

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Енергоефективна система керування виробництвом керамічної
цегли»

Здобувача групи СУ-м.22

Ярмака Захара Леонідовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело.

_____ Захар Ярмак
(підпис)

Керівник _____ к.ф.-м.н., доцент С.В.Соколов _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Суми – 2023

РЕФЕРАТ

Ярмак Захар Леонідович. Енергоефективна система керування виробництвом керамічної цегли. Кваліфікаційна робота магістра зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (дипломний проект). Сумський державний університет, Суми, 2023 р.

Робота присвячена дослідженню технологічного процесу виробництва керамічної цегли, а саме процесу сушіння, а також розробці енергоефективної системи керування змішувальною камерою для сушильної установки. В наслідок чого було проаналізовано математичну модель та розроблено регулятор. Перевірено роботу регулятора під дією зовнішніх збурень.

Робота містить 84 сторінки основного тексту, 38 рисунків, 1 додаток; список використаних джерел з 21 найменування.

Ключові слова: виробництво, температура, вологість, енергоефективність, завантаження, цегла.

ABSTRACT

Yarmak Zakhar Leonidovych. Energy efficient control system for ceramic brick production. Master's thesis in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies (diploma project). Sumy State University, Sumy, 2023.

The work is devoted to the study of the technological process of ceramic brick production, namely the drying process, as well as the development of an energy-efficient control system for the mixing chamber for the drying plant. As a result, a mathematical model was analyzed and a controller was developed. The operation of the controller under the influence of external disturbances was tested.

The work contains 84 pages of the main text, 38 figures, 1 appendix, and a list of references of 21 titles.

Keywords: production, temperature, humidity, energy efficiency, loading, brick.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ П.В. Леонтєв
“ _____ “ _____ “ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу магістра

Тема роботи: Енергоефективна система керування виробництвом керамічної цегли. Затверджено наказом ректора університету № 1097-VI від 09.10.2023.

Термін подання закінченої роботи 18.12.2023 р.

Вихідні дані до роботи:

1. Звіт з переддипломної практики.
2. Автоматизація технічних процесів: ДСТУ 21.404 – 85.
3. Нестеров В.Г., Телющенко І.Ф. Технологія керамічних будівельних матеріалів, 2020. – 744 с.

Зміст роботи:

1. Характеристика технологічного процесу та об'єкта автоматизації.
2. Функціональна схема автоматизації.
3. Моделювання контуру керування технологічним процесом сушіння цегли в камері періодичної дії.
4. Дослідження режимів роботи змішувальної камери, розрахунок регулятора.

Графічні матеріали:

1. Локальні контури управління.
2. Алгоритми функціонування контурів.
3. Презентація до доповіді.

Календарний план проектування

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Терміни виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Складання ТЗ. Аналіз літератури.	07.11.2023-15.11.2023
2	Аналіз технологічного процесу та конструктивних характеристик об'єкта керування.	16.11.2023-24.11.2023
3	Інформаційний аналіз та вибір локальних контурів керування.	24.11.2023-30.11.2023
4	Математичне моделювання сушіння керамічної цегли	01.12.2023-08.12.2023
5	Імітаційне моделювання системи керування змішувальною камерою та температурою на вході в сушарку.	09.12.2023-14.12.2023
6	Оформлення роботи та презентації	15.12.2023-16.12.2023
7	Подання роботи керівнику. Публічний захист роботи	17.12.2023-20.12.2023

Дата видачі завдання «07» 11. 2023 р

Керівник проекту:
к.ф.-м н., доцент

Соколов С.В.

До виконання прийняв:
студент групи СУ.м-22

Ярмак З.Л.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1. ВИДИ СУШИЛЬНИХ КАМЕР ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ	12
1.1 Всесвітня статистика використання керамічної цегли	12
1.2 Переваги автоматизації підприємств по виготовленню керамічної цегли .	15
1.3 Процеси, що піддаються автоматизації й роботизації на підприємствах по виготовленню керамічної цегли.....	18
2. КОНСТРУКТИВНИЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	21
2.1 Конструктивний аналіз об'єкта керування.....	21
2.2 Технологічний аналіз процесу сушіння керамічної цегли	30
3. ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ	34
3.1 Інформаційний аналіз об'єкта керування	34
3.1 Вибір локальних контурів керування	36
4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ЦЕГЛИ.....	43
4.1 Аналіз проблеми сушіння.....	43
4.2 Прийняття та обґрунтування припущень для спрощення режимів	45
4.3 Формування математичної моделі	46
4.3.1 Тепловий баланс об'єкта відносно теплоносія.....	47
4.3.2 Тепловий баланс об'єкта керування відносно матеріалу, що висушується	50
4.3.3 Матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в матеріалі	52
4.3.4 Матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в теплоносії	55
4.3.5 Складання математичної моделі камерної сушарки періодичної дії та її аналіз	57
5. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ В КОНВЕКТИВНІЙ СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ	59
5.1 Аналіз функціональної конструкції системи керування.....	59
5.2 Імітаційна модель змішувальної камери	61
5.2 Імітаційна модель сервопривода.....	63
5.3 Імітаційна модель змішувальної камери з сервоприводами.....	67

5.4 Розробка алгоритму системи керування процесом сушіння керамічної цегли	75
6. ОХОРОНА ПРАЦІ НА ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ.....	77
7. ВИСНОВОКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81
Додаток А	Error! Bookmark not defined.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- СУ - система управління
- СК – сушильна камера
- АСУ – автоматизована система управління
- ПЛК – програмований логічний контролер
- МК – мікроконтролер
- ПЗ – програмне забезпечення
- США – Сполучені Штати Америки
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
- ПО – панель оператора
- ФСА - функціональна схема автоматизації
- САУ - система автоматизованого управління
- ППП - пристрій плавного пуску
- ІМП - інформаційно-матеріальні потоки
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ЧРП – частотно-регульовані приводи

ВСТУП

Використання цегли бере свій початок у стародавніх цивілізаціях, таких як Месопотамія та долина Інду, близько 7000 років до нашої ери. Спочатку для будівництва використовували висушену на сонці глиняну цеглу, що стало раннім прикладом основних технологій виготовлення цегли. Близько 3500 року до н.е. в стародавній Месопотамії з'явилася перша випалена цегла. Ці цеглини виготовлялися з глини і соломи, обпалювалися в печах для збільшення міцності. Єгиптяни також перейняли технологію обпаленої цегли, використовуючи її при будівництві пірамід та інших споруд. За часів Римської імперії римляни значно вдосконалили техніку виготовлення цегли. Вони використовували суміш вапна і вулканічного попелу під назвою пуцолан, що підвищувала міцність і довговічність цегли. Римляни були плідними у виробництві цегли, що сприяло широкому використанню цегли в будівництві по всій їхній величезній імперії. Всі ці події дали поштовх для того, щоб у 20 столітті інновації у виробництві цегли продовжилися з впровадженням електричних печей та автоматизованих виробничих ліній. Сучасна керамічна цегла має різні форми, розміри і склад, для задоволення різноманітних будівельних потреб. Сучасне будівництво часто передбачає використання спеціальної цегли з особливими властивостями, такими як теплоізоляція.

Популяризація будівництва з керамічної цегли та висока потреба в даному матеріалі потребували більшу кількість заводів для виробництва та технології максимально швидкої продуктивності, що викликало інші проблеми, такі як - екологічність, енергоефективність та сталість виробництва цегли. Переробка матеріалів та оптимізація процесів випалу для зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення енергоефективності є ключовими факторами у сучасному виробництві цегли. Саме параметр енергоефективності є основним в написанні даної роботи.

Один з методів підвищення енергоефективності є розташування підприємства близько до місця з джерелом глини та води, на відстані не більше ніж

3 км. В цьому випадку часові рамки та паливо на доставку сировини будуть оптимальними та не потребуватимуть додаткових ресурсів. Якщо джерела глини та води будуть розташовуватися на відстані більше 30 км від підприємства, виробництво цегли стає менш рентабельним з точки зору витрат та доходів.

Найпопулярніший формфактором керамічної цегли є 23 см x 11 см x 7,6 см і має річний обсяг виробництва близько 200 мільярдів цеглин. Існує понад 100 000 цегельних заводів по всьому світу, і вони зазвичай працюють сезонно, протягом 6-7 місяців на рік. Установки для виробництва керамічних виробів шляхом випалу, зокрема черепиці, цегли, вогнетривкої цегли, плитки, керамо-граніту або порцеляни, мають виробничу потужність понад 75 тонн на добу, та з об'ємом печі понад 4 м³ і щільністю захоплення на одну піч понад 300 кг/м³. Сьогоднішні заводи повністю автоматизовані, тому час від початку виробництва до отримання першої готової до експлуатації цегли займає від шести днів, на заводах середньої потужності, до трьох тижнів на потужностях невеликого виробництва. Технології та погодні умови визначають швидкість виготовлення продукції. Який вид печі використовує підприємство, також впливає на продуктивність заводу. Вони переважно існують кільцеві та тунельні. Перший вимагає менших витрат, але без ручної праці не обійтись. При цьому якість цегли, випаленої в кільцевій печі, буде нижчою, ніж у більш дорогій і повністю автоматизованій тунельній печі [1].

Покращення якості регулювання основних технологічних параметрів таких як температура, вологість, витрата повітря, зменшення відхилень від стандартів технологічного регламенту, заміна морально чи фізично застарілих засобів автоматизації та покращення роботи алгоритмів для сушки цегли є цілями існуючих СУ технологічним процесом.

Проаналізувавши вищесказаний матеріал, можна поставити мету та завдання роботи.

Метою роботи є енергоефективне керування такими параметрами як температура та витрата повітря в окремій камері сушильної камері.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- 1) аналіз впливу температури на масу цегли;
- 2) математичне моделювання масопереносу в процесі сушіння цегли;
- 3) виявлення критеріїв оптимальності параметрів температури та витрат повітря під час сушіння цегли;
- 4) імітаційне моделювання системи автоматичного керування, що реалізує оптимальне співвідношення температури та витрат повітря для сушіння цегли;

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування, що реалізує оптимальне співвідношення температури та витрат повітря в процесі сушіння керамічної цегли.

Предметом дослідження є модель системи керування технологічними параметрами всередині сушильної камери.

Наукова новизна:

- набули подальшого розвитку відомі математичні моделі масопереносу, балансу масообміну;
- побудована та скорегована імітаційна модель системи керування, що реалізує енергоефективне керування температурою та витратами повітря всередині сушильної камери періодичної дії.

Теоретична значимість:

- проведені оціночні розрахунки параметрів моделі керування сушильною камерою можуть бути використані для спрощення моделей камер сушіння;

Практична цінність:

- оптимальне керування температурою та витратою повітря підвищить енергоефективність виробництва керамічної цегли, адже стане оптимальною витрата палива на обігрів сушильної камери, а відходи у вигляді відпрацьованого повітря будуть використовуватися повторно. Також за рахунок оптимальних витрат ресурсів знизиться собівартість

однієї цеглини, що позитивно по впливає на економічну складову виробництва керамічної цегли та будівельної галузі в цілому, адже цегла є невід'ємною частиною більшості будівних проектів у світі та є основним матеріалом для багатоповерхових та приватних будинків, відбудова яких є пріоритетним завданням в Україні в цей непростий час.

1. ВИДИ СУШИЛЬНИХ КАМЕР ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ

1.1 Всесвітня статистика використання керамічної цегли

Приріст світового населення провокує збільшення попиту на житло. Зі зростанням населення планети відповідно зростає попит на житло, більше людей потребують більше житла, а це призводить до зростання попиту на будівельні матеріали, в тому числі на керамічну цеглу. Ця цегла є основним компонентом житлових будинків і використовується для зведення стін та інших структурних елементів. Також зростання чисельності населення зумовлює необхідність розвитку інфраструктури, зокрема шкіл, лікарень та інших громадських об'єктів[2].

Керамічна цегла широко використовується в цих будівельних проектах завдяки своїй довговічності та ізоляційним властивостям. Якщо звернутися до статистики, то можна побачити, що світовий об'єм саме керамічної цегли в 2014 році складав 157,7 мільярдів долларів (рис.1.1), зараз у 2023 році складає 248,89 мільярдів долларів, а за прогнозами до 2030 року світовий об'єм ринку керамічної цегли складатиме 359,35 мільярдів долларів, що складає 201,65 мільярдів долларів в порівнянні з 2014 роком, тобто ріст є різким, що показано на гістограмі 1.1.

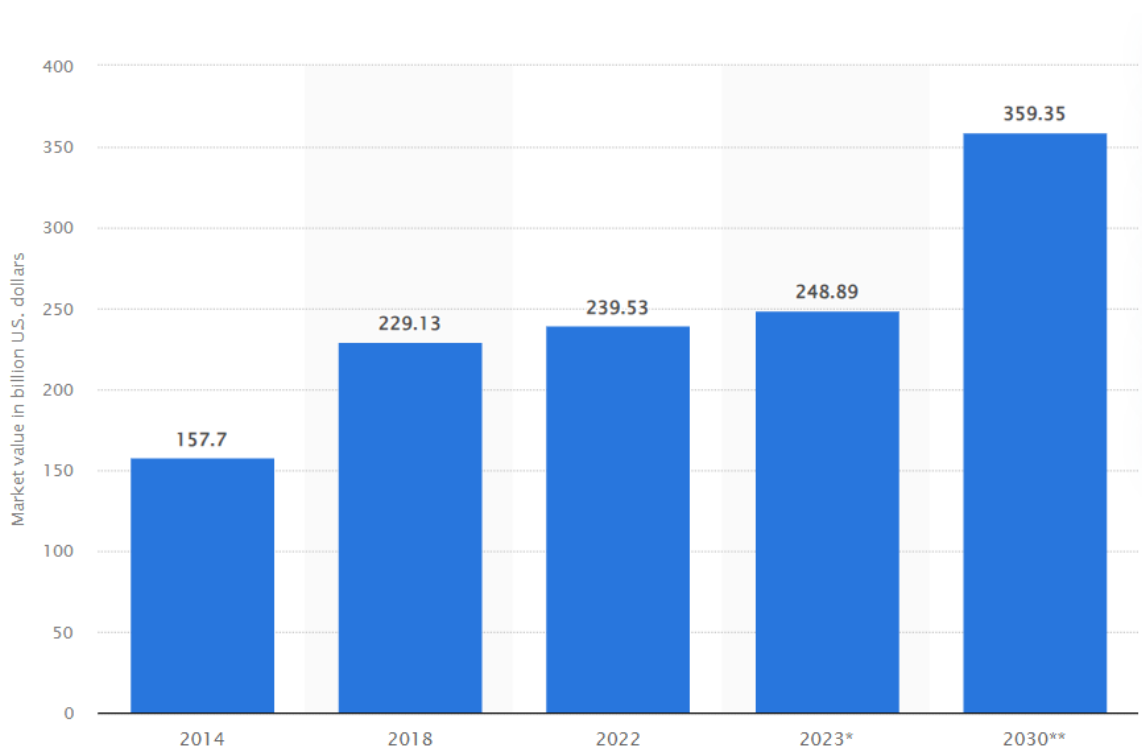


Рисунок 1.1 - Обсяг світового ринку продаж керамічної цегли

Але відбувається не лише збільшення продажів керамічної цегли, але й кількості підприємств по її виробництву, які все частіше починають використовувати повністю автоматизовані підприємства для її виготовлення. В наш час майже всі підприємства використовують ту чи іншу автоматику для виробництва керамічної цегли, адже цей процес потребує точності та контролю всіх етапів виробництва. Серед лідерів будівництва заводів по виготовленню керамічної цегли є Китай який має 66,67% (рис.1.2) світових виробництв керамічних виробів включаючи керамічну цеглу, на другому місці Індія, яка тримає 13,33% від всіх заводів у світі на своїй території, а трійку лідерів закриває Пакистан з 3,00% від світових значень. Більш детальна інформація представлена на гістограмі 1.2.

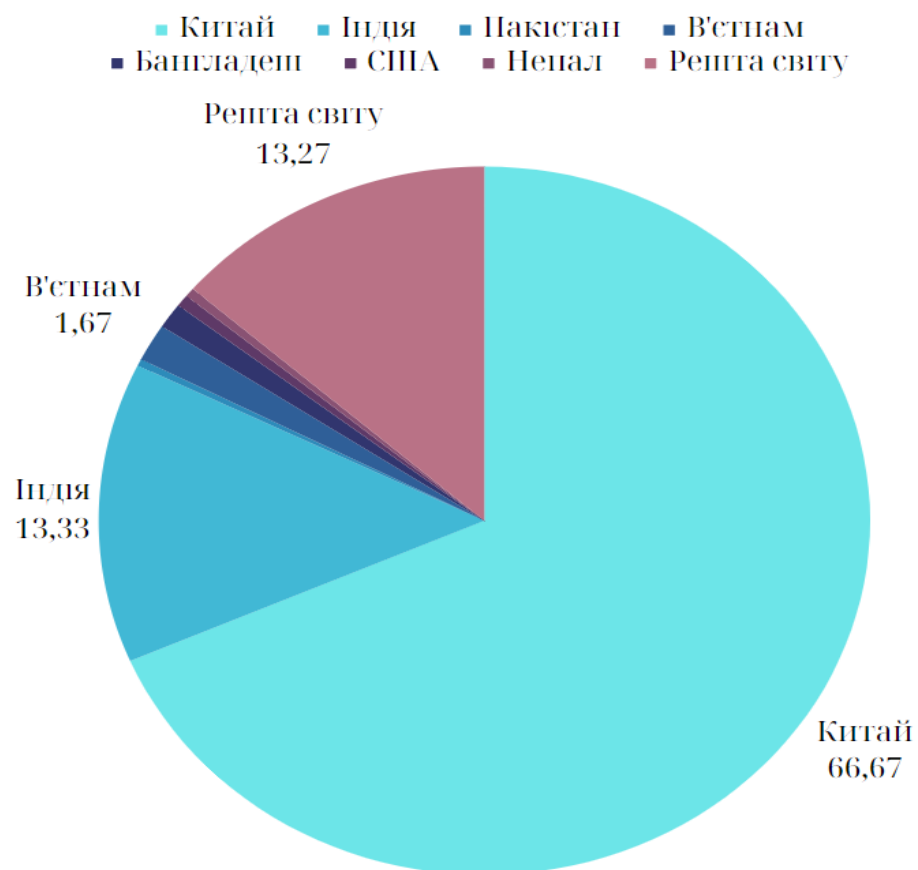


Рисунок 1.2 – Частка кількості заводів та підприємств по виробництву керамічної цегли по країнам

В Україні виробництво керамічних виробів та керамічної цегли мало декілька важливих періодів, з 2007 до 2012 року відбувався сильний ріст виробництва аж на 223,25% від значень у 2007 році, адже каолінові глини в наших родовищах одні з кращих у світі, але після настання проблем з експортом продукції та імпортом потрібних ресурсів у вигляді домішок та добавок наступив другий етап з 2012 по 2015 рік, який характеризувався різким зниженням темпів виробництва керамічної цегли на 72,15%, далі відбулося послаблення умов експорту та імпорту продукції і відбувся ріст виробництва керамічної цегли на території України. За прогнозами цей ріст буде ще вищий в наш час, адже актуальною проблемою постає питання відбудови країни, а керамічна цегла є одним із будівельних матеріалів для цього. З темпами виробництва керамічної цегли можна ознайомитися на гістограмі 1.3.



Рисунок 1.3 – Виробництво керамічної цегли в Україні тис. м³

1.2 Переваги автоматизації підприємств по виготовленню керамічної цегли

Автоматизація підприємств з виробництва керамічної цегли являє собою зміну парадигми у виробничих процесах, що має серйозні наслідки для ефективності, якості та загальної динаміки роботи. Автоматизовані виробничі процеси на підприємствах з виробництва керамічної цегли демонструють значне підвищення ефективності виробництва. Система автоматизації сприяє підвищенню продуктивності завдяки підвищеній швидкості та точності роботи. Послідовне скорочення тривалості циклу є хорошим передвістям для задоволення зростаючих потреб ринку з одночасною оптимізацією використання ресурсів.

Точність і однорідність є невід'ємними атрибутами автоматизованих систем виробництва керамічної цегли, які значно підвищують стандартизацію розмірів і властивостей продукту. Інтеграція датчиків і механізмів моніторингу забезпечує ретельний контроль якості шляхом оперативного виявлення та усунення відхилень або дефектів у виробничому процесі.

Економічні переваги автоматизації помітно проявляються через економію праці та раціональне використання ресурсів. Автоматизовані системи зменшують залежність від ручної праці, тим самим зменшуючи супутні ризики такі як людський фактор та витрати на утримання великої кількості працівників. Крім того, ці системи оптимізують споживання сировини, мінімізуючи відходи та, як наслідок, знижуючи загальні виробничі витрати.

