

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

СЕНЬКІВ Олександр Іванович

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА СКЛА. /AUTOMATED CONTROL SYSTEM
FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF GLASS PRODUCTION

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача першого (бакалаврського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТ–41
О. І. Сеньків

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Николайчук Я. М.

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2026 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сегін
"___"._____ 2025р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Сеньківу Олександрові Івановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система автоматизованого управління технологічним процесом виробництва скла. /Automated control system for the technological process of glass production.

керівник роботи д.т.н., проф. Николайчук Я. М.

затверджено наказом по університету від « 1 » грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Характеристики технологічного процесу виробництва скла.
2. Вимоги до системи автоматизованого управління процесом виробництва скла, зокрема, регулювання температура в печі варки.
3. Вимоги до апаратного та програмного забезпечення системи автоматизованого управління процесом виробництва скла.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Проаналізувати технологічний процес варіння скломаси та визначити його основні параметри.
2. Побудувати математичні моделі та передаточні функції основного і допоміжного каналів, розробити каскадну систему регулювання та визначити оптимальні параметри налаштування регуляторів.
3. Розробити архітектуру системи автоматизованого управління із застосуванням сучасних контролерів та SCADA-програмного забезпечення.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Технологічна схема скловарної печі.
2. Структурні схеми одноконтурної та каскадної систем автоматичного регулювання.
3. Моделі одноконтурної і каскадної САР в Simulink та графіки перехідних процесів їх роботи.
4. Архітектура системи автоматизованого управління скловарною піччю.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Николайчук Я. М.		
2	Николайчук Я. М.		
3	Николайчук Я. М.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу виробництва скла та аналіз скловарної печі як об'єкта управління	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	виконано
2	Розрахунок системи автоматичного регулювання температури в зоні освітлення скловарної печі	16.02. 2026р.– 15.03.2026р.	виконано
3	Архітектура системи автоматизованого управління процесом варки скла в печі та її апаратно-програмне забезпечення	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026 р. – 25.05.2026 р.	виконано

Студент

Сеньків О. І.

(підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Николайчук Я.М.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Сеньків О. І. Система автоматизованого управління технологічним процесом виробництва скла. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійною програмою – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2026.

У кваліфікаційній роботі розроблено систему автоматизованого управління технологічним процесом варіння скла з використанням сучасних технічних і програмних засобів, що забезпечує підвищення якості регулювання температури в скловарній печі шляхом впровадження каскадної системи автоматичного регулювання.

ANNOTATION

Senkiv O. I. Automated control system for the technological process of glass production. – Manuscript.

Research for obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 – Automation and computer-integrated technologies, educational and professional program - Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2026.

The qualification work presents the development of an automated control system for the glass melting technological process using modern hardware and software tools, which ensures improved temperature regulation quality in the glass furnace through the implementation of a cascade automatic control system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СКЛА ТА АНАЛІЗ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ ЯК ОБ’ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	11
1.1. Загальний огляд технологічного процесу виготовлення скла..	11
1.2 Опис технологічного процесу отримання скломаси у скловарній печі.....	14
1.3 Аналіз скловарної печі як об’єкта керування.....	18
2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗОНІ ОСВІТЛЕННЯ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ.....	22
2.1 Визначення динамічних характеристик скловарної печі.....	22
2.2 Розрахунок системи автоматичного регулювання температури в печі.....	23
2.3 Розрахунок одноконтурної системи автоматичного регулювання.....	28
2.4 Розрахунок каскадної системи автоматичного регулювання.....	31
2.5 Порівняльний аналіз одноконтурної та каскадної систем автоматичного регулювання.....	39
3. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВАРКИ СКЛА В ПЕЧІ ТА ЇЇ АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	43
3.1. Архітектура системи автоматизованого управління скловарною піччю та підбір апаратних засобів.....	43
3.2 SCADA-система на платформі AVEVA System Platform.....	49

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Система автоматизованого управління технологічним процесом виробництва скла	Лім.	Арк.	Акрушів
Розроб		Михальчук М.В.					6	59
Перевір		Николаичук Я. М.						
Консульт.		Николаичук Я. М.						
Н. Контр.		Заставний О.М.				ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41		
Затверд.		Сегін А.І.						

ВИСНОВКИ..... 54

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 56

ДОДАТКИ..... 59

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне скловиробництво характеризується високими вимогами до якості продукції [1], стабільності технологічних режимів та енергоефективності [2]. Процес варіння скломаси є складним теплотехнічним процесом із значною інерційністю, великою кількістю взаємопов'язаних параметрів і суттєвим впливом зовнішніх збурень [3-4]. Одним із ключових факторів, що визначає якість готової продукції, є точність підтримання температурного режиму в різних зонах скловарної печі, особливо в зоні освітлення [5]. Традиційні одноконтурні системи регулювання не завжди забезпечують необхідну швидкодію та точність, що призводить до підвищення енергоспоживання і збільшення кількості браку. У зв'язку з цим актуальним є впровадження сучасних автоматизованих систем управління із застосуванням каскадних методів регулювання, промислових контролерів нового покоління та сучасного SCADA-програмного забезпечення, що дозволяє значно підвищити ефективність виробництва.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у розробленні системи автоматизованого управління технологічним процесом варіння скла з використанням сучасних технічних і програмних засобів, а також у підвищенні якості регулювання температури в скловарній печі шляхом впровадження каскадної системи автоматичного регулювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання.

1. Проаналізувати технологічний процес варіння скломаси та визначити його основні параметри;
2. Дослідити скловарну піч як об'єкт автоматичного керування та виділити регульовані, керуючі й збурюючі величини;
3. Отримати та проаналізувати динамічні характеристики об'єкта;
4. Побудувати математичні моделі та передавальні функції основного і допоміжного каналів;

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

5. Виконати синтез одноконтурної системи автоматичного регулювання температури;
6. Розробити та обґрунтувати каскадну систему регулювання;
7. Визначити оптимальні параметри налаштування регуляторів із використанням інженерних методів;
8. Провести порівняльний аналіз ефективності одноконтурної та каскадної систем;
9. Розробити функціональну схему автоматизованої системи управління із застосуванням сучасних контролерів Schneider Modicon M580;
10. Обґрунтувати вибір SCADA-програмного забезпечення, зокрема Ignition SCADA, та розробити елементи візуалізації процесу; оцінити практичну ефективність запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес варіння скломаси у скловарній печі.

Предметом дослідження є автоматизована система управління температурним режимом скловарної печі.

Методи дослідження. У роботі використано методи математичного моделювання та теорії автоматичного керування для аналізу динамічних характеристик об'єкта, методи ідентифікації та побудови передаточних функцій, а також інженерні методи синтезу регуляторів, зокрема метод Циглера–Нікольса. Для дослідження поведінки системи та визначення оптимальних параметрів регуляторів застосовано комп'ютерне моделювання. Також використано методи порівняльного аналізу для оцінювання ефективності одноконтурної та каскадної систем регулювання.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості впровадження розробленої автоматизованої системи управління на реальному виробництві. Запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення точності підтримання температурного режиму, зменшення динамічних відхилень та часу перехідних процесів, що сприяє покращенню

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

якості скломаси та зниженню кількості браку. Використання сучасних контролерів і SCADA-систем дозволяє підвищити надійність роботи обладнання, оптимізувати енергоспоживання, а також забезпечити можливість моніторингу та керування технологічним процесом у реальному часі.

Апробація результатів роботи

О. Сеньків, А. Гетьман. Каскадна система автоматичного регулювання температури в скловарній печі. // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С. 17-23.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СКЛА ТА АНАЛІЗ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

1.1. Загальний огляд технологічного процесу виготовлення скла

Основою для виготовлення скла є спеціальна суміш компонентів, яку називають шихтою. До складу шихти входять кварцовий пісок, сода, вапняк, доломіт та інші добавки, що забезпечують необхідні фізичні та хімічні властивості готового матеріалу. Основним компонентом є кварцовий пісок, який містить значну кількість діоксиду кремнію. Саме він утворює основу майбутнього скла та визначає його прозорість і міцність [2].

Сода використовується для зниження температури плавлення суміші, що дозволяє зменшити витрати енергії під час процесу варіння. Вапняк і доломіт додають для підвищення хімічної стійкості скла та покращення його механічних властивостей. У деяких випадках до шихти додають спеціальні барвники або домішки, які змінюють колір скла чи надають йому додаткових характеристик.

Перед подачею до печі всі компоненти ретельно подрібнюються, очищуються від сторонніх домішок та змішуються у визначених пропорціях. Від точності дозування залежить стабільність складу скломаси та якість кінцевої продукції. Значну роль у виробництві також відіграє склобій — подрібнене відпрацьоване скло, яке додають до шихти для прискорення плавлення та зменшення витрат сировини.

Одним із головних етапів виробництва є варіння скломаси у скловарній печі. Саме в печі відбувається плавлення шихти та утворення однорідного скляного розплаву. У сучасній промисловості найчастіше використовуються ванні скловарні печі безперервної дії, які забезпечують постійне надходження шихти та безперервне отримання готової скломаси.

У процесі роботи печі температура всередині може досягати 1400–

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1600 °С. За таких умов тверді компоненти шихти поступово плавляться та перетворюються на рідку масу. На початковому етапі нагрівання відбувається випаровування вологи та розкладання окремих компонентів суміші. Після цього починається активне плавлення матеріалу та формування скломаси.

У процесі варіння важливу роль відіграє рівномірний розподіл температури всередині печі [5-7]. Нерівномірне нагрівання може призвести до утворення дефектів, бульбашок або сторонніх включень у готовому склі. Для забезпечення стабільного температурного режиму використовуються пальники, які працюють на природному газі або інших видах палива [8-9]. Повітря, необхідне для горіння, подається через спеціальні регенератори, де воно попередньо нагрівається теплом відхідних газів.

Після плавлення шихти скломаса переходить до зони освітлення. На цьому етапі з розплаву видаляються дрібні бульбашки газу та сторонні домішки. Процес освітлення є дуже важливим, оскільки навіть незначні дефекти можуть погіршити якість готового виробу. Після очищення скломаса надходить у робочу зону, де підтримується стабільна температура перед подальшим формуванням виробів.

Після завершення процесу варіння готова скломаса надходить через спеціальні канали до обладнання для формування виробів. Температура розплаву на цьому етапі повинна бути строго визначеною, оскільки надмірно гаряча або недостатньо нагріта скломаса не дозволяє отримати вироби необхідної форми та якості.

Одним із найпоширеніших способів формування є видування. Цей метод широко використовується для виготовлення пляшок, банок та інших порожнистих виробів. Розплавлене скло надходить у форму, після чого за допомогою стисненого повітря йому надається необхідна форма. Для виробництва листового скла застосовують метод флоат-процесу, під час якого скляний розплав рівномірно розтікається по поверхні розплавленого

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

олова, утворюючи гладку поверхню.

Після формування вироби мають дуже високу температуру, тому їх необхідно поступово охолодити. Різке охолодження може викликати появу внутрішніх напружень та руйнування матеріалу. Для цього використовується процес відпалу, під час якого скло повільно охолоджується у спеціальних печах. Завдяки цьому матеріал набуває необхідної міцності та стійкості до механічних навантажень.

Після завершення охолодження готові вироби проходять контроль якості. Перевіряється наявність тріщин, бульбашок, нерівностей та інших дефектів. Вироби, які відповідають встановленим вимогам, надходять на пакування та подальше транспортування.

Сучасні скляні заводи (рисунок 1.1) активно використовують автоматизовані системи керування технологічними процесами. Автоматизація дозволяє підтримувати стабільні параметри роботи обладнання, зменшити витрати енергії та підвищити якість готової продукції. Особливу увагу приділяють контролю температури в скловарних печах та живильниках.



Рисунок 1.1 – Завод виробництва скла та його технологічна лінія.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для вимірювання температури застосовуються пірометри та термопари, сигнали від яких надходять до систем автоматичного регулювання. На основі отриманих даних система змінює подачу газу та повітря до пальників, забезпечуючи підтримання заданого температурного режиму. Також контролюється тиск газу, витрата повітря та рівень скломаси у печі.

Важливу роль у сучасному виробництві відіграють каскадні системи автоматичного регулювання, які дозволяють швидше реагувати на зміни технологічного процесу та зменшувати вплив зовнішніх збурень. Використання таких систем забезпечує стабільність роботи печі та покращує якість скломаси.

Автоматизація виробництва дозволяє не лише підвищити ефективність технологічного процесу, а й знизити кількість браку та витрати енергоресурсів. Крім того, автоматизовані системи сприяють підвищенню безпеки праці персоналу, оскільки значна частина операцій виконується без безпосереднього втручання людини.

1.2 Опис технологічного процесу отримання скломаси у скловарній печі

Процес виробництва скломаси включає варіння шихти у скловарній печі та забезпечення необхідного температурного режиму в живильниках. Для приготування скломаси використовується скловарна піч із поперечним напрямком полум'я (рисунок 1.2).

Конструктивно піч поділяється на три основні зони: зону варіння, зону освітлення та робочу зону (рисунок 1.3). У зоні варіння відбувається плавлення компонентів шихти, у зоні освітлення скломаса очищується від бульбашок повітря та сторонніх домішок, а в робочій зоні завершується

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

процес приготування готового розплаву.

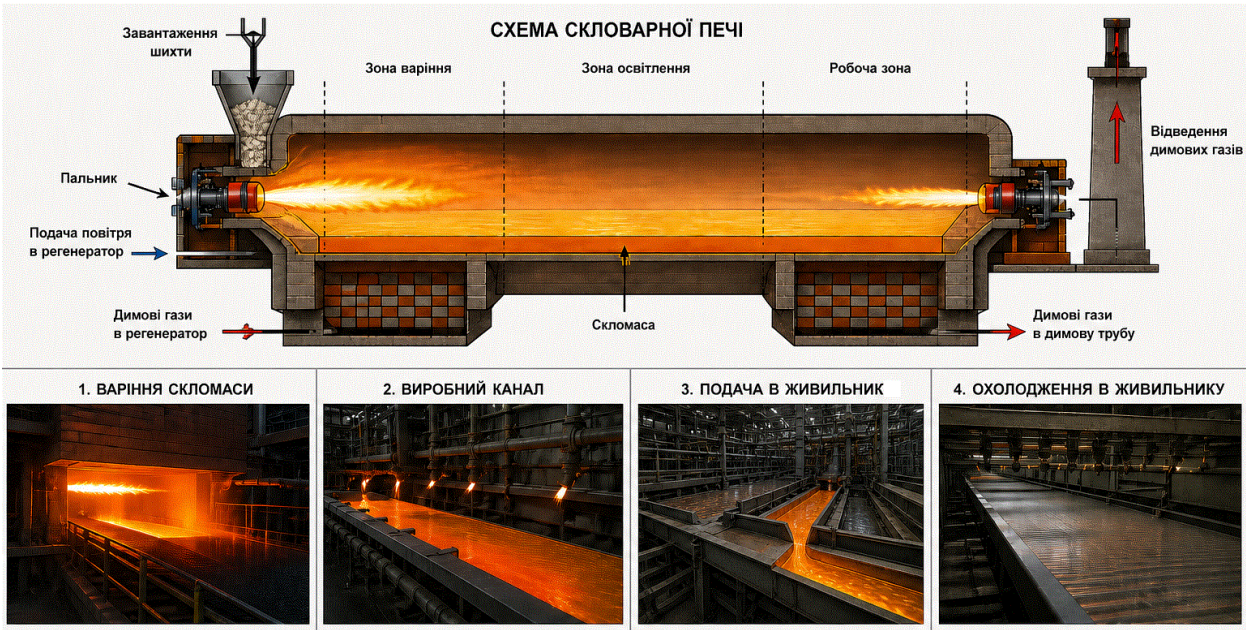


Рисунок 1.2 – Скловарна піч з поперечним напрямом полум'я для виробництва листового скла та послідовність технологічного процесу.

