - T \lambda / 2)$.

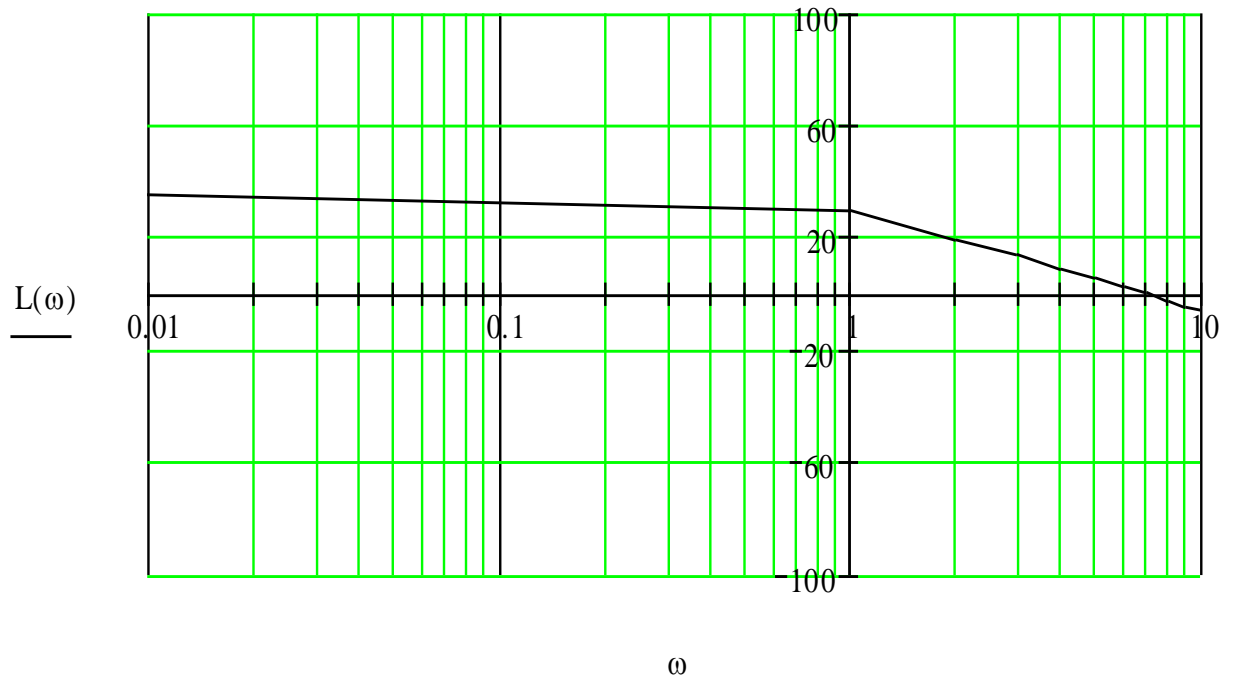


Рисунок 3.2 – Побудована бажана ЛАЧХ цифрової системи автоматичного керування (ЦСАК)

5. Визначивши задане значення показника коливальності (M), будемо μ -криву в межах варіації модуля (A) бажаної ЛАЧХ ЦСАК:

$$20 \cdot \lg[M/(M + 1)] \leq 20 \cdot \lg A \leq 20 \cdot \lg[M/(M - 1)]$$

Виходячи з відповідного виразу:

$$\mu = \arccos \cdot \left(\frac{A^2 + C^2 - R^2}{2 \cdot A \cdot C} \right)$$

$$\text{де } C = \frac{M^2}{M^2 - 1} = \frac{1.2^2}{1.2^2 - 1} = 3,27, \quad R = \frac{M}{M^2 - 1} = 2,7$$

Якщо $A < M/(M + 1)$ або $A > M/(M - 1)$, запас стійкості системи за фазою може бути довільним, оскільки в цьому випадку вектор амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи не потрапляє в заборонену зону, обмежену колом із заданим показником коливальності.

Максимальний фазовий запас системи визначається за заданим значенням показника коливальності (M) за формулою:

$$\mu_{\max} = \sqrt{\frac{M^2 - 1}{M}} = \arcsin(1/M)$$

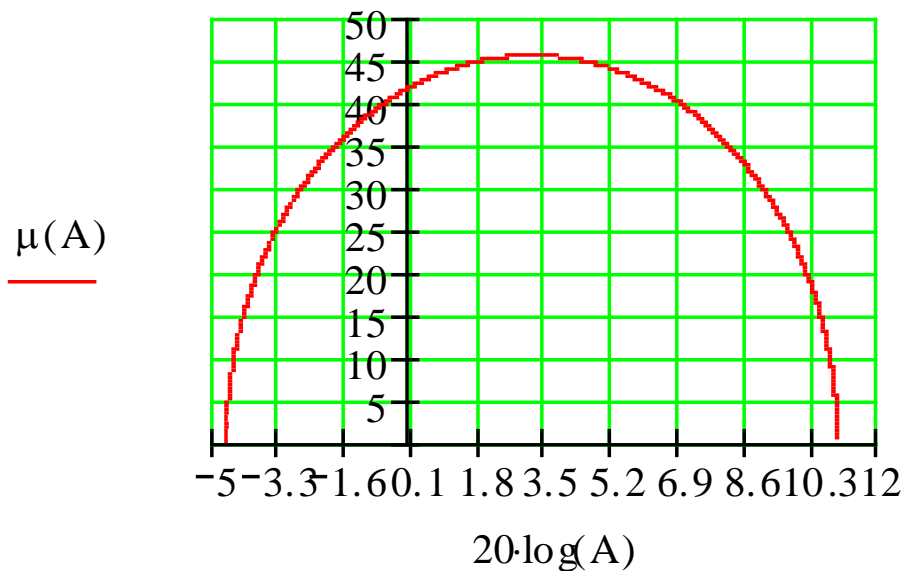


Рисунок 3.3 - μ -крива

6. За розрахованими даними для побудови μ -кривої визначаємо заборонену зону для ЛФЧХ бажаної ЛАЧХ системи.

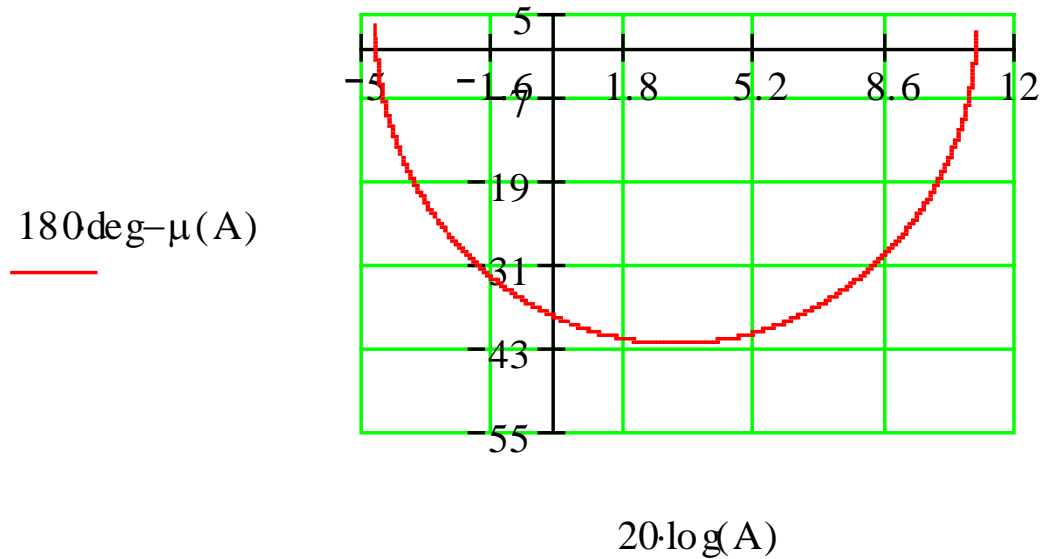


Рисунок 3.4 – Візуалізація забороненої зони ЛФЧХ системи

7. Будуємо фазочастотну характеристику системи (ЛФЧХ), яку визначають за отриманою формою бажаної ЛАЧХ. Для ЦСАК з астатизмом нульового порядку вираз для розрахунку фазочастотної характеристики має такий вигляд:

$$\Phi(\omega) := \left[-\text{atan} \left[\frac{\left(\frac{\lambda(\omega)}{\lambda_1} \right)}{1 - \left(\frac{\lambda(\omega)}{\lambda_1} \right)^2} \right] + \text{atan} \left(\frac{\lambda(\omega)}{\lambda_2} \right) - \text{atan} \left(\lambda(\omega) \cdot \frac{T}{2} \right) \right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

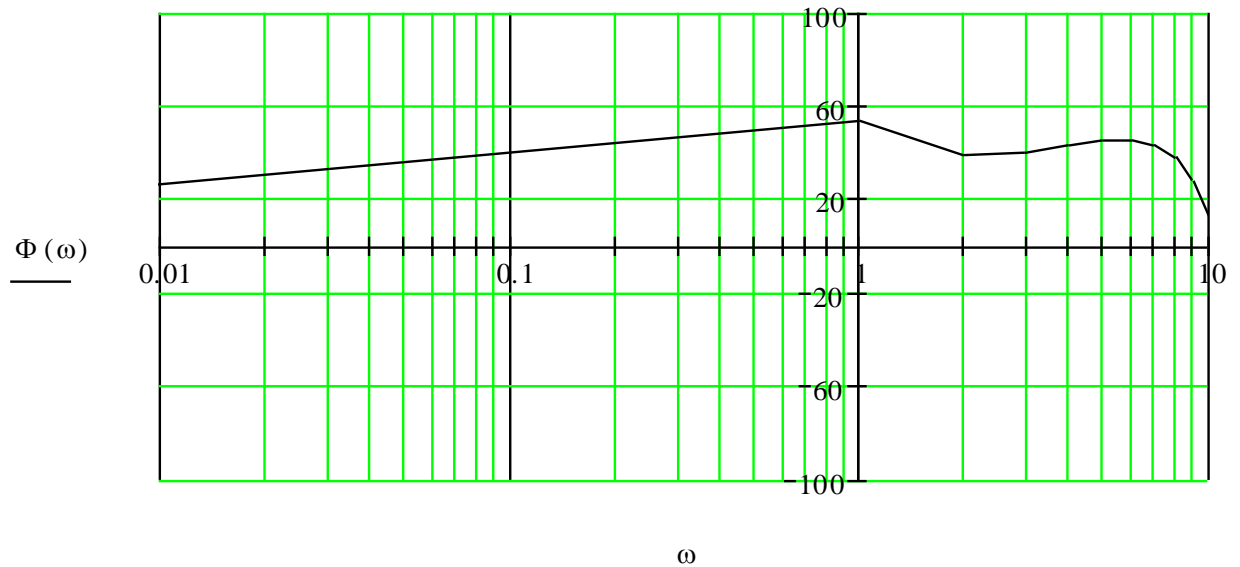


Рисунок 3.5 - ЛФЧХ системи

8. Перевіряємо, чи не потрапляє ЛФЧХ $\varphi(\lambda)$ у заборонену зону. В даному випадку ця умова дотримана.

