

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Шосткинський інститут
Кафедра системотехніки та інформаційних технологій

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Георгій Худолей
_____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»,
освітньо-професійної програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»
на тему: Система управління технологічного процесу отримання соди аміачним способом

Здобувача групи СУз-01Ш _____ Кушнірєва Володимира Івановича
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

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

_____ Володимир КУШНІРЬОВ

Керівник завідувач кафедрою, к.т.н. Георгій ХУДОЛЕЙ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант¹⁾ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)



ЗМІСТ

стр.

Вступ	3
1 Загальна характеристика кальцинованої соди	6
1.1 Загальні відомості про содові продукти.....	6
1.2 Технологія отримання кальцинованої соди аміачним способом.....	6
2 Конструктивно-технологічний аналіз виробництва кальцинованої соди.....	9
2.1 Перша стадія. Очищення розсолу	9
2.2 Друга стадія. Амонізація	9
2.3 Третя стадія. Карбонізація.....	10
2.4 Четверта стадія. Фільтрування та промивання осаду	10
2.5 П'ята стадія. Кальцинування.....	11
2.6 Шоста стадія. Регенерація аміаку	11
2.7 Висновки щодо оптимального ведення технологічного процесу.....	12
2.8 Технологічні змінні керування, контролю та сигналізації.....	12
3 Вибір каналів керування, контролю, сигналізації та блокування.....	14
3.1 Канали управління, сигналізації та блокування	14
4 Вибір сучасних засобів автоматизації	16
4.1 Нижній рівень автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСУ ТП). 16	
4.2 Обґрунтування та вибір регулюючих органів	21
4.3 Середній рівень АСУ ТП.....	28
4.4 Верхній рівень АСУТП (АРМ)	31
5 АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ	32
6 Розрахункова частина.....	34
6.1 Конструкція та принцип дії содової печі	34
6.2 Особливості режиму кальцинації в содовій печі	36
6.4 Розроблення математичної моделі процесу кальцинації аналітичним методом	37
6.5 Синтез регулятора температури в содовій печі методом логарифмічних характеристик ..	54
7 РОЗРОБКА АСУТП З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ TRACE MODE 6	
63	
7.1 Створення екранної форми АРМ.....	63
7.2 Створення програмного забезпечення для PC-based контролера.....	65
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68

РЕФЕРАТ

Кушнірьов Володимир Іванович. Система управління технологічного процесу отримання соди аміачним способом. Бакалаврська робота. Шосткинський інститут Сумського державного університету, Шостка, 2024 рік.

Бакалаврська робота містить 68 аркушів пояснювальної записки, з урахуванням 45 рисунків, 16 таблиць; 1 креслення.

Роботу присвячено модернізації системи управління технологічним процесом отримання соди аміачним способом. Виконаний конструктивно-технологічний аналіз технологічного процесу, вибрані параметри контролю та управління, визначені канали контролю, керування та сигналізації. Виконано обґрунтування та вибір сучасних засобів автоматизації, розроблена функціональна схема автоматизації та алгоритм управління процесом. В розрахунковій частині розроблена аналітичним способом математична модель процесу кальцинації соди, на базі якої виконаний синтез системи управління температурою кальцинованої соди на виході з содової печі. Розроблена мнемосхема АСУ ТП з використанням САПР TRACE MODE 6.

Ключові слова: кальцинована сода, содова піч, система управління, математична модель, ідентифікація, синтез, MATLAB.

ABSTRACT

Kushnirov Volodymyr. Management system of the technological process of obtaining soda by the ammonia method. Bachelor work. Shostka Institute of Sumy State University, Shostka, 2024.

The bachelor thesis contains 68 sheets of explanatory note, including 45 figures, 16 tables; 1 drawing.

The work is devoted to the modernization of the control system of the technological process of obtaining soda by the ammonia method. Constructive and technological analysis of the technological process was carried out, control and management parameters were selected, control, control and signaling channels were determined. Reasoning and selection of modern automation tools were performed, a functional automation scheme and a process control algorithm were developed. In the calculation part, a mathematical model of the soda calcination process was developed analytically, on the basis of which the synthesis of the temperature control system of calcined soda at the exit of the soda furnace was performed. A mnemonic diagram of ACS TP was developed using CAD TRACE MODE 6.