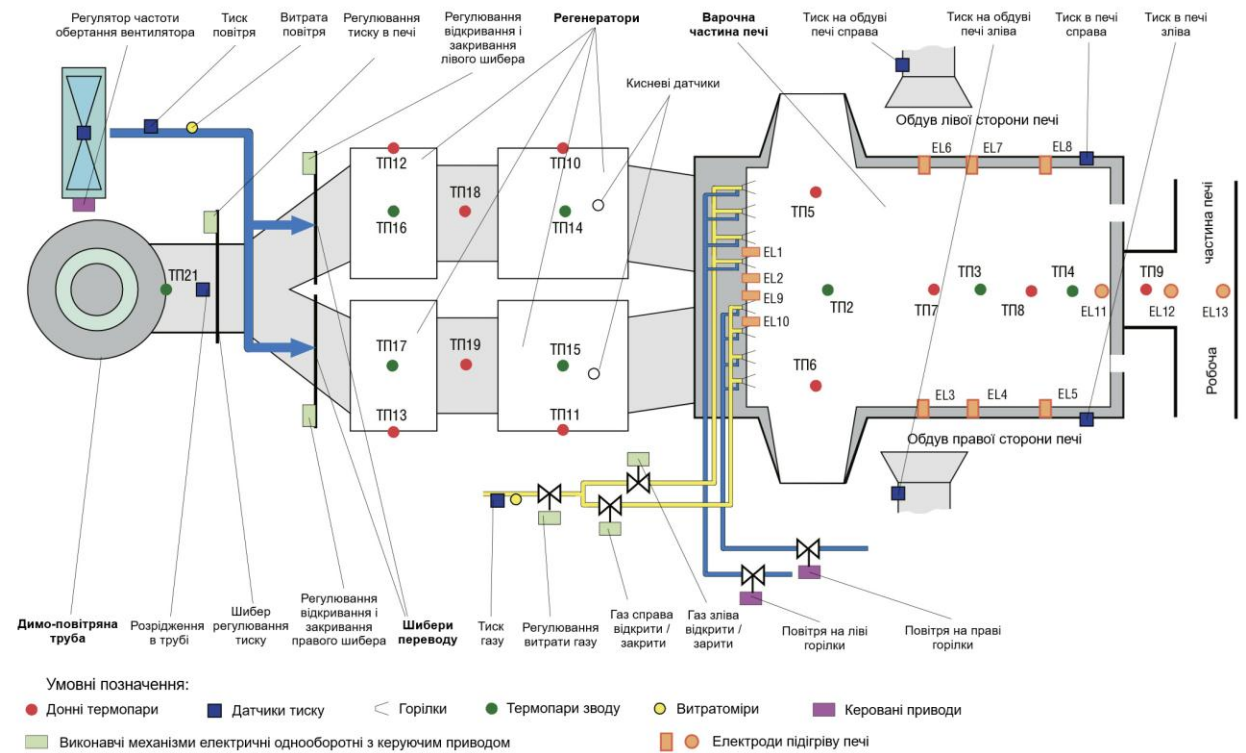


Рисунок 1.3 – Технологічна схема скловарної печі.

Пальники розміщені по обидва боки печі, по два з кожної сторони для кожної технологічної зони. Процес горіння здійснюється поперемінно: полум'я подається то з одного, то з іншого боку печі, а напрямок змінюється через кожні 30 хвилин. До пальників подається природний паливний газ, згоряння якого відбувається за наявності повітря. Повітря нагнітається повітродувками в регенератори, розташовані з двох сторін печі, де воно попередньо нагрівається за рахунок тепла печі. Продукти згоряння у вигляді димових газів виводяться через димову трубу в атмосферу.

Шихта разом зі склобомом надходить у скловарну піч, де здійснюється її плавлення. Особливістю промислового процесу скловаріння є необхідність розплавлення значних об'ємів шихти за відносно короткий проміжок часу. У ванних скловарних печах нагрівання шихти відбувається внаслідок теплового випромінювання гарячих газів і кладки печі, конвективного перенесення тепла від полум'я, теплопередачі всередині шару шихти, а також передачі тепла від розплавленої скломаси знизу.

Оскільки швидкість руху газів у робочому просторі печі є невеликою, вплив конвективного теплообміну незначний. Через високу теплову інерційність шихти внутрішньою теплопередачею також можна частково знехтувати. Таким чином, основна частина тепла передається шихті шляхом випромінювання з боку полум'я та від нагрітої скломаси. Саме тому швидкість прогрівання шихти до температури плавлення є одним із головних факторів, що визначають ефективність процесу скловаріння.

Подача шихти в піч здійснюється завантажувачем у вигляді поздовжніх гряд висотою приблизно 150–250 мм. Після потрапляння в зону високих температур поверхня шихти швидко оплавляється, утворюючи тонкий рухомий шар розплаву. Під цим шаром формується пластична маса, що складається з твердих і рідких фаз. Через недостатню кількість рідкої складової цей шар залишається малорухомим. Нижче розташовується менш прогріта шихта з температурою приблизно 100–300 °С.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для інтенсивного перемішування шарів шихти та скломаси знизу в піч подається повітря за допомогою повітродувки. У процесі нагрівання та плавлення поступово відбувається стікання шару розплаву, що відкриває нові шари шихти для подальшого плавлення. Такі процеси спричиняють зміну висоти та об'єму шару шихти. Швидкість цих змін визначається співвідношенням між швидкістю утворення розплаву та швидкістю його стікання. Основний вплив на цей процес має температура в зоні варіння.

Після завершення процесу плавлення готова скломаса через виробний канал надходить до живильників. Основне призначення живильника полягає у поступовому охолодженні скломаси до температури, необхідної для формування виробів. Для кожного типу продукції встановлюється власний температурний режим, який необхідно підтримувати з високою точністю. Навіть незначні відхилення температури можуть призвести до збільшення кількості браку та погіршення якості готових виробів.

На підприємстві скломаса з печі розподіляється виробним каналом на три живильники, кожен з яких орієнтований на виготовлення окремого виду продукції. Наприкінці кожного живильника встановлена склоформувальна машина, яка формує пляшки та передає їх до печі відпалу.

Виробний канал виконує функцію розподілу потоку скломаси між живильниками та забезпечує підтримання необхідної температури на вході до кожного з них. Канал поділений на п'ять зон, у кожній із яких розташовані пальники для нагрівання скломаси. Живильники, у свою чергу, складаються з чотирьох зон, де здійснюється контроль та регулювання температури. Особливо важливим є точне підтримання температури в останніх зонах, оскільки це безпосередньо впливає на стабільність процесу формування виробів.

До складу технологічного обладнання входять конструкції живильників і виробного каналу, газорегуляторна установка, газозмішувальні установки, вентилятори високого тиску та пальникові пристрої.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Газорегуляторна установка забезпечує зниження та стабілізацію тиску газу, що надходить із заводської магістралі. Газозмішувальні установки формують необхідну газоповітряну суміш та підтримують задане співвідношення між газом і повітрям у всьому діапазоні роботи системи.

Пальникові пристрої призначені для спалювання природного газу з попереднім змішуванням із повітрям. До їх складу входять пальники, колектори розподілу суміші та вогнеперешкоджувачі, які запобігають проникненню полум'я у трубопроводи. Для подачі повітря використовуються вентилятори високого тиску, які працюють у парі: один є основним, а другий — резервним.

Контроль температури здійснюється за допомогою пірометрів, встановлених у виробному каналі та живильниках. Вони вимірюють температуру верхнього шару скломаси на виході кожної технологічної зони. Усього на підприємстві використовується три живильники для подачі скломаси до формувального обладнання.

Рух скломаси в живильниках забезпечується невеликим нахилом каналів та тиском розплаву в печі. Пальники розташовані над поверхнею рідкого скла з обох боків живильників і працюють на готовій газоповітряній суміші. Відведення димових газів відбувається природним способом через спеціальні башти у верхній частині конструкції. Для кожного живильника передбачена окрема газозмішувальна станція, що забезпечує незалежне регулювання режимів роботи.

1.3 Аналіз скловарної печі як об'єкта керування

На підприємстві для виготовлення скла використовується ванна скловарна піч із поперечним напрямком полум'я. Основним призначенням даної печі є отримання однорідної скломаси необхідного складу та високої

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

якості. Технологічно піч поділяється на три основні зони. У зоні варіння здійснюється плавлення компонентів шихти та початкове формування скломаси. Далі матеріал надходить до зони освітлення, де відбувається очищення скломаси від домішок і видалення дрібних бульбашок повітря. Після цього скломаса переходить у робочу зону, в якій завершується процес приготування очищеного скла.

Під час аналізу скловарної печі як об'єкта автоматичного керування [10] визначаються основні регульовані параметри, керуючі впливи та можливі збурення технологічного процесу (рисунок 1.4). До основних параметрів, що підлягають регулюванню, належать рівень скломаси в печі L , тиск і розрідження в робочому просторі P_p , температура газоповітряного середовища в зоні освітлення T , а також концентрація кисню у відхідних газах Q . Керування роботою печі здійснюється за рахунок зміни витрати паливного газу F_z , подачі повітря $F_{нов}$, кількості відхідних газів $F_{в.з.}$, подачі сировини $F_{сир}$ та витрати повітря на барботаж $F_{н.б.}$.

На стабільність технологічного процесу значно впливають зовнішні збурення. До вимірюваних збурювальних факторів належать параметри газу Q_z та повітря $Q_{нов}$, зокрема їх температура, тиск і вологість, а також параметри навколишнього середовища $Q_{н.с.}$. Крім цього, існують і невимірювані збурення, серед яких можна виділити зміну складу сировини Q_c та швидкість її переміщення V під час технологічного процесу.

Одним із найважливіших параметрів роботи скловарної печі є температура в зоні освітлення, оскільки саме вона суттєво впливає на якість скломаси та характеристики готової продукції. На підприємстві для підтримання необхідної температури використовується одноконтурна система автоматичного регулювання, у якій температура змінюється шляхом регулювання подачі паливного газу до пальників печі. Однак така система не

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

завжди забезпечує достатню швидкодію та точність регулювання при виникненні зовнішніх збурень.

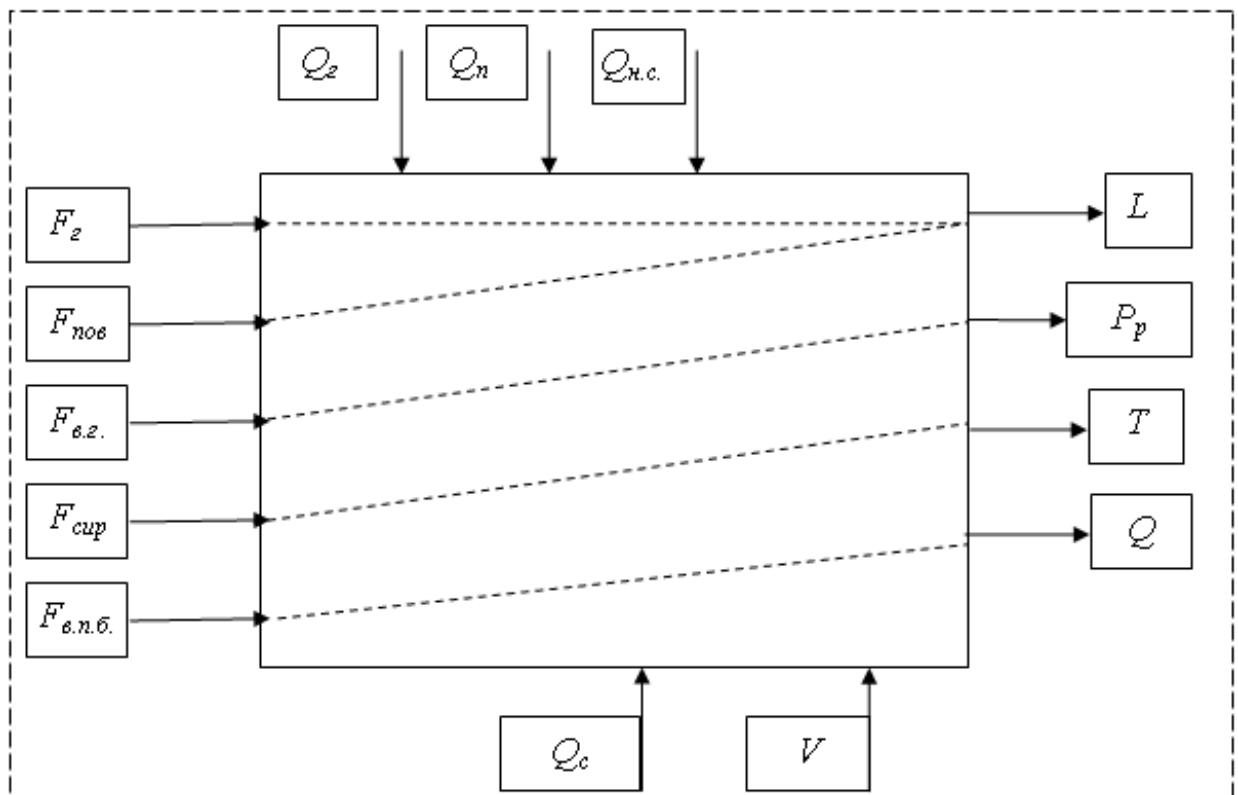


Рисунок 1.4 – Схематичне представлення печі як об'єкта управління;
вхідні параметри: F_z – витрати паливного газу; F_{nov} – подачі повітря;
 $F_{v.z.}$ – кількості відхідних газів; F_{cup} подачі сировини; $F_{v.n.b.}$ – витрати
повітря на барботаж;
вихідні параметри, що регулюються: L – рівень скломаси в печі, P_p – тиск і
розрідження в робочому просторі, T – температура газоповітряного
середовища в зоні освітлення, Q – концентрація кисню у відхідних газах
вимірювальні збурювальні фактори: Q_z і Q_{nov} – параметри газу та
повітря; $Q_{n.c.}$ – параметри навколишнього середовища
невимірювані збурення, Q_c – зміну складу сировини та V швидкість її
переміщення під час технологічного процесу.