При побудові логарифмічних частотних характеристик ЦСАК можна застосовувати як дискретну, $W(j\lambda)$ так і неперервну передаточну функцію $W(e^{j\omega T})$. При цьому всі вимоги до частотних передаточних функцій $W(j\omega)$ неперервних систем і їх логарифмічних характеристик залишаються чинними і для частотних передаточних функцій $W(e^{j\omega T}), W(j\lambda)$ ЦСАК та відповідних логарифмічних характеристик.

3.5 Процес визначення дискретної передаточної функції КМЕОМ

Частотна дискретна передаточна функція коригувального пристрою задається наступним виразом:

$$D(j\omega) = W_{\text{баз}}(j\omega) / W_{\text{н}}(j\omega)$$

$W_{\text{баз}}(j\omega)$ - Частотна передаточна функція, що обчислюється на основі отриманої форми бажаної ЛАЧХ;

$W_{\text{н}}(j\omega)$ - Частотна передаточна функція зведеної неперервної частини (ЗНЧ) системи.

Для розімкненої системи з нульовим порядком астатизму:

$$W_{\text{баз}}(j\lambda) = \frac{k_1 \cdot (1 + j\lambda / \lambda_2) \cdot (1 - j \cdot \lambda \cdot T / 2)}{(1 + j\lambda / \lambda_1)^2}$$

$$W_{\text{н}}(j\lambda) = \frac{3 \cdot (j\lambda T / 2)^9 - 70,02 \cdot (j\lambda T / 2)^8 + 216 \cdot (j\lambda T / 2)^7 + 217 \cdot (j\lambda T / 2)^6 + 45,2 \cdot (j\lambda T / 2)^5 - (j\lambda T / 2)^9 - 2,34 \cdot (j\lambda T / 2)^8 - 35,5 \cdot (j\lambda T / 2)^7 - 81,8 \cdot (j\lambda T / 2)^6 - 59,2 \cdot (j\lambda T / 2)^5 + - 54,2 \cdot (j\lambda T / 2)^4 + 207,4 \cdot (j\lambda T / 2)^3 - 182,2 \cdot (j\lambda T / 2)^2 + 54,4 \cdot (j\lambda T / 2) - 2,82 + 34,1 \cdot (j\lambda T / 2)^4 + 85,3 \cdot (j\lambda T / 2)^3 + 59,6 \cdot (j\lambda T / 2)^2 + 20,8 \cdot (j\lambda T / 2) + 3,42}{(j\lambda T / 2)^9 - 2,34 \cdot (j\lambda T / 2)^8 - 35,5 \cdot (j\lambda T / 2)^7 - 81,8 \cdot (j\lambda T / 2)^6 - 59,2 \cdot (j\lambda T / 2)^5 - 54,2 \cdot (j\lambda T / 2)^4 + 207,4 \cdot (j\lambda T / 2)^3 - 182,2 \cdot (j\lambda T / 2)^2 + 54,4 \cdot (j\lambda T / 2) - 2,82 + 34,1 \cdot (j\lambda T / 2)^4 + 85,3 \cdot (j\lambda T / 2)^3 + 59,6 \cdot (j\lambda T / 2)^2 + 20,8 \cdot (j\lambda T / 2) + 3,42}$$

$$D(j\omega) = W_{\text{баз}}(j\omega) / W_{\text{н}}(j\omega) = \frac{110 \cdot (1 + 5,9 \cdot \frac{z-1}{z+1}) \cdot (1 - \frac{z-1}{z+1}) \cdot (\frac{z-1}{z+1})^9 - 2,34 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^8 - 35,5 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^7 - (1 + 22,2 \cdot \frac{z-1}{z+1})^2 \cdot (3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^9 - 70,02 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^8 + 216 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^7 + - 81,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^6 - 59,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^5 + 34,1 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^4 + 85,3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^3 + 59,6 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^2 + 20,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1}) + 3,42)}{3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^9 - 70,02 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^8 + 216 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^7 + - 81,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^6 - 59,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^5 + 34,1 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^4 + 85,3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^3 + 59,6 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^2 + 20,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1}) + 3,42} + 217 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^6 + 45,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^5 - 54,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^4 + 207,4 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^3 - 182,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^2 + 54,4 \cdot (\frac{z-1}{z+1}) - 2,82$$

Визначивши дискретну частотну передаточну функцію $D(j\lambda)$ та підставивши в неї $j\lambda = 2w/T$ відповідні значення, можна отримати вираз коректуючого алгоритму у формі w-перетворення $D(w)$. Виконавши підстановку в цей вираз, знаходимо дискретну передаточну функцію коректуючого пристрою, а саме:

$$D(z) = \frac{\sum_{i=0}^k b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^h a_i z^{-i}}$$

$$D(z) = \frac{110 \cdot (1 + 5,9 \cdot \frac{z-1}{z+1}) \cdot (1 - \frac{z-1}{z+1})}{(1 + 22,2 \cdot \frac{z-1}{z+1})^2} \cdot \frac{(\frac{z-1}{z+1})^9 - 2,34 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^8 - 35,5 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^7 - 81,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^6 - 59,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^5 + 34,1 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^4 + 85,3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^3 + 59,6 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^2 + 20,8 \cdot (\frac{z-1}{z+1}) + 3,42}{3 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^9 - 70,02 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^8 + 216 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^7 + 217 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^6 + 45,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^5 - 54,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^4 + 207,4 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^3 - 182,2 \cdot (\frac{z-1}{z+1})^2 + 54,4 \cdot (\frac{z-1}{z+1}) - 2,82} =$$

$$= \frac{1,7z^{10} + 81,6z^9 + 54,4z^8 - 57,8z^7 + 20,4z^6 - 13,6z^5 - 1,19z^4 + 0,85z^3 - 0,34z^2 + 0,34z + 0,04}{z^{11} - 0,6z^{10} + 0,2z^9 + 1,7z^8 - 1,6z^7 + 1,2z^6 + 1,9z^5 - 2,7z^4 - 0,5z^3 - 0,3z^2 - 0,5z + 0,2} =$$

$$= \frac{1,7z^{-1} + 81,6z^{-2} + 54,4z^{-3} - 57,8z^{-4} + 20,4z^{-5} - 13,6z^{-6} - 1,19z^{-7} + 0,85z^{-8} - 0,34z^{-9} + 0,34z^{-10} + 0,04z^{-11}}{1 - 0,6z^{-1} + 0,2z^{-2} + 1,7z^{-3} - 1,6z^{-4} + 1,2z^{-5} + 1,9z^{-6} - 2,7z^{-7} - 0,5z^{-8} - 0,3z^{-9} - 0,5z^{-10} + 0,04z^{-11}}$$

Під час синтезу цієї функції необхідно дотримуватися умови стійкості системи: невеликі зміни чи відхилення як параметрів (коефіцієнтів a_i , b_i) програмної реалізації, так і характеристик неперервної частини ЦСАК, не повинні суттєво впливати на показники її якості.

Для забезпечення стійкості та грубості ЦСАК коректуючого пристрою слід дотримуватись таких умов:

1. Функція $W_{\text{оаж}}(j\omega)$ має включати всі власні нулі й полюси, а також нулі й полюси функції $W_n(j\omega)$.

2. Нахил ЛАЧХ $W_{\text{оаж}}(j\omega)$ у діапазоні частот $\lambda > 2/T$ повинен бути не меншим за нахил ЛАЧХ $W_n(j\omega)$.

3. Чисельник функції $D(j\lambda)$ не повинен перевищувати за ступенем знаменник.

3.6 Розробка алгоритмічної схеми програмної реалізації дискретного коректуючого пристрою

Алгоритм програмної реалізації дискретного коректуючого пристрою може бути представлений у вигляді дискретної передаточної функції.

$$D(z) = \frac{x(z)}{\Theta(z)} = \frac{\sum_{i=0}^k b_i z^{-i}}{\sum_{i=1}^h a_i z^{-i} + 1} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \dots + b_k \cdot z^{-k}}{1 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_h \cdot z^{-h}}$$

де $x(z) = Z\{x_{|n|}\}$, $\Theta(z) = Z\{\Theta_{|n|}\}$

Дискретній передаточній функції (16) відповідає різницеве рівняння

$$x(n) = b_0 \cdot \Theta_{|n|} + b_1 \cdot \Theta_{|n-1|} + \dots + b_k \cdot \Theta_{|n-k|} - (a_1 \cdot x_{|n-1|} + a_2 \cdot x_{|n-2|} + \dots + a_h \cdot x_{|n-h|})$$

$$D(z) = \frac{x(z)}{\Theta(z)} = \frac{1,7z^{-1} + 81,6z^{-2} + 54,4z^{-3} - 57,8z^{-4} + 20,4z^{-5} - 13,6z^{-6} - 1,19z^{-7} + 0,85z^{-8} - 0,34z^{-9} + 0,34z^{-10} + 0,04z^{-11}}{1 - 0,6z^{-1} + 0,2z^{-2} + 1,7z^{-3} - 1,6z^{-4} + 1,2z^{-5} + 1,9z^{-6} - 2,7z^{-7} - 0,5z^{-8} - 0,3z^{-9} - 0,5z^{-10} + 0,2z^{-11}}$$