Автоматизація створює підвищений рівень безпеки на підприємствах з виробництва керамічної цегли, зменшуючи ризики, пов'язані з ручною працею. Розгортання автоматизованого обладнання для виконання завдань, пов'язаних із важким обладнанням або впливом небезпечних матеріалів, сприяє підвищенню безпеки на робочому місці, тим самим створюючи безпечне виробниче середовище.

Можливість адаптації автоматизованих систем до різних специфікацій блоків підкреслює їхню гнучкість. Програмовані конфігурації забезпечують плавний

перехід між різними типами цегли, відповідаючи динамічним вимогам ринку. Швидке перемикання ще більше сприяє підвищенню операційної гнучкості та оперативності.

Автоматизація забезпечує комплексний збір даних протягом усього процесу виробництва керамічної цегли. Накопичені дані служать цінним ресурсом для оцінки ефективності, оптимізації процесів і ініціатив постійного вдосконалення. Інтеграція аналізу даних покращує процеси прийняття рішень, сприяючи керованому даними підходу до управління виробництвом.

Автоматизовані системи сприяють підвищенню енергоефективності на підприємствах з виробництва керамічної цегли. Завдяки оптимізованим робочим процесам ці системи гарантують, що обладнання функціонує з максимальним рівнем ефективності, таким чином мінімізуючи споживання енергії та сприяючи екологічності виробничих процесів.

Автоматизація підприємства по виготовленню керамічної цегли включає в себе такі системи:

1. Система обробки матеріалів яка включає:

- Автоматизацію процесів завантаження та розвантаження сировини.
- Транспортування матеріалів у межах виробництва за допомогою автоматизованих конвеєрних систем.

2. Система змішування та дозування яка включає:

- Автоматизоване дозування та змішування сировини для забезпечення точного складу.
- Інтеграція автоматизованих систем для послідовної гомогенізації сировинної суміші.

3. Система формування цегли яка включає:

- Автоматизацію процесів формування цегли за допомогою роботизованих або механічних систем.

4. Система сушіння цегли яка включає:

- Інтеграцію автоматизованих сушильних камер з контрольованою температурою, вологістю та витратою повітря.

- Застосування автоматизованих транспортно-розвантажувальних систем для переміщення мокрої цегли до місць сушіння.

5. Система випал в печі яка включає:

- Автоматизацію процесів завантаження та вивантаження з печі.

- Впровадження систем контролю параметрів температури та атмосферного тиску для точних циклів випалу.

6. Система перевірки якості яка включає:

- Інтеграцію автоматизованих датчиків і камер для контролю якості в реальному часі.

- Впровадження автоматизованих систем сортування для ідентифікації та відокремлення дефектної цегли.

7. Система пакування та палетування яка включає:

- Автоматизацію процесів пакування за допомогою роботизованих систем.

- Впровадження автоматизованих систем палетування для ефективного штабелювання та обробки.

8. Система управління запасами яка включає:

- Впровадження автоматизованих систем обліку сировини та готової продукції.

- Інтеграцію систем RFID або штрих-кодів для ефективного контролю запасів сировини та готової продукції.

9. Система збору та аналізу даних яка включає:

- Встановлення датчиків і пристроїв збору даних протягом усього виробничого процесу.

- Впровадження автоматизованих інструментів аналізу даних для постійної оптимізації процесів.

10. Системи безпеки які включають:

- Інтеграцію автоматизованих систем безпеки, включаючи механізми аварійного відключення.

- Використання датчиків і сигналізації для моніторингу та усунення небезпек.

11. Система керування відходами виробництва яка включає:

- Автоматизацію процесів утилізації відходів.
- Впровадження систем переробки, зберігання та повторного використання відходів виробництва, таких як відбракований матеріал, та тепло від печі [3].

12. Системи навчання які включають:

- Інтеграцію автоматизованих систем навчання персоналу, який займається експлуатацією та обслуговуванням автоматизованого обладнання.

- Використання симуляції та інструментів віртуального навчання для розвитку навичок.

1.3 Процеси, що піддаються автоматизації й роботизації на підприємствах по виготовленню керамічної цегли

В сучасних підприємствах по виробництву керамічної цегли автоматизації та роботизації підлягають більшість процесів та потребують велику кількість датчиків та виконавчих механізмів по всьому периметру, адже технологічний процес включає низку операцій над сировиною перш ніж з неї вийде кінцевий продукт. Використання автоматизації значно зменшує один з основних параметрів, а саме час виробництва партії готового матеріалу, що позитивно впливає на ефективність виробництва та економічні показники.

Переміщення та зберігання матеріалів. Автоматизовані системи можуть використовуватися для завантаження сировини на конвеєрні стрічки та вивантаження готової продукції з виробничих ліній. На сьогоднішній день є

можливість використання роботизованих самоскидів, яку можуть оптимізувати систему доставки сировини на декількох етапах:

1) На першому етапі автоматизовані самоскиди транспортують свіжопривезену глину, яку привезли на вантажному транспорті з кар'єру, до глиприймача.

2) На другому етапі глину, яка пройшла через глиноприймач, автоматизовані самоскиди транспортують до спеціальних відділень на складі глини, який ще називають глинозапасником, які помічені відповідно від родовища сировини. Кожна комірка відведена під відстоювання глини на певний проміжок часу, який залежить від фізичних та хімічних властивостей сировини та від родовища.

3) На третьому етапі відстоюна глина з глинозапасника транспортується автоматизованими самоскидами до конвеєрної стрічки, яка в свою чергу транспортує сировину до першого етапу обробки

Роботизоване укладання на піддони. Роботи можуть переміщувати і укладати цеглу на піддони на двох етапах для підвищення швидкості і точності позиціонування та переносу.

1) На першому етапі використовуються роботи маніпулятори які переміщують готові карти з керамічною цеглою від лінії нарізання заготовок до вагонеток які в подальшому відправляються до сушильних камер.

2) На другому етапі висушена цегла навпаки від вагонеток переміщується роботами маніпуляторами на лінію підготовки до обжигу в тунельній печі неперервної дії.

Змішування та формування. Точного змішування сировини можна досягти за допомогою автоматизованих систем дозування та змішування, саме від правильної пропорції основної сировини та домішок залежить кінцеві фізичні властивості цегли, тому цей процес потребує особливої точності. Роботи можуть використовуватися для формування глини в цеглу, забезпечуючи стабільність

форм і розмірів, адже геометрія цегли в подальшому буде головним фактором в будівництві та рівномірності рівня будівлі.

Контроль якості. Автоматизовані системи інспекції використовуючі технології технічного зору та датчики можуть використовуватися для автоматичної перевірки цегли на наявність дефектів, забезпечуючи високу якість продукції, це дозволить швидко виявляти всі проблеми з продуктом та зменшить вплив людського фактору на контроль якості, адже не буде потреби проводити лабораторні дослідження, все буде перевірятися в режимі реального часу на основних етапах виробництва, що позитивно вплине на загальну ефективність заводу.

Роботизоване сортування. Роботи можуть сортувати цеглу на основі критеріїв якості, зменшуючи ймовірність потрапляння дефектної продукції на ринок. Сортування допомагає досягти рівномірності обробки матеріалу та запобігати дестабілізації відповідного процесу обробки.

Моніторинг та аналіз даних. Впровадження інструментів аналізу даних може допомогти контролювати та оптимізувати виробничі процеси виготовлення керамічної цегли, використання енергії та розподіл ресурсів. Не можливо тримати всі дані про кожен процес та мати можливість оперувати ними в режимі реального часу без систем автоматизації. Саме МК, ПЛК та ПК забезпечують збирання, обробку та аналіз даних від кожного об'єкту, щоб надати сигнал відповідному виконавчому механізму виконувати свої функції.

Подрібнення та змішування. При доставці сировини у вигляді глини до підприємства виявляється нерівномірність геометричних параметрів сировини, тому використовують багатоетапну систему автоматизованого подрібнення та змішування, аби досягти рівномірних показників суміші. Спочатку відбувається автоматизоване подрібнення грудок до розмірів 3-5 см грубим подрібненням, на наступному етапі автоматизованого перетирання фракція глини зменшується до 5-6 мм, а на останньому етапі тонкого перемелювання фракція зменшується до 0,15-0,2 мм.

2. КОНСТРУКТИВНИЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Конструктивний аналіз об'єкта керування

Керамічна цегла – це виважена суміш основних високодисперсних мінеральних частинок і пластифікуючих рідин. Оптимальне співвідношення сировини для керамічної цегли може змінюватися залежно від конкретних вимог виробничого процесу, бажаних властивостей кінцевого продукту та типу наявної глини.

Основним компонентом керамічної цегли є глина. Глина забезпечує пластичність суміші, дозволяючи їй формуватися і надавати форму. Ідеальний вміст глини зазвичай становить від 20% до 30%. Можна використовувати різні види глини, такі як каолін або шамотна глина, і вибір залежить від наявності та бажаних характеристик.

Кремнезем додається для покращення структурної цілісності цегли та запобігання розтріскуванню під час сушіння та випалу. Оптимальний вміст кремнезему зазвичай становить від 50% до 65%. Зазвичай використовується дрібний кварцовий пісок, який допомагає зменшити усадку під час випалу.

Польовий шпат використовується для зниження температури випалу цегли і діє як флюс. Він сприяє склуванню глини, підвищуючи міцність кінцевого продукту. Рекомендований вміст польового шпату становить близько 10% [4].

Невеликі кількості інших добавок можуть бути включені для покращення специфічних властивостей цегли. Наприклад, органічні матеріали можуть бути додані для поліпшення пластичності, в той час як невелика кількість оксиду заліза може бути використана для додання кольору.

Конструктивний аналіз об'єкта по виробництву керамічної цегли починається з доставки сировини, тобто глини. В переважній більшості

виробництва розташовують максимально близько до джерела глини для покращення економічних та енергоефективних показників. Після того як глину доставляють до виробництва вона шляхом самоскидів, або транспортеру потрапляє в глинозапасник.

Мостовим грейферним краном відстояна глина з глинозапасника подається в агрегат завантаження сировини. Призначення агрегату завантаження сировини в тому, щоб забезпечити первинне подрібнення та дозування для подальшої обробки сировини. Агрегат завантаження сировини складається з таких з'їздових елементів як:

- Металева рама;
- Бункер для завантаження сировини;
- Шнеки з лопатями (4 за замовчуванням);
- Привід;
- Роздавальна коробка.

Агрегат завантаження сировини представлено на рис.2.1.



Рисунок 2.1 - Агрегат завантаження сировини

Агрегат працює за наступним принципом – скупчення глини, які містяться в бункері, подрібнюються та розпушуються лопатями, які працюють на обертовому валу агрегату. Після подрібнення, глина транспортується до вивантажувального люка за допомогою гвинтового розташування валів лопатей. Звідти глина надходить на вихідний стрічковий конвеєр завантажувального агрегату, а потім у приймальний шнековий транспортер. Система частотного регулювання приводу дозволяє змінювати продуктивність агрегату, підтримуючи достатній запас глини для роботи агрегату підготовки сировини в режимі реального часу.

Регулювання подачі глини частотним регулюванням при виробництві цегли передбачає тонкий підхід до оптимізації виробничого процесу. Використовуючи передові системи управління, датчики та частотно-регульовані приводи (ЧРП), можна отримати точне дозування подачі. Для правильного функціонування частотного регулювання потрібно реалізувати наявність мінімум 4 давачів які слідкують за фактичними параметрами на різних відрізках лінії подачі, далі система керування порівнює фактичні значення з еталонними і в залежності від різниці між цими показниками формується сигнал управління.

Наступним кроком відбувається обробка сировини в агрегаті підготовки сировини. Саме тут відбувається підготовчий етап до формування готового складу суміші з якої в процесі обробки буде отримано готовий продукт. Агрегат підготовки сировини складається з:

- Металева рама;
- Шнеки;
- Завантажувальний короб;
- Привід обертання шнеків;
- Розпилювач;
- Розвантажувальний бункер.

Принцип діє агрегату підготовки сировини базується на зволоженні та перемішуванні. Сухий подрібнений матеріал надходить по конвеєрній стрічці

до завантажувального коробу, в який потрапляє дозована кількість води та обертаються шнеки для перемішування, які рухаються на зустріч один одному. Кількість води варіюється в залежності від виду кінцевої цегли та початкових властивостей глини.

У процесі виробництва керамічної цегли для зволоження глини зазвичай використовується звичайна водопровідна вода або, в деяких випадках, вода, очищена від домішок і забруднень. Вибір води залежить від таких факторів, як якість місцевої води, її доступність та специфічні виробничі вимоги.

Водопровідна вода є поширеним вибором на багатьох цегельних заводах, оскільки вона легкодоступна та економічно вигідна. Однак у ситуаціях, коли водопровідна вода містить високий рівень домішок або мінералів, які можуть негативно впливати на глину або процес випалу цегли, може знадобитися додаткова водопідготовка або очищення води. Якість води має вирішальне значення, оскільки вона може впливати на пластичність, консистенцію та загальні характеристики глини. Забруднюючі речовини у воді, такі як надмірна кількість мінералів або домішок, можуть призвести до таких проблем, як погана оброблюваність глини, небажане забарвлення або погіршення якості цегли. Роботи агрегату підготовки сировини представлено на рис.2.2.



Рисунок 2.2 – Агрегат підготовки сировини

Далі суміш надходить у стрижневий змішувач, який є гранулятором. На цьому етапі глина остаточно перемішується до однорідності та гранулюється. Основна функція гранулятора полягає в зменшенні розміру і формуванні сировинної суміші, перетворюючи її на гранули або пелети, придатні для подальшої обробки в процесі виробництва цегли. Гранулятор допомагає досягти рівномірного і послідовного розподілу частинок за розміром, що полегшує ефективну і контрольовану обробку матеріалу.

Стрижневий змішувач складається з таких елементів:

- Металева рама;
- Гранулятор;
- Привід обертання гранулятора;

Гранулятор обертається навколо своєї осі та рівномірно переміщує та гранулює матеріал для подальшої обробки. Принцип дії проілюстровано на рис.2.3.



Рисунок 2.3 - Гранулятор в стрижневому змішувачі

На наступному етапі гранульована сировина проходить через контрольний пункт та спеціального роду магніт. Контрольним пунктом є вологомір який перевіряє вміст вологи в сировині і, якщо він буде вище, або нижче норми, то автоматизована лінія поверне матеріал на додаткову обробку. Магніт використовується для усунення можливого потрапляння металевої стружки в сировину в процесі обробки, або транспортування. Найчастіше використовують магніт у вигляді г-подібної палиці на рухомій основі, кінець г-подібної палиці контактує з верхнім шаром сировини та таким чином збирає металеву стружку за її наявності в сировині.

Після цього сировина потрапляє на формувальний етап. На цьому етапі сировина потрапляє до вакууматора де видаляється все повітря з сировини. Після проходження вакуумного етапу сировина потрапляє до пресу, де під силою 450

кг/см² відбувається пресування сировини та видавлювання через спеціальну форму, на виході отримуємо заготовку. Цей процес представлено на рис.2.4.

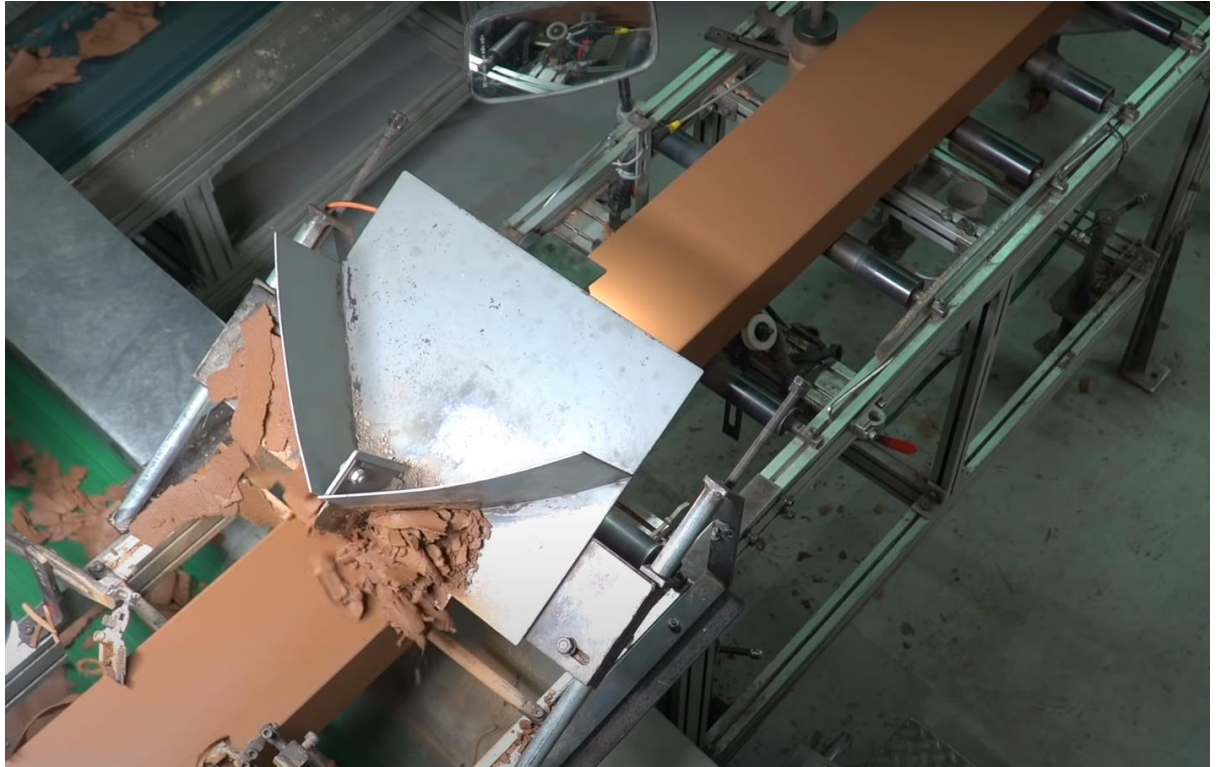


Рисунок 2.4 - Заготовка після пресування

Наступним кроком є зона нарізання, в якій в залежності від потреб механічно відділяється форми цегли від заготовки з заданими геометричними параметрами. Для нарізання використовують спеціальні металеві струни, які швидко та точно розрізають заготовку, спочатку по довжині, а потім завдяки множинним струнам спеціальним різакom з заготовки виходять форми готової керамічної цегли. Саме тут особливо прискіпливо перевіряють якість цегляних форм, а ті форми, які мають відхилення по структурі чи по розмірах, повертають знову на етап гранулювання. Даний етап проілюстровано на рис.2.5.



Рисунок 2.5 - Зона нарізання

Наступним етапом є комплектування багатоцільовими маніпуляційними роботами отриманих цегляних форм на спеціальні вагонетки для подальшого сушіння, заготовки вкладаються таким чином, щоб кожен наступний ряд був протилежно направленим попередньому, тому використовується принцип парних та не парних поверхів, спочатку заповнюються парні поверхи, а потім не парні. Обов'язково за цим процесом наглядає оператор, який контролює правильно позиціонування самих форм які подаються та маніпуляційних роботів. Цегляні форми позиціонуються на однаковій відстані одна від одної від 2 до 5 см для подальшого сушіння, адже це є важливою умовою рівномірного висушування цегляних форм. Даний етап проілюстровано на рис.2.6.

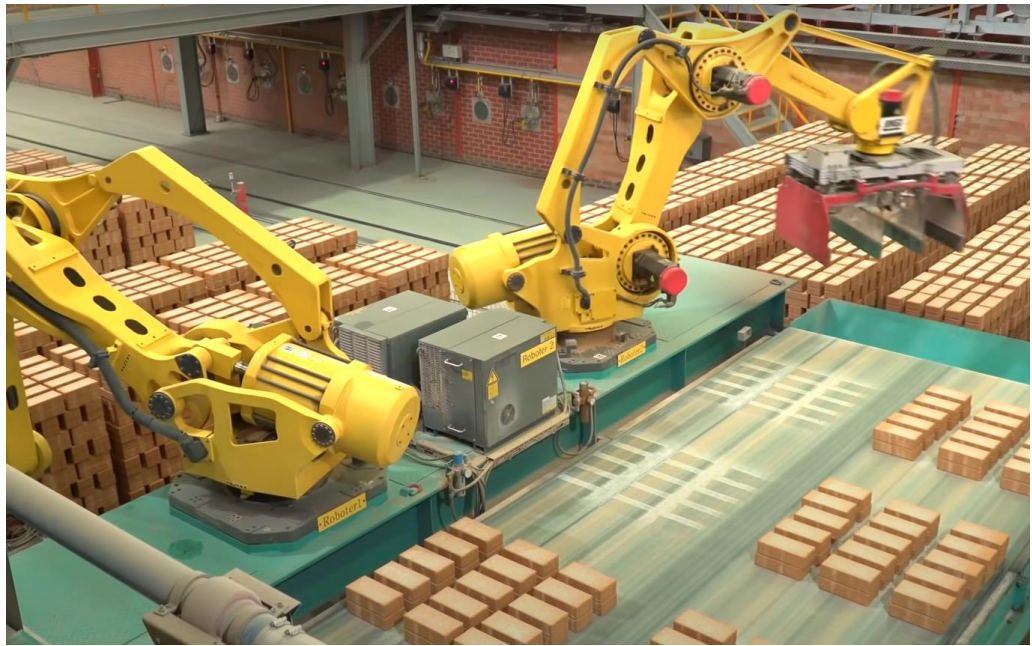


Рисунок 2.6 – Комплектування цегли маніпуляційним роботом

Залишилося два виробничих етапи, це сушіння цегляних форм та обжиг вже сформованої керамічної цегли в тунельній печі періодичної дії, а також пакування готової цегли. Ці етапи будуть детальніше розглянуті далі.