З метою покращення динамічних характеристик процесу та підвищення ефективності керування доцільно застосувати каскадну систему автоматичного регулювання температури. Використання каскадної структури дозволяє зменшити динамічні відхилення параметрів та забезпечити більш стабільний режим роботи печі. Як допоміжну координату в такій системі пропонується використовувати витрату паливного газу, оскільки цей параметр швидше реагує на зміни режиму роботи печі та більш оперативно характеризує поточний стан технологічного процесу. У ролі регульованої величини в системі виступає витрата паливного газу, що подається до пальників скловарної печі.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗОНІ ОСВІТЛЕННЯ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

2.1 Визначення динамічних характеристик скловарної печі

Початковими даними для виконання розрахунків є графіки перехідних процесів об'єкта керування [11]. Для визначення динамічних характеристик скловарної печі за основним каналом керування було досліджено зміну температури в зоні освітлення під час ступінчастої зміни витрати природного паливного газу. Як вхідний збурювальний вплив приймалося відкриття регулювального клапана на лінії подачі природного газу на 5 %. У результаті експерименту було отримано графічну залежність зміни температури в зоні освітлення печі від часу, яка характеризує зміну температури за основною координатою. Відповідний графік розгону наведений на рисунку 2.1.

Подібним чином було отримано ще одну динамічну характеристику, що описує зміну витрати природного газу при відкритті клапана подачі газу на 5 %. За результатами вимірювань побудовано графік розгону для допоміжної координати, який наведений на рисунку 2.2.

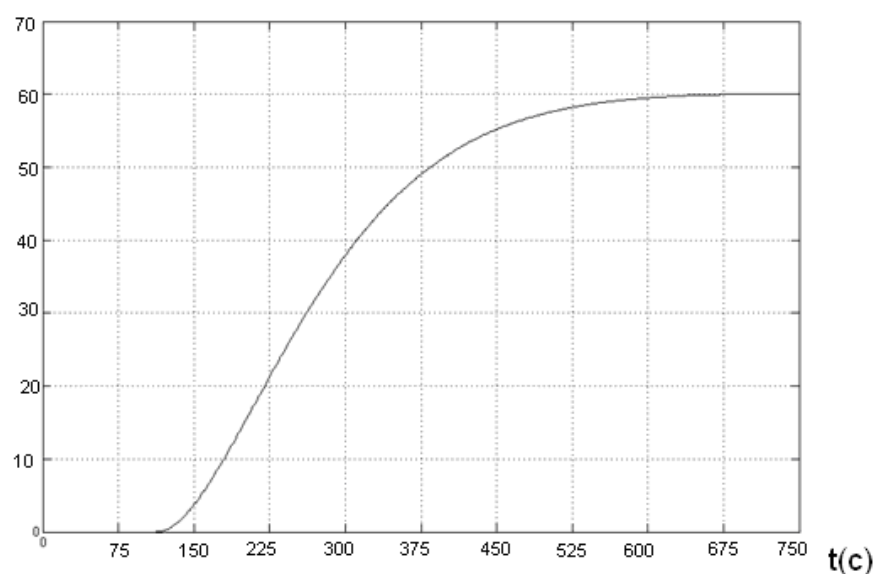


Рисунок 2.1 – Графік розгону для основної координати

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

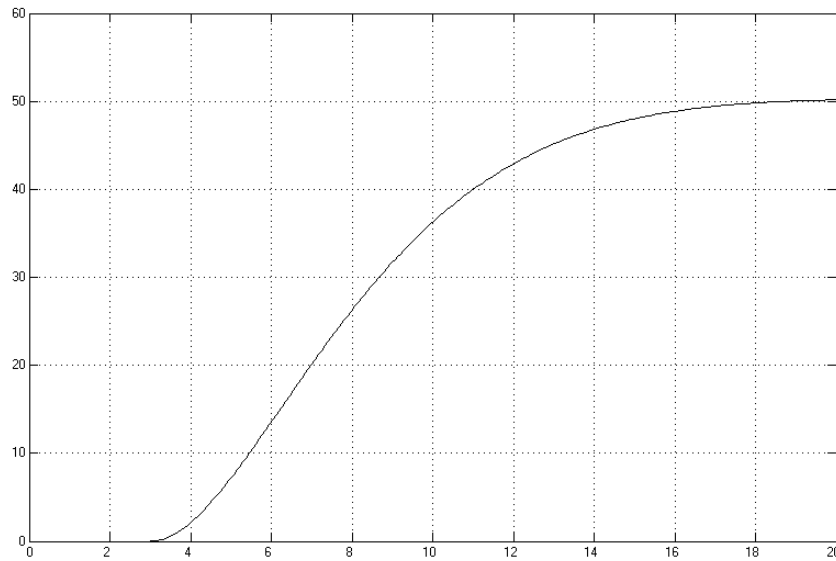


Рисунок 2.2 – Графік розгону для допоміжної координати.

2.2 Розрахунок системи автоматичного регулювання температури в печі

Передавальні функції об'єкта визначаються за методом Симою на основі отриманих експериментальних перехідних характеристик [12]. Отримані математичні залежності використовуються для подальшого розрахунку параметрів системи автоматичного регулювання (САР) та оцінки її динамічних властивостей.

$$W(p) = \frac{k}{F_3 p^3 + F_2 p^2 + F_1 p + 1} e^{-p\tau},$$

де

$$F_1 \approx \Delta t \left[\sum_{i=0}^n [(1 - \sigma(i \cdot \Delta t)) - 0,5(1 - \sigma(0))] \right]$$

$$F_2 \approx \Delta Q \left[\sum_{i=0}^n [(1 - \sigma(i \cdot \Delta Q)) \cdot (1 - i \cdot \Delta Q) - 0,5(1 - \sigma(0))] \right] \cdot F_1^2$$

$$F_2 \approx \Delta Q \left[\sum_{i=0}^n \left[(1 - \sigma) \cdot \left(1 - 2 \cdot \Delta Q + \frac{\Delta Q^2}{2} \right) - 0,5(1 - \sigma(0)) \right] \right] \cdot F_1^3.$$

Передавальна функція основного каналу характеризується коефіцієнтом підсилення $K=12$. Час запізнювання об'єкта становить $\tau=112,5\text{с}$. Для чисельника передавальної функції прийнято коефіцієнт $b[0]=1$. Коефіцієнти знаменника мають такі значення: $F[0] = 1$, $F1=120,25\text{с}$, $F2=2945,\text{с}^2$ та $F3=1000\text{с}^3$. На основі отриманих параметрів сформовано передавальну функцію основного каналу системи керування.

$$W_T(p) = \frac{60 * e^{-112,5\tau}}{1000p^3 + 2945.42p^2 + 120.25p + 1}.$$

Для допоміжного каналу передавальна функція має коефіцієнт підсилення $K=10$, а час запізнювання складає $\tau=3\text{с}$. У чисельнику передавальної функції коефіцієнт прийнято рівним $b[0]=1$. Коефіцієнти знаменника становлять: $F[0]=1, F[1]=3\text{с}$, $F[2]=1,5625\text{с}^2$ та $F[3]= 0,5 \text{с}^3$. За цими параметрами визначено передавальну функцію допоміжного каналу.

$$W_F(p) = \frac{50 * e^{-3\tau}}{0.5p^3 + 1.5625p^2 + 3p + 1}.$$

На основі отриманих передавальних функцій виконуються подальші розрахунки частотних характеристик основного каналу системи автоматичного регулювання: комплексна частотна характеристика (КЧХ) (рисунок 2.3); амплітудо-частотна характеристика (АЧХ) (рисунок 2.4); фазо-частотна характеристика (ФЧХ) (рисунок 2.5).

Відповідні частотні характеристики допоміжного каналу, КЧХ, АЧХ та ФЧХ, будуть мати вигляд представлений графіками на рисунках 2.6-2.8.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

К Ч Х

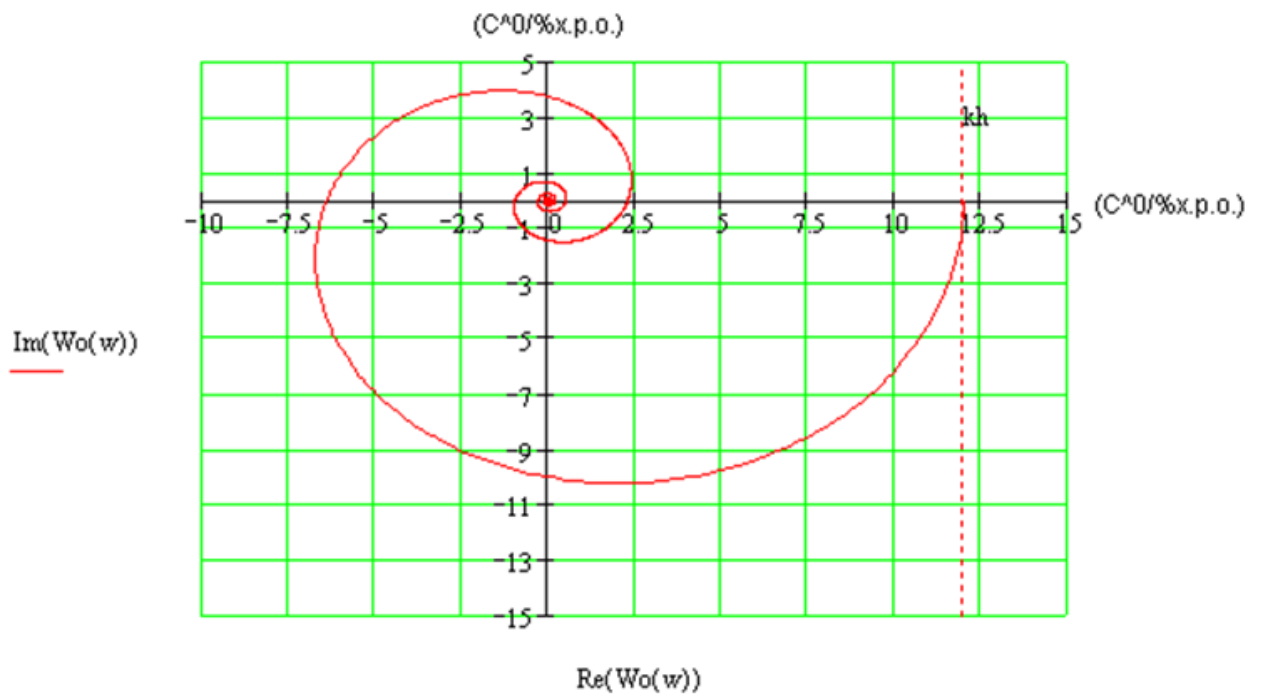


Рисунок 2.3 – Комплексна частотна характеристика основного каналу

А Ч Х

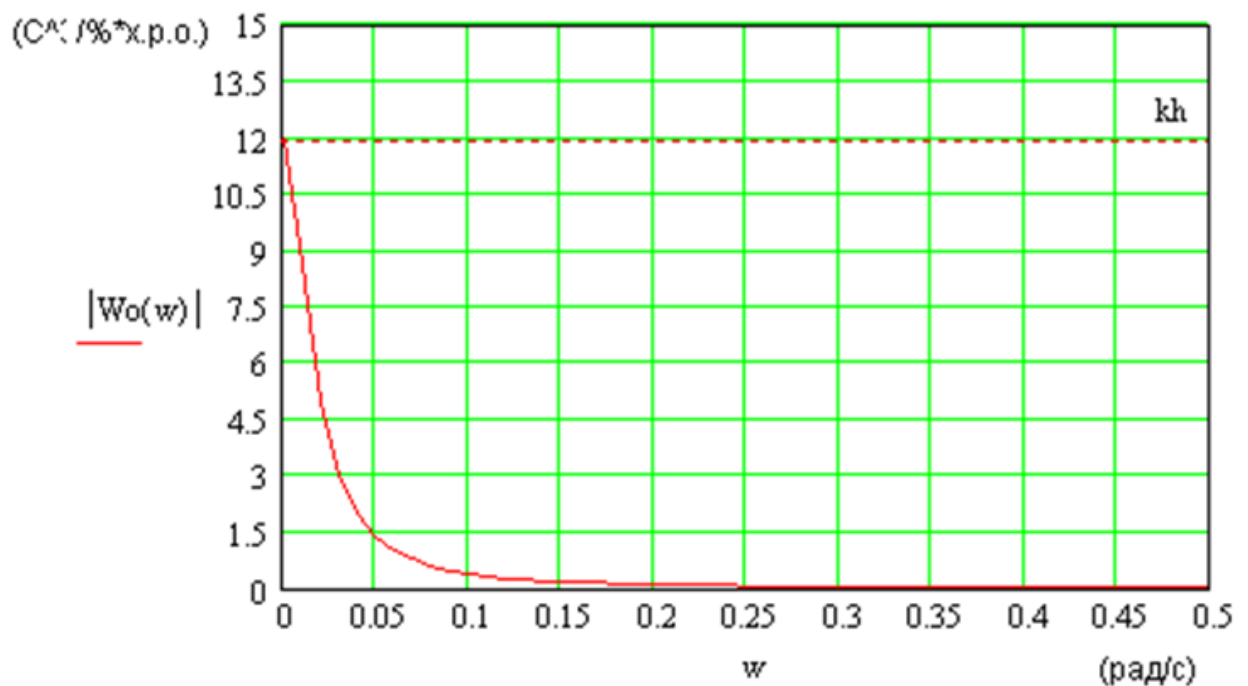


Рисунок 2.4 – Амплітудно-частотна характеристика основного каналу

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ

Арк.