Її реалізують методом прямого програмування, виконуючи перехресне множення

$$x(z) \cdot (1 - 0,6z^{-1} + 0,2z^{-2} + 1,7z^{-3} - 1,6z^{-4} + 1,2z^{-5} + 1,9z^{-6} - 2,7z^{-7} - 0,5z^{-8} - 0,3z^{-9} - 0,5z^{-10} + 0,04z^{-11}) = \Theta(z)(1,7z^{-1} + 81,6z^{-2} + 54,4z^{-3} - 57,8z^{-4} + 20,4z^{-5} - 13,6z^{-6} - 1,19z^{-7} + 0,85z^{-8} - 0,34z^{-9} + 0,34z^{-10} + 0,2z^{-11})$$

Застосовуємо обернене Z-перетворення

$$\begin{aligned} X(n) = & 0\Theta(z) + 1,7\Theta_{[n-1]} + 81,6\Theta_{[n-2]} + 54,4\Theta_{[n-3]} - 57,8\Theta_{[n-4]} + 20,4\Theta_{[n-5]} - \\ & - 13,6\Theta_{[n-6]} - 1,19\Theta_{[n-7]} + 0,85\Theta_{[n-8]} - 0,34\Theta_{[n-9]} + 0,34\Theta_{[n-10]} + 0,04\Theta_{[n-11]} + \\ & + 0,6X_{[n-1]} - 0,2X_{[n-2]} - 1,7X_{[n-3]} + 1,6X_{[n-4]} - 1,2X_{[n-5]} - 1,9X_{[n-6]} + 2,7X_{[n-7]} + \\ & + 0,5X_{[n-8]} + 0,3X_{[n-9]} + 0,5X_{[n-10]} - 0,2X_{[n-11]} \end{aligned}$$

3.7 Побудова перехідного процесу системи

За допомогою середовища MATLAB будується графік перехідного процесу, який порівнюється з відповідним графіком перехідного процесу системи без корекції:

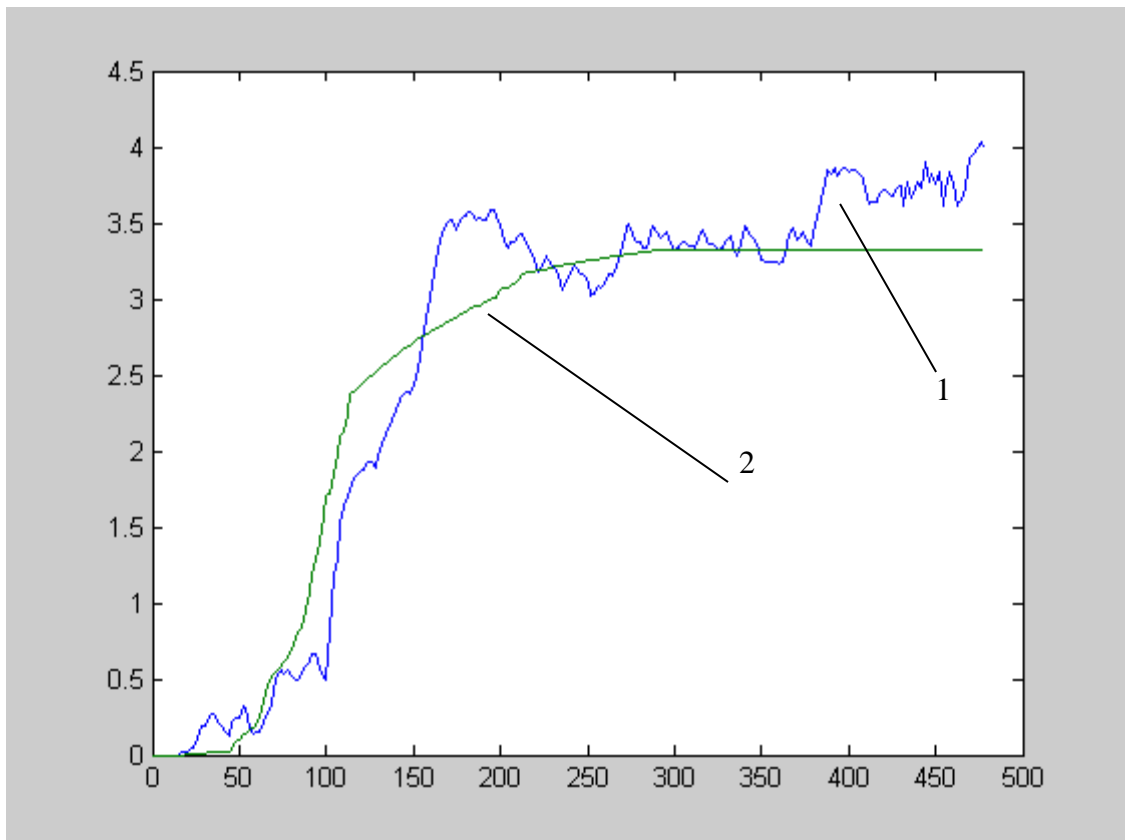


Рисунок 3.6 – Зіставлення графіків перехідного процесу.

1 – перехідна характеристика нескоректованої системи;

2 – перехідна характеристика скоректованої системи.

Як видно з порівняння графіків, застосування цифрового регулятора дозволило підтримувати усталене значення вологості на рівні 3,3%. Це значення перебуває в рекомендованому діапазоні 3,0–3,5% і забезпечує необхідні фізико-механічні властивості суміші, що суттєво підвищує її якість.

4 Створення схеми цифрового регулятора

4.1 Створення структурної схеми регулятора

Структурно регулятор включає:

- мікроЕОМ з периферійними пристроями вводу-виводу (ПВВ1, ПВВ2);
- блок зв'язку мікроЕОМ із неперервною частиною системи.

Проектування мікроЕОМ зазвичай починають із опису її архітектури, що являє собою модель мікроЕОМ з точки зору програміста. У процесі розробки ця модель перетворюється на структуру мікроЕОМ, яка визначає склад, призначення та взаємозв'язки апаратних компонентів, необхідних для реалізації заданої архітектури.

В останні роки найбільше поширення отримав принцип модульної організації обчислювальних систем. Для забезпечення зв'язку елементів всередині модулів та між модулями виділяють два підходи: використання довільних зв'язків «кожен з кожним» або впорядкованих (шинних) зв'язків, що дозволяє зменшити загальну кількість комунікацій.

Найбільш розповсюджена схема мікроЕОМ передбачає наявність двох або трьох загальних магістралей, до яких модулі можуть підключатися по черзі під керуванням пристрою управління. Така архітектура вимагає обмеженої кількості зовнішніх контактів, проте обмін даними між модулями повинен відбуватися у строго визначеному порядку.

У мікроЕОМ процесор формується на основі великих інтегральних схем (ВІС), що складають базовий мікропроцесорний комплект (МП-комплект). Процесор може бути реалізований як однокристально (одна ВІС), так і багатокристально (кілька ВІС). Для створення інших блоків мікроЕОМ використовують спеціалізовані ВІС або інтегральні схеми середнього ступеня інтеграції. Основні типи ІС у мікроЕОМ поділяються на чотири групи: базовий мікропроцесорний комплект, ІС запам'ятовуючих пристроїв, ІС для вводу-виводу інформації в мікропроцесор і ІС для зв'язку мікроЕОМ з об'єктами керування.

При використанні спеціалізованих ІС для різних модулів мікроЕОМ її структурну схему можна представити як сукупність функціональних блоків, з'єднаних відповідно до вимог інтерфейсів. У запропонованій схемі обробку інформації здійснює мікропроцесор (МП), який синхронізується тактовими сигналами пристрою синхронізації (ГТІ). Обмін даними між мікропроцесором та іншими блоками відбувається через три шини: адресу (ША), даних (ШД) та управління (ШУ).

Шина адреси використовується для передачі адресного коду, за яким здійснюється доступ до пристроїв пам'яті, вводу-виводу та інших зовнішніх пристроїв, підключених до мікропроцесора. Дані, що обробляються, а також результати обчислень передаються через шину даних (ШД). Шина управління (ШУ) подає сигнали керування на всі блоки мікроЕОМ, налаштовуючи їх на необхідний режим роботи для виконання заданої команди.

Використання трьох шин у мікроЕОМ дозволяє досягти високої швидкодії та спрощує виконання обчислень.

Системний контролер (СК) призначений для фіксації стану мікропроцесора, обробки системних сигналів управління, буферизації шини даних та керування передачею інформації.

Щоб підвищити навантажувальну здатність адресних виходів А0...А15 мікропроцесора, використовують буферний шинний формувач (БШФ).

Селектор адреси (СА) використовується для забезпечення адресного доступу до потрібних пристроїв.

Для передачі даних між мікропроцесором та зовнішніми пристроями в мікроЕОМ використовуються пристрої вводу-виводу (ПВВ1, ПВВ2). У випадку цифрового регулятора такими пристроями виступають цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) використовується для збереження керуючої програми мікропроцесора і забезпечує лише зчитування записаної в ньому інформації.

Оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) у системах використовується для тимчасового збереження даних під час виконання програми та забезпечує можливість як запису, так і зчитування інформації.