Після визначення всіх основних вузлів було складено загальну структурну схему виробництва керамічної цегли яка включає кожний етап і представлена на рис.2.7.

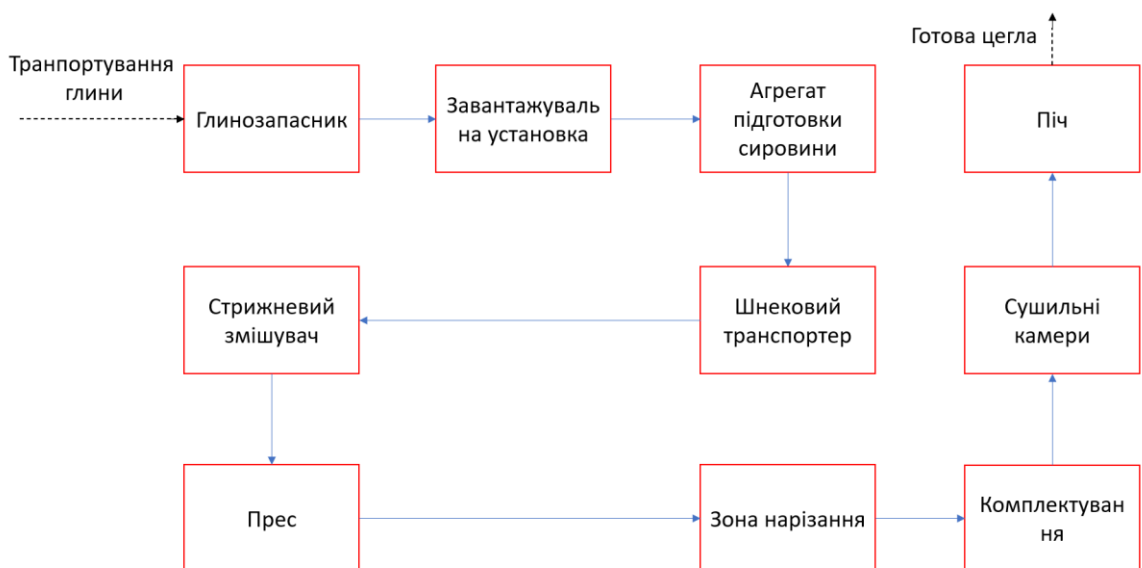


Рисунок 2.7 - Загальна структурна схема виробництва керамічної цегли

2.2 Технологічний аналіз процесу сушіння керамічної цегли

Після комплектування вагонеток для сушіння, формами цегли, вони відправляються до тунельної сушарки з поперечним ходом теплоносія. Вся тунельна сушарка складається з 10 окремих камер. Теплопостачання надходить по схемі на три основні блоки, тобто 3-4-3. Для енергоефективного та безвідходного виробництва використовується відпрацьоване повітря від печі в якій відбувається обжиг. Розробляється система теплопостачання яка використовує і теплогенератор і відпрацьоване повітря від печі в якості подальшого теплоносія для камер сушіння. Сушіння відбувається під дією таких виконавчих механізмів як теплогенератора ТВС-600 який є основним джерелом тепла та використовується у випадку відключення печі, або недостатньої температури теплоносія, циркуляційного вентилятора МВТ-090-290-14Р основне завдання якого рівномірно направити теплоносій до кожної вагонетки з цегляними формами, вентилятора витяжки ВЦ 4-75-12,5 (рис.2.8) і мережі повітропроводу з клапанами для подачі готового теплоносія до кожної камери окремо та виведення відпрацьованого повітря. Також використовуються датчики температури та вологості, а також витратоміри.



Рисунок 2.8 - Вентилятор витяжки ВЦ 4-75-12,5

Кожна сушильна камера має двосторонні двері, що піднімаються за допомогою електричного підйомного механізму. У центральній частині камери розміщено шість паралельних рейкових шляхів і металеві 10-ярусні стелажі, призначені для розміщення пар рейок з цеглою. Зверху імпровізована стеля з азбестоцементних листів приховує верхню частину камери. Така конфігурація утворює порожнину, що дозволяє циркуляцію теплоносія, забезпечуючи комплексний процес сушіння всього штабеля. В бокові стінки вбудовані направляючі апарати, стратегічно розміщені для рівномірного розподілу теплоносія по всьому поперечному перерізу сушильної камери. Циркуляційний осьовий вентилятор, зокрема модель МВТ-090-290-14Р (рис.2.9), прикріплений до центральної перегородки для ефективною циркуляції повітря і контролю температури.



Рисунок 2.9 - Циркуляційний вентилятор МВТ-090-290-14Р

Процес доставки штабелів з цеглою також має свої правила, штабелі повинні чередуватися по внутрішній температурі для того, аби збалансувати температуру навколо швидше і процес сушіння відбувався максимально рівномірно.

Кожна окрема камера оснащена прецизійним клапанним механізмом, призначеним для ефективного виведення вологого відпрацьованого повітря в навколишню атмосферу. Подача нагрітого повітря в камеру ретельно організована, воно надходить як із зони охолодження обпалювальної печі, так і від теплогенератора ТВС-600, що працює на природному газі. Завдяки налаштованому принципу роботи, теплогенератор забирає навколишнє повітря з цеху, підвищуючи його температуру до 120°C за допомогою процесу теплообміну. Цей рівномірно підігрітий теплоносій потім направляється назад у сушильну камеру, оптимізуючи теплове середовище для процесу сушіння. Після того, як теплоносій виконає свій робочий цикл, витяжний вентилятор, зокрема модель ВЦ 4-75-12.5, видаляє відпрацьований теплоносій, забезпечуючи постійну ефективність і безперебійну роботу системи.

Після завершення процесу сушіння, цеглу виймають з сушильних рейок або сушильних лотків і комплектують маніпуляційними роботами як і на етапі комплектування, у візок для подальшого введення в піч (рис.2.10). Вогнетривка цегла встановлюється всередині печі, де вона піддається випалу.



Рисунок 2.10 - Завантаження цегли в піч для проведення випалу

Архітектурна конструкція цегельної печі складається з трьох ключових зон: підготовчої, випалювальної та охолоджувальної. Ядром технологічного процесу заводу є зона випалу, де обладнання для випалу організовує перетворення цегли-сирцю на міцну, високоякісну продукцію. Сам процес випалу виконується ретельно, зі стратегічно розташованими пальниками над піччю, що забезпечують рівномірний розподіл тепла для досягнення оптимального результату. Після того, як цегла пройшла всі етапи в печі, спеціальний пічний візок організовує її переміщення до станції пакування цегли - ключового вузла виробничої лінії, де ретельно обпалена цегла готується до подальшого розподілу.

Автоматичні гідравлічні грейфери дозволяють ефективно виймати випалену цеглу з печі і складати пачки на транспортувальні піддони. Упаковка для піддонів з керамічною цеглою виконується двома способами: за допомогою стретч плівки, або з використанням металевої або поліуретанової стрічки. Після цього цеглу групують як готовий продукт.

3. ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ. ВИБІР КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ

3.1 Інформаційний аналіз об'єкта керування

Досконале володіння термічними процесами, зокрема тонкощами сушіння та випалу, є основою для досягнення енергоефективного виробництва керамічної цегли. Приступаючи до трансформації існуючого цегельного заводу для реалізації нового проекту, першочерговий виклик полягає в організації оптимального поєднання: максимізації ефективності теплової установки, забезпечення якості кінцевої продукції в заданому діапазоні та одночасної мінімізації витрат енергії, що є невід'ємною частиною всього процесу. Це завдання вимагає комплексного підходу, де інноваційні технології та ретельне планування реалізуються, щоб створити основу для сталого та високоефективного виробництва цегли, встановлюючи нові стандарти якості та енергозбереження.

Особливо важливою є енергоефективність процесу сушіння, який є одним із найбільш енергоємних у виробництві керамічних виробів. Тому більшість виробників використовують передові технології та автоматизують даний процес на всіх рівнях автоматизації, задля уникнення непередбачуваних проблем які можуть призвести до браку готової продукції, або зменшення терміну експлуатації.

Тунельні сушарки, що широко використовуються в промисловому секторі, є надійним обладнанням, виготовленим здебільшого з міцних металевих конструкцій або з міцної цегли. Оскільки процес сушіння займає центральне місце у виробництві, багато дослідників спрямовують свої зусилля на детальний аналіз цього ключового етапу. Їхні зусилля виходять за межі зовнішніх умов, таких як витрати повітря, температури, відносної вологості та швидкості. Інший аспект досліджень ретельно вивчає внутрішні умови, зосереджуючись на тонких механізмах, що керують рухом вологи, та їхньому глибокому впливі на якість кінцевого продукту.

Є складність механізмів транспортування вологи в самому матеріалі, що обробляється. Саме ця перспектива - поєднання зовнішніх кліматичних впливів з внутрішньою динамікою матеріалу - стимулює розвиток промислових методів сушіння в напрямку точності та оптимізації. У міру розвитку досліджень синтез знань, отриманих із зовнішніх і внутрішніх чинників, дозволяє вдосконалити процес сушіння, що в кінцевому підсумку спрямує галузь до підвищення ефективності та якості продукції [5].

Схема інформаційно-матеріальних потоків представлена на рис.3.1.

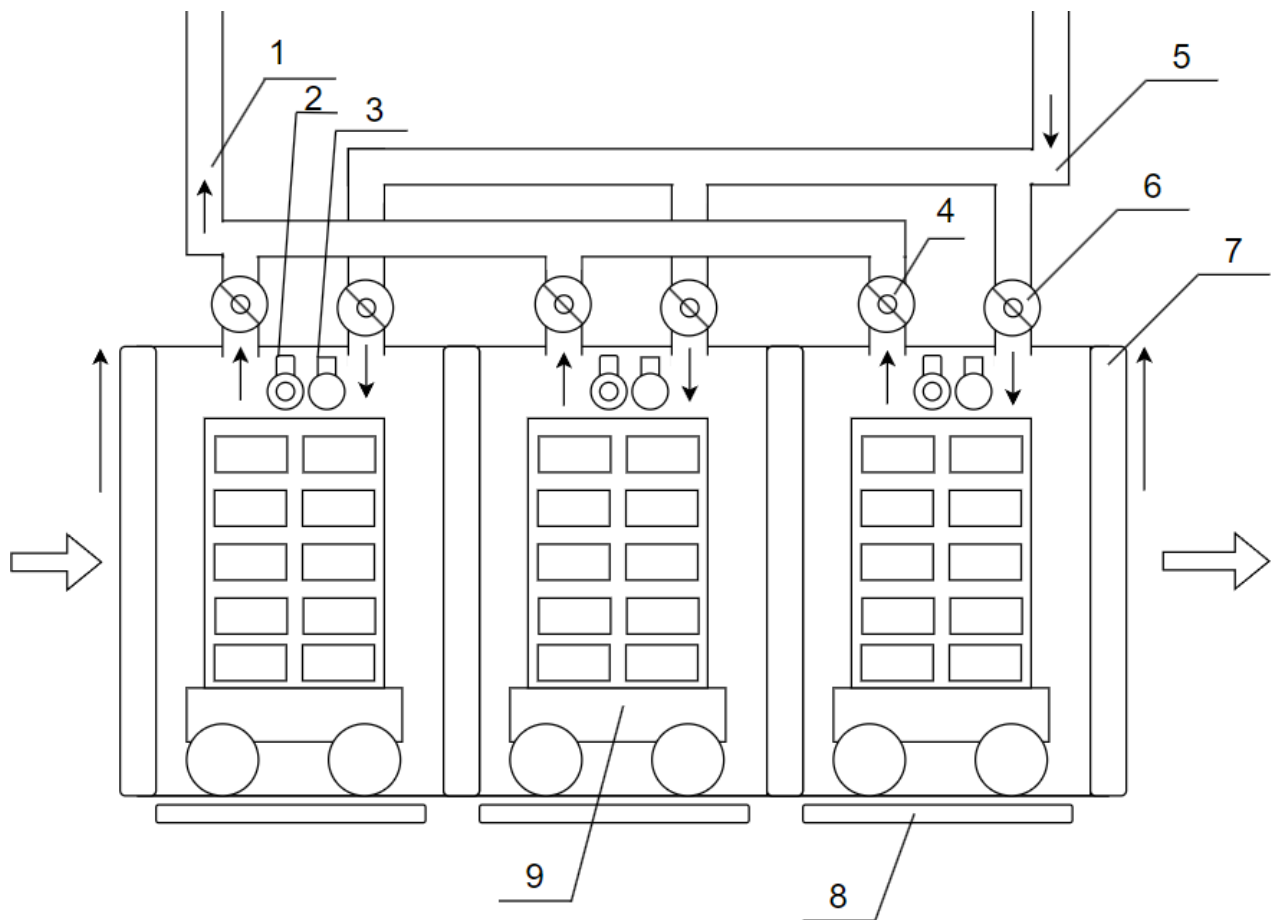


Рисунок 3.1 – Схема інформаційно-матеріальних потоків сушіння цегли

На рисунку 3.1 використані такі позначення:

1 – повітропровід відпрацьованого повітря; 2 – датчик вологості; 3 – датчик температури; 4 – заслінка регулювання відпрацьованого повітря; 5 – трубопровід подачі нагрітого повітря; 6 – заслінка регулювання нагрітого повітря; 7 – двері; 8 – тензодатчик; 9 – електролафет.

До завантаження сировини в сушильну камеру вимірюють вологість та вагу заготовок цегли, після цього відкриваються двері 7 та до сушильної камери подають електролафет 9 з заготовками цегли. Далі тензодатчиками 8 вимірюється вага на трьох етапах сушіння цегли. В самих камерах є датчик вологи 2 та датчик температури 3 які контролюють параметри всередині кожної сушильної камери, при заданих показниках температури та вологості які показують ці датчики відбувається відкриття або закриття заслінок 4, або 6 в залежності від ситуації.

На сьогоднішній день існують добре розроблені підходи до математичного опису процесів теплообміну та масообміну, на підставі яких формуються зручні математичні моделі об'єктів. Вони зводяться до стабілізації режимних параметрів окремих контурів.

Типовою проблемою існуючих автоматизованих систем є обмежена можливість ефективного регулювання параметрів повітря, яке подається в сушарку під час процесу сушіння сировини. Це, в свою чергу, може призвести до появи дефектів, таких як тріщини, відшарування та порожнини. Вирішення цього недоліку сприятиме стабілізації якості виробленої продукції і підвищенню ефективності роботи технологічного обладнання.

3.1 Вибір локальних контурів керування

Перш за все це керуючі впливи які змушують коливатися показники всередині сушильної камери, до них відносяться:

- Витрата повітря;

- Температура повітря.

Окрім керуючих впливів існують збурюючі впливи які негативно впливають на систему і які постійно треба тримати у контролі, до них відносяться:

- Початкова вологість сировини;
- Початкова температура сировини;
- Нестабільність питомої маси сировини;
- Нерівномірність подачі повітря;
- Вологість повітря.

А також оперативні показники які є еталонними для нас та є критерієм якості сушіння керамічної цегли в сушильній камері, до них відносяться:

- Температура на виході;
- Втрата маси;
- Відсутність дефектів матеріалу.

Всі впливи та показники представлені на схемі параметричних впливів та показників рис.3.2.

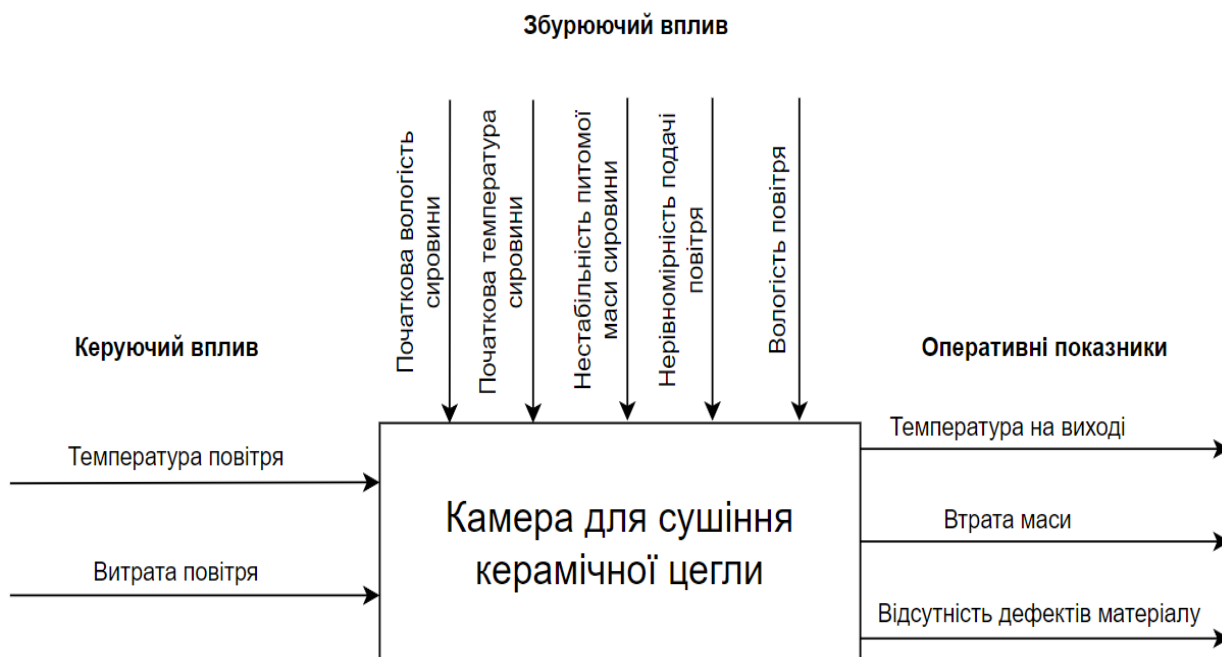


Рисунок 3.2 – Структурна схема параметричних впливів та показників

Основним завданням системи управління є енергоефективне сушіння керамічної цегли. Підтримка такого керування буде заощаджувати витрату теплоносія, що буде добре відобразитися на економічних показниках, екологічності, та оптимальних витрат ресурсів.

Зазвичай завдання оптимізації керування процесом сушіння будівельних матеріалів полягає в пошуку керуючих впливів за допомогою багатофакторних моделей. Ці моделі встановлюють зв'язки між параметрами сировини та показниками якості кінцевої продукції, наприклад, цегли. Підвищення точності оптимального керування одночасно вирішується шляхом визначення коефіцієнтів у моделі.

Після ретельного аналізу технологічного процесу, можна визначити, що процес сушіння цегли є слабоформалізованим, адже існує багато факторів, які впливають на процес в цілому, або на окремі ланки. До таких факторів відносяться:

- Зовнішні параметри сушильної камери;
- Теплова інерційність сушильних камер;
- Контраст температур на перехресті сушильних камер;
- Візуальні та якісні дефекти сировини які вимагають присутність оператора;
- Порушення технічного регламенту виробництва та пропорції;
- Людський фактор.

Враховуючі всі ці фактори оптимально використовувати загальну модель сушіння керамічної цегли, як основну, адже існує багато різних варіантів початкових умов, таких як: початкова температура сировини, початкова вологість сировини та інші. Актуальність загальної моделі сушіння полягає в її адаптивності до різноманітних початкових умов. Від різних температур, при яких сировина починає сушіння, до коливань рівня вологості, загальна модель діє як універсальна структура, здатна інкапсулювати весь цей спектр. Ця адаптивність виявляється корисною для інкапсуляції тонкощів різних сценаріїв, що дозволяє проводити

аналіз, який враховує широкий спектр умов, що зустрічаються в практичних промислових умовах.

Звідси випливає, що першим локальним контуром керування є контур контролю температури, витрат повітря та вологості в сушильній камері (рис.3.3). Даний контур є основним у енергоефективному керуванні процесом сушіння керамічної цегли, адже саме тут відбувається керування основними технологічними параметрами, які можна оптимізувати.