25

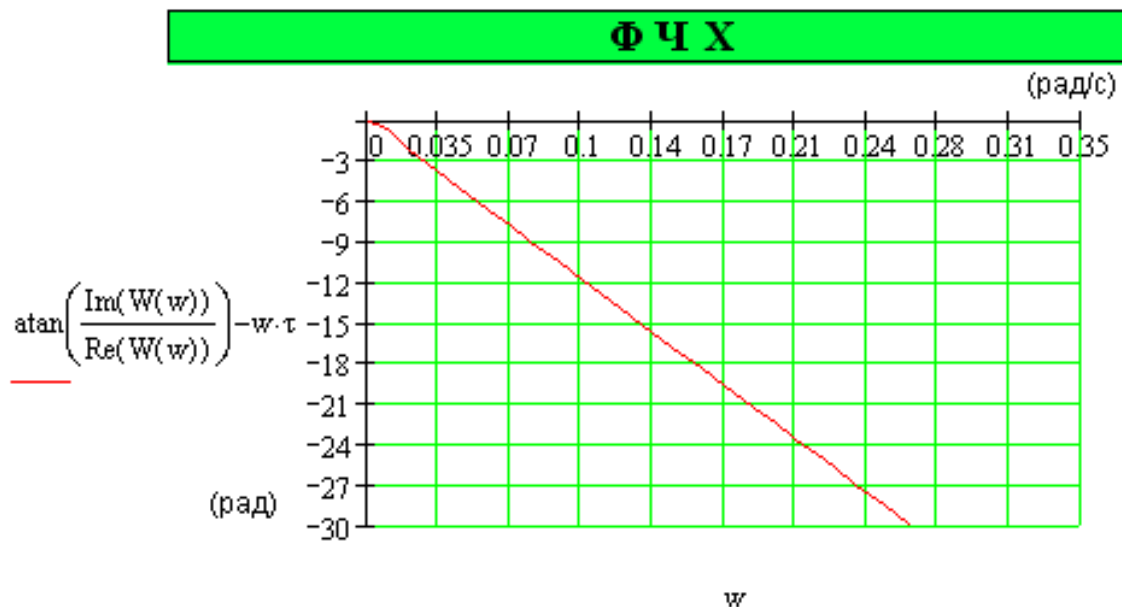


Рисунок 2.5 – Фазо-частотна характеристика основного каналу

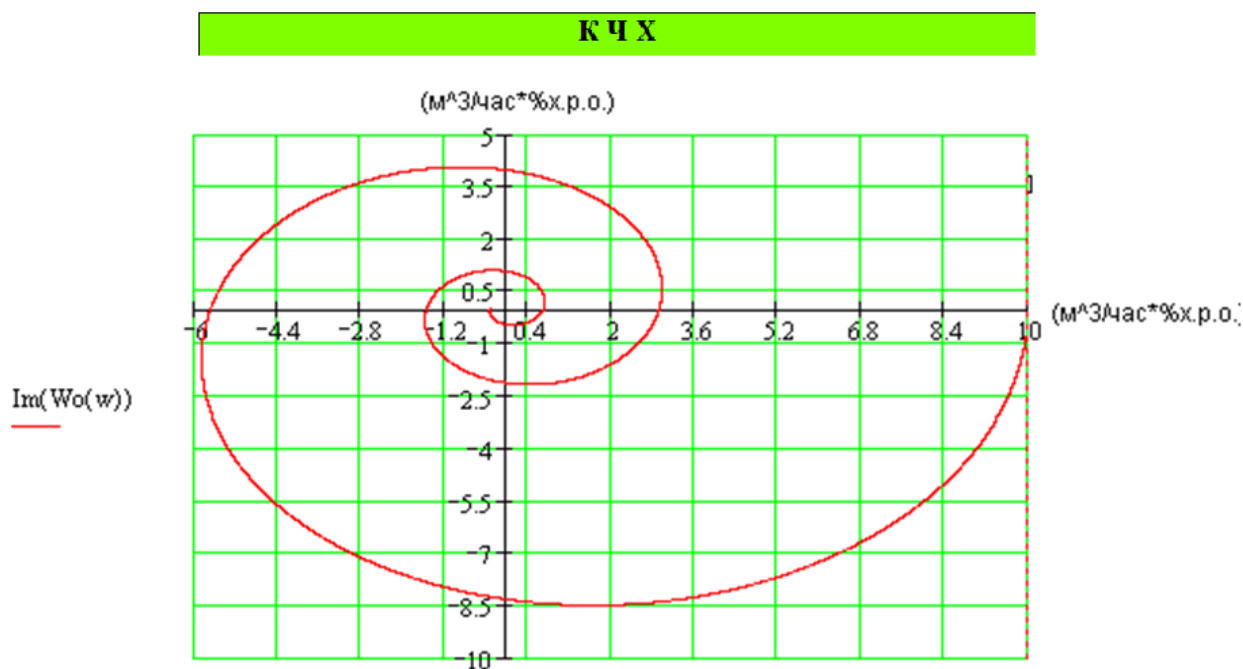


Рисунок 2.6 – Комплексна частотна характеристика допоміжного каналу

А Ч Х

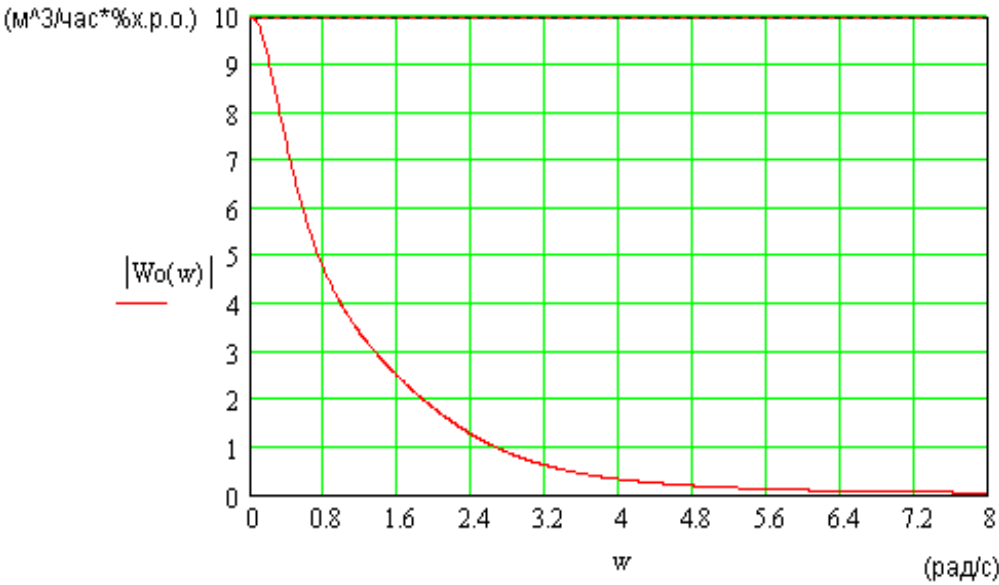


Рисунок 2.4 – Амплітудно-частотна характеристика допоміжного каналу

Ф Ч Х



Рисунок 2.8 – Фазо-частотна характеристика допоміжного каналу

2.3 Розрахунок одноконтурної системи автоматичного регулювання

Під час розрахунку параметрів автоматичної системи регулювання необхідно визначити оптимальні налаштування регуляторів. Для одноконтурної системи підтримання температури (рисунок 2.9) в зоні освітлення скловарної печі обрано ПІ-закон регулювання, оскільки він забезпечує астатичний режим роботи системи та дозволяє досягти достатньо високої якості регулювання технологічного процесу.

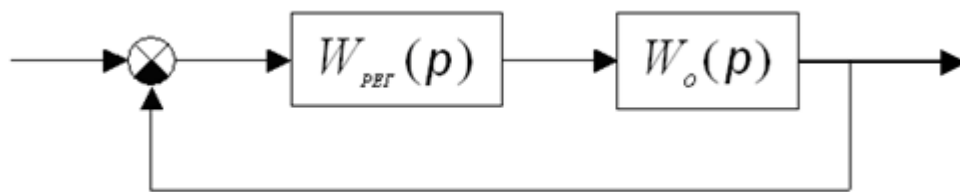


Рисунок 2.9 – Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання

Передавальна функція ПІ-регулятора описується таким виразом:

$$W_{PI} = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right),$$

де K_P — коефіцієнт підсилення регулятора, а T_I — стала часу інтегрування.

Розрахунок параметрів каскадної системи регулювання передбачає визначення налаштувань як основного, так і допоміжного регуляторів з урахуванням динамічних характеристик об'єкта за двома каналами керування. Оскільки параметри обох регуляторів взаємопов'язані, їх визначення здійснюється ітераційним методом. На початковому етапі

параметри одного з регуляторів визначаються на основі налаштувань іншого регулятора, отриманих для одноконтурної системи регулювання. Під час виконання розрахунків використовуються передаточні функції еквівалентних об'єктів.

Для знаходження оптимальних параметрів регулятора автоматичної системи можуть застосовуватися як точні, так і наближені методи розрахунку. До точних методів належить метод розширених комплексно-частотних характеристик, однак у даній роботі для спрощення обчислень використовується наближений метод Циглера–Нікольса.

Визначення параметрів допоміжного регулятора для одноконтурної системи регулювання витрати виконується саме за методом Циглера–Нікольса. Суть цього методу полягає в тому, що в системі спочатку використовується П-регулятор. Поступово змінюючи коефіцієнт підсилення регулятора, визначають таке його значення, при якому в системі виникають незгасаючі коливання. У цьому режимі система перебуває на межі коливальної стійкості. Після визначення критичних параметрів за напівемпіричними залежностями розраховуються оптимальні налаштування ПІ-регулятора:

$$K_P = 0,45K_{кр}, \quad T_I = 0,83T_{кр}.$$

Для визначення параметрів регулятора проведемо дослідження об'єкта керування в середовищі Matlab. У процесі моделювання [13] експериментальним шляхом встановлюється критичне значення коефіцієнта підсилення пропорційного регулятора, при якому система переходить у режим незгасаючих коливань. На основі отриманих результатів надалі визначаються оптимальні параметри налаштування ПІ-регулятора.

Схема, що використовується для визначення критичного коефіцієнта підсилення основного регулятора, наведена на рисунку 2.10.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

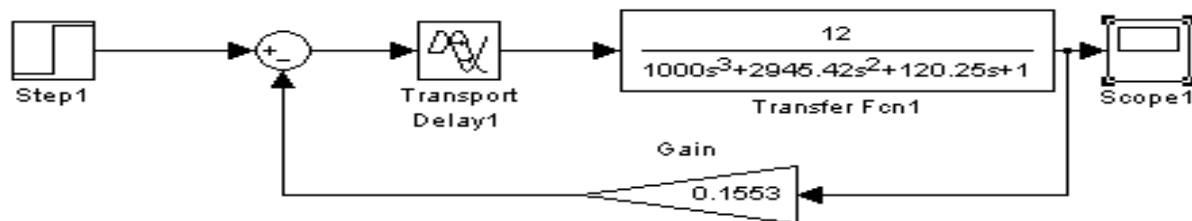


Рисунок 2.10 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температури для визначення та основного регулятора.

$K_{кр} T_{кр}$

Перехідний процес системи при одиничному збурювальному впливі представлений на рисунку 2.11.

$T [^{\circ}\text{C}]$

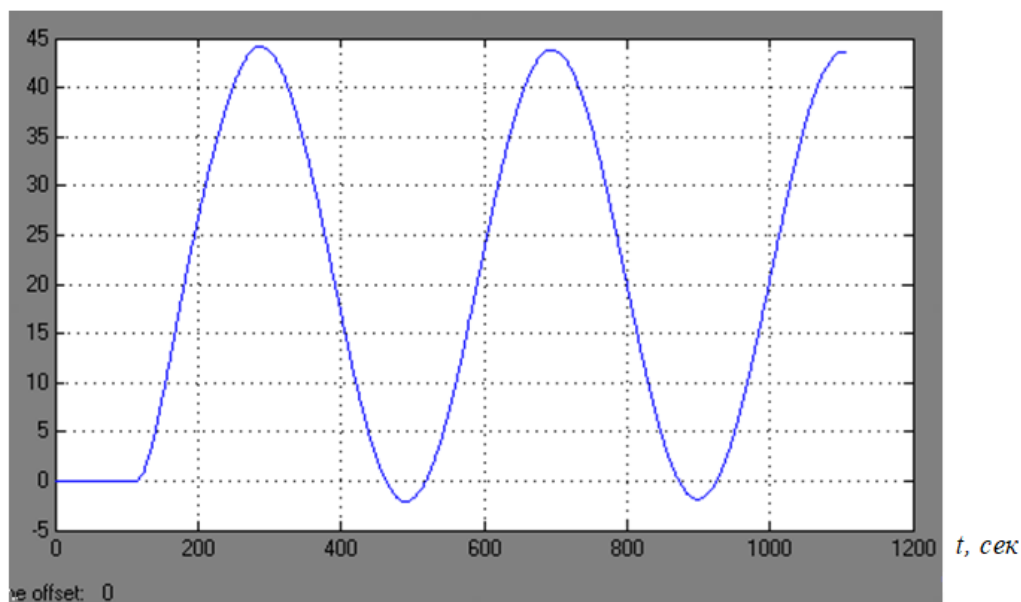


Рисунок 2.11 – Перехідний процес системи при одиничному збурювальному впливі

Для отриманого перехідного процесу критичний період коливань становить $T_{кр} = 426 \text{ c}$. Відповідне значення критичної частоти дорівнює:

$$\omega_{кр} = \frac{2\pi}{T_{кр}} = 0,0147 \text{ c}^{-1}, \quad K_P = 0,45K_{кр} = 0,069885 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\%x.p.o.} \right]$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ

Арк.

30

Наступним етапом є вибір оптимальних параметрів налаштування, які повинні забезпечити необхідний запас стійкості автоматичної системи регулювання. Для аналізу динамічних властивостей системи використовується передавальна функція замкнутого контуру, що описує поведінку системи при наявності зворотного зв'язку (рисунок 2.12).

$$W = \frac{W_p \cdot W_o}{1 + W_p \cdot W_o}$$

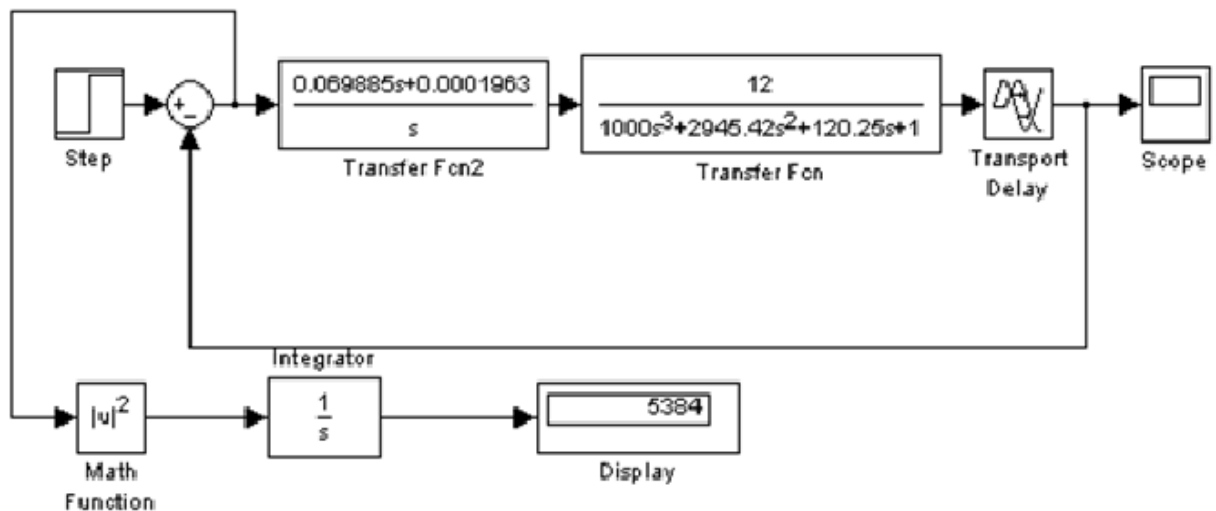


Рисунок 2.12 – Модель замкнутої САР в Simulink.