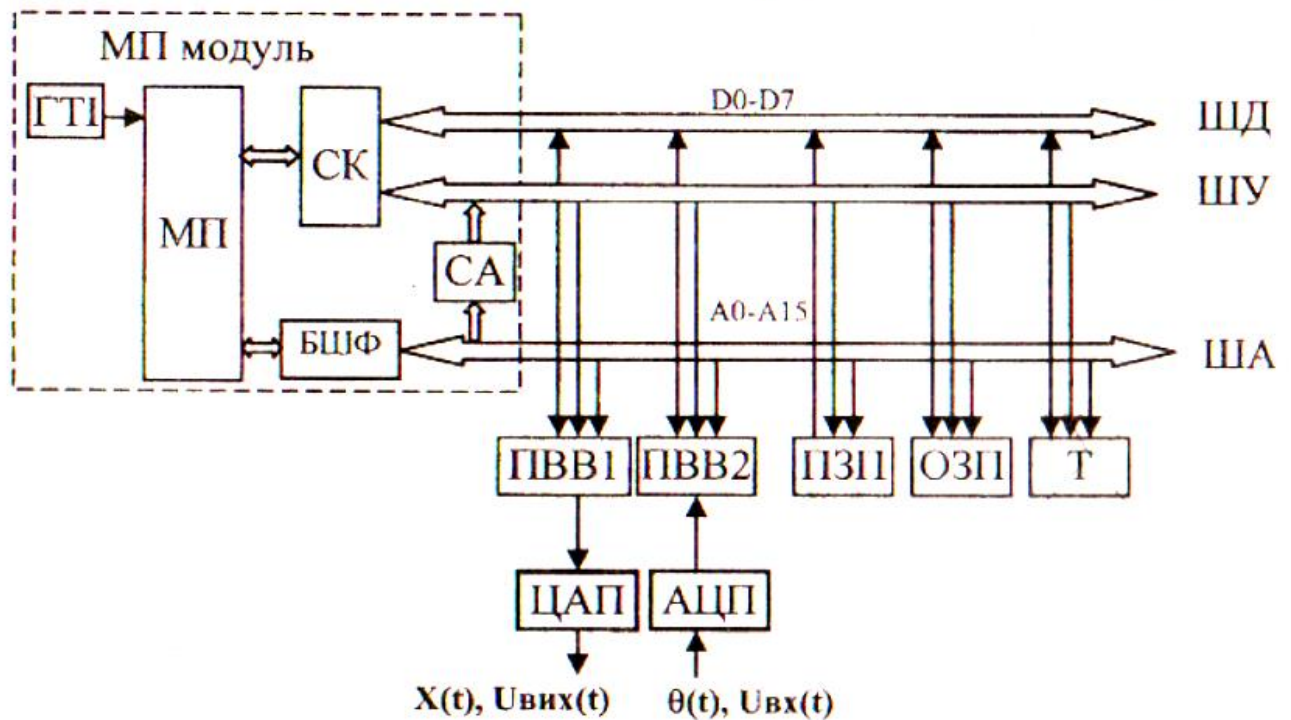


Рисунок 4.1 – Блок-схема цифрового мікропроцесорного регулятора.

МП — центральний мікропроцесор;

ГТІ — генератор тактових сигналів;

СК — контролер системи;

БШФ — формувач шинного буфера;

СА — адресний селектор;

ПВВ1 — перший пристрій вводу-виводу;

ПВВ2 — другий пристрій вводу-виводу;

ЦАП — перетворювач цифра-аналог;

АЦП — перетворювач аналог-цифра;

ПЗП — постійний запам'ятовуючий модуль;

ОЗП — оперативний модуль пам'яті;

Т — таймер для синхронізації.

Таймер (Т) — це пристрій, який призначений для формування часових інтервалів між імпульсами, причому їх тривалість і форма задаються програмно. Програмно визначені режими роботи таймера дозволяють ділити вхідну частоту, генерувати одноразові сигнали стробування, синхронізовані з тактовою частотою, вести підрахунок зовнішніх імпульсів і вимірювати тривалість часових проміжків.

4.2 Розробка схеми електричних з'єднань

Основним елементом мікропроцесорного модуля є мікропроцесор, при виборі якого важливо враховувати його швидкодію. Оскільки до проєктованої системи не пред'являються високі вимоги, можна обрати мікропроцесор із середньою продуктивністю, наприклад, із мікропроцесорного комплекту серії КР580, який є одним із найпоширеніших наборів великих інтегральних схем і дозволяє створювати ефективні обчислювальні пристрої для реалізації як обчислювальних, так і керуючих задач. Основу комплекту становить однокристальний мікропроцесор КР580ВМ80, а крім нього до серії входить велика кількість ВІС, що забезпечують просте підключення різноманітних пристроїв до МП і організацію швидкого обміну інформацією між модулями мікроЕОМ. Схеми комплекту виготовлені за М-МОП технологією, а рівні вхідних і вихідних сигналів сумісні з ТТЛ-логікою, що дозволяє використовувати його у різних обчислювальних та керуючих пристроях. МікроЕОМ на базі цього комплекту здатна працювати на тактовій частоті до 2,5 МГц і програмується за фіксованим набором команд мікропроцесора КР580ВМ80. Мікропроцесор КР580ВМ80 є однокристальним 8-розрядним пристроєм із однонаправленою 16-розрядною адресною магістраллю і двонаправленою

8-розрядною магістраллю даних, а також 12 сигналами керування, серед яких шість входів і шість виходів. Він використовується як центральний процесор для обробки даних і керування системою, при цьому адресна магістраль забезпечує пряму адресацію зовнішньої пам'яті обсягом до 65 535 байт і доступ до 256 пристроїв введення і стільки ж пристроїв виведення. Мікропроцесор здатний виконувати логічні та арифметичні операції з 8-розрядними числами у двійковій і десятковій системах, а також обробляти числа подвійної розрядності, проте один МП не може самостійно реалізувати всі покладені на нього функції, оскільки команди виконуються через машинні цикли, які формуються тактовими імпульсами. Для генерації цих імпульсів використовується генератор тактових сигналів, у комплекті серії КР580 цю роль виконує мікросхема КР580ГФ24, яка забезпечує синхронізацію роботи мікропроцесора. Розробку електричної принципової схеми починають із визначення способу підключення мікропроцесора КР580ВМ80 до генератора КР580ГФ24, що гарантує правильну синхронізацію роботи всіх модулів системи та забезпечує стабільне виконання команд мікропроцесором, а також ефективну взаємодію між мікроЕОМ і зовнішніми пристроями введення-виведення, що підключені до нього.

Генератор тактових імпульсів виробляє сигнали на виводах Р1 і Р2, причому на Р1 тривалість імпульсу дорівнює двом періодам опорної частоти, а на Р2 — п'яти періодам цієї частоти, з амплітудою 12 В. Опорна частота визначається кварцовим резонатором ВQ1, підключеним до висновків ХТАL1 і ХТАL2 мікросхеми КР580ГФ24, причому його резонансна частота має бути в 9 разів більшою за тактову частоту мікропроцесора. На вході RESIN мікросхеми КР580ГФ24 реалізована схема встановлення мікроЕОМ у початковий стан за допомогою зовнішнього RC-ланцюга, зібраного на елементах $R1=100$ кОм, $R2=1$ кОм, $C1=10$ мкФ та

діоді VD1. При замиканні перемикача SA1 ємність C1 замикається на землю, що викликає стрибок напруги на вході RESIN і формує вихідний сигнал RESET. Цей сигнал використовується для встановлення мікропроцесора та інших мікросхем мікропроцесорного регулятора у вихідний стан. Крім того, генератор формує серію тактових імпульсів P2 у ТТЛ-логіці, частота яких може застосовуватися як опорна для живлення каналів таймера, а також сигнал стробування стану STSTB, який формується при наявності високого рівня напруги на вході SINC, що надходить з виходу мікропроцесора на початку кожного машинного циклу. Сигнал STSTB використовується для передачі інформації про стан мікропроцесора до системного контролера для формування сигналів управління.

4.3 Організація шин у мікропроцесорній системі

Для організації шин мікроЕОМ на базі МП KP580BM80 використовуються шинні формувачі KP580BA86 та системний контролер KP580BK28. Ці мікросхеми безпосередньо взаємодіють із процесором і розширюють його функціональні можливості. Умовні графічні позначення мікросхем комплекту МП наведені у додатку Ж. Підключення 16-розрядного адресного каналу МП до шини адреси (ША) мікроЕОМ здійснюється через формувачі KP580BA86(87), які являють собою двонаправлені 8-розрядні прийомопередатчики з високою навантажувальною здатністю (до 32 мА). KP580BA87 відрізняється від KP580BA86 тим, що двонаправлена передача даних виконується з інверсією. Мікросхеми KP580BA86(87) мають двонапрямлений канал А, що

підключається до МП, та двонаправлений канал В для з'єднання з магістральною шиною.

Передача даних відбувається при сигналі $CS=0$ у напрямку $A \rightarrow B$ ($T=1$) або $A \leftarrow B$ ($T=0$). Коли $CS=1$, усі виходи каналів А та В відключаються й переходять у високоомний стан. Системний контролер і шинний формувач КР580ВК28 включають двонаправлену буферну схему даних, регістр стану та дешифратор сигналів управління. Восьмирозрядна буферна схема приймає інформацію з каналу даних мікропроцесора через виводи $D0-D7$ і передає її в регістр стану; у циклі запису за сигналом WR , що надходить від МП, по виводах $DB0-DB7$ дані передаються на системний канал даних. У циклі читання сигналу MP $DBIM$ приймає інформацію з системного каналу через виводи $DB0-DB7$ і передає її на канал даних МП через $D0-D7$. Регістр стану за сигналом $STSTB$, який надходить від ГТІ, фіксує стан мікропроцесора у такті $T1$ кожного машинного циклу.

Дешифратор сигналів управління генерує відповідний сигнал управління у кожному машинному циклі: під час читання даних із запам'ятовуючого пристрою (ОЗП або ПЗП) формується сигнал $MEMR$, при записі в запам'ятовуючий пристрій – $MEMW$, при читанні з ПВВ – I/OR , при записі в ПВВ – I/OW , а для підтвердження запиту на переривання – сигнал $INTA$. Передача даних по двонаправленій шині можлива за умови, що системна шина керується сигналом $BUSEN=0$, а напрямок передачі визначається сигналами $DBIN$ і WR .

За умови $DBIN = 1$ і $WR = 1$ передавання інформації відбувається в напрямку $D \leftarrow DB$, а при значеннях $DBIN = 0$ та $WR = 0$ — у напрямку $D \rightarrow DB$. Якщо сигнал $BUSEN = 1$, виходи DB системного контролера відключаються від шини та переходять у високоомний (високоімпедансний) стан.