Key words: soda ash, soda furnace, control system, mathematical model, identification, synthesis, MATLAB.

Вступ

Содова промисловість – матеріало- та енергомістке виробництво [1]. Щоб отримати 1 т соди, необхідно витратити по 1,5 т кухонної солі та вапняків, а для нагрівання розсолу – 1,7 т умовного палива. Ось чому таке виробництво зорієнтоване на сировинний та паливно-енергетичний чинники. Іноді використовують суху кам'яну сіль, в інших випадках – рідкі розсоли солоних озер або заток. Синтезують харчову, кальциновану та каустичну соду. Харчова сода застосовується у харчовій промисловості, медицині, хімічній (для виробництва пінопласту, фарбників, побутової хімії), легкій промисловості (для штучної шкіри, гуми, текстилю), входить до складу порошків для гасіння пожеж. Інші види соди є отруйними. Вони йдуть на виробництво мила, паперу, скла, глинозему. Основними споживачами кальцинованої соди є скляна, хімічна промисловість і кольорова металургія, а також целюлозно-паперова, нафтохімічна, нафтопереробна, харчова і медична промисловість.

У 2009 році світове виробництво кальцинованої соди становило близько 35 000 тис. т. [2]. В Україні основний виробник кальцинованої соди - ПАТ «Кримський содовий завод» - понад 2% світового виробництва соди та до 80% вітчизняного виробництва.

В даний час тенденції апаратурного оформлення більшості відомих процесів технології кальцинованої соди визначилося, і прогрес у цій галузі техніки розвивається шляхом модернізації існуючого обладнання.

Модернізація процесів має здійснюватися з урахуванням специфічних властивостей кальцинованої соди та напівпродуктів, необхідності спрощення управління, збільшення стійкості процесів до впливу зовнішніх збурень.

Комплекс основних завдань, що вирішуються на хіміко-технологічних виробництвах для забезпечення їх ефективної та безперебійної роботи, визначає особливе місце для задач автоматизації. Ефективне вирішення цих завдань - один з найбільш значущих факторів, що визначають загальну ефективність управління хімічним підприємством. Автоматизовані системи управління технологічним процесом (АСУТП) є основою для рентабельного функціонування виробництва, фундаментом для побудови систем управління підприємством в цілому. Необхідність створення АСУТП на базі сучасної мікропроцесорної техніки зумовлена тим, що:

- підйом виробництва обов'язково повинен бути пов'язаний з технічним переозброєнням, а підвищення якості продукції та екологічності виробництва кальцинованої соди неможливе без застосування сучасних засобів автоматизації технологічних процесів;
- відсутня необхідна ємність пристроїв зв'язку з об'єктом для відстеження всіх параметрів контролю та управління;
- морально та технічно застаріли засоби подання та архівації інформації;
- сучасні засоби мають менше енергоспоживання та вищий показник надійності.

Проблема ефективної експлуатації АСУТП завжди була актуальною темою. Не всі складові ефективності грають однакову роль створенні прибутку в реальних умовах експлуатації. Глобальна мета управління процесом - виконання виробничої програми при найкращому в економічному та екологічному сенсі технологічному режимі при отриманні максимуму прибутку.

Автоматизація на базі сучасної мікропроцесорної техніки дозволяє реалізувати якісно нову технологію та підвищити ефективність виробництва за рахунок:

- підвищення обсягу продукції, що випускається;
- зниження витрат сировинних та енергетичних ресурсів за деякими статтями витрат на ТП;
- підвищення якості продукції, що випускається;
- скорочення простоїв через неполадки;
- збільшення міжремонтних термінів роботи обладнання;
- використовувати мінімальну кількість працівників, необхідних для підтримки технологічного процесу у робочому стані та ліквідації аварійних ситуацій.

Завданням цієї роботи було вирішення кола питань, пов'язаних з модернізацією системи управління технологічного процесу отримання соди аміачним способом. Робота виконується на основі завдання кафедри системотехніки та інформаційних технологій Шосткинського інституту СумДУ.