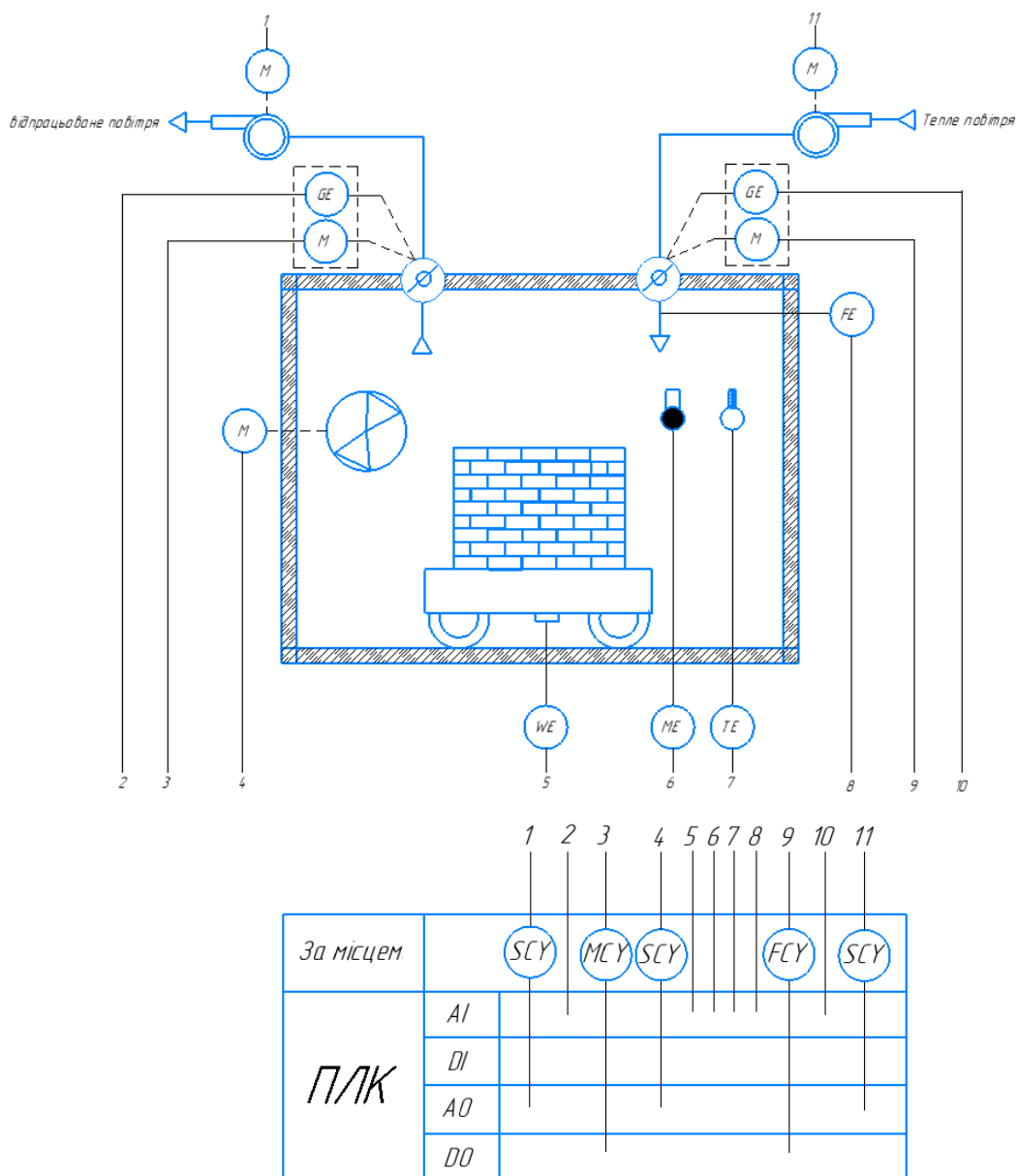


Рисунок 3.3 - Контур контролю температури, витрат повітря та вологості в сушильній камері

На рисунку 3.3 використані такі позначення:

ME - датчик вологості повітря, FE - датчик витрати повітря, TE - датчик температури повітря, GE - датчик положення заслінки теплого та відпрацьованого повітря, WE – датчик ваги, SCY - частотний перетворювач, FCY, MCY - пристрій плавного пуску, M - електродвигун приводу, ПЛК – програмований логічний контролер.

Наступним локальним контуром є контур керування приводом електролафету, принцип якого побудовано на фотодатчику та відбитих променях. Це надає можливість зупиняти, або навпаки запускати привід в залежності від ситуації та перенаправляти цеглу в іншу камеру на наступний етап сушіння. Даний каскад руху забезпечує автоматизацію доставки матеріалу з камери в камеру для рівномірного висушування на кожному етапі (рис.3.4).

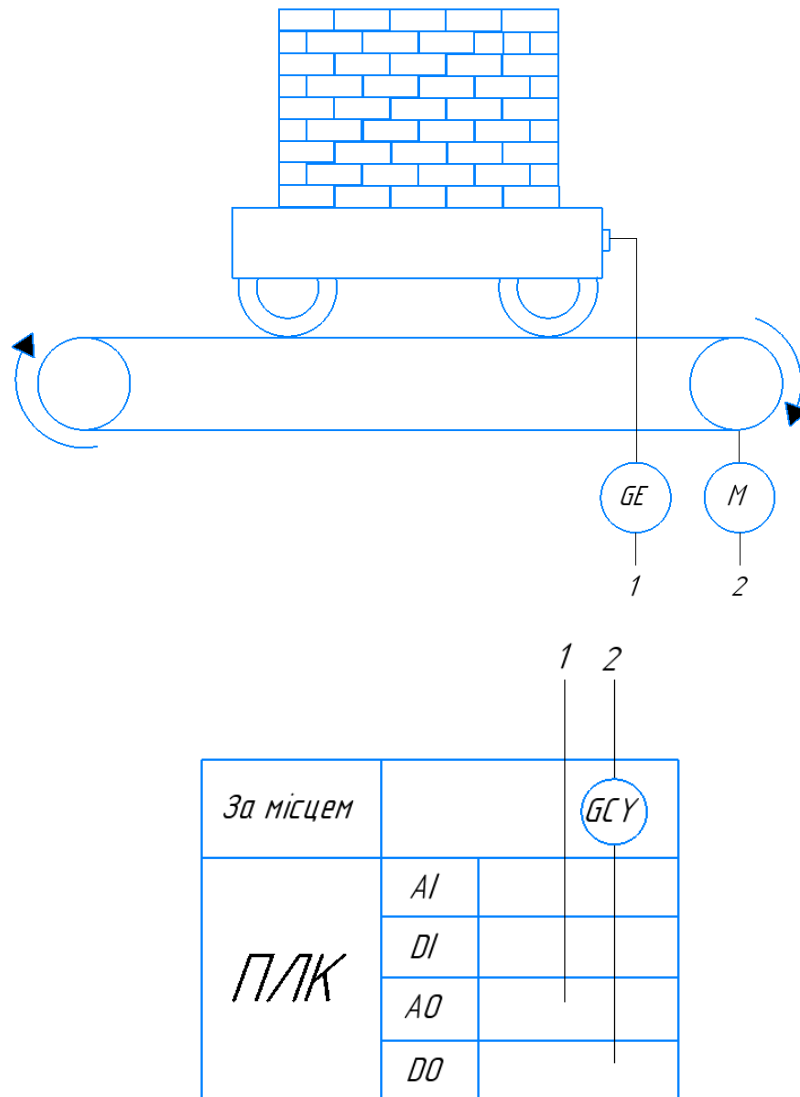


Рисунок 3.4 - Контур керування приводом електролафету

На рисунку 3.4 використані такі позначення:

ПЛК – програмований логічний контролер, GE – фотодатчик положення візка, М – двигун електролафету

Останнім локальним контуром керування є контур керування положенням дверей між сушильними камерами (рис.3.5). В даному контурі двері підіймаються та опускаються завдяки електроприводу. Початкове положення дверей фіксується за допомогою індуктивних датчиків положення, які розташовані з верхнього та нижнього краю дверей. Електропривід дверей керується пристроєм плавного пуску. Алгоритм роботи дверей в процесі завантаження наведено в додатку А.

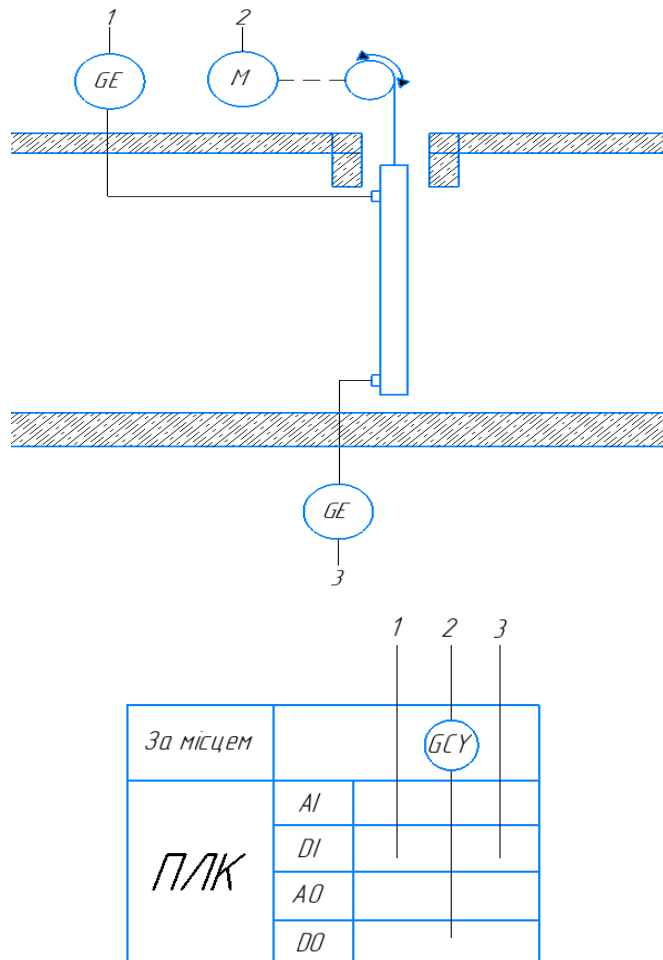


Рисунок 3.5 - контур керування положенням дверей між сушильними камерами

На рисунку 3.5 використані такі позначення:

GE – індукційні датчики положення, GCU – пристрій плавного пуску, M – привід дверей, ПЛК – програмований логічний контролер

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУШІННЯ ЦЕГЛИ

4.1 Аналіз проблеми сушіння

У загальному підході, технологічний процес сушіння цегли розглядається як поєднання трьох різних фізичних процесів [6, 11, 12, 13]: конвективної дифузії, капілярної дифузії та десорбції вологи. Ці процеси діють одночасно, впливаючи на перебіг теплових, масообмінних та гідродинамічних явищ. Отже, математична модель процесу сушіння в ідеалі включає одночасне застосування рівнянь теплопередачі, закону Фіка та співвідношень, що описують гідродинаміку процесів у капілярній системі матеріалу, що сушиться.

Створення математичної моделі сушіння керамічної цегли складається з двох складових:

1. Фаза сушіння при постійній швидкості, коли випаровування вологи наближається до адіабатичних умов, а волога присутня виключно на поверхні матеріалу, перебуваючи у вільному стані. За цих обставин випаровування вологи відбувається при контакті з теплоносієм в конвективному потоці.
2. Фаза сушіння зі зниженою швидкістю, коли поступово знижується відсоток вологи матеріалу, а межа випаровування проникає все нижче з поверхні до центру матеріалу.

Запишемо математичну модель сушіння для окремої цеглини (рис.4.1), яка буде представляти собою диференційні рівняння масопереносу та теплопереносу в частотних похідних та об'єднані системою, яка показує зміни основних технологічних параметрів якими є вологість U та температура T .

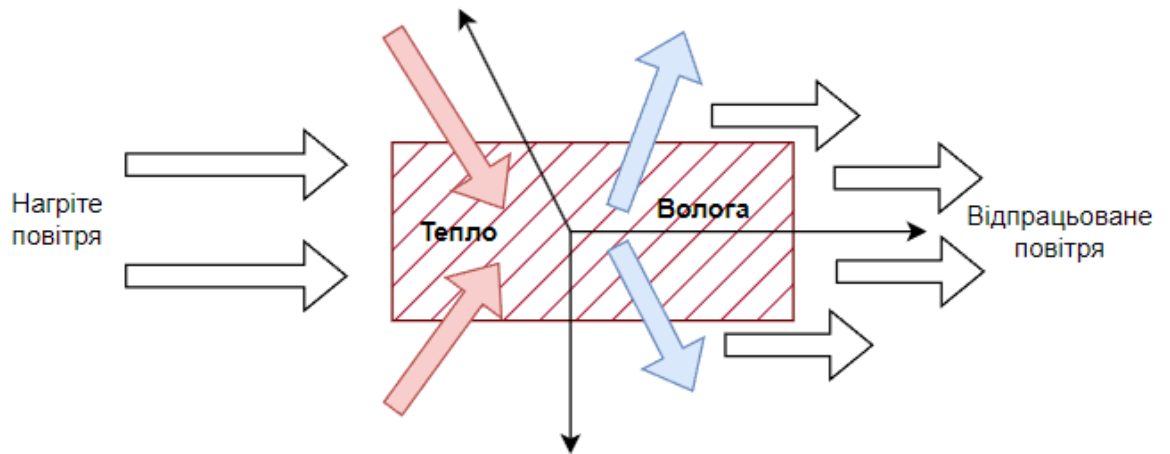


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення процесу сушіння окремої цеглини

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \tau} = D \nabla^2 u + D \delta_m \cdot \nabla T \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \end{cases} \quad (1)$$

де ∇ – оператор Лапласа;

a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с;

D – коефіцієнт молекулярної дифузії, м²/с;

δ_m – термоградієнтний коефіцієнт;

ε – коефіцієнт фазового перетворення;

r – питома теплота пароутворення, кДж/кг;

c – масова теплоємність, кДж/(кг·К) [5].

Але дана система не є загальною, адже необхідно доповнити її початковими та граничними умовами, що само по собі являється окремою, не простою задачею. З точки зору математичних розрахунків задачі управління, математична модель процесу сушіння цегли має ряд суттєвих невизначеностей та недоліків, таких як:

- Складний чисельний розв'язок системи з усіма доповненнями;
- Відсутність стійких даних в літературних джерелах, та принципова складність отримання даних експериментальним шляхом;

- Стійка залежність параметрів від технологічного процесу проведення сушіння в камері;
- Складний принцип отримання передатних функцій з часткових похідних диференціальних рівнянь при синтезі законів управління;
- Труднощі в адаптуванні математичної моделі до висушування великої кількості цеглин одночасно.

Всі ці фактори, змушують нас шукати такий підхід до розробки математичної моделі технологічного процесу сушіння цегли в камерній сушарці періодичної дії, який забезпечує створення енергоефективних умов системи керування за обмежених можливостей та з прийнятною точністю.

4.2 Прийняття та обґрунтування припущень для спрощення режимів

При ретельному вивченні тонкощів, що регулюють процес сушіння, аналіз забезпечує основу для побудови математичної моделі, яка ідеально відповідає цілям сушіння цегли-сирцю в камерній сушарці періодичної дії. Враховуючи складнощі, притаманні цьому технологічному процесу, було зроблено низку припущень, які не є обмеженнями, а радше стратегічними спрощеннями. Ці припущення формують основу для розробки моделі, підібраної для відображення суті досліджуваного об'єкта.

- Розсіювання тепла в навколишнє середовище в процесі сушіння в камерній сушарці залишається в межах 8-10% по відношенню до загальної теплової рівноваги. Ці втрати мають мінімальну варіацію протягом одного циклу сушіння, що дозволяє вважати їх постійними. Отже, в нашій моделі ми будемо розглядати теплові втрати як коефіцієнт, визнаючи їх стабільність протягом усього процесу сушіння.
- Оскільки цикл сушіння відбувається в умовах ретельного контролю якості, температурний режим тісно пов'язаний з нормативними стандартами.

Максимальний температурний діапазон залишається в межах 30°C. Отже, такі фактори, як густина теплоємності, коефіцієнт теплопередачі та інші, які зазвичай мають залежність від температури, не беруться до уваги. Замість цього вони розглядаються як постійні та усереднені величини завдяки постійним температурним умовам в межах контрольованого процесу сушіння.

- Беручи до уваги розташування цегли-сирцю в вагонетках на та кожному поверхі штабелю, можна припустити, що кожна окрема цеглина в штабелі перебуває в однакових теплових і гідродинамічних умовах відносно інших та отримує повний контакт з теплоносієм. Отже, всю цеглу в конвективній камері періодичної дії можна розглядати як єдиний штабель, що характеризується рівномірним і усередненим одночасним нагріванням по всьому його об'єму.
- Враховуючи рівномірний розподіл теплоносія по всій площі поперечного перерізу сушильної камери, що легко досягається завдяки добре спроектованим повітроводам, а також специфічне розташування цегли-сирцю на візку, яке забезпечує безперешкодний доступ теплоносія до матеріалу по всьому об'єму, індукуючи при цьому турбулентність потоків, можна стверджувати, що гідродинамічний режим теплоносія в сушарці наближається до умов ідеального перемішування [5].

4.3 Формування математичної моделі

Як встановлено, основною метою математичного формулювання проблеми (або розробки математичної моделі) є отримання набору математичних співвідношень, що відображають поведінку і характеристики модульованого об'єкта. З формальної точки зору, математична модель включає в себе взаємозалежності між вхідними і

вихідними змінними, забезпечуючи точне уявлення про фізичну (або іншу) природу процесів, що відбуваються в об'єкті.

Враховуючи, що кожен об'єкт моделювання за своєю суттю має матеріальну основу, система рівнянь для математичного опису постійно включає рівняння матеріального балансу, будь то в загальному контексті, або спеціально адаптоване для конкретної речовини. Включення рівнянь теплового балансу стає актуальним лише тоді, коли теплові явища в об'єкті набувають помітної ролі.

Дослідження процесу сушіння в сушарці періодичної дії підкреслює переважний вплив теплових явищ. Отже, математична модель повинна включати рівняння матеріального і теплового балансу. Варто зазначити, що протягом усього циклу сушіння цегли-сирцю кількість глини і сухого повітря залишається постійною. Таким чином, складання рівнянь матеріального балансу для сухої маси цегли і сухого повітря вважається зайвим.

4.3.1 Тепловий баланс об'єкта відносно теплоносія

Сформулюємо тепловий баланс для об'єкта керування - камерної сушарки для цегли-сирцю - з урахуванням схематичного представлення теплових потоків (рис.4.2). Цей аналіз включає в себе ідеалізації та спрощення, згадані вище.

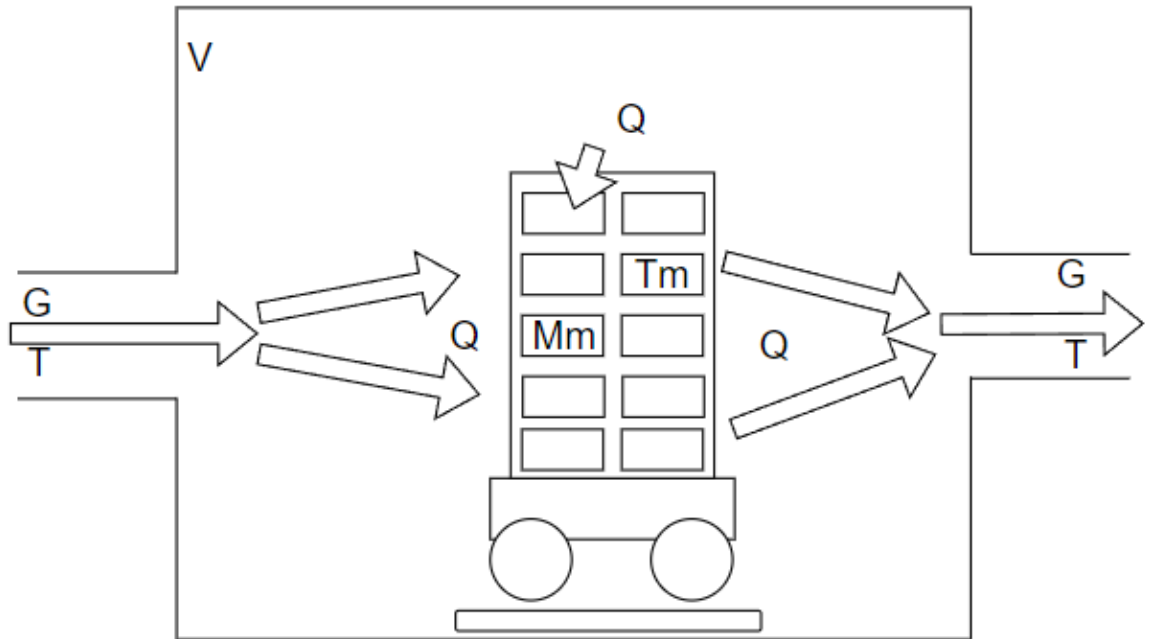


Рисунок 4.2 - Схема теплових потоків об'єкта управління

Теплова рівновага відносно об'єкта керування у зв'язку з теплоносієм в цілому

$$\Delta Q = Q_n - Q_k - Q_w, \quad (2)$$

При цьому швидкість накопичення (збільшення або зменшення) ентальпії теплоносія в об'ємі камерної сушарки, що позначається як ΔQ , можна визначити, дослідивши швидкість зміни температури теплоносія в сушарці, представлену через T .

$$\Delta Q = V_{ck} \cdot \rho_{pov} \cdot c_{p_pov} \cdot \frac{dT_{pov}}{dt}, \quad (3)$$

де V_{ck} – об'єм камерної сушарки; ρ_{pov} та c_{p_pov} - щільність та питома ізобарна теплоємність теплоносія відповідно;

Кількість тепла, позначена як Q_n , що надходить до камерної сушарки через вхідний потік теплоносія, може бути визначена за допомогою виразу:

$$Q_n = G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov} \cdot c_{p_rov} \cdot T_{rov}^0, \quad (4)$$

де G_{rov}^0 – об'ємна витрата теплоносія, що гріє, з параметрами ρ_{rov} , c_{p_rov} на вході в сушарку; T_{rov}^0 - температура теплоносія на вході в сушарку;

Кількість теплоти, представлена як Q_k , що виходить з камерної сушарки з вихідним потоком теплоносія, який складається з масових потоків повітря $G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov}$ і пари M_{ww} , що виникають протягом усього процесу сушіння матеріалу, виводиться з наступного виразу:

$$Q_n = (1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{rov}^0 \cdot \rho_{rov} + M_{ww}) \cdot c_{p_rov} \cdot T_{rov}^0, \quad (5)$$

де β_{pt} – коефіцієнт втрат тепла через зовнішню стінку сушарки.