2.4 Розрахунок каскадної системи автоматичного регулювання

Багатоконтурні системи автоматичного регулювання, у яких додатково використовується допоміжна регульована величина, розташована ближче до регульовального органа, називають каскадними системами. Їх застосовують для підвищення ефективності керування об'єктами з великою інерційністю за основним каналом регулювання. Основною перевагою таких систем є можливість швидкого реагування на збурення, що надходять через канал керування, завдяки використанню проміжної координати з меншими

динамічними запізненнями. При цьому для допоміжного та основного контурів використовується одна й та сама регулювальна дія.

Каскадна автоматична система регулювання складається з двох регуляторів. Основний, або зовнішній, регулятор R призначений для підтримання заданого значення основного вихідного параметра об'єкта y . Допоміжний, або внутрішній, регулятор забезпечує стабілізацію проміжної координати y_1 . Вихідний сигнал основного регулятора використовується як задавальний вплив для внутрішнього контуру. Завдяки більшій швидкодії внутрішнього контуру значно покращуються показники якості перехідного процесу, особливо при компенсації збурень, які виникають у каналі регулювання. У багатьох випадках основна та допоміжна координати мають однакову фізичну природу та характеризують один і той самий технологічний параметр у різних точках системи.

Структурна схема каскадної автоматичної системи регулювання наведена на рисунку 2.13.

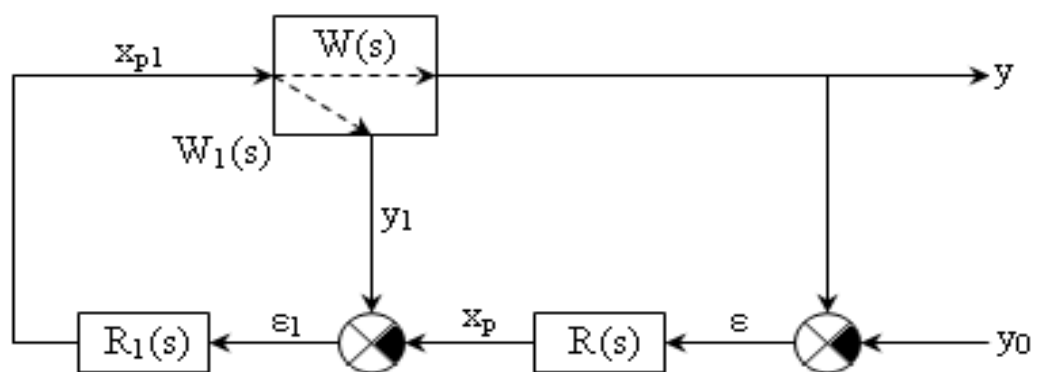


Рисунок 2.13 – Структурна схема каскадної САР.

Розрахунок каскадної системи автоматичного регулювання передбачає визначення параметрів налаштування як основного, так і допоміжного регуляторів з урахуванням динамічних характеристик об'єкта за двома каналами керування. Оскільки параметри регуляторів взаємопов'язані, їх розрахунок здійснюється методом послідовних наближень. На кожному етапі

ітераційного процесу аналізується еквівалентна одноконтурна система регулювання, у якій один із регуляторів умовно включається до складу еквівалентного об'єкта керування.

Структурна схема еквівалентної одноконтурної системи з основним регулятором $R(s)$ наведена на рисунку 2.14, а структурна схема еквівалентної системи з допоміжним регулятором $R1(s)$ – на рисунку 2.15.

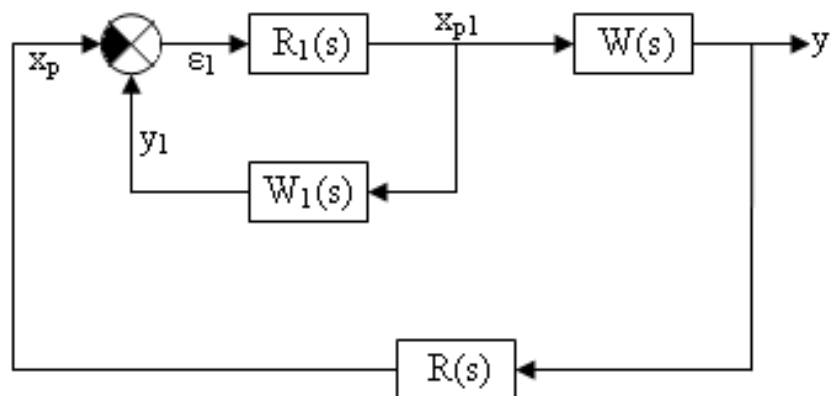


Рисунок 2.14 – Структурна схема еквівалентної каскадної системи з основним регулятором $R(s)$

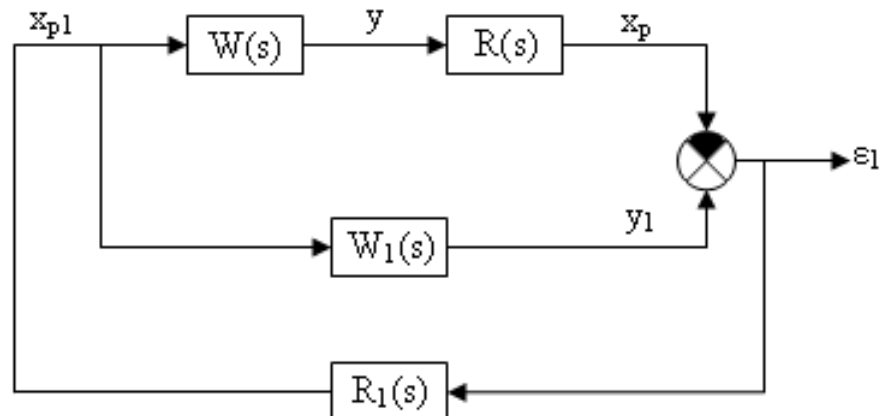


Рисунок 2.15 – Структурна схема еквівалентної каскадної системи з допоміжним регулятором $R1(s)$

Передавальна функція еквівалентного об'єкта [14-15] для основного регулятора $R(s)$ визначається таким виразом:

$$W_{00}(s) = \frac{-R1(s) \cdot W(s)}{1 - W1(s) \cdot R1(s)}.$$

Передавальна функція еквівалентного об'єкта для допоміжного регулятора $R1(s)$ визначається відповідним математичним виразом, який враховує динамічні властивості внутрішнього контуру системи. Модель САР та відповідний перехідний незатухаючий процес представлено на рисунках 2.16 і 2.17.

$$W_{01}(s) = W1(s) - W(s) \cdot R(s)$$

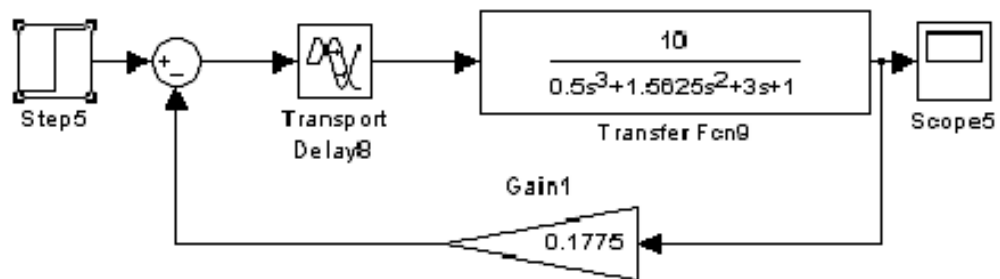


Рисунок 2.16 – Модель замкнутої САР в Simulink з допоміжним регулятором $R1(s)$.

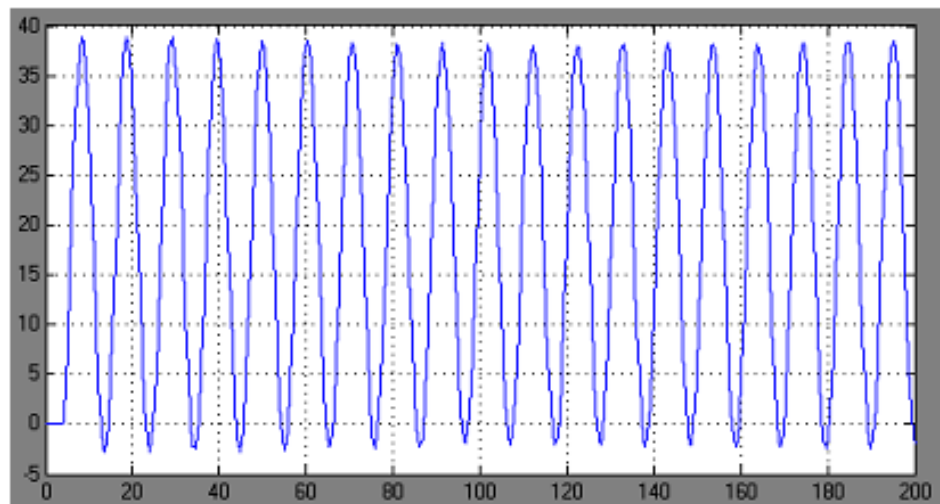


Рисунок 2.17 – Перехідний процес САР при одиничному збурювальному впливі з допоміжним регулятором $R1(s)$.

$$C_{kp}^1 = 0,1775 \cdot \left[\frac{M^3}{\text{год} * \%x.p.o.} \right]$$

$$C_1 = 0,45 * C_1^{KP} = 0,0799 \cdot \left[\frac{M^3}{\text{год} * \%x.p.o.} \right]$$

$$R_1(S) = 0,0799$$

Для визначення параметрів основного регулятора $R(s)$ використовується метод Циглера–Нікольса.

У результаті моделювання (рисунок 2.18) було встановлено критичне значення коефіцієнта підсилення, яке становить:

$$C_{kp}^1 = 0,6 [\text{град} / \%x.p.o.].$$

Критичний період коливань системи та відповідна критична частота будуть складати (рисунок 2.19):

$$T_{kp} = 287,5 (c),$$

$$\omega_{kp} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{kp}} = 0,01218 c^{-1}.$$

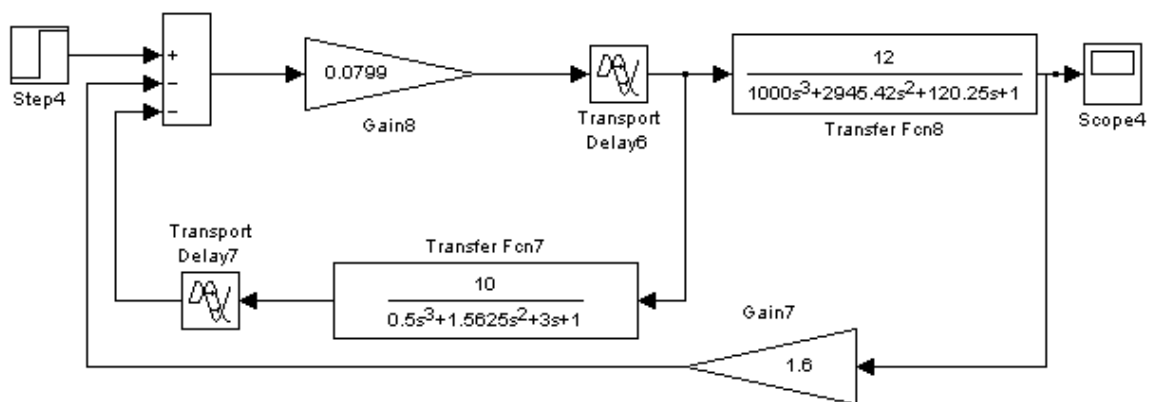


Рисунок 2.18 – Модель замкнутої САП в Simulink
з основним регулятором $R(s)$.

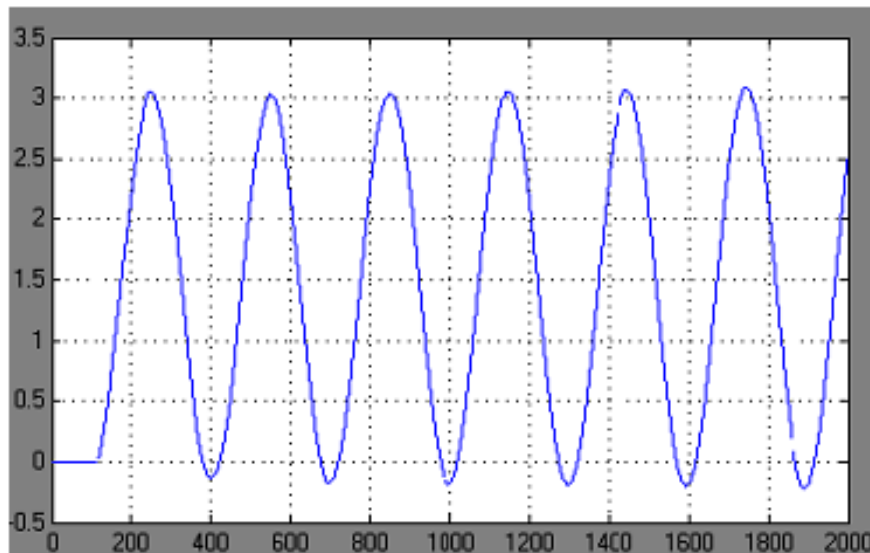


Рисунок 2.19 – Перехідний процес САР при одиничному збурювальному впливі з допоміжним регулятором $R1(s)$.

Для забезпечення високої точності та астатичних властивостей системи в якості закону регулювання обрано ПІ-закон, для якого:

$$C_1 = 0,45 \cdot C_{кр}^1 = 0,45 \cdot 1,6 = 0,72 [^{\circ}C / \%x.p.o.],$$

$$C_0 = 0,086 \cdot C_{кр}^1 \cdot \omega_{кр} = 0,086 \cdot 1,6 \cdot 0,0128 = 0,00299 [^{\circ}C / \%x.p.o.],$$

$$R(s) = 0,72 + \frac{0,00299}{s}.$$

Після цього виконується друга ітерація розрахунку та моделювання (рисунок 2.20-2.21), у межах якої визначаються параметри допоміжного регулятора $R1(s)$ за методом Циглера–Нікольса.