4.4 Проектування адресного селектора

Мікросхеми пам'яті зазвичай реалізуються у вигляді постійних запам'ятовуючих пристроїв (ПЗП або ROM), з яких можливе лише зчитування інформації, а також оперативних запам'ятовуючих пристроїв з довільним доступом (ОЗП або RAM), що забезпечують як зчитування, так і запис даних. Наявність десяти адресних ліній дозволяє адресувати ($2^{10}=1024$), тобто 1 К, окремих комірок пам'яті, тоді як вісім ліній даних свідчать про те, що кожна з цих комірок призначена для зберігання одного байта інформації, який складається з 8 бітів.

Отже, структуру пам'яті даної мікросхеми доцільно подати у вигляді 1024×8 , що означає наявність 1024 адресованих комірок, кожна з яких містить 8 бітів інформації.

Зчитування одного байта з мікросхеми відбувається за умови, що сигнал CS перебуває в активному стані, тобто має логічне значення «0».

Розташування виводів мікросхем оперативної пам'яті загалом повторює структуру постійних запам'ятовуючих пристроїв, однак для ОЗП додатково використовується керуючий сигнал R/WR зчитування/запису в шині управління мікропроцесора, який визначає напрям передавання байта даних. Мікросхеми ПЗП та ОЗП підключаються безпосередньо до шини даних і до відповідної кількості молодших адресних ліній. Формування сигналів вибору кристала здійснюється за допомогою адресного дешифратора типу 2:4, який забезпечує активізацію лише однієї мікросхеми пам'яті в певний момент часу. Його робота така, що лише на одному з чотирьох виходів може з'явитися активний сигнал логічного «0», за умови, що на вході дозволу також присутній рівень «0», інакше всі виходи

залишаються неактивними. У даній схемі пам'яті сигнал з адресної лінії A15 використовується для запуску роботи дешифратора, а сигнали з ліній A12 та A11 підлягають дешифрації й безпосередньо визначають вибір конкретної мікросхеми. Позначення «х» вказує на те, що відповідна адресна лінія не задіяна в процесі вибору та умовно вважається такою, що має нульовий логічний рівень.

Таблиця 4.1 – Таблиця логічних станів адресного дешифратора типу 2:4

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

У разі, коли схема пам'яті містить понад чотири мікросхеми, використання дешифратора типу 2:4 стає недостатнім, тому його замінюють на дешифратор 3:8. До входів такого дешифратора під'єднують вільні старші розряди адресної шини, що дозволяє забезпечити вибір більшої кількості мікросхем пам'яті.

4.5 Засоби взаємодії мікропроцесора з безперервною частиною системи керування

До зовнішніх пристроїв, що взаємодіють з мікропроцесором, відносяться цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі (ЦАП і АЦП). Цифро-аналоговий перетворювач забезпечує однозначне

перетворення цифрового коду в аналоговий сигнал, тоді як аналого-цифровий перетворювач виконує зворотню функцію, перетворюючи аналоговий сигнал у відповідний цифровий код. Сьогодні вітчизняна промисловість випускає широкий спектр типів ВІС ЦАП і АЦП. Основною вимогою до цих перетворювачів є сумісність із мікропроцесором, що включає відповідність логічних рівнів цифрових сигналів перетворювачів шині даних МП, збіг видів цифрових кодів і формату даних, а також програмну сумісність. Для сполучення мікропроцесора серії КР580 з неперервною частиною системи керування ефективно використовуються перетворювачі серії КР572. Наявність у цій серії 12-розрядних АЦП і ЦАП дозволяє за потреби збільшувати розрядність вхідних і вихідних даних з мінімальними доопрацюваннями пристрою сполучення.

Цей пристрій забезпечує безперервний обмін даними між мікропроцесором та вхідними й вихідними перетворювачами без необхідності переривання виконання програми. Він має такі технічні характеристики: діапазон вхідних аналогових сигналів від 0 до 4 В, діапазон вихідних аналогових сигналів ± 12 В, час перетворення інформації в АЦП становить 120 мкс, а час встановлення та видачі даних ЦАП дорівнює 15 мкс.

Головними компонентами цього пристрою є 12-розрядні АЦП і ЦАП, які побудовані на основі мікросхем К572ПВ1 та К594ПА2 відповідно.

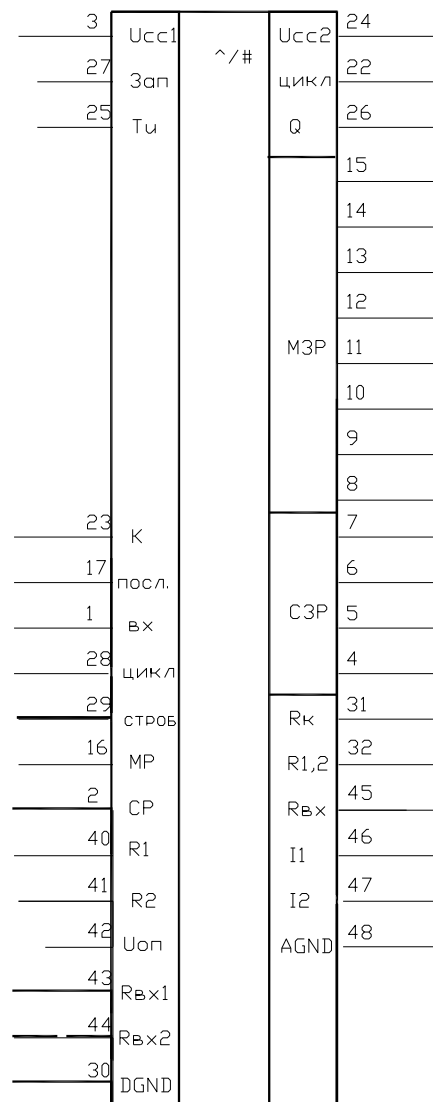
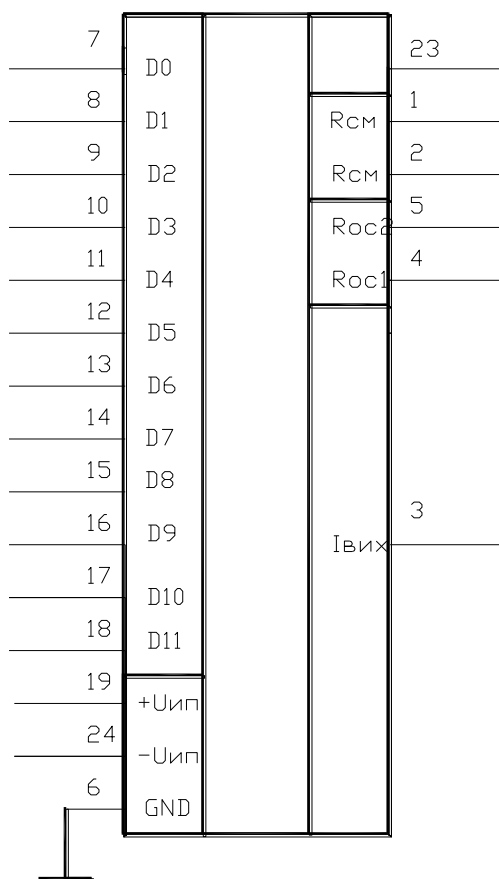


Рисунок 4.2 – Призначення контактів мікросхеми K572ПВ1: 1 – послідовний вхід (посл.в); 2 – вхід керування (CP); 3 – живлення мікросхеми (Ucc1); 4–15 – цифрові входи/виходи; 16 – вхід керування (MP); 17 – керування режимом (р.); 22 – вихід «цикл»; 23 – вхід порівняння (К); 24 – друге джерело живлення (Ucc2); 25 – вхід тактових імпульсів (Tu); 26 – вихід «кінець перетворення» (Q); 27 – вхід «запуск» (зап); 28 – вхід «цикл» (цикл); 29 – стробувальний вхід ЦАП (строб); 30 – цифрова земля (DGND); 31 – вихід R-2R структури (Rк); 32 – загальний вихід R/2, R/4 (R1,2); 40 – вихід резистора R/2 (R1); 41 – вихід резистора R/4 (R2); 42 – опорна напруга (Uоп); 43,44 – аналогові входи (Rвх1, Rвх2); 45 – загальний вихід резистора аналогових входів 1,2 (Rвх); 46,47 – аналогові виходи 1,2 (I1,I2); 48 – аналогова земля (AGND).

Мікросхема є 12-розрядним біполярним цифро-аналоговим перетворювачем, який перетворює вхідний паралельний двійковий цифровий код у вихідний струм, пропорційний значенню цього коду. Час стабілізації вихідного сигналу становить $t_{вст} = 3,5$ мкс.



Мікросхема К594ПА2 має такі виводи: 1 і 2 — резистори зміщення ($R_{см}$); 3 — вихід струму (I); 4 та 5 — резистори зворотного зв'язку ($R_{ос1}$ та $R_{ос2}$); 6 — загальний вивід; 7–18 — цифрові входи (D_0 – D_{11}); 19 та 20 — плюсове живлення ($+U_{ип}$); 21 — інвертуючий вхід ОП; 22 — неінвертуючий вхід ОП; 23 — опорна напруга ($U_{оп}$); 24 — мінус джерела живлення ($-U_{ип}$).

Ця мікросхема також придатна для перетворення цифрових кодів, що надходять від КМОН-мікросхем.

Висновки

Метою даної роботи було створення системи автоматичного регулювання вологості формовочної суміші під час її змішування. У процесі виконання проекту була розроблена цифрова система автоматичного контролю з використанням цифрового регулятора, який забезпечує необхідну точність подачі води. Завдяки цій системі вдалося підтримувати вологість на стабільному рівні 3,3%, що відповідає оптимальним показникам для формовочних сумішей. Це дозволило підвищити якість суміші та значно знизити кількість бракованої продукції у ливарному цеху. Таким чином, можна зробити висновок, що поставлена мета роботи була успішно досягнута.

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 Законодавча та нормативна база України з охорони праці

Науково технічний прогрес, зміни технології та устаткування призводять до трансформації трудового процесу й умов праці, в цілому. Тому, при розробці нової техніки, технологічних процесів, організації виробництва, обов'язково проводять науковий аналіз можливих небезпечних та шкідливих виробничих факторів та передбачають заходи і засоби, спрямовані на мінімізацію несприятливого впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників на працівників. Все це поєднує у собі велике поняття «охорона праці».