Кількість тепла, позначена як Q_w , що витрачається в процесі сушіння матеріалу конвективним методом, розраховується за формулою Ньютона [11].

$$Q_w = \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{rov} - T_{mat}), \quad (6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до поверхні матеріалу

F_{mat} являє собою сукупну площу поверхні теплопередачі матеріалу, що сушиться. У контексті цегли вона точно визначається як загальна площа поверхні цегли-сирцю, завантаженої для процесу сушіння.

$$F_{mat} = k_f \cdot f_{mat} \cdot N_c, \quad (7)$$

Підставивши рівняння (3) - (7) в (2), отримаємо рівняння теплового балансу відносно теплоносія

$$\frac{dT_{пов}}{dt} = \frac{G_{пов}^0 \cdot T_{пов}^0}{V_{ck}} - \frac{(1+\beta_{pt}) \cdot (G_{пов}^0 \cdot \rho_{пов} + M_{ww}) \cdot T_{пов}}{V_{ck} \cdot \rho_{пов}} - \frac{0,106 \cdot \alpha \cdot k_f \cdot N_c \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{V_{ck} \cdot \rho_{пов} \cdot c_{p,пов}} \quad (8)$$

4.3.2 Тепловий баланс об'єкта керування відносно матеріалу, що висушується

Рівняння, що описує теплову рівновагу об'єкта керування щодо матеріалу, який проходить одночасно нагрівання та сушіння в сушарці періодичної дії, представлене в комплексному форматі.

$$\Delta Q_m = Q_{mn} - Q_{mk} - Q_w, \quad (9)$$

Враховуючи ідеалізацію процесу сушіння та його різноманітні механізми, що залежать від конкретних умов, ми стверджуємо, що в теплових процесах сушіння матеріалу сам матеріал можна розглядати як форму "транспорту" для випаровування. Отже, різниця між тепловим вкладом при завантаженні матеріалу для сушіння, позначеним як Q_{mn} , і тепловіддачею з матеріалом при вивантаженні, Q_{mk} , після завершення процесу сушіння, або незначна, або практично дорівнює нулю в порівнянні із загальною кількістю тепла, необхідного для сушіння.

$$Q_{mn} - Q_{mk} = 0. \quad (10)$$

У процесі сушіння матеріалу, як з'ясовано раніше, швидкість конвективного теплообміну між теплоносієм і матеріалом змінюється на різних стадіях сушіння. На початковій і кінцевій стадіях вона залежить від різниці температур між теплоносієм ($T_{пов}$) і поверхнею матеріалу (T_{mat}). І навпаки, на другому етапі процес сушіння відбувається при постійній температурі поверхні матеріалу, саме при постійній температурі "мокрого термометра" (T_{mt}) за термодинамічних умов теплоносія.

Для завершення першого етапу сушіння матеріал повинен бути нагрітий від початкової температури T_{mat0} до температури "мокрого термометра" T_{mt} . Ця вимога виконується, коли порушується нерівність $T_{mat} < T_{mt}$, особливо коли початкова температура матеріалу нижча за температуру "мокрого термометра", що зазвичай спостерігається.

Другий етап сушіння завершується, якщо охоплюється сам процес випаровування, це вимагає одночасного виконання двох умов: $T_{mat} = T_{mt}$ і $u_{mat} \geq u_{mat}^*$, де u_{mat}^* - критична вологість матеріалу.

Третій етап здійснюється при одночасному виконанні інших двох умов $T_{mat} > T_{mt}$ та $T_{mat} < T_{пов}$ [12].

Отже, для визначення Q_w - кількості теплоти, що витрачається в процесі сушіння матеріалу, використовуємо формули (6) і (7), ретельно враховуючи вищезгадані умови. З урахуванням умов, викладених раніше, отримаємо:

$$Q_w = \begin{cases} \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{пов} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{пов} - T_{mat}) & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{пов}. \end{cases} \quad (11)$$

Тут u_{mat} – вологість матеріалу, що висушується, u_{mat}^* - рівноважна (критична) вологість матеріалу, після якої швидкість видалення вологи з матеріалу стає значно меншою.

Отже, рівняння теплового балансу об'єкта управління відносно матеріалу, що нагрівається та сушиться в камерній сушарці періодичної дії, з урахуванням (4-6), (9) та (10) [7].

$$\frac{dT_{mat}}{dt} = \begin{cases} \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0 & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{пов}. \end{cases} \quad (12)$$

4.3.3 Матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в матеріалі

Схематичне зображення матеріальних потоків, що ілюструють передачу вологи від матеріалу до теплоносія в процесі конвективного сушіння та її подальше видалення з камерної сушарки, зображено на рис.4.3.

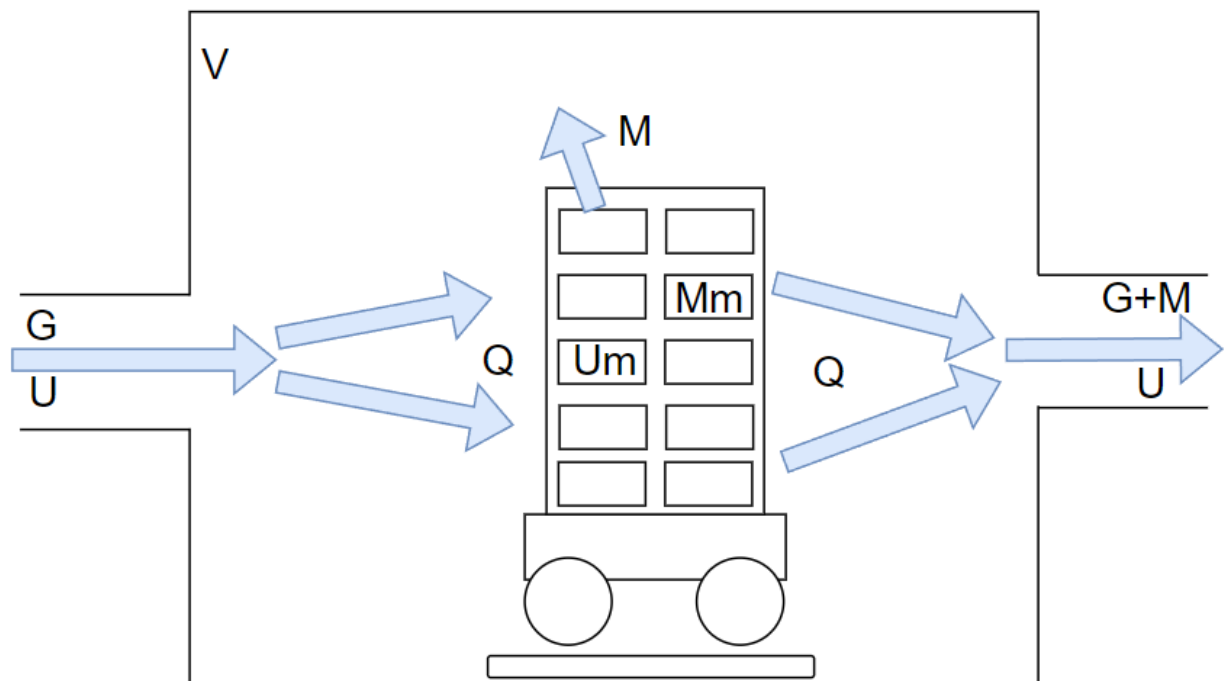


Рисунок 4.3 - Схема матеріальних потоків об'єкта керування

Загальне формулювання рівняння матеріального балансу, що стосується вологи в матеріалі, має вигляд

$$\Delta M_{wm} = M_{wm_n} - M_{wm_k} - M_{ww}, \quad (13)$$

де ΔM_{wm} – є швидкістю зміни маси вологи в матеріалі в результаті висушування, ця швидкість знаходиться з виразу

$$\Delta M_{wm} = M_{mat_c} \cdot \frac{du_{mat}}{dt}, \quad (14)$$

де M_{mat_c} – маса сухого матеріалу, що висушується, кг, яка може бути визначена через кількість цегли в штабелю N_c та сухої маси однієї цеглини.

M_{wm_n} і M_{wm_k} представляють маси вологи, що надходить у камеру з матеріалом і виходить з неї, відповідно. Однак, оскільки процес, що відбувається з матеріалом, є періодичним, ці величини є незначними, тобто

$$M_{wm_n} = M_{wm_k} = 0; \quad (15)$$

M_{ww} означає масу вологи, яка випаровується з матеріалу за певну одиницю часу, переходячи в зовнішнє середовище і змішуючись з теплоносієм. Щоб вивести вираз для розрахунку M_{ww} , введемо наступні міркування:

Кількість тепла, необхідна для випаровування 1 кг вологи з відкритої поверхні матеріалу в процесі сушіння [12]:

$$q_{wl} = W \cdot r, \quad (16)$$

Інтенсивність перехідного процесу випарування вологи з вільної поверхні матеріалу:

$$j_{wl} = \frac{W}{F_{mat} \cdot t}, \quad (17)$$

Якщо W із останнього рівняння підставити в (16), то отримаємо:

$$q_{wl} = j_{wl} \cdot F_{mat} \cdot (2501 - 2,36 \cdot T_{mt}), \quad (18)$$

І навпаки, тепловий потік від теплоносія при конвективному сушінні можна визначити за формулою Ньютона.

$$q_{wl} = \alpha \cdot F_{mat} \cdot (T_{пов} - T_{mt}), \quad (19)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія з температурою $T_{пов}$ до поверхні матеріалу з температурою T_{mt} , яка в ході активної стадії сушки дорівнює температурі «мокрого термометра».

Об'єднавши рівняння (4-22) та (4-23), отримаємо співвідношення для визначення інтенсивності виходу вологи в одиницю часу, тобто M_{ww}

$$M_{ww} = j_{wl} = \frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}. \quad (20)$$

Паралельно з процедурою формулювання рівняння теплового балансу для матеріалу, що висушується, ми постулюємо відсутність випаровування на першій і третій стадіях сушіння. Акцент сушіння робиться виключно на другій стадії за порівняних умов. Згодом, підставивши співвідношення (14), (15) і (20) у рівняння

(13), ми можемо сформулювати рівняння матеріального балансу щодо вологи в матеріалі, який сушиться.

$$\frac{du_{mat}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ -\frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mt})}{(2501 - 2,36 \cdot T_{mt}) \cdot N_c \cdot m_{c,c}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ 0, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{пов}. \end{cases} \quad (21)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння $umat(0) = umat0$ [13].

4.3.4 Матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в теплоносії

Схема матеріальних потоків відносно вологи, що знаходиться в теплоносії, наводиться нарис. 4.3.

Комплексне формулювання рівняння матеріального балансу з урахуванням вологи в теплоносії:

$$\Delta M_{wp} = M_{wp_n} - M_{wp_k} + M_{ww}, \quad (22)$$

де $\Delta M_{пов}$ – це швидкість зміни діапазону вологості в теплоносії, в загальному об'ємі камерної сушарки V_{ck} , за рахунок висушування матеріалу визначається виразом:

$$\Delta M_{wp} = V_{ck} \cdot \rho_{пов} \cdot \frac{du_{пов}}{dt}, \quad (23)$$

де $\rho_{пов}$ - усереднена густина теплоносія, а $u_{пов}$ - вологість теплоносія в сушильній камері. Цей вміст вологи визначається як відношення маси вологи в повітрі до одиниці маси сухого повітря.

M_{wp_n} означає масу вологи, що потрапляє в камерну сушарку з теплоносієм.

Ця кількість точно визначається як:

$$M_{wp_n} = G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} \cdot u_{pov}^0, \quad (24)$$

M_{wp_k} являє собою масу вологи, витягнутої з камерної сушарки разом з теплоносієм. Цей параметр точно визначається як:

$$M_{wp_k} = (G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) \cdot u_{pov}, \quad (25)$$

де u_{pov} - вологість теплоносія на виході з сушарки, еквівалентна вологості в об'ємі сушарки за умови ідеального перемішування;

M_{ww} - маса вологи, що випаровується з матеріалу в процесі сушіння та інтегрується з об'ємом теплоносія;

M_{ww} позначає масу вологи, яка випаровується з матеріалу в процесі сушіння за одиницю часу, зливаючись з теплоносієм. Її визначення відбувається за аналогічним виразом, що був отриманий раніше, але зі зворотним знаком [8].

Враховуючи, що процес випаровування відбувається лише на другому етапі сушіння, і підставляючи вирази (23), (24), (25) і (20) у рівняння (22), отримуємо рівняння матеріального балансу для об'єкта контролю щодо вологи в теплоносії, яке має вигляд:

$$\frac{du_{pov}}{dt} = \begin{cases} \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot u_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(G_{pov}^0 \cdot \rho_{pov} + M_{ww}) u_{pov}}{V_{ck} \cdot \rho_{pov}} + \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{V_{ck} \cdot \rho_{pov} (2501 - 2,36 \cdot T_{mt})}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}. \end{cases} \quad (26)$$

Початкові умови для цього диференційного рівняння $u_{pov}(0) = u_{pov}^0$

4.3.5 Складання математичної моделі камерної сушарки періодичної дії та її аналіз

Загальноновизнано, що основною метою математичного формулювання проблеми (або побудови математичної моделі) є отримання набору математичних співвідношень, що описують поведінку та характеристики об'єкта, який моделюється. З формальної точки зору, математична модель включає в себе взаємозалежності між вхідними і вихідними змінними, що відображають фізичну (або іншу) суть процесів, які відбуваються в об'єкті з певним рівнем точності.

Для формулювання математичної моделі сушарки періодичної дії систематично перетворимо вищезгадані вирази для визначення теплового та матеріального балансів у набір з чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку, що набувають вигляду:

$$\frac{dT_{пов}}{dt} = \frac{G_{пов}^0 \cdot T_{пов}^0}{V_{ск}} - \frac{(1 + \beta_{pt}) \cdot (G_{пов}^0 \cdot \rho_{пов} + M_{ww}) \cdot T_{пов}}{V_{ск} \cdot \rho_{пов}} - \frac{0,106 \cdot \alpha \cdot k_f \cdot N_c \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{V_{ск} \cdot \rho_{пов} \cdot c_{p_пов}}; \quad (27)$$

$$\frac{dT_{mat}}{dt} = \begin{cases} \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ 0 & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{\alpha \cdot k_f \cdot 0,106 \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{(u_{mat} + 1) m_{c,c} \cdot 750} & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{пов}; \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{du_{mat}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ -\frac{\alpha \cdot (T_{пов} - T_{mat})}{(2501 - 2,36 \cdot T_{mt}) \cdot N_c \cdot m_{c,c}}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ 0, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{пов}; \end{cases} \quad (29)$$

$$\frac{du_{pov}}{dt} = \begin{cases} \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} < T_{mt}; \\ \frac{G_{pov}^0 u_{pov}^0}{V_{ck}} - \frac{(G_{pov}^0 \rho_{pov} + M_{ww}) u_{pov}}{V_{ck} \rho_{pov}} + \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{V_{ck} \rho_{pov} (2501 - 2,36 T_{mt})}, & \text{при } T_{mat} = T_{mt} \text{ та } u_{mat} \geq u_{mat}^*; \\ \frac{G_{pov}^0 \cdot (u_{pov}^0 - u_{pov})}{V_{ck}}, & \text{при } T_{mat} > T_{mt} \text{ та } T_{mat} < T_{pov}; \end{cases} \quad (30)$$

при початкових умовах

$$T_{pov}(0) = T_{pov0}, T_{mat}(0) = T_{mat0}, u_{mat}(0) = u_{mat0} \text{ та } u_{pov}(0) = u_{pov0}, \quad (31)$$

та доповнимо її виразом для визначення маси випареної вологи [13]

$$M_{ww} = \frac{\alpha \cdot (T_{pov} - T_{mt})}{2501 - 2,36 \cdot T_{mt}}. \quad (32)$$

У цій системі T_{pov} представляє температуру теплоносія, що функціонує як залежна змінна. Аналогічно, T_{mat} позначає температуру матеріалу, що сушиться, яка також вважається залежною змінною. Аналогічно, u_{mat} позначає вологість матеріалу, що сушиться, а u_{pov} позначає вологість теплоносія. Загалом маємо чотири залежні змінні. Розрахунок цих змінних полегшується наявністю чотирьох рівнянь. Отже, сформульована математична модель є вичерпною і може бути ефективно використана для теоретичного і практичного моделювання процесів, що розглядаються [9].

Важливо зазначити, що в межах виразів розроблена математична модель спирається на параметр T_{mt} - температуру "морого термометра". Ця величина характеризує термодинамічний стан вологого повітря (теплоносія) і може бути визначена на основі відомих параметрів теплоносія в камерній сушарці.

5. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ В КОНВЕКТИВНІЙ СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ

5.1 Аналіз функціональної конструкції системи керування

Після проведеного аналізу конструктивних та технологічних характеристик систем можна сформулювати вимоги до системи керування яка синтезується:

- Для зменшення браку продукції в умовах зовнішніх збурень необхідно строго дотримуватися технологічних норм щодо допустимої температури Т_{ров} в камері сушарки та гідродинамічного режиму обдування матеріалу шляхом збереження об'ємного приходу теплоносія на вході G_{ров}.
- Своєчасне завершення циклу висушування в умовах змінних початкових умов може призвести до зменшення непродуктивних витрат теплової енергії під час сушіння матеріалу. Для визначення тривалості циклу доцільно використовувати розроблену математичну модель динаміки.

Система повинна забезпечувати точне регулювання температури в сушарці для досягнення оптимальних умов сушіння. Це має вирішальне значення для запобігання пересушування або недосушування керамічної цегли.

Забезпечити постійний і рівномірний потік повітря по всіх секціях сушильної камери для сприяння рівномірному висиханню.

Система повинна використовувати вентилятори зі змінною швидкістю, щоб контролювати інтенсивність повітряного потоку залежно від конкретних вимог до сушіння [14].

Система управління повинна дозволяти програмувати цикли сушіння для різних типів керамічної цегли і різних рівнів вологості.

Функціональна схема системи управління технологічним процесом сушіння в камерній сушарці періодичної дії, що реалізує вказані вимоги, має вигляд, наведений на рис.5.1.