У результаті розрахунків отримано:

$$C_{кр}^1 = 0,1777 [^{\circ}C / \%x.p.o.],$$

$$C_1 = 0,45 \cdot C_{кр}^1 = 0,45 \cdot 0,1777 = 0,79965 [^{\circ}C / \%x.p.o.],$$

$$R1(s) = 0,79965$$

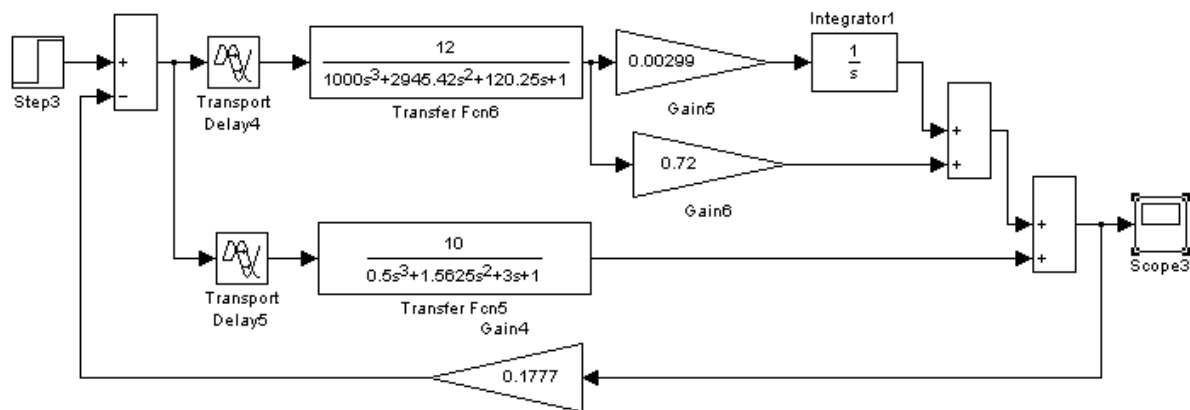


Рисунок 2.20 – Модель замкнутої САР в Simulink з допоміжним регулятором $R1(s)$, друга ітерація.

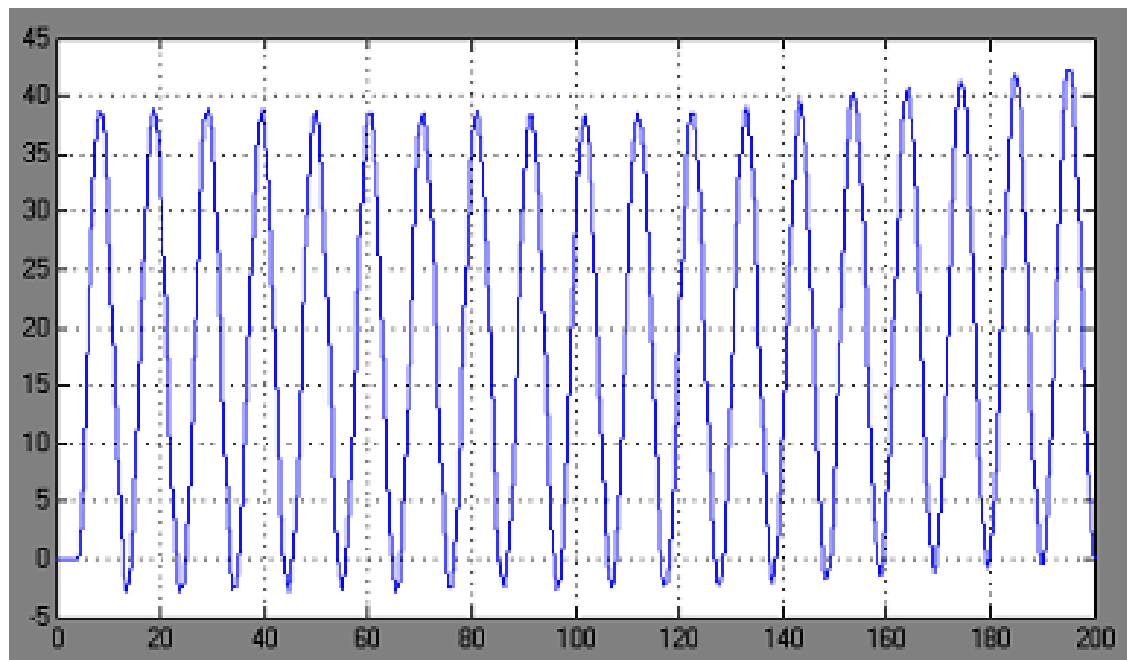


Рисунок 2.21 – Перехідний процес САР при одиничному збурювальному впливі з допоміжним регулятором $R1(s)$, друга ітерація.

Далі повторно виконується розрахунок параметрів основного регулятора $R(s)$ (рисунок 2.22 – 2.23).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

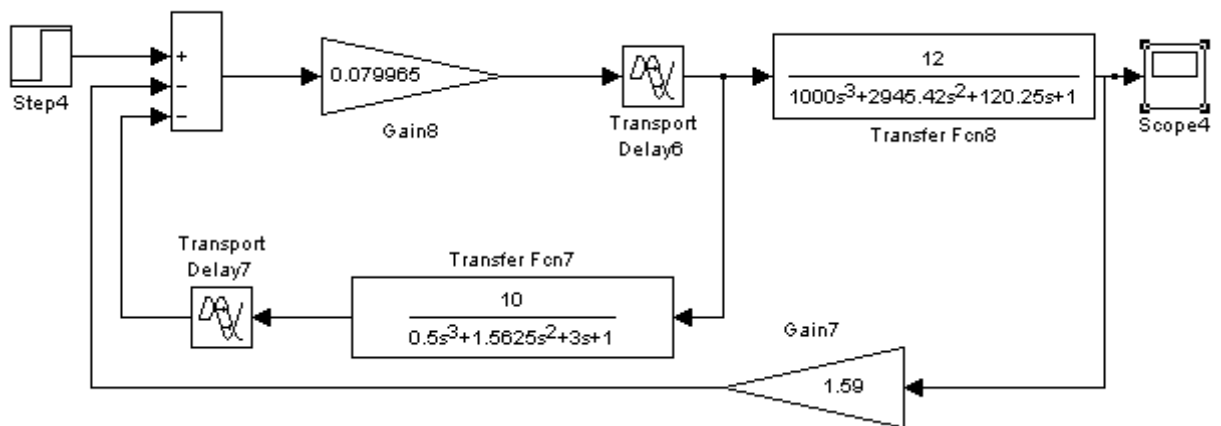


Рисунок 2.22 – Модель замкнутої САР в Simulink
з досновним регулятором $R(s)$, друга ітерація.

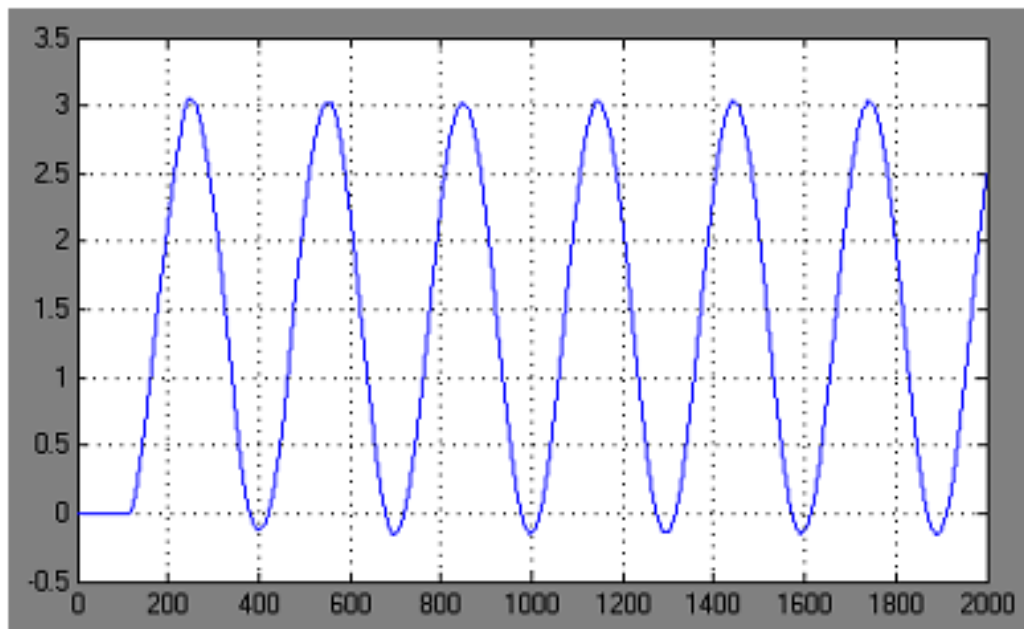


Рисунок 2.23 – Перехідний процес САР при одиничному
збурювальному впливі основним регулятором $R(s)$, друга ітерація.

За результатами моделювання встановлено, що критичний коефіцієнт підсилення становить

$$C_{кр}^1 = 1,59 [\text{град} / \% \text{x.p.o.}],$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

а критичний період коливань дорівнює:

$$T_{кр} = 287,68 (с).$$

Значення критичної частоти при цьому складає:

$$\omega_{кр} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{кр}} = 0,02184 \text{ с}^{-1}.$$

На основі отриманих критичних параметрів виконано розрахунок налаштувань ПІ-регулятора.

$$C_1 = 0,45 \cdot C_{кр}^1 = 0,45 \cdot 1,59 = 0,7155 [^{\circ}\text{C} / \%x.p.o.],$$

$$C_0 = 0,086 \cdot C_{кр}^1 \cdot \omega_{кр} = 0,086 \cdot 1,59 \cdot 0,02184 = 0,00298 [^{\circ}\text{C} / \%x.p.o.],$$

$$R(s) = 0,7155 + \frac{0,00298}{s}$$

Оскільки різниця між параметрами, отриманими на останніх етапах ітераційного процесу, не перевищує 15 %, розрахунок каскадної автоматичної системи регулювання можна вважати завершеним.

2.5 Порівняльний аналіз одноконтурної та каскадної систем автоматичного регулювання

Для оцінки ефективності роботи систем регулювання було змодельовано роботу обох САР в Simulink (рисунок 2.24) та побудовано

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

графіки перехідних процесів для одноконтурної та каскадної САР (рисунок 2.25).

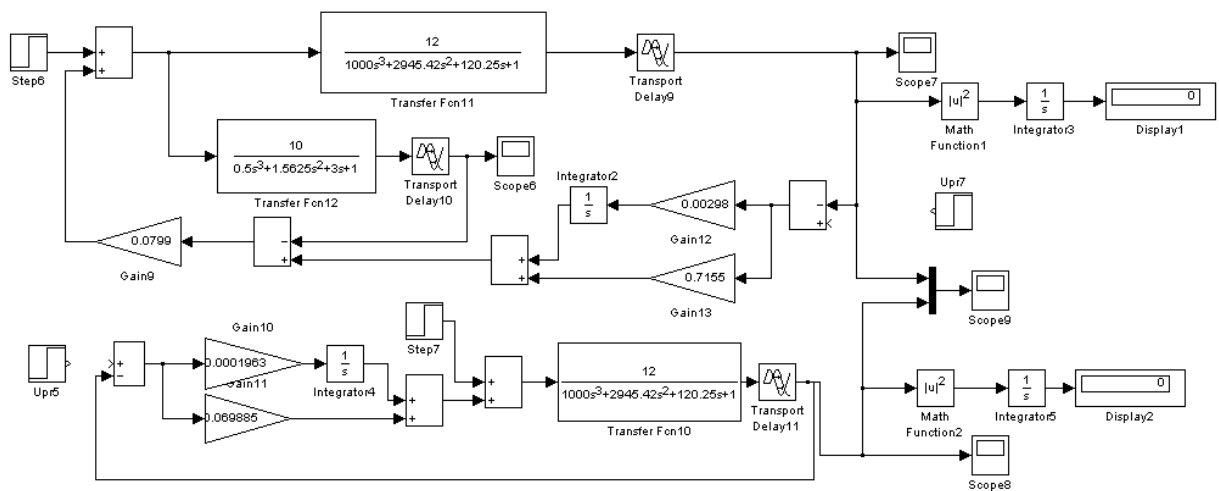


Рисунок 2.22 – Модель одноконтурної та каскадної САР в Simulink

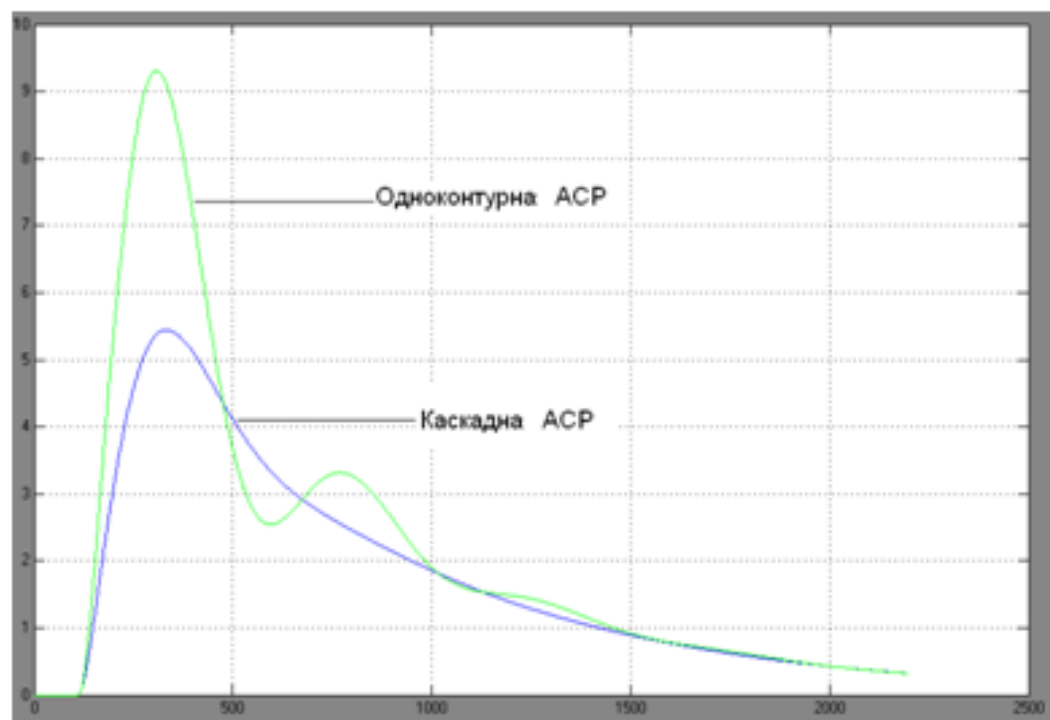


Рисунок 2.23 – Перехідні процеси одноконтурної та каскадної САР.