За результатами роботи зроблено доповідь та опубліковані тези на ІХ Всеукраїнській науково-методичній конференції «ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ» (Шостка, 25 квітня 2024 року) [3].

Основний зміст роботи викладено в шести розділах, де представлені результати конструктивно-технологічного аналізу об'єкту управління, на основі якого здійснено вибір основних технологічних змінних та каналів керування, контролю та сигналізації та вибрані сучасні засоби автоматизації і як результат розроблена функціональна схема автоматизації. В розрахунковій частині роботи згідно завдання розроблена математична модель, проведена ідентифікація та лінеаризація цієї моделі та синтезована система управління температурою кальцинованої соди в содовій печі. На завершення роботи була розроблена мнемосхема АСУ ТП технологічного процесу отримання соди аміачним способом з використанням САПР TRACE MODE 6.

1 Загальна характеристика кальцинованої соди

1.1 Загальні відомості про содові продукти

Під загальною назвою "сода" хімічна промисловість виробляє низку продуктів [4]. До них зокрема відносяться:

- кальцинована сода Na_2CO_3 (або карбонат натрію);
- харчова сода NaHCO_3 (очищений гідрокарбонат натрію);
- кристалічна сода $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (декагідрат) та $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (моногідрат);
- «важка» сода (її насипна вага 900 - 1000 кг/м³);
- каустична сода NaOH (гідроксид натрію).

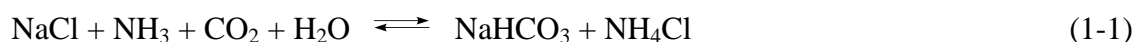
Найважливішими з них є кальцинована, харчова та каустична сода.

Кальцинована сода є основним матеріалом для одержання інших содових і хімічних продуктів таких як їдкий натр, двохвуглекіслю і кристалічна сода, а також для виробництва мила, скла, в нафтовій, металургійній, текстильній, шкіряній, харчовій, кондитерській, хіміко-фармацевтичній, целюлозній, паперовій промисловості, виробництві лакофарбових матеріалів.

Кальцинована сода - це білий кристалічний порошок з густиною 2,533 г/см³ і температурою плавлення 851⁰С. З водою карбонат натрію утворює ряд гідратів, наприклад $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Водні розчини соди мають сильні лужні властивості. Згідно стандарту розрізняють три марки кальцинованої соди: 1-технічна; 2-фотографічна; 3-оптична.

1.2 Технологія отримання кальцинованої соди аміачним способом

Кальциновану соду аміачним способом отримують [5] з гідрокарбонату амонію NH_4HCO_3 за схемою, яку запропонував наприкінці XIX століття бельгійський інженер Е.Сольве. Суть його полягає в послідовній обробці насиченого розчину NaCl аміаком NH_3 і вуглекислим газом CO_2 , внаслідок чого утворюється малорозчинний NaHCO_3 за реакцією



Осад NaHCO_3 , що випав у процесі карбонізації, відфільтровують і далі він розкладається внаслідок прожарювання (кальцинації) з отриманням кальцинованої соди Na_2CO_3



Залежно від конструкції печі температура розкладання NaHCO_3 становить 160-180⁰С. Ця операція протікає у відділенні кальцинації. Діоксид вуглецю CO_2 , що при цьому виділяється, використовують у процесі карбонізації.

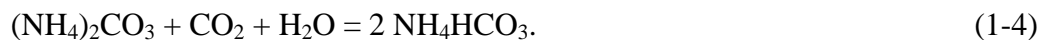
Основною стадією виробництва кальцинованої соди є карбонізація амонізованого розчину хлористого натрію. Утворення NaHCO_3 відбувається внаслідок складних хімічних процесів. При цьому відбуваються іонні реакції між розчиненими речовинами NaCl , NH_4Cl , NH_4HCO_3 і NaHCO_3 ,

що перебувають в динамічній рівновазі з недисоційованими молекулами твердої фази NaHCO_3 і газом. Кількість NaHCO_3 в осаді і розчині еквівалентна кількості NH_4Cl в розчині.