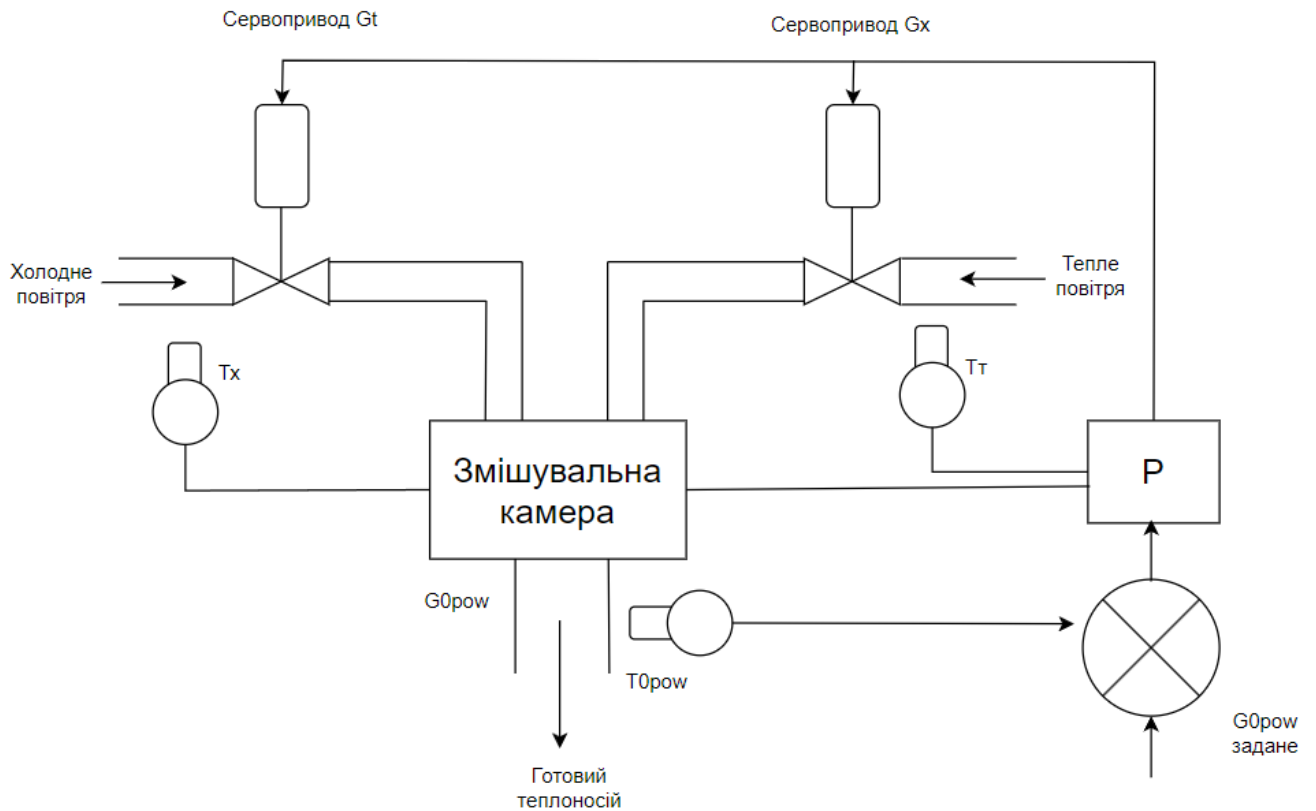


Рисунок 5.1 - Функціональна схема системи управління технологічним процесом сушіння керамічної цегли в камерній сушарці періодичної дії

В нашому випадку процес сушіння відбувається при незмінній температурі поверхні матеріалу, а це означає, що основними впливами, що можуть порушити тепловий режим є зовнішні впливи, а також маючи на увазі суттєву теплову інерцію камерної сушарки, що ускладнює створення високоякісної системи стабілізації, прийнято рішення стабілізувати температуру теплоносія на вході в сушарку T_{rov0} шляхом зміни співвідношення об'ємних потоків теплого G_t з температурою T_t , яка має властивість мінятись, та холодного G_x з температурою T_x , холодного атмосферного повітря.

Для підтримання постійного заданого об'єму подачі теплоносія в камеру при заданій температурі T_{rov0} з метою керування буде застосовано стратегію з використанням двох асинхронних сервоприводів. Це означає, що коли заслінка теплого повітря зміщується з одного боку, заслінка холодного повітря одночасно

переміщується в протилежний бік. Цей синхронізований рух забезпечує незмінний потік об'єму охолоджувальної рідини, навіть при зміні температури.

5.2 Імітаційна модель змішувальної камери

Об'єктом управління є камера змішування, яка є агрегатором теплого повітря з заданими параметрами, які досягаються за рахунок використання двох сервоприводів в асинхронному режимі, які керують подачею теплого T_T та холодного T_x повітря для змішування в єдиний потік T_{pov0} який і подається в камеру сушіння цегли.

Малий об'єм камери змішування при великих швидкостях руху повітряних потоків, дозволяють припустити, що відбувається процес ідеального змішування без відхилень, а конкретно заданий діапазон потрібних температур <100 градусів дозволяє припустити, що цей потік не залежить від складу та визначається як середні значення.

Складемо рівняння теплового балансу для змішувальної камери:

$$V_{cm} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT_{pov}^0}{dt} = G_T \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_T + G_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_x - (G_x + G_T) \cdot \rho \cdot c_p \cdot T_{pov}^0, \quad (33)$$

де V_{cm} – об'єм камери змішування; ρ , c_p – щільність та питома ізобарна теплоємність теплоносія та його компонентів; T_{pov}^0 , T_x , T_T – температури теплоносія після камери змішування, холодного та теплого повітря, відповідно; G_x , G_T – об'ємний розхід відповідно холодного та теплого повітря [10].

Провівши низку логічних перетворень, скорочення на $\rho \cdot c_p$ та виразивши об'ємний розхід холодного та теплого повітря через його задане значення G_{pov0} і долю відкриття заслінки Δu (приймаємо, що об'ємний розхід повітря прямо пропорційний долі відкриття заслінки), тобто $G_T = G_{pov0} \cdot \Delta u$ та $G_x = G_{pov0} \cdot (1 - \Delta u)$, отримаємо [10]

$$\frac{V_{cm}}{G_{pov}^0} \cdot \frac{dT_{pov}^0}{dt} + T_{pov}^0 = \Delta u \cdot T_T + (1 - \Delta u) \cdot T_x. \quad (34)$$

На базі отриманого рівняння складемо структурну модель камери змішування представлену на рис.5.2.

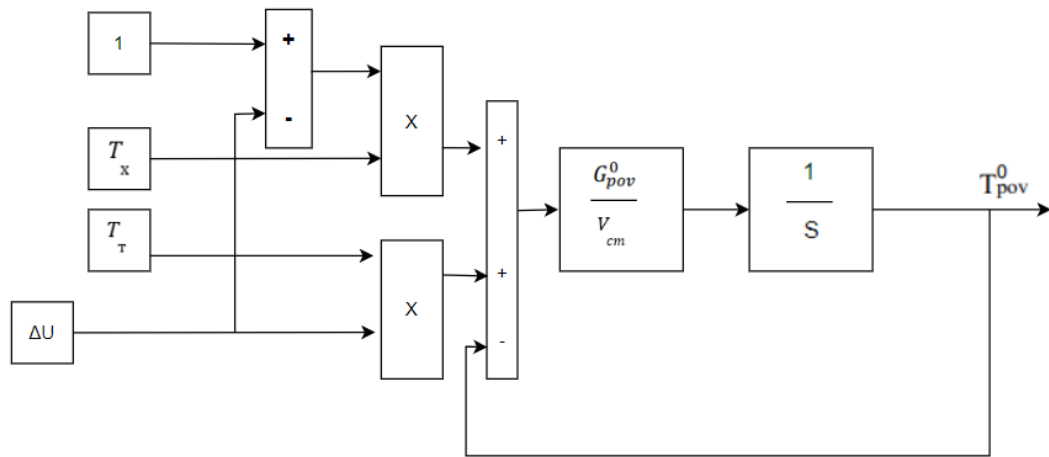


Рисунок 5.2 – Структурна модель змішувальної камери

В якості початкових даних було обрано $G_{pov} 0 = 5200 \text{ м}^3/\text{год}$, $V_{cm} = 0,2 \text{ м}^3$, $T_T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_x = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Складаємо дану підсистему в середовищі Matlab Simulink та модулюємо її.

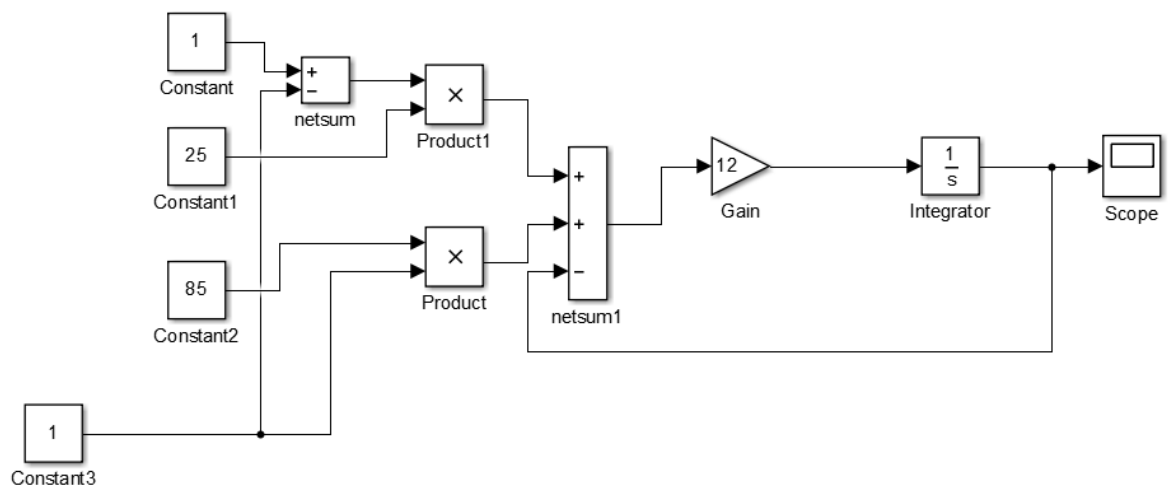


Рисунок 5.3 - Підсистема камери змішування в середовищі Matlab Simulink

Промодельовавши дану підсистему отримуємо наступну перехідну характеристику представлену на рис.5.4.

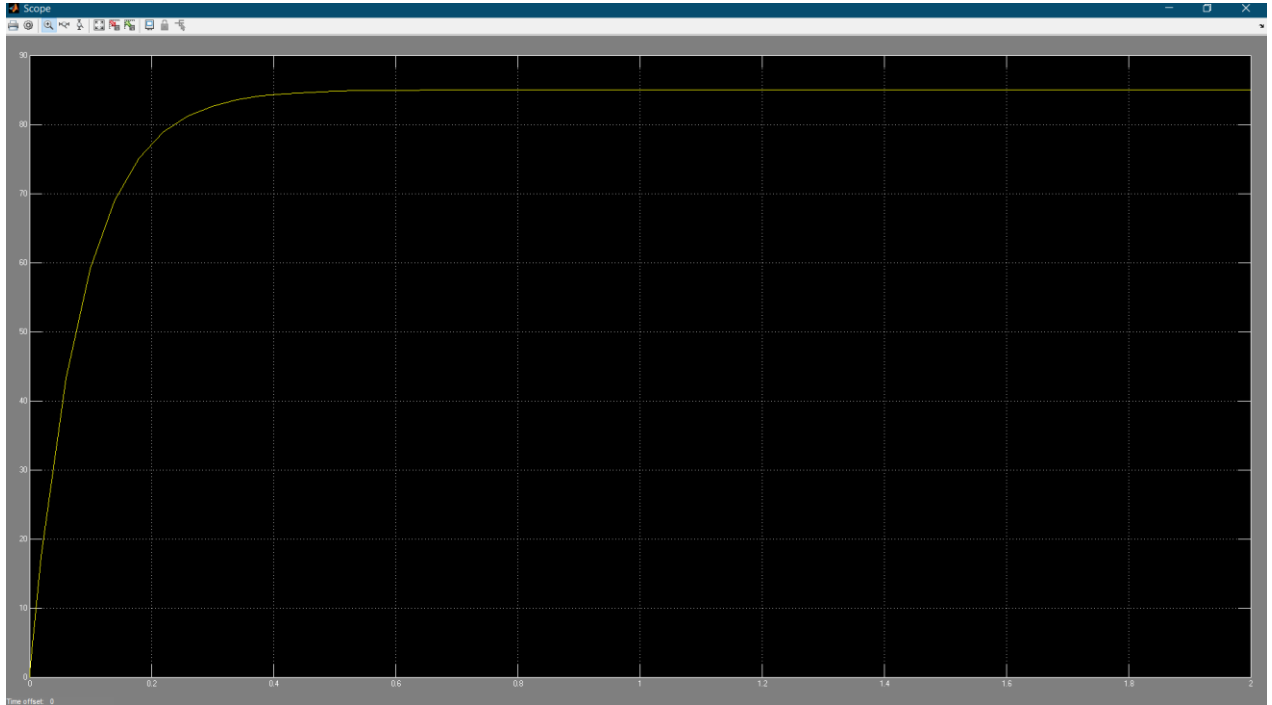


Рисунок 5.4 – Перехідна характеристика підсистеми змішувальної камери

5.2 Імітаційна модель сервопривода

Для підтримки стабільної роботи та швидкодії системи керування потрібно використовувати швидкодіючі малогабаритні сервоприводи на основі електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням з підпорядкованим керуванням положення та швидкості.

В звичайних умовах для систем з підпорядкованим регулюванням використовують три контури. В нашому випадку для регулювання положенням заслінки слід керувати швидкість руху, тобто обертання двигуна. А обертання двигуна в свою чергу керуються струмом який надходить до нього. Серед характеристик двигуна саме момент є пріоритетним, адже він зв'язаний зі

швидкістю, а система керування зв'язана з напругою та струмом який подається на електропривод сервоприводу [15].

Рівняння замкнутої системи в операторній формі мають вигляд

$$\begin{cases} \omega = \frac{rK_d^2}{T_M p} (M - M_c), \\ M = \frac{1/rK_d}{T_{яp+1}} \left(U - \frac{1}{K_d} \omega \right), \\ \varphi = \frac{n\omega}{p}, \\ U = K_p (\varphi_3 - \varphi). \end{cases} \quad (35)$$

В даній формулі r – повний активний опір якірного ланцюга (Ом); ω – механічна швидкість обертання ротора (рад/с); M – момент обертання, що створюється двигуном (Н*м); M_c – момент статичного навантаження, приведений до валу двигуна (Н*м); $K_d = K\Phi$ (рад/В*с), де K – безрозмірний конструктивний коефіцієнт двигуна, Φ – магнітний потік збудження двигуна, який створюється постійним магнітом (Вб); T_M – електромеханічна постійна часу привода (с); $T_{я}$ – електромагнітна постійна якірного ланцюга (с); U – напруга на обмотці якоря двигуна (В); φ – кут повороту вихідного валу сервопривода (рад); n – передаточне число редуктора; K_p - коефіцієнт підсилення П-регулятора (В/рад); φ_3 – заданий кут повороту вихідного валу сервопривода [16].

Структурна схема сервопривода відповідно до моделі проілюстрована на рис.5.5.

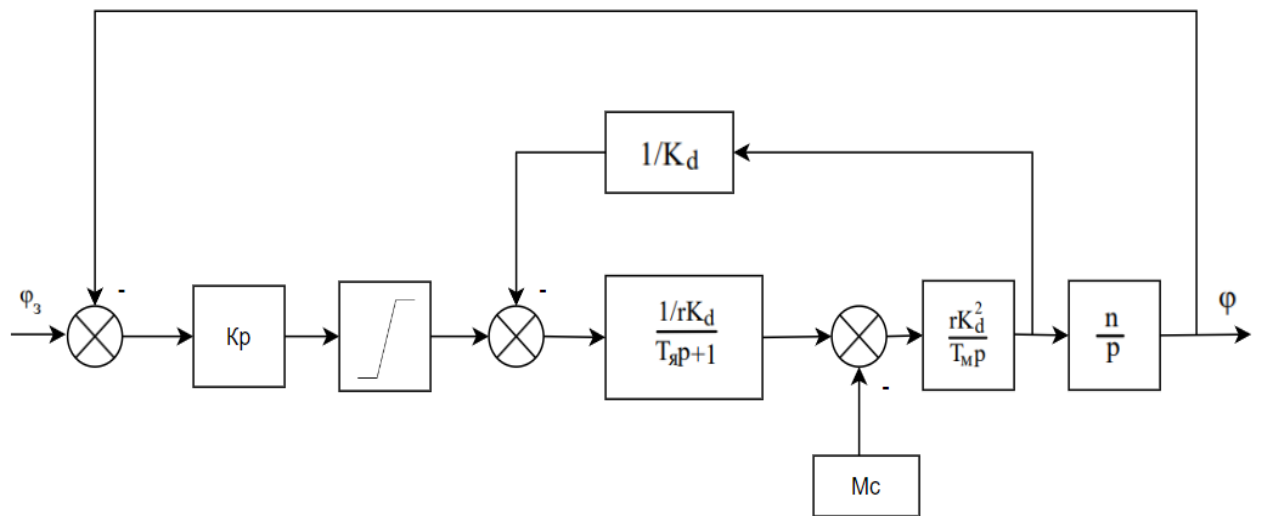


Рисунок 5.5 - Структурна схема математичної моделі сервопривода

Наступним кроком розглянемо систему рівнянь (35) більш докладно. З останнього рівняння треба виразити параметр φ та звести всі змінні до визначення основного параметра який в нашому випадку є змінна φ . Виразивши параметри ω та φ_3 запишемо повне рівняння для знаходження параметру φ , отримаємо такий вираз:

$$\varphi(p) = \frac{\varphi_3(p) - r \frac{K_d}{K_p} (T_{я}p + 1) M_c}{T_{я}T_M T_c p^3 + T_M T_c p^2 + T_c p + 1}, \quad (36)$$

Де

$$T_c = \frac{1}{n K_d K_p}.$$

Наступним кроком є підбір якісних динамічних властивостей сервопривода шляхом підбору характеристичного полінома, який буде забезпечувати перехідний процес без перерегулювання. За основу було обрано характеристичний біном Ньютона

$$H(p) = (p + \omega_0)^n \quad (37)$$

де ω_0 – параметр полінома; $n = 3$ – порядок полінома. Для одержання правильного перехідного процесу підбираємо корені характеристичного полінома, так, щоб позбутися перерегулювання. Обчислюємо розрахункові співвідношення $T_M = 1/\omega_0$; $T_c = 3/\omega_0$; $T_{\gamma} = 1/3\omega_0$. Правильна побудова перехідного процесу при моделюванні в MATLAB передбачає ретельний розгляд підходу до моделювання, системної динаміки та методів моделювання. Використання відповідних функцій MATLAB, або блоків Simulink для моделювання перехідної характеристики. Отримуємо перехідну характеристику сервопривода при змінній $\omega_0 = 1$ для характеристичного полінома (рис.5.6) [17]

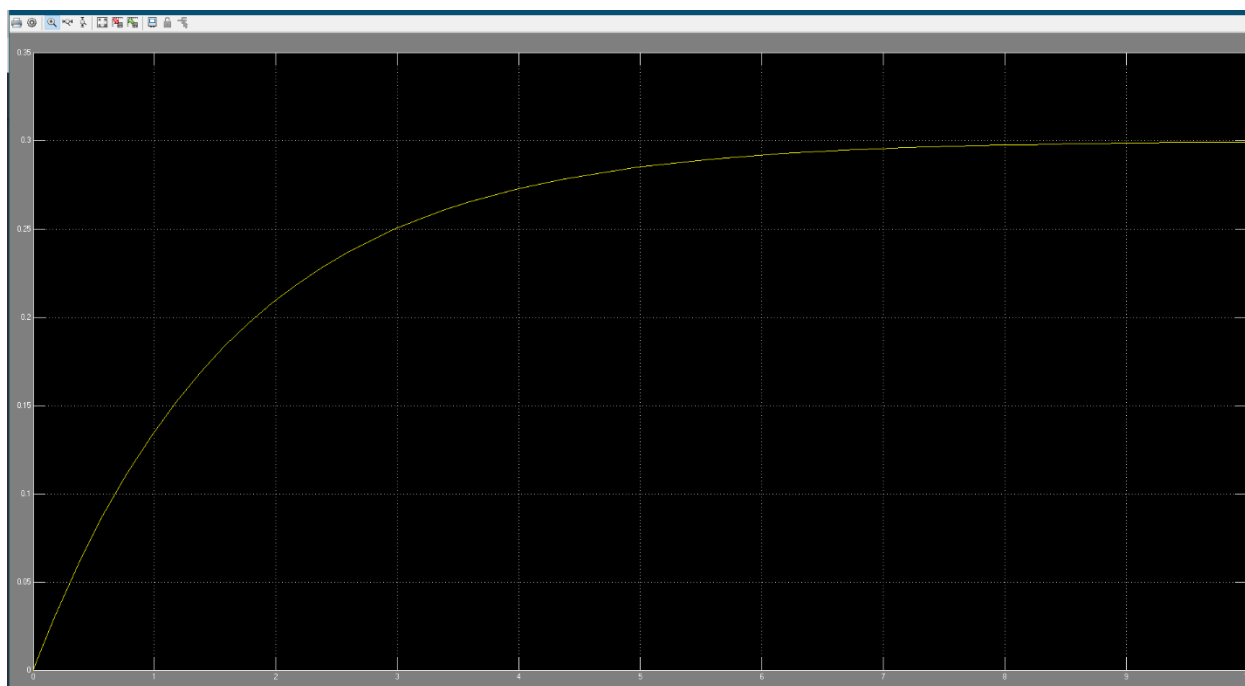


Рисунок 5.6 - Перехідна характеристика сервопривода при ступінчатій зміні сигналу вхідного на $\varphi_3 = 0.3$

Взявши до порівняння перехідну характеристику камери змішування та сервоприводу можна зробити висновок, що саме сервопривід потребує оптимізації, адже його перехідний процес триває набагато довше та не так стабільно, а отже і

система в цілому з використанням таких сервоприводів буде не оптимальною, тому треба оптимізувати роботу сервопривода.