На отриманих графіках зеленим кольором зображено перехідний процес одноконтурної системи, а синім — каскадної системи регулювання.

Аналіз перехідних процесів проводився при подачі збурювального впливу на систему [16]. Для одноконтурної САР час регулювання становить $t_p = 2500 \text{ с}$. Статична похибка визначається як відхилення усталеного значення регульованої величини від заданого значення.

$$\varepsilon_{cm} = N - x(\infty) = 0$$

Степінь затухання перехідного процесу для даної системи складає:

$$\psi = \frac{A_i - A_{i+2}}{A_i} = 1 - \frac{A_{i+2}}{A_i} = 0,645$$

Квадратично-інтегральний критерій якості для одноконтурної системи дорівнює $I = 6,1636$.

Також було визначено значення динамічної похибки системи при дії збурення, що дорівнює $9,3 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\%x.p.o. \cdot \text{с}} \right]$.

Для каскадної автоматичної системи регулювання час перехідного процесу становить $t_p = 2200 \text{ с}$, що є меншим порівняно з одноконтурною системою. Статична похибка системи також була визначена за результатами моделювання $\varepsilon_{cm} = N - x(\infty) = 0$.

Степінь затухання перехідного процесу в каскадній САР дорівнює:

$$\psi = \frac{A_i - A_{i+2}}{A_i} = 1 - \frac{A_{i+2}}{A_i} = 1,$$

що свідчить про покращення динамічних характеристик системи.

Значення квадратично-інтегрального критерію якості для каскадної системи складає $I = 3,3664$, що значно менше, ніж у одноконтурній САР. Це

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підтверджує підвищення якості регулювання та зменшення відхилень у процесі роботи системи.

Отримані результати свідчать про те, що каскадна система автоматичного регулювання забезпечує значно кращі показники якості перехідного процесу порівняно з одноконтурною системою. При подачі збурюючого впливу, динамічне відхилення в каскадній САР зменшилося приблизно у 1,75 рази, а тривалість перехідного процесу скоротилася у 1,136 рази. Це підтверджує доцільність використання каскадної системи регулювання температури в зоні освітлення скловарної печі.

Використання каскадної САР дозволить покращити стабільність процесу варіння скломаси, підвищити якість готової продукції та зменшити кількість браку на підприємстві.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВАРКИ СКЛА В ПЕЧІ ТА ЇЇ АПАРАТНО- ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Архітектура системи автоматизованого управління скловарною піччю та підбір апаратних засобів

Архітектура системи автоматизованого управління скловарною піччю побудована за багаторівневим принципом і складається з інформаційного, мережевого, рівня керування, рівня введення-виведення та польового рівня (рисунок 3.1). Така структура забезпечує централізований контроль технологічного процесу, високу швидкість обробки даних, стабільність роботи обладнання та можливість дистанційного моніторингу.

У верхній частині схеми розташований інформаційний рівень. До нього входять операторські станції, інженерна станція, SCADA-сервер, сервер архівування даних та веб-клієнт для віддаленого доступу. Операторські станції виконані на базі сучасних промислових комп'ютерів з операційною системою Windows 11 IoT Enterprise. На них встановлено програмне забезпечення для візуалізації технологічного процесу, відображення мнемосхем, графіків температури та аварійних повідомлень. Через операторські станції персонал може змінювати уставки регуляторів, запускати обладнання та контролювати роботу печі в режимі реального часу.

Інженерна станція використовується для програмування контролерів, налаштування мережі та діагностики обладнання. Для цього застосовується сучасне програмне забезпечення EcoStruxure Control Expert, яке призначене для роботи з контролерами Schneider Electric [18]. Воно дозволяє створювати алгоритми автоматичного регулювання, налаштовувати ПІ-регулятори та виконувати моніторинг роботи системи.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ СКЛОВАРНОЮ ПІЧЧЮ

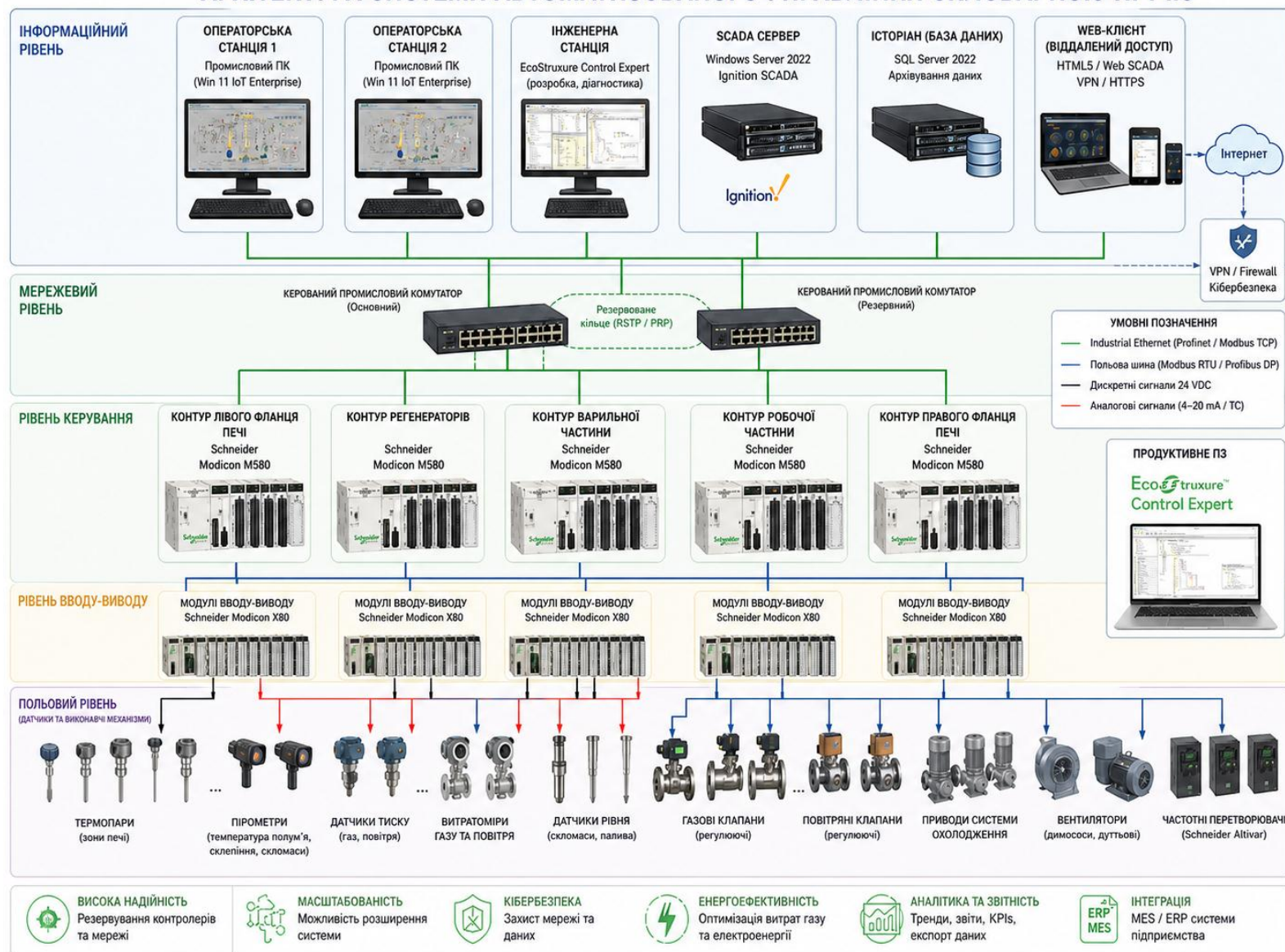


Рисунок 3.1 – Архітектура системи автоматизованого управління скловарною піччю

SCADA-сервер забезпечує збір інформації від контролерів, обробку технологічних параметрів та передачу даних операторським станціям. У схемі використовується сучасна SCADA-платформа Ignition SCADA, яка підтримує web-доступ, OPC UA та промислові Ethernet-протоколи. Сервер Historian відповідає за архівування технологічних даних у базі SQL Server. Завдяки цьому всі параметри роботи печі можуть зберігатися тривалий час та використовуватися для формування звітів і аналізу ефективності виробництва.

Вебклієнт забезпечує дистанційний доступ до системи через браузер або мобільний пристрій. Передача даних здійснюється через VPN та захищені канали HTTPS, що підвищує рівень кібербезпеки системи.

Наступним є мережевий рівень. У схемі використовуються керовані промислові комутатори Industrial Ethernet, які об'єднують усі елементи системи в єдину мережу. Передача інформації здійснюється за допомогою протоколів Profinet і Modbus TCP. Для підвищення надійності реалізоване резервування мережі за технологією RSTP або PRP. Це дозволяє підтримувати працездатність системи навіть при пошкодженні одного з каналів зв'язку.

На рівні керування розташовані програмовані логічні контролери Schneider Modicon M580 (рисунк 3.2). Вони виконують функції основного обчислювального центру системи автоматизації. Кожен контролер відповідає за окрему частину технологічного процесу: контур лівого фланця печі, контур регенераторів, контур варильної частини, контур робочої частини та контур правого фланця печі. Контролери отримують сигнали від датчиків, виконують обробку інформації та формують команди для виконавчих механізмів.

Schneider Modicon M580 [17] є сучасними ePAC-контролерами, які підтримують Ethernet-комунікацію, OPC UA, резервування процесорів та

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

роботу в режимі реального часу. Використання таких PLC значно підвищує швидкодію системи та точність регулювання температури у скловарній печі.



Рисунок 3.2 – Програмовані логічні контролери Schneider Modicon M580

Нижче розташований рівень введення-виведення. У ньому використовуються модулі Schneider Modicon X80 (рисунок 3.3), які забезпечують приймання аналогових і дискретних сигналів [18]. Через ці модулі контролери отримують інформацію від термопар, пірометрів, датчиків тиску, витратомірів та датчиків рівня. Також через модулі передаються сигнали керування на клапани, приводи та частотні перетворювачі.

Польовий рівень містить безпосередньо технологічне обладнання та контрольно-вимірювальні прилади. Для вимірювання температури застосовуються термопари та інфрачервоні пірометри. Термопари встановлюються у різних зонах печі та забезпечують безперервний контроль температури. Пірометри контролюють температуру полум'я, склепіння печі та поверхні скломаси.



Рисунок 3.3 – Модулі Schneider Modicon X80

Датчики тиску контролюють параметри газу та повітря у системі подачі палива. Витратоміри вимірюють витрату природного газу та повітря, що дозволяє підтримувати оптимальне співвідношення «газ–повітря» для стабільного горіння.

У схемі використовуються регулюючі газові та повітряні клапани з електроприводами. Вони автоматично змінюють подачу газу та повітря відповідно до команд контролерів. Для систем охолодження застосовуються електроприводи та виконавчі механізми, які регулюють інтенсивність охолодження окремих зон печі.

Для керування вентиляторами та насосами використовуються частотні перетворювачі Schneider Altivar (рисунок 3.4). Вони дозволяють плавно

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

змінювати швидкість обертання електродвигунів, що забезпечує економію електроенергії та зменшує зношування обладнання [19].



Рисунок 3.4 – Частотні перетворювачі Schneider Altivar різної потужності

У нижній частині схеми також показані основні переваги модернізованої системи. До них належать висока надійність завдяки резервуванню мережі та контролерів, масштабованість системи, сучасні засоби кібербезпеки, енергоефективність, можливість аналітики та інтеграція з MES- і ERP-системами підприємства.

Таким чином, представлена функціональна схема демонструє сучасну автоматизовану систему управління скловарною піччю, побудовану на базі контролерів Schneider Modicon M580 та сучасного SCADA-програмного забезпечення. Система забезпечує точне підтримання технологічних параметрів, підвищення якості скломаси, зменшення витрат енергоресурсів та підвищення ефективності виробництва.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.2 SCADA-система на платформі AVEVA System Platform

SCADA-програмне забезпечення в автоматизованій системі керування скловарною піччю є ключовим елементом верхнього рівня, який забезпечує взаємодію між оператором і технологічним процесом. У сучасних системах для цього часто застосовують такі платформи, як Ignition SCADA, Siemens WinCC Unified або AVEVA System Platform. Вони виконують функції збору даних, візуалізації, архівування, аналізу та диспетчерського керування процесом варіння скла.

Розроблена SCADA-система на платформі AVEVA System Platform [20] постійно отримує дані від контролерів Schneider Modicon M580 через промислові протоколи (наприклад, OPC UA або Modbus TCP). Ці дані включають температуру в різних зонах печі, витрати газу та повітря, тиск, рівень скломаси, стан клапанів і приводів. Усі параметри обробляються в реальному часі, після чого відображаються оператору у зручному графічному вигляді.

Основним елементом SCADA є мнемосхеми — графічні екрани, що відображають технологічний процес. Головна мнемосхема скловарної печі зазвичай показує саму піч, поділену на зони варіння, освітлення та робочу зону. На схемі відображаються пальники, напрямки полум'я, регенератори, канали подачі газу й повітря. Кожен елемент має індикатори стану: наприклад, клапани можуть бути позначені кольорами (зелений — відкритий, червоний — закритий), а температура відображається у вигляді числових значень біля відповідних зон. Якщо параметр виходить за допустимі межі, елемент підсвічується або генерується аварійне повідомлення (рисунок 3.5).

Окремі екрани SCADA призначені для детального контролю окремих контурів регулювання. Наприклад, екран регулювання температури в зоні освітлення може містити графічне представлення ПІ-регулятора, значення уставки, поточну температуру, витрату газу та положення регулюючого

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

клапана. Оператор може змінювати уставку температури або перевести систему в ручний режим керування(рисунок 3.6).



Рисунок 3.5 – Головна мнемосхема скловарної печі.

Важливою частиною SCADA є трендові графіки. Вони відображають зміну параметрів у часі, наприклад температуру в різних зонах печі, витрату газу або тиск повітря. Графіки можуть бути як короткостроковими (за кілька хвилин або годин), так і довгостроковими (за дні чи тижні). Це дозволяє аналізувати динаміку процесу, виявляти відхилення та оцінювати ефективність роботи печі. Наприклад, оператор може побачити, як змінюється температура після коригування подачі газу, і зробити висновки щодо налаштування регулятора.