Сумарна реакція (1-1) має декілька стадій, які протікають при послідовному насиченні розчину NaCl аміаком (при амонізації) і вуглекислим газом (при карбонізації). У верхній частині колони утворюється $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за схемою



який за наявності надлишку CO_2 утворює NH_4HCO_3



Внаслідок збільшення концентрації іонів HCO_3^- приблизно з середини колони починається реакція обмінного розкладу з утворенням NaHCO_3



Амонізація розчину здійснюється для введення в нього CO_2 , який не розчиняється у насиченому розчині NaCl , але добре взаємодіє з NH_3 .

Ступінь утворення NaHCO_3 згідно з законом діючих мас тим більший, чим більше співвідношення між кількістю NH_3 і NaCl в розчині і чим більша концентрація NaCl в розчині. Чим ближча ступінь насичення аміачно-соляного розчину вуглекислим газом до стехіометричного співвідношення CO_2 і NH_3 в молекулі NH_4HCO_3 , тим більше NaHCO_3 випадає в осад. Для кращого використання вихідних речовин і забезпечення оптимального виходу NaHCO_3 треба знати сумісну розчинність солей в багатокомпонентній системі. Знаючи концентрацію кінцевих розчинів після насичення їх CO_2 , можна визначити коефіцієнт використання вихідних компонентів NaCl і NH_3 , а також вихідні концентрації цих компонентів, що зумовлює концентрацію кінцевих розчинів.

Найбільший вихід NaHCO_3 (84%) спостерігається в інтервалі $30\text{-}32^\circ\text{C}$. Це фактично та межа, до якої можна підвищувати температуру у цьому процесі. У виробничих умовах ступінь використання NaCl в процесі карбонізації не досягає теоретично можливого і здебільшого не перевищує 75-76%.

Теплова енергія, необхідна для дисоціації, забезпечується спалюванням вугілля (коксу), що подається в піч відпалювання разом із вапняком CaCO_3 . Основним фактором, що визначає рівновагу та швидкість дисоціації, є температура. Рівноважний тиск двоокису вуглецю CO_2 , що визначає константу рівноваги процесу, досягає 105 Н/м^2 при 990°C [3] (рис. 1.1).

Взаємний зв'язок окремих основних операцій технології виробництва кальцинованої соди показано на рис.1.2 [5].

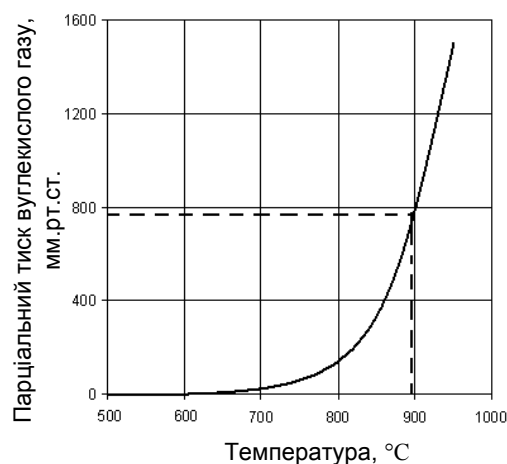


Рис. 1.1 - Залежність рівноважного тиску CO_2 від температури при дисоціації карбонату кальцію