5.3 Імітаційна модель змішувальної камери з сервоприводами

Для оптимізації перехідного процесу сервопривода, система якого зазвичай включає двигун, контролер і пристрої зворотного зв'язку, такі як енкодери, розглянемо загальну модель камери змішування з інтегрованими в неї підсистемами сервоприводів. Маємо два сервоприводи, тому використовуємо дві підсистеми для включення в загальну систему. Структурна схема математичної моделі змішувальної камери повітря з використанням сервоприводів представлена на рис.5.7.

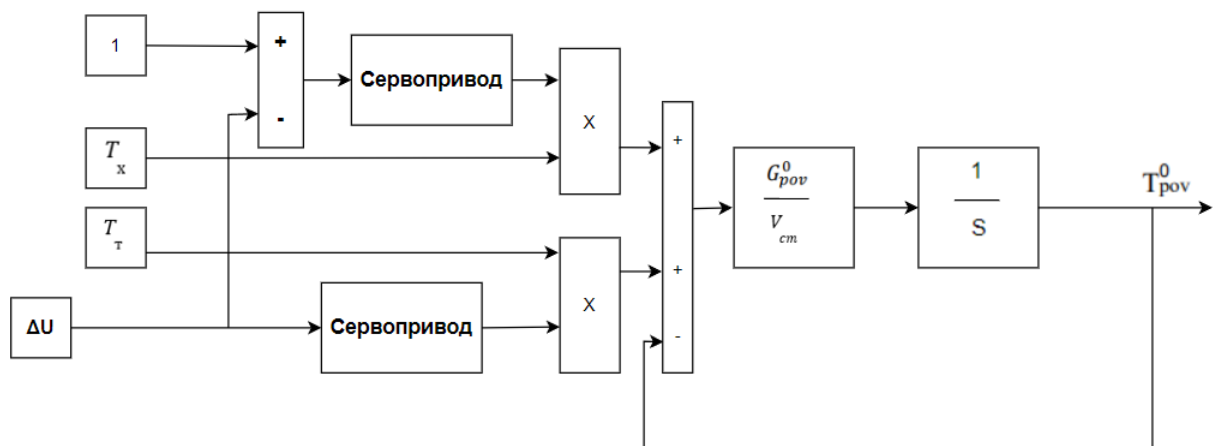


Рисунок 5.7 - Структурна схема математичної моделі змішувальної камери повітря з використанням сервоприводів

Отже, схему сервопривода ми об'єднуємо в окрему підсистему, які в свою чергу додаємо в загальну схему змішувальної камери. В середовищі Matlab та пакеті Simulink, дана модель буде виглядати так (рис.5.8).

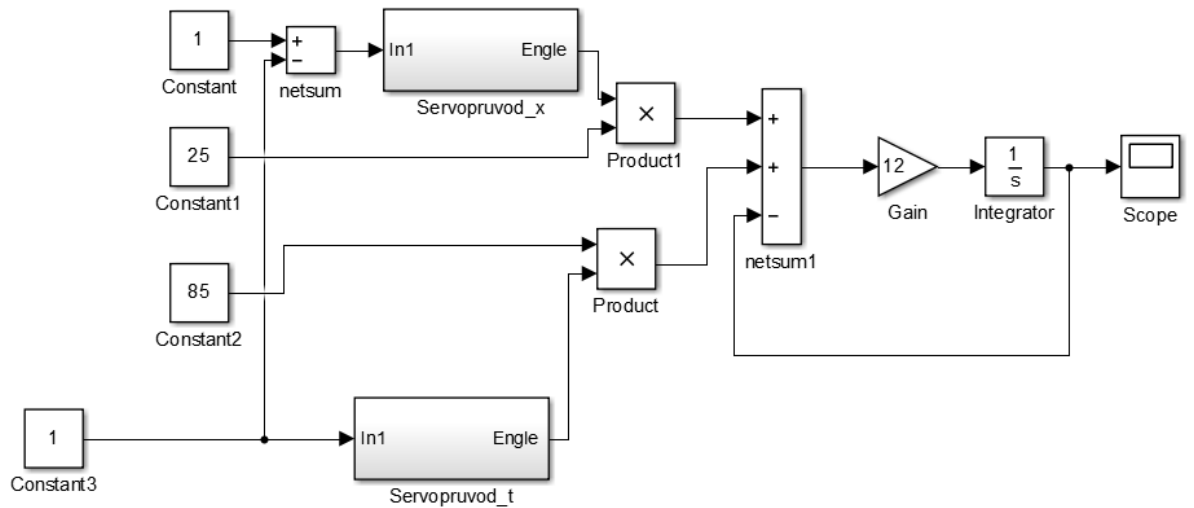


Рисунок 5.8 - Структурна схема математичної моделі змішувальної камери повітря з використанням сервоприводів, зібрана в середовищі Matlab Simulink

Результати моделювання змішувальної камери одночасно з сервоприводами, проведеного за допомогою математичного програмного забезпечення MatLab (додаток Simulink), представлені на рис.5.9. Результати моделювання ілюструють, що об'єкт керування демонструє властиву йому самостабілізацію та помітну інерційність, на яку в першу чергу впливають динамічні характеристики.

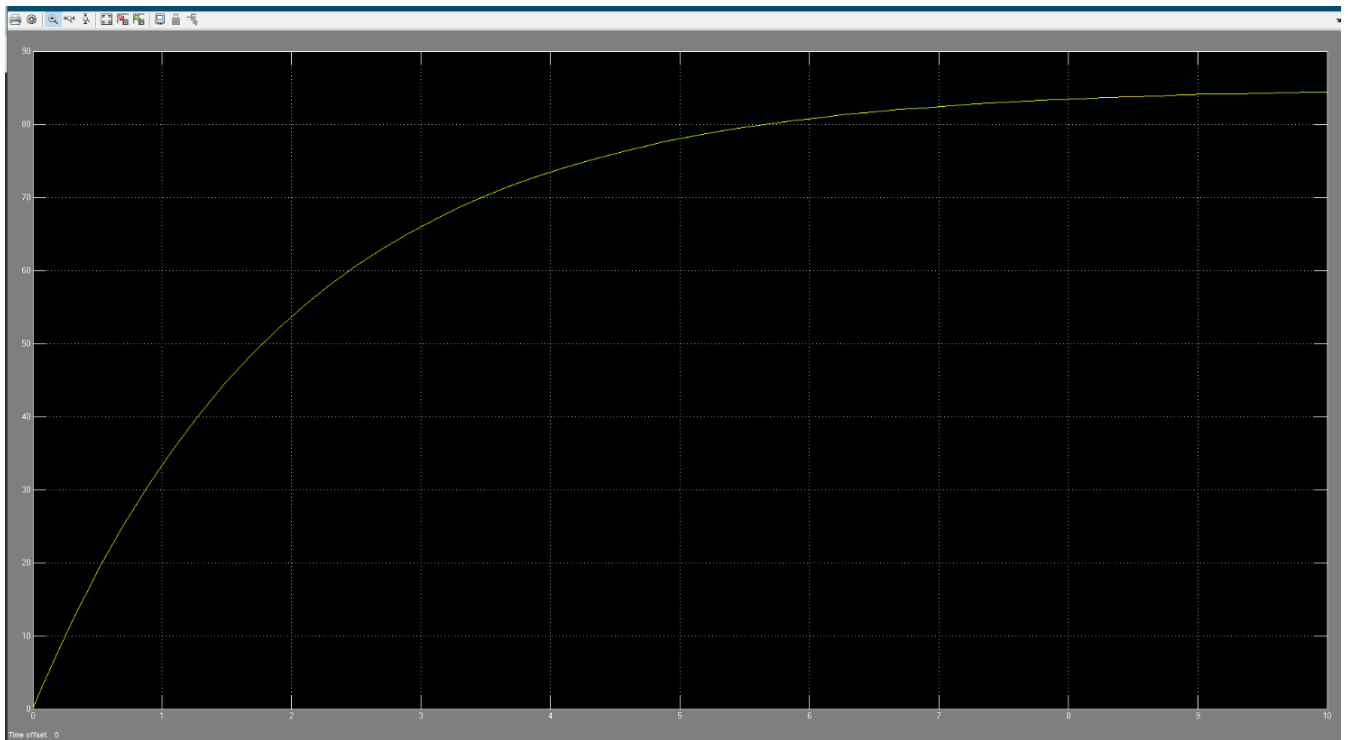


Рисунок 5.9 - Перехідна характеристика системи камери змішування з сервоприводами за умов ступінчатої зміни сигналу керування на величину $\Delta u = 1$, що відповідає максимальній температурі

Проаналізувавши дану перехідну характеристику було прийнято рішення оптимізувати даний перехідний процес шляхом введення в систему ПІД регулятора.

ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційні) регулятори є важливою складовою систем автоматичного керування і мають ряд переваг, які забезпечують їх ефективне використання у різних галузях і застосуваннях. Основні переваги ПІД регуляторів включають:

1. Гнучкість налаштувань: ПІД регулятори мають три параметри (пропорційний, інтегральний та диференційний), що дозволяє операторам гнучко налаштовувати їх для оптимального відгуку на різноманітні зміни в системі.

2. Стабільність системи: завдяки можливості включення інтегрального та диференційного впливів, ПІД регулятори допомагають забезпечити стабільність системи та уникнення осциляцій чи перерегулювання.

3. Ефективність в управлінні змінами: ПІД регулятори виявляються ефективними в ситуаціях, коли система стикається з різкими чи непередбачуваними змінами, оскільки можуть швидко адаптуватися до нових умов.

4. Можливість використання в різних галузях: ПІД регулятори широко використовуються у різних галузях, таких як промисловість, автомобільна промисловість, теплотехніка та інші, що свідчить про їхню універсальність.

5. Можливість врахування різних режимів роботи: ПІД регулятори можуть бути ефективно використані як для роботи в статичних, так і в динамічних режимах, що розширює їхні можливості застосування [10].

Для нашої ситуації ПІД регулятор є найкращим вибором, бо нам потрібно дані три основних параметри. Складемо структурну схему моделі змішувальної камери з сервоприводами та ПІД регулятором представлену на рис.5.10.

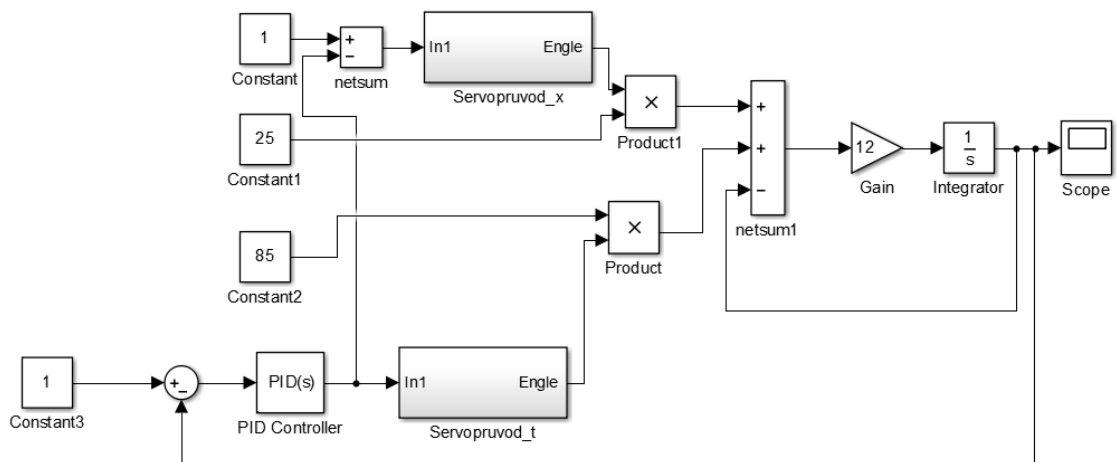


Рисунок 5.10 - Структурна схема моделі камери змішування з сервоприводами та ПІД регулятором

Для налаштування регулятора будемо використовувати пакет **Simulink Design Optimization**, а саме блок **Signal Constraints** в якому міститься **Check Step Response Characteristics**.

Simulink Design Optimization пропонує ряд функцій, інтерактивних інструментів та блоків, призначених для комплексного аналізу та налаштування параметрів моделі. Він полегшує аналіз чутливості, пристосування моделі до тестових даних та налаштування параметрів для виконання конкретних вимог. Використовуючи такі методології, як моделювання методом Монте-Карло та планування експериментів, користувачі можуть систематично досліджувати простір проектування та оцінювати вплив параметрів на поведінку моделі.

Інструментарій сприяє підвищенню точності моделі за рахунок попередньої обробки даних випробувань і автоматичної оцінки критичних параметрів моделі, таких як коефіцієнти тертя і аеродинамічні коефіцієнти. Отримані результати розрахунків можуть бути строго перевірені.

Для оптимізації проектних характеристик системи, включаючи час відгуку, пропускну здатність і енергоспоживання, Simulink Design Optimization підтримує спільну оптимізацію фізичних параметрів установки і алгоритмічних або контролерних коефіцієнтів підсилення. Ці параметри можуть бути точно налаштовані для задоволення різноманітних часових і частотних вимог, таких як перерегулювання і фазовий запас, а також специфікацій, визначених користувачем.

Пакет Simulink Design Optimization дозволяє оптимізувати налаштування регуляторів під задані умови шляхом вибору меж обмежень перерегулювання та часу перехідного процесу, даний проект візуалізує процес перехідного процесу та дає змогу автоматично оптимізувати параметри ПД регулятора.

Вихідні дані для виконання синтезу налаштувань ПД-регулятора з математичним описом [18]:

$$R(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s: \quad (38)$$

Задамо максимальне значення перерегулювання 4%, а час перехідного процесу до 2,5 с.

Складаємо структурну схему моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі Simulink для оптимізації налаштувань (рис.5.11) та з блоком автоматичних налаштувань (рис.5.12) [19].

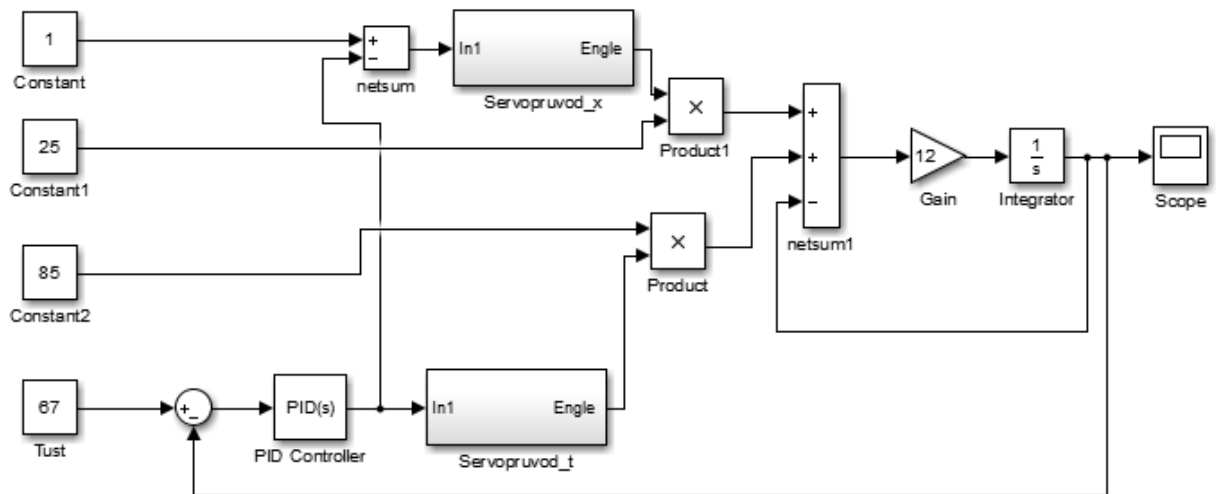


Рисунок 5.11 - Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі Simulink для оптимізації налаштувань

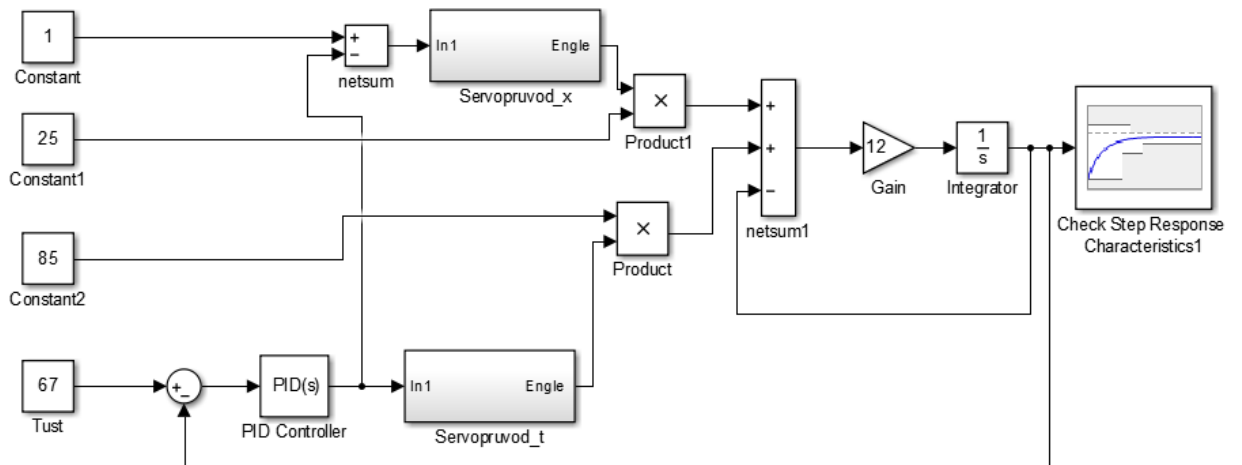


Рисунок 5.12 - Структурна схема моделі замкнутої системи управління температурою на вході в сушарку в середовищі Simulink для оптимізації налаштувань з блоком Check Step Response Characteristics.

В блок Check Step Response Characteristics вносимо дані розробленої системи, а також перерегулювання та часу та отримуємо перехідний процес (рис.5.13).

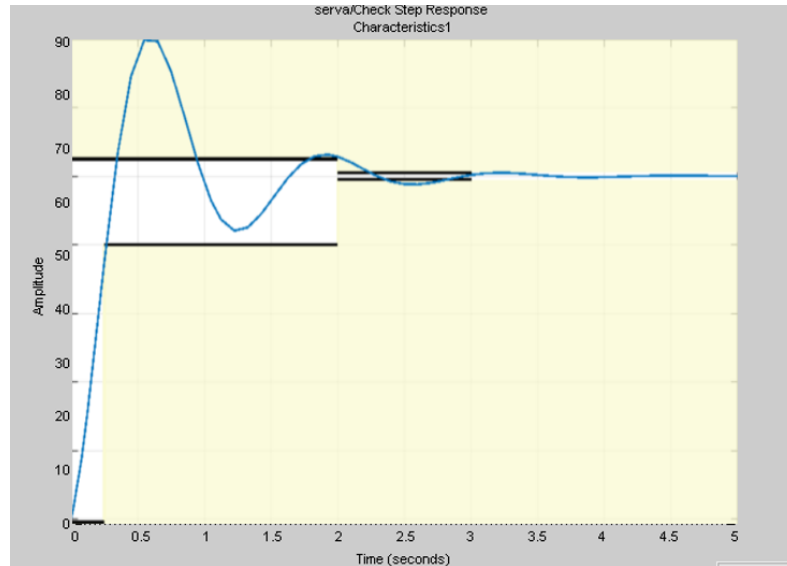


Рисунок 5.13 – Перехідний процес до оптимізації

Далі після обрання критеріїв оптимізацію запускаємо ініціалізацію автоматичного налаштування коефіцієнтів для ПД регулятора розробленої системи керування (рис.5.14).