SCADA також включає систему аварій і повідомлень. У разі відхилення параметрів від норми система формує сигнал тривоги, який відображається на екрані оператора та записується в журнал подій.

Наприклад, це може бути перевищення температури, падіння тиску газу або відмова обладнання. Оператор отримує інформацію про час події, її причину та може швидко відреагувати.

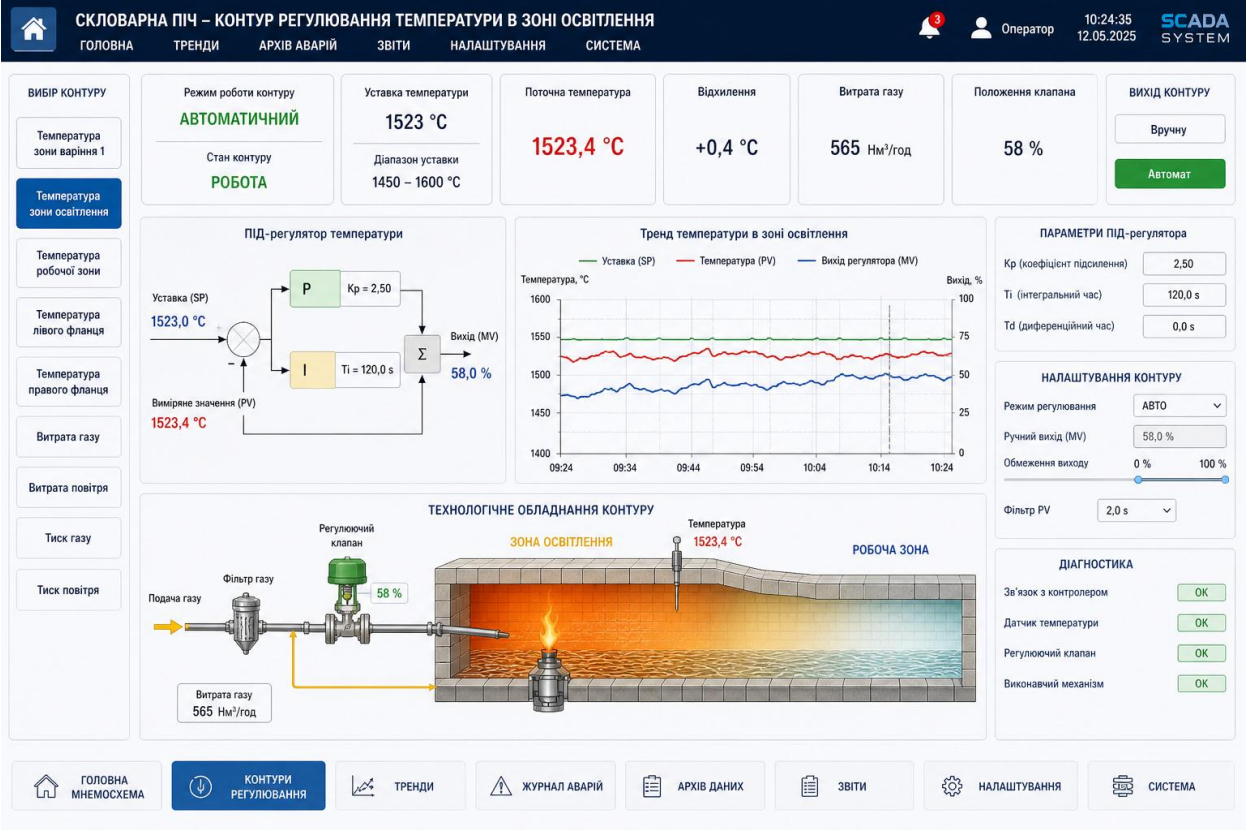


Рисунок 3.6 – Екрани SCADA призначені для детального контролю окремих контурів регулювання.

Для аналізу роботи системи використовується архів даних (Historian). У ньому зберігається історія всіх параметрів процесу. Це дає можливість будувати звіти, аналізувати якість продукції та оптимізувати режими роботи печі. Наприклад, можна визначити, як зміна температурного режиму вплинула на кількість браку.

Сучасні SCADA-системи також мають вебінтерфейси, що дозволяють переглядати мнемосхеми та графіки через браузер на комп'ютері або смартфоні. Це дає можливість інженерам і керівникам контролювати процес навіть поза межами підприємства, використовуючи захищене підключення.



Рисунок 3.7. – Вебінтерфейси, що дозволяють переглядати мнемосхеми через браузер на комп'ютері.

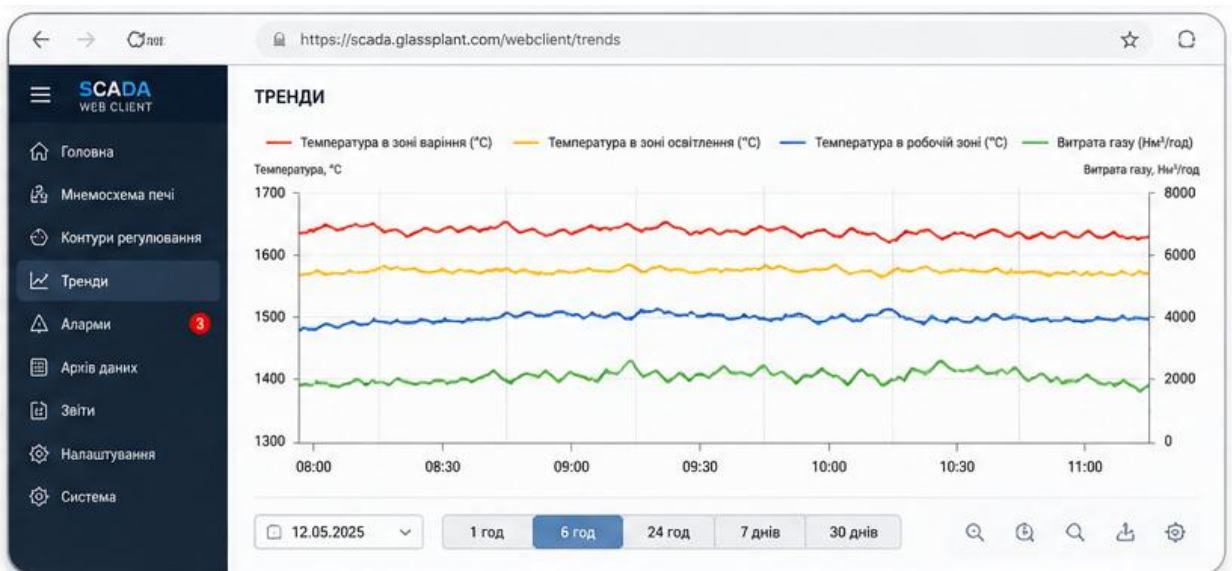


Рисунок 3.8. – Вебінтерфейси для перегляду графіків через браузер



Рисунок 3.9. – Вебінтерфейс для перегляду мнемосхем на смартфоні

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

SCADA-програмне забезпечення є центральним інструментом керування скловарною піччю. Воно забезпечує наочне відображення технологічного процесу, точний контроль параметрів, швидке реагування на аварії та можливість глибокого аналізу роботи системи, що безпосередньо впливає на якість скломаси та ефективність виробництва.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто та проаналізовано автоматизовану систему управління технологічним процесом виробництва скла на прикладі скловарної печі. Проведене дослідження показало, що сучасні вимоги до якості продукції, енергоефективності та стабільності виробництва обумовлюють необхідність впровадження високотехнологічних систем автоматизації.

Було детально проаналізовано технологічний процес варіння скломаси, визначено його основні етапи, теплові та масообмінні процеси, а також ключові параметри, що впливають на якість кінцевого продукту. Особливу увагу приділено температурному режиму скловарної печі, який є критичним фактором для забезпечення однорідності скломаси та мінімізації дефектів продукції.

У роботі виконано аналіз об'єкта керування та визначено основні регульовані, керуючі та збурюючі параметри. Обґрунтовано доцільність використання каскадної системи автоматичного регулювання температури, яка дозволяє суттєво підвищити якість перехідних процесів і зменшити вплив зовнішніх збурень. Проведені розрахунки показали, що застосування каскадної САР забезпечує зменшення динамічних відхилень і скорочення часу регулювання порівняно з одноконтурною системою.

Було розроблено функціональну схему автоматизованої системи управління із використанням сучасних технічних засобів, зокрема програмованих логічних контролерів Schneider Modicon M580, модулів вводу-виводу та промислових мереж Ethernet. Це дозволило підвищити надійність системи, швидкодію обробки сигналів та забезпечити інтеграцію з сучасними інформаційними системами підприємства.

Окремо розглянуто SCADA-рівень автоматизації із застосуванням сучасного програмного забезпечення, такого як Ignition SCADA. Було

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

показано, що використання SCADA-систем забезпечує ефективну візуалізацію технологічного процесу, зручне керування, архівування даних, а також можливість аналізу та оптимізації виробництва. Розроблені мнемосхеми, тренди та вебінтерфейси дозволяють оператору швидко реагувати на зміну параметрів і запобігати аварійним ситуаціям.

Модернізація системи керування із застосуванням сучасних контролерів, SCADA-платформ та мережевих технологій забезпечує підвищення точності підтримання технологічних параметрів, зменшення витрат енергоресурсів та покращення якості продукції. Крім того, впровадження засобів кібербезпеки та віддаленого доступу підвищує загальну надійність і керованість виробництва.

Отже, у ході роботи доведено, що впровадження сучасної автоматизованої системи управління технологічним процесом скловаріння є технічно обґрунтованим і економічно доцільним. Запропоновані рішення дозволяють підвищити ефективність роботи підприємства, зменшити кількість браку та забезпечити стабільний випуск якісної продукції.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналітичний огляд виробництва та споживання листового флоат-скла стан, динаміка за 2010-2023рр й перспективи розвитку до 2030р. Товариство з обмеженою відповідальністю «Український науково-дослідний інститут скла» (ТОВ «УкрНДІСкло») Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (ПДАБА) / Олександр Маричев, Павло Воронцов, Сергій Попович, Зоя Кукоба та іню Дніпро., 2024 р. –84 с.

2. Племянніков М. М. Хімія і технологія скла. Високотемпературні процеси / М. М. Племянніков, А. П. Яценко, Б. Ю. Корнілович. – Київ: Освіта України, 2015. – 184с.

3. Ящишина «Технологія скла у трьох частинах: Ч. 1. Фізика і хімія скла» Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 204 с.

4. Ящишин Й. М. Технологія скла: підручник у трьох частинах. – Ч. 2 : Технологія скляної маси / Й. М. Ящишин. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2004. – 250 с.

5. Інноваційні технології у виробництві спеціального та побутового скла / М. М. Племянніков, А. П. Яценко, І. В. Пилипенко, Б. Ю. Корнілович; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,94 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 298 с.

6. Воронов Г. К. Технології виробництва скломатеріалів : конспект лекцій для студентів за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Г. К. Воронов. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 128 с.

7. Some Health Disorders among Workers in a Glass Factory [Електронний ресурс] // Occupational Medicine & Health Affairs. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.esciencecentral.org/journals/some-health-disordersamongworkers-in-a-glass-factory-omha-2329-6879.1000106.pdf>.

8. Склоробство [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://aspectplus.com.ua/content/view/156/3/lang.ua/>

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

9. 5. Pulker H.K. Coatings on Glass/ 2nd Edition. - Elsevier Science. - 1999. - 466 p.

10. Сокол А. В. Дослідження скловарної печі як об'єкта керування у процесі виробництва склотари[Текст] / Сокол А. В., Бородін В. І. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: Тези доповідей дванадцятої науковопрактичної конференції студентів; Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського 5-6 грудня 2018 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 45-46.

11. Арсенічев А.Л. Розробка ієрархічної системи керування скловарною піччю / Арсенічев А.Л. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів Volume 7, Issue 1 /2015. – С.83-86.

12. Методи сучасної теорії управління [Текст]: підручник / А.П. Ладанюк Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Іващук. – К.: Видавництво ЛіраК, 2018. – 368 с.

13. Kuhn W. S. Mathematical modeling of batch melting in glass tanks / W. S. Kuhn // Mathematical Simulation in Glass Technology / eds. D. Krause and H. Loch. – Berlin : Springer, 2002. – P. 73-125.

14. Жученко А.І. Отримання передатних функцій елементів скловарної печі /А.І.Жученко, О.В. Ситніков // «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2011. – № 1(7). С. 101-105

15. Кубрак А.І. Вивід передатної функції ванни скловарної печі, як об'єкту керування /А.І.Кубрак, О.В. Ситніков // «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2012. – № 2(10). С. 131-136.

16. Y.V. Panvan Kumar, Arvapalli Rajesh, SadhuYugandhar and Viswaraju Srikant, "Cascaded PID Controller Design For Heating Furnace Temperature Control," IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE) e-ISSN: 2278-2834, p-ISSN:2278-8735. Volume 5, Issue 3 (Mar. -Apr. 2013), PP 76-83.

17. Schneider Electric. Modicon M580 – ePac PAC із вбудованим Ethernet.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Режим доступу до ресурсу:

<https://www.se.com/ua/uk/product-range/62098-modicon-m580-epac/#products>

18. Schneider Electric. Платформа модулів вводу/виведення Modicon X80.

Режим доступу до ресурсу:

<https://www.se.com/ua/uk/product-range/61938-%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%96%D0%B2-%D0%B2%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%83-%D0%B2%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-modicon-x80/#products>

19. Schneider Electric. Schneider Altivar. Режим доступу до ресурсу:

<https://www.se.com/ua/uk/work/products/master-ranges/altivar/>

20. QuickHMI Lynx (V14) – Web HMI SCADA Software Visualize and control — easy with drag-and-drop. Режим доступу до ресурсу:

https://www.indi-an.com/en/quickhmi/quickhmi-overview/?gad_source=1&gad_campaignid=178084139&gbraid=0AAAAADoJeXvw1FkLfazVjCzUD3y8H1Of&gclid=CjwKCAjwqubPBhBOEiwA zgZX2nMpEceUcumeAW9yWzGybE-S9afsH6yubnQ2E4BkdFgOxFkHMTa0UBoCccIQAvD_BwE

21. Загальні методичні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого «бакалаврського» і другого «магістерського» рівнів. // Укладачі: В. М. Островерхов, Л. І. Біловус, К. З. Возьний, О. О. Луцишин, Г. Л. Монастирський, С. В. Питель, С. А. Надвиничний, С. К. Шандрук. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. – 89 с/

22. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи за освітнім ступенем “бакалавр” спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерноінтегровані технології / Під ред. А.І. Сегіна – Тернопіль: ЗУНУ, 2021. – 36 с.

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТКИ

					ДП.АКІТ.10658579.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		