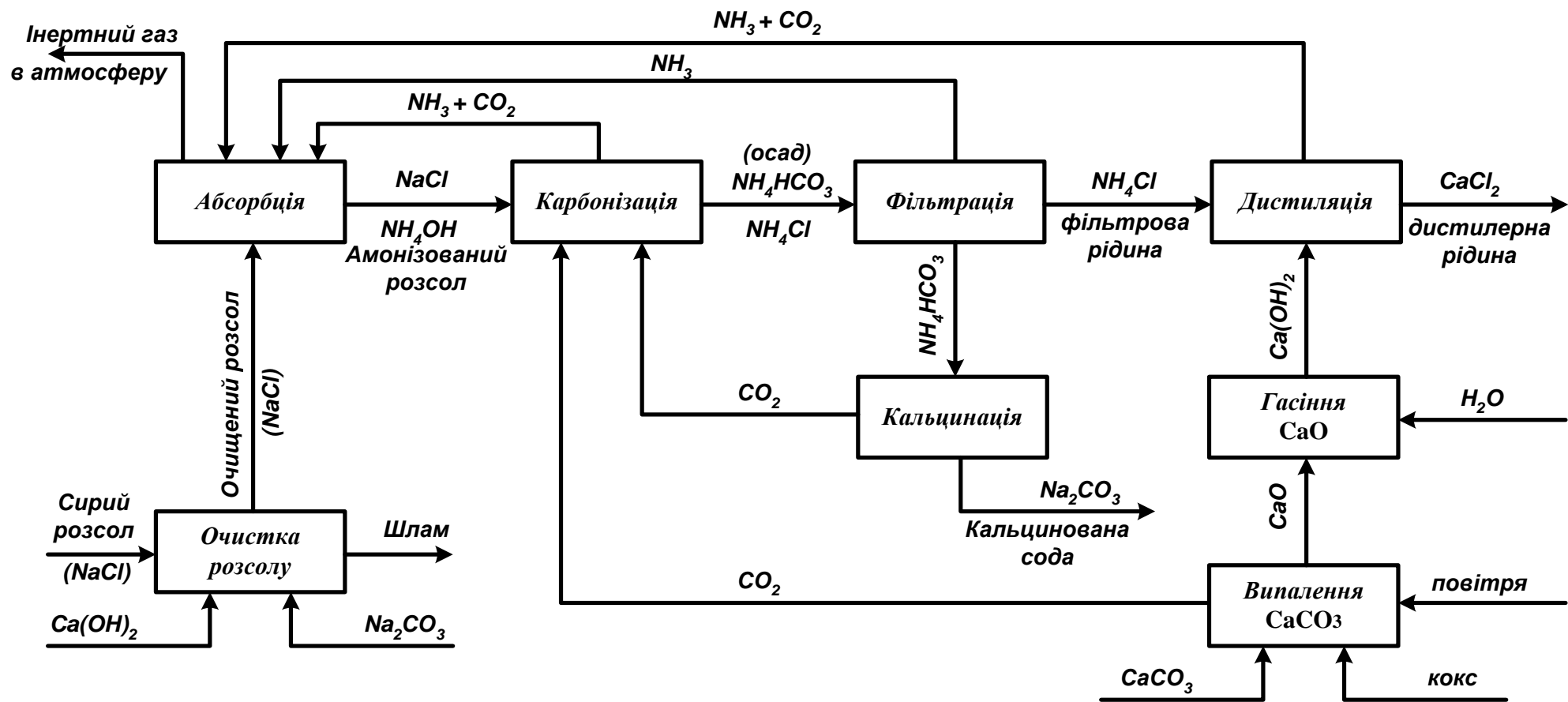


Рис. 1.2 - Принципова схема отримання кальцинованої соди аміачним способом

2 Конструктивно-технологічний аналіз виробництва кальцинованої соди

Технологічна схема виробництва кальцинованої соди представлена на рис. 2.1 [5,7].