Охорона праці (ОП) – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я й працездатності людини в процесі праці [13].

В Україні юридичні підвалини щодо ОП утворюють загальні закони та спеціальні юридичні акти [13, 15].

Серед загальних законів, найбільш вагомих у цій царині, слід назвати: Конституцію 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»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ) і Кодекс законів про працю України (КЗпП).

У ст. 43 Конституції України [16] записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується». «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом». «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для їхнього здоров'я роботах забороняється».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України). 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 [13, 15, 16].

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, що 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, 15, 16].

Основоположним законодавчим документом в галузі ОП є Закон України «Про охорону праці» [17], дія якого 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.

Верховна Рада України прийняла Закон України «Про охорону праці» 14 жовтня 1992 року. 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, організації, або уповноваженим ним органом, і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації ОП в Україні. На роботодавця покладений обов'язок створити в кожному структурному підрозділі і на робочому місці умови праці, відповідно до вимог нормативних актів, а також забезпечити додержання прав працівників, гарантованих законодавством про ОП (ст. 13). Керівники та власники підприємств несуть персональну відповідальність за порушення вимог законодавства з ОП [13, 15, 17].

Відповідно до ст. 44 Закону України «Про охорону праці», за порушення законів та інших нормативно-правових актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП, а також

представників професійних спілок, їх організацій та об'єднань, винні особи притягаються до дисциплінарної, адміністративної, матеріальної, кримінальної відповідальності, згідно із законом [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 санітарно-епідеміологічної 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» [8] був прийнятий Верховною Радою України 8 лютого 1995 року. Він визначає права й обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з експлуатацією ядерних установок і джерел іонізуючого випромінювання, встановлює правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії, а також щодо ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи.

В Законі сформульовано основні принципи державної політики щодо використання ядерної енергії та радіаційного захисту: пріоритет захисту людини й довкілля від впливу іонізуючого випромінювання; забезпечення безпеки при використанні ядерної енергії; відкритість і доступність відповідної інформації; встановлення відповідальності за порушення правового режиму безпеки в цій сфері; розмежування функцій державного управління в галузі використання ядерної енергії та державного регулювання ядерної й радіаційної безпеки; створення правового та фінансового механізму відповідальності експлуатуючої організації перед громадянами та суб'єктами господарювання за заподіяну

ядерну шкоду тощо. Закон закріплює основні вимоги, що є спільними для ядерного законодавства всіх держав, які використовують ядерну енергію. Серед них – вимоги щодо: гарантій безпеки ядерних установок, джерел іонізуючого випромінювання та безпечного поводження з ядерними матеріалами; відшкодування шкоди, заподіяної ядерним інцидентом; виконання міжнародних угод в ядерній галузі тощо [13, 15, 20].

Основні принципи соціального страхування від нещасного випадку закріплені у Законі України «Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування» [21], який набув чинності з 1 квітня 2001 року:

- 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 і т. д.

КЦЗ України [22], від 2 жовтня 2012 року, 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 АР 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] спрямований на охорону трудових прав працюючих. Він ще з 10 грудня 1971 року регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини .

У КЗпП, зокрема, зазначені наступні положення: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років

(ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192); забороняється застосовувати працю жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (ст. 174). В ст. 153 КЗпП зазначено про обов'язковість створення безпечних та нешкідливих умов праці [13, 15, 23].

Спеціальними юридичними актами в галузі ОП є: Нормативно-правові акти з ОП (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), Державні будівельні норми (ДБН), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН), Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП), Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [13, 14, 15].

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про ОП (ДНАОП), – це правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання. Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Всі НПАОП вносяться до Державного Реєстру. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядохоронпраці в 1997 році. З 2003 року ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [13, 14, 15].

ДСТУ, як Національні стандарти, поступово вводяться у всіх сферах на заміну стандартів колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ). ДСТУ почали розроблятися з 1992 р. У сфері ОП можна виділити, наприклад:

- ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.
- ДСТУ 7238:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація.
- ДСТУ 7239:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.
- ДСТУ 2272:2006 Пожежна безпека. Терміни та визначення основних

понять.

ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов'язкові вимоги до об'єкта нормування у будівництві. Об'єктами нормування у 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 [13, 14, 15].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (до них відносяться ДСанПіН, ДСНП, ДСН, ДСП та ін.) [13, 14, 15].

Правове поле діяльності в галузі пожежної безпеки, утворене КЦЗ України, доповнюють 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].

ПТЕЕС встановлюють основні організаційні й технічні вимоги до експлуатації електроустановок та електрообладнання напругою до 150 кВ включно [24].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [25].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [13, 14, 15]. Ці нормативні документи є обов'язковими для керівників, спеціалістів і робітників підприємства, а також для тимчасово залучених до праці на них осіб, студентів та учнів профтехучилищ, які проходять виробничу практику на підприємствах.

Держава виступає гарантом створення безпечних та нешкідливих умов

праці для працівників підприємств, установ, організацій усіх форм власності.

A.2 Небезпечні та шкідливі фактори виробництва при експлуатації автоматизованої системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей

На будь-якому виробництві існує та чи інша загроза травматизму, тому вводять поняття шкідливого та небезпечного факторів .

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника [13, 14, 15].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого, за певних умов, може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника [13, 14, 15].

Шкідливі і небезпечні фактори, за природою їх дії, поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [13, 14, 15].

Розглянемо виробничі фактори, які можуть мати негативний вплив на працівників при експлуатації системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей.

До фізичних небезпечних і шкідливих факторів виробництва належать:

- рухомі машини та механізми, незахищені рухомі елементи обладнання, рухомі конструкції, напівфабрикати, готова продукція;
- несприятливі параметри мікроклімату в робочих зонах, підвищена або низька температура поверхонь обладнання, сировини, готової продукції;
- підвищений рівень шуму або вібрації, ультразвучу, інфразвучу;
- можливість виникнення пожежі, оскільки виробництво протікає з використанням високих температур;
- небезпечний рівень напруги в електричній мережі, замикання якої

може відбутися крізь тіло людини, підвищений рівень статичної електрики;

- підвищена напруженість електричного або магнітного полів, випромінювання різної природи;
- відсутнє або недосконале природне освітлення, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла, відсутність контрасту між фоном та об'єктом розрізнення, блиск, підвищена пульсація світлового потоку, підвищений рівень ультрафіолетового або інфрачервоного випромінювання;
- гострі краї, зазубреність і шорсткість поверхонь обладнання, інструментів, напівфабрикатів, готової продукції;
- високий рівень запиленості і загазованості повітря.

Хімічні шкідливості та небезпеки проявляються найчастіше у наявності хімічних речовини та сполук у повітрі робочих зон, а також у величезній кількості хімікатів, застосовуваних безпосередньо у технологічних процесах при приготуванні формовочних сумішей.

Хімічні речовини (шкідливі та небезпечні), відповідно до ДСТУ 2293:2014, поділяються:

а) за характером впливу на організм людини на:

- подразнюючі;
- токсичні;
- сенсibiliзуючі;
- канцерогенні;
- мутагенні;
- такі, що впливають на репродуктивну функцію;

б) за шляхами проникнення в організм людини вони бувають такими, що діють через:

- органи дихання;
- шлунково-кишковий тракт;

– шкіряні покрови і слизові оболонки.

Основним шляхом надходження промислових шкідливих речовин в організм людини є дихальні шляхи. Завдяки величезній (понад 90 м²) всмоктувальній поверхні легенів утворюються сприятливі умови для потрапляння шкідливих речовин у кров [13].

Шкідливі речовини, що потрапили тим, чи іншим шляхом в організм, можуть викликати отруєння (гострі чи хронічні). Ступінь отруєння залежить від токсичності речовини, її кількості, часу дії, шляху проникнення, метеорологічних умов, індивідуальних особливостей організму. Гострі отруєння виникають в результаті одноразової дії великих доз шкідливих речовин (чадний газ, метан, сірководень). Хронічні отруєння розвиваються внаслідок тривалої дії на людину невеликих концентрацій шкідливих речовин (свинець, ртуть, марганець). Шкідливі речовини потрапивши в організм розподіляються в ньому нерівномірно. Найбільша кількість марганцю накопичується в печінці, фтору – в зубах, свинцю – в кістках. Такі речовини мають властивість утворювати в організмі так зване «депо» і затримуватись в ньому тривалий час.

При хронічному отруєнні шкідливі речовини можуть не лише накопичуватись в організмі (матеріальна акумуляція), але й викликати «накопичення» функціональних ефектів (функціональна кумуляція).

Біологічні небезпечні і шкідливі фактори виробництва включають біологічні об'єкти, дія яких на організм працюючих може призвести до травм або захворювання. До них належать:

- макроорганізми (рослини і тварини);
- мікроорганізми (бактерії, віруси, спірохети, грибки, коки, бацили тощо) та продукти їх життєдіяльності.

До психофізіологічних небезпечних і шкідливих факторів належать:

- фізичні перенавантаження (статичні і динамічні);
- нервово-психічні перенавантаження (розумові, емоційні, монотонність або інтенсивність у роботі та ін.).

А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу небезпечних та шкідливих факторів виробництва при експлуатації автоматизованої системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей

Виробничий травматизм і професійні захворювання завдають сьогодні значних збитків. Їх можна уникнути шляхом додержанням вимог трудового законодавства, спеціальних нормативних та інших документів, а також впровадженням у виробництво найновіших досягнень науки і передового досвіду з ОП.

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

Безпечність виробничого устаткування 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.

Для запобігання впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів необхідно виконати ряд організаційних і технічних заходів.

Для унеможливлення механічного травматизму від рухомих частин обладнання, гострих країв, зазубреностей і шорсткостей поверхонь, інструментів, напівфабрикатів, готової продукції застосовуються різноманітні капоти, екрани, огороження, що унеможливають безпосередній контакт із частинами тіла працівника. Також, в обов'язковому порядку, використовуються захисні і запобіжні пристрої, пристрої, автоматичного контролю та сигналізації (світлової і звукової), дистанційне керування; наносяться попереджувальні

написи; вивішуються знаки безпеки.