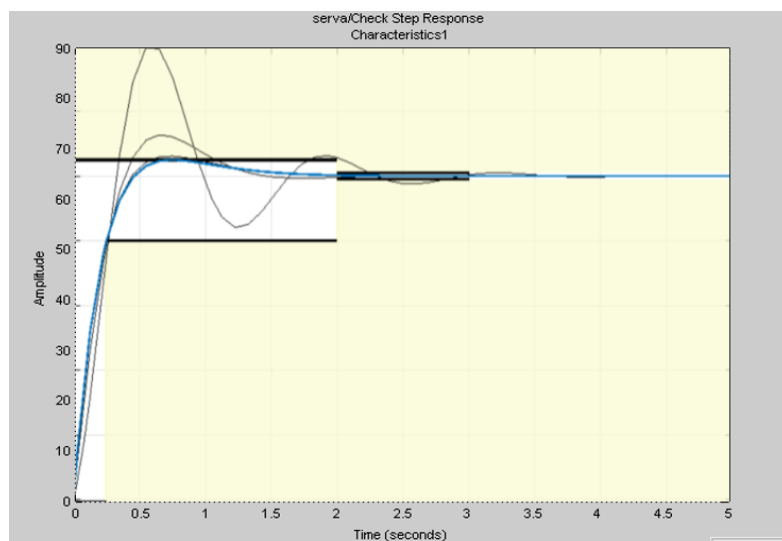


Рисунок 5.14 - Перехідний процес після оптимізації

Оптимальні для цього процесу параметри налаштувань ПІД-регулятора: $K_p = 0,083$; $K_i = 0,008$; $K_d = 0,053$.

У типових сценаріях процес сушіння матеріалу в камерній сушарці стикається із зовнішніми збуреннями двох різних типів:

Високочастотні збурення, що впливають на температуру теплого повітря, яке надходить в камеру змішування від джерела тепла (наприклад, пічних газів або теплообмінника).

Низькочастотні збурення, що впливають на температуру холодного повітря через добові коливання атмосферної температури.

Для відтворення цих збурень та оцінки роботи системи керування в реальних умовах було створено модель системи (рис.5.15). Ця модель включає в себе частотний випадковий сигнал з амплітудою, що відповідає температурі повітря T_t . Крім того, введено високочастотний випадковий сигнал з амплітудою 5°C для температури теплого повітря T_x , а також низькочастотний синусоїдальний сигнал з амплітудою 11°C [20].

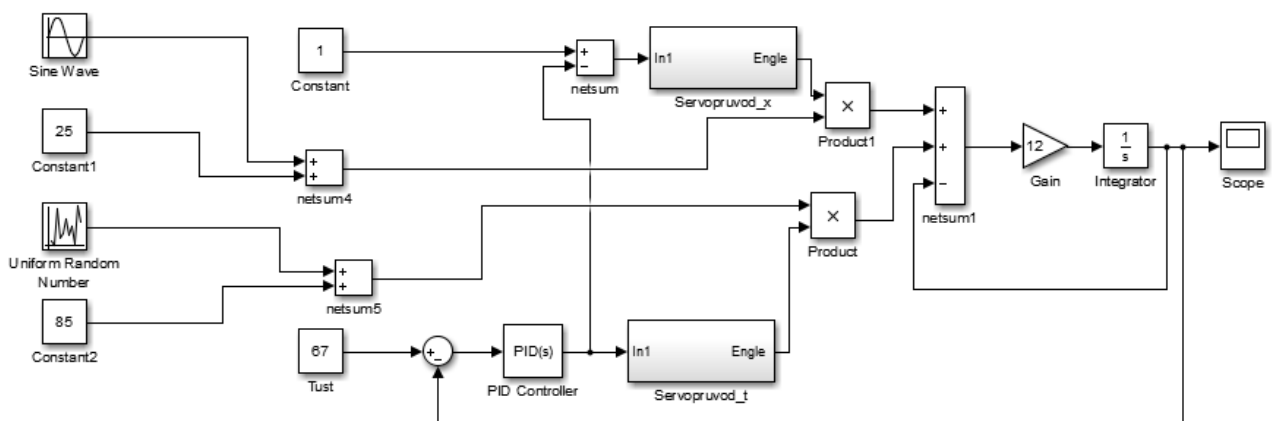


Рисунок 5.15 – Модель системи керування в умовах дії на неї зовнішніх збурень.

Після проведеного моделювання біло отримано перехідну характеристику системи під дією зовнішніх збурень (рис.5.16).

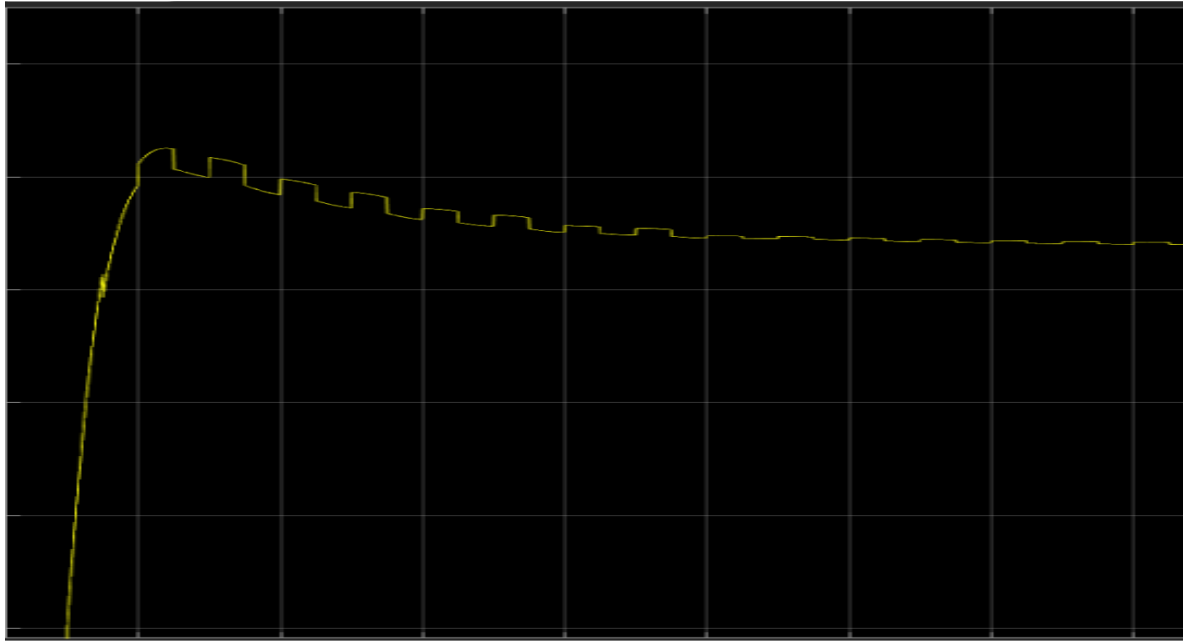


Рисунок 5.16 – Перехідна характеристика системи під дією зовнішніх збурень

5.4 Розробка алгоритму системи керування процесом сушіння керамічної цегли

Узагальнений алгоритм роботи системи керування в камерній сушарці під час сушіння партії цегли на рис.5.17.

Початок чергового циклу сушіння партії цегли-сирцю передбачає визначення початкових даних для роботи системи. До них відносяться кількість цегли, завантаженої в штабель (Nc), і початкова вологість матеріалу, що сушиться ($umat0$), встановлена за допомогою лабораторних досліджень. Одночасно можуть бути записані або усереднені за рік дані про атмосферне повітря, такі як тиск і вологість [21].

Алгоритм працює за наступним принципом – спочатку перевіряється справність датчиків та виконавчих механізмів, потім завантажуються цегла-сирець в камеру, аналізуються початкові дані, вираховується яка повинна стати вага висушеного матеріалу, перевіряється фактична вага і процес сушіння відбувається до того моменту, коли фактична вага стане дорівнювати вирахованій заданій вазі. Даний принцип базується на тепло та масопереносі.

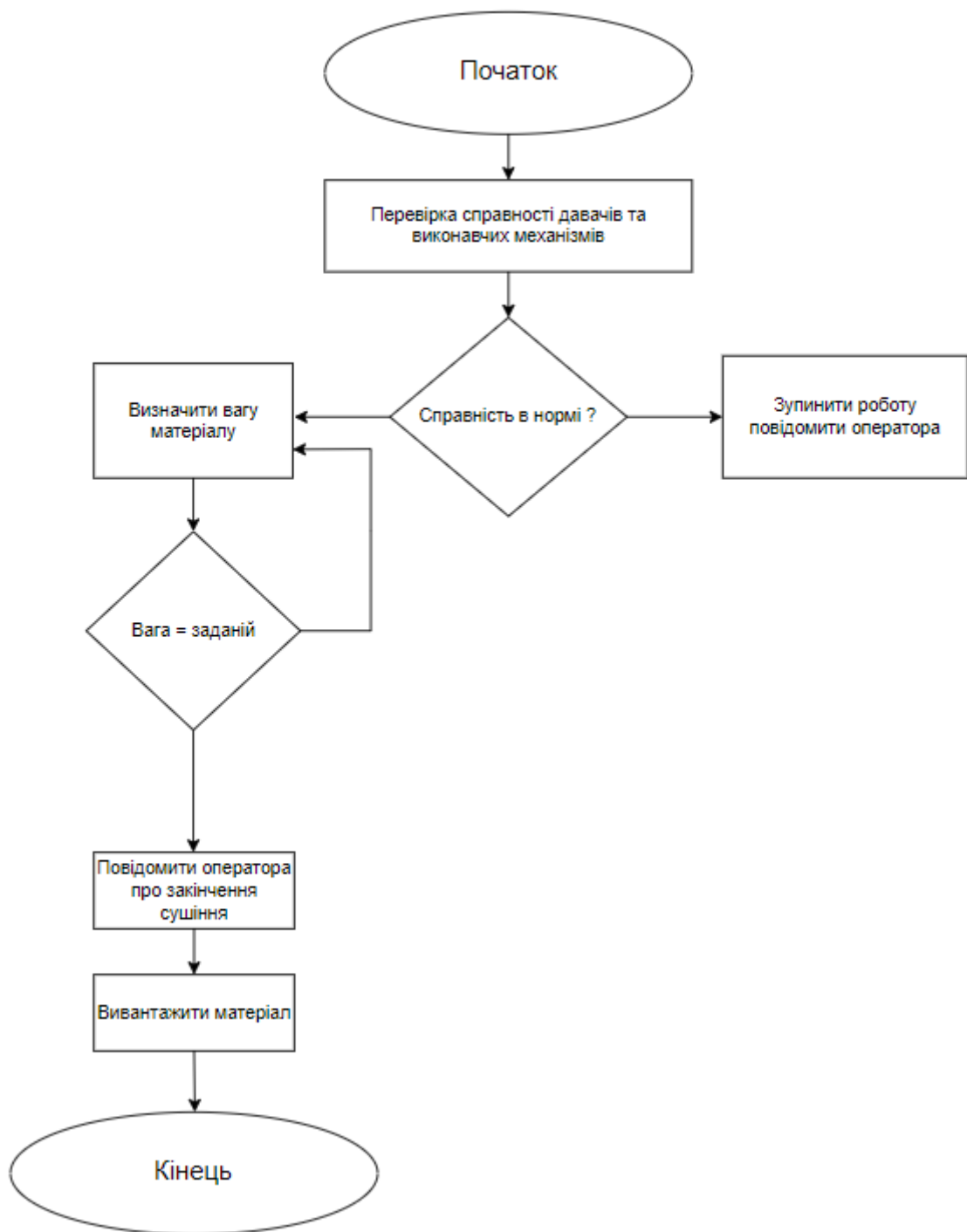


Рисунок 5.17 – Алгоритм функціонування системи керування в камерній сушарці під час сушіння партії цегли

6. ОХОРОНА ПРАЦІ НА ВИРОБНИЦТВІ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ

Охорона праці у виробництві керамічної цегли є важливим аспектом, спрямованим на забезпечення здоров'я та безпеки працівників, задіяних на різних етапах виробничого процесу. Нижче наведені ключові міркування щодо охорони праці у виробництві керамічної цегли:

1. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- Працівники повинні бути забезпечені відповідними ЗІЗ, такими як захисні каски, рукавички, захисні окуляри та засоби захисту вух, щоб зменшити ризики, пов'язані з поводженням із сировиною, обладнанням та готовою продукцією.

2. Навчання та освіта:

- Необхідно впроваджувати комплексні навчальні програми для ознайомлення працівників з потенційними небезпеками у виробничому процесі, а саме небезпечні вібрації, шум, конвеєрні стрічки, електрика. Це включає навчання з експлуатації обладнання, дій у надзвичайних ситуаціях та поводження з небезпечними матеріалами.

3. Безпека обладнання

- Регулярне технічне обслуговування та перевірка обладнання на всій лінії виробництва керамічної цегли мають важливе значення для запобігання нещасним випадкам. Необхідно підтримувати належний захист та засоби безпеки на обладнанні, а працівники повинні бути навчені безпечній експлуатації машин.

4. Хімічна безпека:

- Працівники, які працюють з хімічними речовинами, задіяними у виробничому процесі, повинні бути обізнані про потенційні небезпеки та навчені безпечному поводженню з ними, зберіганню та процедурам утилізації. Паспорти безпеки матеріалів (MSDS) повинні бути доступними для всіх працівників.

5. Ергономіка:

- Робочі місця та процеси повинні бути спроектовані так, щоб мінімізувати фізичне навантаження на працівників. Це включає належну висоту робочого місця,

інструменти, розроблені для ергономічного використання, та регулярні перерви для запобігання розладам опорно-рухового апарату.

6. Пожежна безпека

- Повинні бути вжиті адекватні протипожежні заходи, включаючи наявність протипожежного обладнання, планів евакуації на випадок надзвичайних ситуацій та навчальних тренувань для забезпечення швидкого та організованого реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з пожежею.

7. Вентиляція та боротьба з пилом:

- Пил, що утворюється під час виробництва керамічної цегли, може становити небезпеку для органів дихання. Для захисту здоров'я працівників слід вживати належних заходів з вентиляції та боротьби з пилом, таких як використання пиловловлювачів та засобів захисту органів дихання.

8. Перша медична допомога та реагування на надзвичайні ситуації

- Засоби першої медичної допомоги повинні бути легкодоступними, а працівники повинні бути навчені наданню базової першої медичної допомоги. Повинні бути розроблені плани реагування на нещасні випадки, травми та інші непередбачувані події.

9. Моніторинг професійного здоров'я:

- Регулярні медичні огляди та моніторинг стану здоров'я працівників, які піддаються впливу потенційних професійних ризиків, таких як пил або хімічні речовини, можуть допомогти виявити проблеми зі здоров'ям на ранній стадії.

7. ВИСНОВОКИ

1. Ефективне сушіння цегли-сирцю пов'язане зі значними енергетичними витратами. Без впровадження автоматизованого контролю та регулювання параметрів ефективний нагляд за процесом сушіння недосяжний. Викладена стратегія розробки системи керування процесом сушіння керамічної цегли з використання ПІД регулятора спрямована на вирішення проблеми стабілізації якості продукції та підвищення продуктивності технологічного обладнання.
2. Було проаналізовано ринок керамічної цегли та виявлено, що кожен рік він зростає на 3-4%. Описано процеси, що піддаються автоматизації й роботизації на підприємствах по виготовленню керамічної цегли, виявлено, що майже кожен вузол виробництва піддається автоматизації, що позитивно вплине на енергоефективність всього виробництва.
3. Було проведено конструктивний аналіз об'єкта керування який дав змогу побудувати загальну структурну схема виробництва керамічної цегли. Було досліджено технологічний процес виробництва цегли та переваги автоматизації всього виробництва. На базі знань технологічного процесу та після проведення інформаційного аналізу було розроблено функціональні завдання керування та обрано локальні контури управління.
4. Наступним кроком було дослідження та адаптація під процес сушіння керамічної цегли математичної, яка включає одночасне застосування рівнянь теплопередачі, закону Фіка та співвідношень, що описують гідродинаміку процесів у капілярній системі матеріалу, що сушиться. Було проведено аналіз проблематики сушіння, що включає вплив зовнішніх факторів та технологічний процес. Прийнято та обґрунтовано припущень для спрощення режимів. Описано формування математичної моделі яка включає в себе: тепловий баланс об'єкта відносно теплоносія, тепловий баланс об'єкта

керування відносно матеріалу, що висушується, матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в матеріалі, матеріальний баланс об'єкта керування відносно вологи, що знаходиться в теплоносії. Всі ці складові були поєднані для складання повної математичної моделі камерної сушарки періодичної дії та її аналізу.

5. Наступним етапом було проведено аналіз функціональної конструкції системи керування. Розроблено імітаційна модель змішувальної камери та сервопривода. Було введено ПІД регулятор для оптимізації перехідного процесу та стабілізації системи. Завдяки пакету Simulink Design Optimization, що входить до програмного середовища Matlab, було автоматично налаштовано регулятор та виявлено потрібні коефіцієнти. Було перевірено систему на здатність протидіяти зовнішнім збуренням та виявлено, що система стійка, надійна та енергоефективна.
6. Було розроблено алгоритму функціонування системи керування процесом сушіння керамічної цегли та проаналізовано заходи з охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. James W.P. Campbell. Brick: A World History, 2003. С 23-68.
2. Aniyikaiye, T. E., Edokpayi, J. N., Odiyo, J. O. and Piketh, S. J. (2021). Traditional Brick Making, Environmental and Socio-Economic Impacts: A Case Study of Vhembe District, South Africa. Sustainability, 13, 10659. <https://doi.org/10.3390/su131910659>.
3. Wong, C. L., Mo, K. H., Yap, S. P., Alengaram, U. J. & Ling, T.-C. (2018). Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. Journal of Cleaner Production, 195, 226–239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>
4. He, Z., Shen, A., Wu, H., Wang, W., Wang, L., Yao, C. & Wu, J. (2021). Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. Construction and Building Materials, 274, 122113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122113>
5. Автоматизація технологічного процесу сушіння керамічної цегли, 2007 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://www.dissercat.com/content/avtomatizatsiyatechnologicheskogo-protsessa-sushky> – Назва з екрану.
6. Costa, R. F., Ferreira, A. D., Silva Jr, J. J. da., Barbosa, P. M. A., Bandeira, D. J. A., Rezende, M. L. de S., & Nascimento, J. J. da S. (2021). Drying of clay/diatomite hybrid ceramic plates: An experimental study. Research, Society and Development, 10(8), e13710817174, 2021. 10.33448/rsd-v10i8.17174.
7. Чаудхарі Р.Р. Комплексна автоматизація технологічного процесу виробництва керамічної цегли // Автоматизація та управління в технічних системах. – 2018. – № 1.

8. Chiara Coletti, Lara Maritan, Giuseppe Cultrone. Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: Effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks. *Construction and Building Materials*. 2018, v. 166, pp. 792-807
9. Araújo, M.V.; Santos, R.S.; Silva, R.M.E.; Lima, A.G.B. Drying of industrial hollow ceramic brick: Analysis of the moisture content and temperature parameters. *Defect Diffus. Forum* 2017, 380, 72–78.
10. Emrullahoglu Abi C.B. Effect of borogypsum on brick properties. *Construction and Building Materials*. 2018, v. 59, pp. 195–203
11. Математичне моделювання та застосування ЕОМ у хімічній технології: конспект лекцій / укладач Худолей Г.М. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 183 с.
12. Г.М. Худолей, Н.О. Медведкова, О. Єврах. Блок моделювання стану вологого повітря в середовищі математичного пакету MATLAB. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (Шостка, 23-25 листопада 2022 року), с. 209-212.
13. Худолей Г.М. Теорія автоматичного управління: конспект лекцій: у 2 частинах. Ч. 2. Синтез лінійних систем автоматичного управління / укладач Г.М.Худолей. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 87 с.
14. Давлетшина В. Н., Шамаєв Е. І. Про комутуючі диференційні оператори рангу два, 2014 [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <https://www.iac.nsk.su> – Назва з екрану
15. Khitab, A., Riaz, M. S., Jalil, A., Khan, R. B. N., Anwar, W., Khan, R. A., Arshad, M. T., Kirgiz, M. S., Tariq, Z. & Tayyab, S. (2021). Manufacturing of Clayey Bricks by Synergistic Use of Waste Brick and Ceramic Powders as Partial

Replacement of Clay. Sustainability, 13(18), 10214.
<https://doi.org/10.3390/su131810214>

16. Martín, D.; Aparicio, P.; Galán, E. Accelerated carbonation of ceramic materials. Application to bricks from Andalusian factories (Spain). *Constr. Build. Mater.* 2018, 181, 598–608.
17. Гоблик Н.М., Гоблик В.В. MATLAB в інженерних розрахунках. Комп'ютерний практикум: навч. посібник. Львів: Нац. ун-т "Львів. політехніка", 2020. 190 с.
18. Цегельний завод. Автоматизоване виробництво цегли, 2019 [Електронний ресурс]: – Режим доступу до ресурсу: <https://chemtech-bayern.com.ua> – Назва з екрану.
19. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S.L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. 4th ed. Gatesmark Publishing. 2020. ISBN 9780982085417
20. Avtandil Bardavelidze, Khatuna Bardavelidze, Irakli Basheleishvili, *Computer Modeling of Automation Systems*, 2019. С – 23-65.
21. Dr. Johnson D.D. *Brickmaking: History and Heritage*, 2021, Amberley Publishing ISBN-13: 9781445699400. С - 56-93