Для захисту від контакту частин тіла працівника з нагрітими елементами устаткування, сировини, напівфабрикатів і готової продукції використовуються різні огороження, кожухи, термоізолюючі покриття та чохла, а також засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) – спецодяг, спецвзуття, захисні рукавиці, головні убори.

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 посиленню конвективного теплообміну та процесу тепловіддачі, при випаровуванні поту. Встановлено, що при температурі повітря понад 30°C працездатність людини починає падати [13, 14, 15]. 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 [15].

Відповідно до галузевих санітарних норм [13, 14, 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.

Одним з основних заходів по оптимізації параметрів мікроклімату та складу повітря в виробничих приміщеннях є забезпечення належного обміну повітря.

Загальнообмінна вентиляція повинна розроблятися таким чином, щоб виключалася можливість надходження повітря із приміщення з більшим пилоутворенням в приміщення з меншим виділенням пилу.

Припливна вентиляція є необхідною складовою будь-якого приміщення для того, щоб завжди дихати свіжим і чистим повітрям, обов'язково потрібно забезпечити приплив свіжого повітря в приміщення. Застояне повітря в приміщенні погано впливає на людське здоров'я.

Боротьба із шумом і вібраціями повинна починатися з раціонального конструювання устаткування. До конструктивних і технологічних заходів відносяться:

- зменшення вібрацій і шуму в джерелі їх утворення шляхом зрівноважування обертових мас; застосування матеріалів, що володіють здатністю поглинати коливальну енергію тощо;
- зменшення вібрацій і шуму по шляху поширення засобами віброізоляції і вібропоглинання шляхом застосування гумових амортизаторів, прокладок, а також шумо- і віброгасителів.

Сумарний час контакту з вібруючими поверхнями не повинен перевищувати 2/3 тривалості робочого дня.

Захист від шуму налічує декілька способів. Найбільш дієвий спосіб – це боротьба з шумом в джерелі його виникнення. Шум знижують також за допомогою звукопоглинання та звукоізоляції. Цей спосіб передбачає використання кожухів із звукопоглинаючих матеріалів, якими відділяють джерело шуму. Зниження шуму акустичною обробкою приміщення передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинаючим матеріалом. У якості ЗІЗ використовують звукозахисні навушники, беруші, звукопоглинальний спецодяг.

Для запобігання виникнення пожежі на підприємстві, де відбувається приготування формовочних сумішей, необхідно передбачити систему протипожежного захисту.

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів,

а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї (ДСТУ 2272:2006).

Попередження розповсюдження пожеж, в основному визначається пожежною безпекою будівель та споруд і забезпечується: правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій правильними об'ємно-планувальними рішеннями будівель та споруд розташуванням приміщень та виробництв з урахуванням вимог пожежної безпеки; встановленням протипожежних перешкод в будівлях, системах вентиляції, паливних та кабельних комунікаціях обмеженням витікання та розтікання горючих рідин при пожежі улаштуванням протидимного захисту; проектуванням шляхів евакуації; заходами щодо успішного розгортання тактичних дій по гасінню пожежі.

Головним заходом запобігання пожеж і вибухів від електрообладнання є правильний вибір і експлуатація обладнання у вибухо- і пожежонебезпечних приміщеннях. Згідно з ПУЕ [25], приміщення поділяються на вибухонебезпечні (В-I, В-Ia, В-Iб, В-Iг, В-II, В-IIa) і пожежонебезпечні (П-I, П-II, П-IIa, П-III) зони.

Вибухонебезпечна зона – це простір, в якому є або можуть з'явитися вибухонебезпечні суміші.

Пожежонебезпечна зона – це простір, де можуть знаходитися горючі речовини як при нормальному технологічному процесі, так і при можливих його порушеннях. Згідно з ПУЕ [25], якщо об'єм вибухонебезпечної суміші перевищує 5 % вільного об'єму приміщення, то все приміщення належить до відповідного класу вибухонебезпеки. Якщо об'єм вибухонебезпечної суміші дорівнює або менший 5 % вільного об'єму приміщення, то вибухонебезпечною вважається зона приміщення в межах до 5 м по горизонталі і вертикалі від технологічного апарата, від якого можливе виділення горючих газів або пари ЛЗР. Приміщення за межами вибухонебезпечної зони вважається вибухобезпечним, якщо немає інших факторів, які утворюють вибухонебезпечність. Клас зони визначають технологи спільно з електриками

проектної або експлуатаційної організації, виходячи з характеристики навколишнього середовища.

Згідно з ПУЕ [25], в пожежонебезпечних зонах використовується електрообладнання закритого типу, внутрішній простір котрого відділений від зовнішнього середовища оболонкою. Апаратуру керування і захисту, світильники рекомендується застосовувати в пилонепроникному виконанні. Вся електропроводка повинна мати надійну ізоляцію. У вибухонебезпечних зонах та в зовнішніх установках слід використовувати вибухозахищене обладнання. Пускову апаратуру, магнітні пускачі для класів В-I та В-II необхідно виносити за межі вибухонебезпечних приміщень з дистанційним керуванням. Проводи у вибухонебезпечних приміщеннях мають прокладатися у металевих трубах. Може використовуватися броньований кабель. Світильники для класів В-I, В-II, В-IIа також повинні мати вибухозахищене виконання.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом застосовують три основні методи:

- захисне заземлення;
- захисне занулення;
- захисне відключення.

Кожен з цих методів може бути застосований як окремо, така і у поєднанні з іншими (в залежності від специфіки виробництва і наявної електронебезпеки).

Для захисту персоналу від впливу електричних та магнітних полів, а також різноманітних випромінювань використовують такі способи та засоби:

- зменшення напруженість та густину потоку електромагнітного випромінювання;
- екранування робочих місць;
- раціональне розташування в робочому приміщенні обладнання, що випромінюють електромагнітну енергію;
- встановлення раціональних режимів роботи обладнання та обслуговуючого персоналу;

– застосування засобів попереджувальної сигналізації та ЗІЗ.

Світло в процесі праці впливає не лише на функцію органів зору працівника, а й на діяльність людського організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенціальна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно зі статистичними даними, до 5 % травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20 % воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції [13, 14, 15].

Для створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли підвищенню продуктивності праці та якості продукції, має бути передбачена система виробничого освітлення. 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.

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 зменшення забруднення повітряного середовища шкідливими хімічними та біологічними речовинами та захисту працюючих, пропонуються загальні заходи та засоби, а також заходи попередження.

Під заходами попередження розуміються:

- проведення вступних, первинних, повторних, позапланових та цільових інструктажів з техніки безпеки; регулярні навчання і перевірка знань з ОП;

- використання попереджувальних написів, плакатів, кольорів та знаків безпеки.

Серед загальних заходів та засобів можна виділити:

- вдосконалення технологічних процесів та устаткування (застосування замкнутих технологічних циклів, неперервних технологічних процесів, мокрих способів переробки пиломатеріалів тощо);
- повне вилучення шкідливих речовин з технологічних процесів або заміна шкідливих речовин менш шкідливими (наприклад, свинцеві білила можуть бути замінені на цинкові, метиловий спирт – іншими спиртами, органічні розчинники для знежирювання – миючими розчинами на основі води і т. п.);
- автоматизація і дистанційне керування технологічними процесами та обладнанням, що виключає безпосередній контакт працюючих з шкідливими речовинами;
- герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування під розрідженням, локалізація шкідливих виділень за рахунок місцевої вентиляції;
- підтримка нормального функціонування систем опалення, загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів в атмосферу;
- попередні та періодичні медичні огляди робітників, які працюють у шкідливих умовах, профілактичне харчування, дотримання правил особистої гігієни;
- контроль за вмістом шкідливих речовин в повітрі робочої зони;
- використання працівниками спецодягу, спецвзуття та ЗІЗ (ватно-марлевих пов'язок, респіраторів, протигазів, захисних окулярів тощо).

Для забезпечення нормального робочого режиму, видалення небезпечних та шкідливих речовин на робочих місцях і у виробничих приміщеннях, необхідно розрахувати оптимальні системи штучної вентиляції.

А.4 Розрахунок системи штучної вентиляції цеху, де відбувається експлуатація автоматизованої системи регулювання вологості при приготуванні формовочних сумішей

Для своєчасного виведення шкідливих речовин, тепла, що виділяється під час технологічних процесів під час приготування формовочних сумішей, необхідно розрахувати систему штучної вентиляції.

Під вентиляцією розуміють сукупність заходів та засобів, призначених для забезпечення на постійних робочих місцях та зонах обслуговування виробничих приміщень метеорологічних умов та чистоти повітряного середовища, що відповідають гігієнічним та технічним вимогам. Основне завдання вентиляції – вилучити із приміщення забруднене або нагріте повітря та подати свіже [14].

Вентиляція класифікується за такими ознаками [[13, 15]]:

- за способом переміщення повітря – природна, штучна (механічні та суміщена (природна та штучна одночасно));
- за напрямком потоку повітря – припливна, витяжна, припливно-витяжна;
- за місцем дії – загальнообмінна, місцева, комбінована.

Штучна (механічна) вентиляція, на відміну від природної, дає можливість очищувати повітря перед його викидом в атмосферу, вловлювати шкідливі речовини безпосередньо біля місць їх утворення, обробляти припливне повітря (очищувати, підігрівати, зволожувати), більш цілеспрямовано подавати повітря в робочу зону. Окрім того, механічна вентиляція дає можливість організувати повітрязабір в найбільш чистій зоні території підприємства і навіть за її межами.

Штучна вентиляція забезпечує створення необхідного мікроклімату та чистоти повітряного середовища у всьому об'ємі робочої зони приміщення. Вона застосовується для видалення надлишкового тепла при відсутності токсичних

виділень, а також у випадках, коли характер технологічного процесу та особливості виробничого устаткування виключають можливість використання місцевої витяжної вентиляції.

Загальнообмінна вентиляція. Розрізняють чотири основні схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції: згори вниз, згори вгору, знизу вгору, знизу вниз (*рис. А.1*).

Схеми згори вниз (*рис. А.1, а*) та згори вгору (*рис. А.1, б*) доцільно застосовувати у випадку, коли припливне повітря в холодний період року має температуру, нижчу за температуру приміщення. Припливне повітря перш ніж досягти робочої зони нагрівається за рахунок повітря приміщення. Інші дві схеми (*рис. А.1, в* та *рис. А.1, г*) рекомендується використовувати тоді, коли припливне повітря в холодний період року підігрівається і його температура вища за температуру внутрішнього повітря.

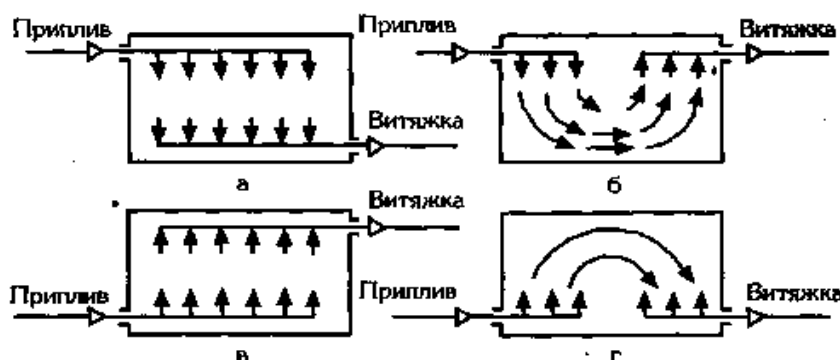


Рисунок А.1 – Схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції

Якщо у виробничих приміщеннях виділяються гази та пари з густиною, що перевищує густину повітря (наприклад, пари кислот, бензину, гасу), то загальнообмінна вентиляція повинна забезпечити видалення 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% – з верхньої.

Якщо густина газів менша за густину повітря, то видалення забрудненого повітря здійснюється у верхній зоні.

Припливна вентиляція. Схема припливної механічної вентиляції (*рис. А.2*) включає: повітрозабірний пристрій 1; фільтр для очищення повітря 2;

повітрянагрівач (калорифер) 3; вентилятор 5; мережу повітроводів 4 та припливні патрубки з насадками 6. Якщо немає необхідності підігрівати припливне повітря, то його пропускають безпосередньо у виробничі приміщення через обвідний канал 7.

Повітрязбірні пристрої необхідно розташовувати в місцях, де повітря не забруднене пилом та газами. Вони повинні знаходитись не: нижче 2 м від рівня землі, а від викидних каналів витяжної вентиляції по вертикалі – нижче 6 м і по горизонталі – не ближче 25 м.

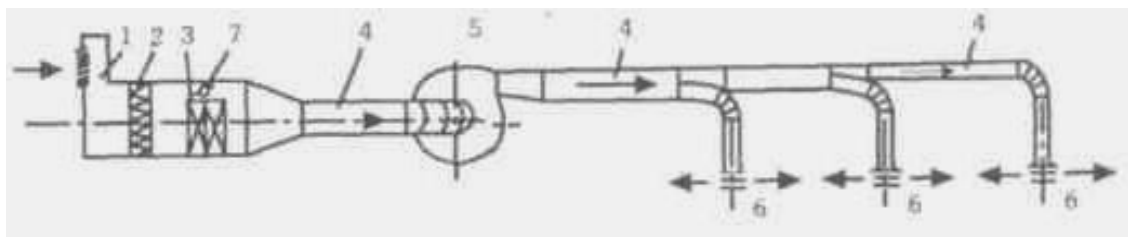


Рисунок А.2 – Схема припливної вентиляції

Припливне повітря подається в приміщення, як правило, розсіяним потоком для чого використовуються спеціальні насадки.

Витяжна та припливно-витяжна вентиляція. Витяжна вентиляція (рис. А.3) складається із очисного пристрою 1, вентилятора 2, центрального 3 та відсмоктуючих повітроводів 4.

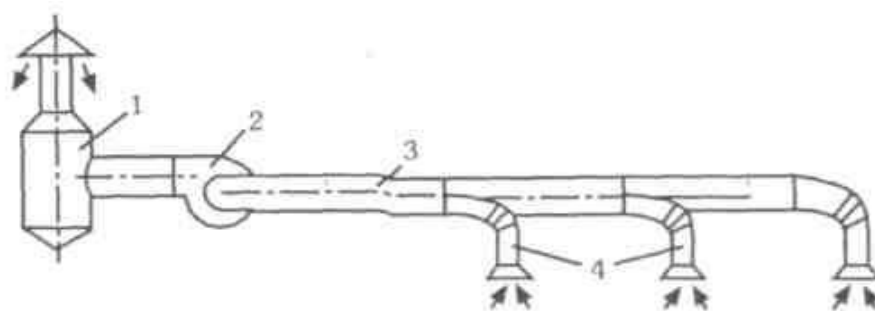


Рисунок А.3 – Схема витяжної вентиляції

Повітря після очищення необхідно викидати на висоті не менше ніж 1 м над гребенем даху. Забороняється робити викидні отвори безпосередньо у вікнах. В умовах промислового виробництва найбільш розповсюджена припливно-витяжна система вентиляції із загальним припливом в робочу зону та

місцевою витяжкою шкідливих речовин безпосередньо з місць їх утворення.

У виробничих приміщеннях, де виділяється значна кількість шкідливих газів, парів, пилю витяжка повинна бути на 10 % більшою ніж приплив, щоб шкідливі речовини не витіснялись у суміжні приміщення з меншою шкідливістю.

В системі припливно-витяжної вентиляції можливе використання не лише зовнішнього повітря, але й повітря самих приміщень після його очищення. Таке повторне використання повітря приміщень називається рециркуляцією і здійснюється в холодний період року для економії тепла, витраченого на підігрівання припливного повітря. Однак можливість рециркуляції обумовлюється цілою низкою санітарно-гігієнічних та протипожежних вимог.

Для розрахунку штучної вентиляції в цеху, де відбувається приготування формовочних сумішей, будемо застосовувати комбіновану штучну вентиляцію. Оскільки в технологічних процесах виділяється значна кількість теплоти, ми будемо застосовувати всмоктувальну панель для відводу тепла, а для вилучення шкідливих речовин застосуємо витяжний зонт (*рис. А.4*).

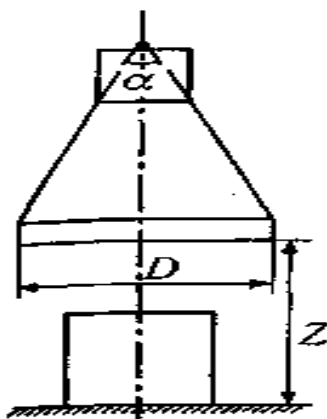


Рисунок А.4 – Витяжний зонт

Розрахунок проведемо у відповідності з методикою, наведеною у [14].

Початкові дані:

– розміри зонту: $a = 1,5 \text{ м}^2$;

$b = 0,8 \text{ м}^2$;

$$l = 1,4 \text{ м};$$

$$- H = 0,7 \text{ м};$$

$$- Q = 69961 \text{ ккал/год.}$$

Розрахунок

Кількість повітря, що вилучається витяжним зонтом визначаємо за формулою:

$$L = a \cdot b \cdot v \cdot 3600, \quad (\text{A.1})$$

де v – швидкість повітря, що вилучається, в площині перетину по краю зонта, м/с.

Середня швидкість руху забрудненого потоку повітря в приймальному отворі зонта повинна бути :

$$v_{\text{сер}} = 1,05 \dots 1,25 \text{ м/с} - \text{зонт відкритий з 4-х сторін};$$

$$v_{\text{сер}} = 0,9 \dots 1,05 \text{ м/с} - \text{зонт відкритий з 3-х сторін};$$

$$v_{\text{сер}} = 0,75 \dots 0,9 \text{ м/с} - \text{зонт відкритий з 2-х сторін};$$

$$v_{\text{сер}} = 0,5 \dots 0,75 \text{ м/с} - \text{зонт відкритий з однієї сторони.}$$

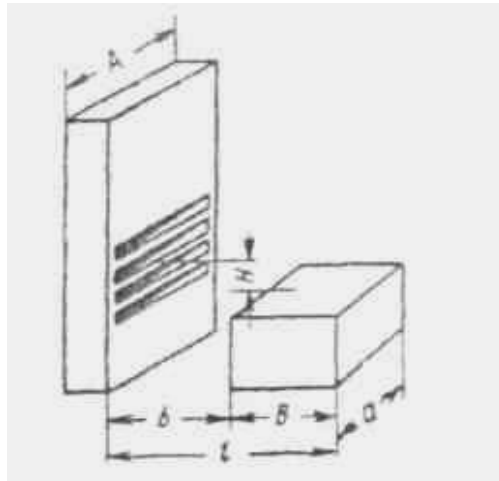


Рисунок А.5 – Схема всмоктувальної панелі

Обравши мінімальний варіант, можемо з виразу (А.1) отримати:

$$L = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,5 \cdot 3600 = 2160 \text{ м}^3/\text{Год.}$$

Об'єм повітря, що вилучається панеллю, визначаємо за формулою:

$$L_{II} = c \cdot Q^{\frac{1}{3}} \cdot (H + B)^{\frac{5}{3}}, \quad (\text{A.2})$$

де c – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструкції панелі та її розташування відносно джерела виділення тепла;

Q – кількість тепла, яка виділяється джерелом, ккал/год.;

H – відстань від верхньої площини джерела до центру всмоктування панелі, м;

B – ширина джерела, м.

Коефіцієнт c для панелі без екрана:

$$c = 240 \left(\frac{l}{H + B} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (\text{A.3})$$

Підставивши значення величин, одержуємо:

$$c = 240 \cdot \left(\frac{1,4}{0,7 + 1} \right)^{\frac{2}{3}} = 212.$$

Об'єм повітря, що вилучається панеллю:

$$L_{II} = 212 \cdot 69961^{\frac{1}{3}} \cdot (0,7 + 1)^{\frac{5}{3}} = 21150 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Загальний об'єм повітря, що вилучається:

$$L_3 = L + L_{II}. \quad (\text{A.4})$$

$$L_3 = 2160 + 21150 = 23310 \text{ м}^3/\text{год.}$$