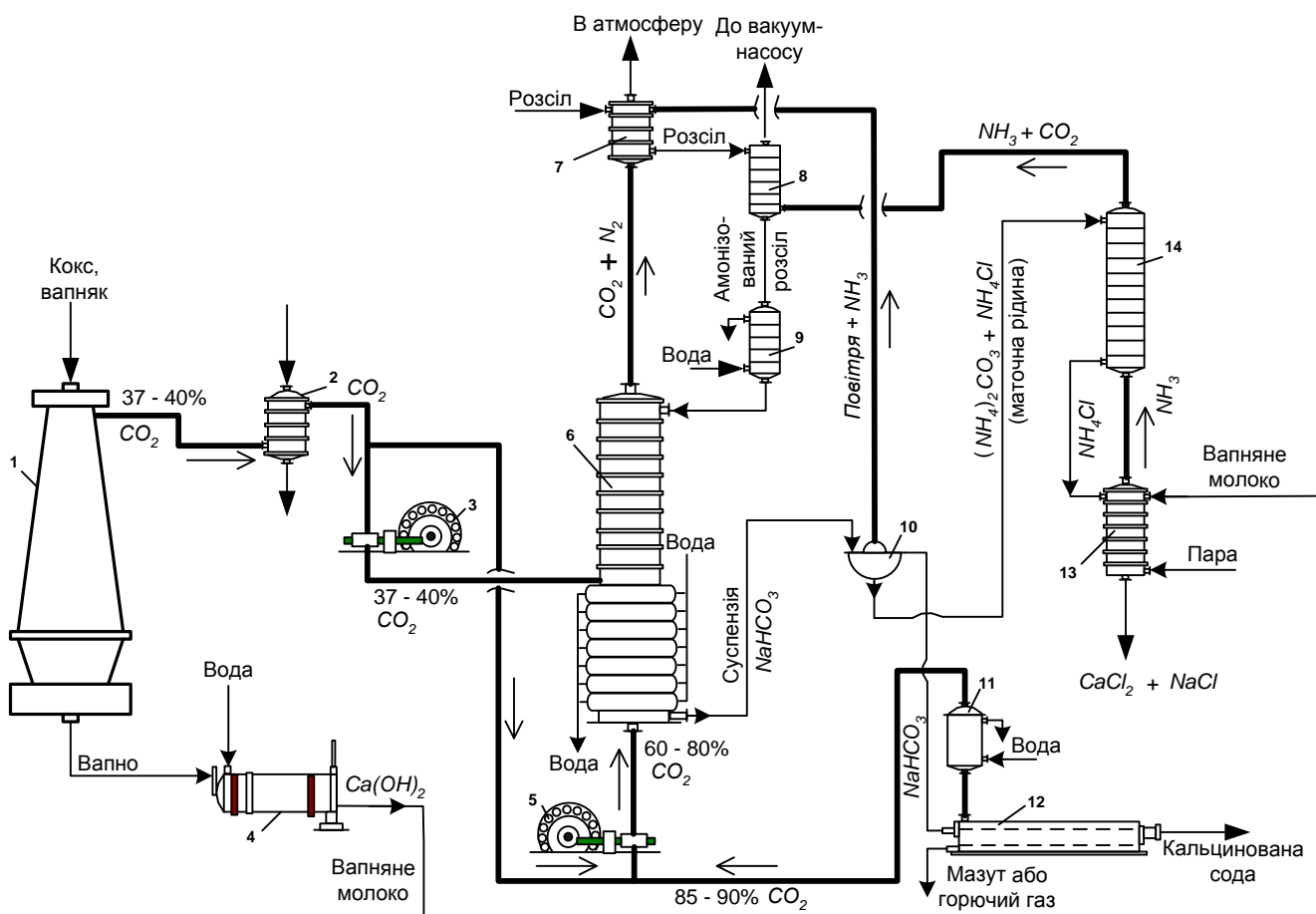


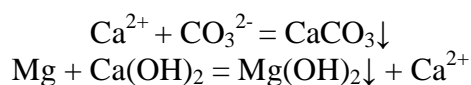
Рис. 2.1 - Технологічна схема виробництва кальцинованої соди аміачним способом

1 - піч для випалювання вапна; 2 - холодильник-газоочищувач; 3, 5 - компресор; 4 - апарат для гасіння вапна; 6 - колона для карбонізації; 7 - промивач газів; 8 - абсорбер; 9 - холодильник амонізованого розсолу; 10 - вакуум-фільтр; 11 - холодильник-промивач газів; 12 - содова піч; 13 - дистилер-змішувач; 14 - дистиляційна колона

2.1 Перша стадія. Очищення розсолу

Попередньо готують насичений розчин кухонної солі, який містить $307 - 310 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl}$, потім його очищають від солей кальцію та магнію. Застосовується, наприклад, вапняно-содове очищення. Ця стадія на технологічній схемі не представлена.

Іони кальцію та магнію утворюють малорозчинні сполуки та осаджуються з розчину за реакціями



2.2 Друга стадія. Амонізація

Ця стадія поділяється на дві стадії.

2.2.1 Попереднє насичення розсолу аміаком та вуглекислим газом (поз. 7)

Очищений від солей кальцію і магнію розсіл самопливом надходить у промивач газів поз. 7, де поглинає CO₂ з газів, що залишають карбонізаційну колони поз. 6, а також поглинає NH₃ з газів, що надходять з вакуум-фільтру поз. 10. Відпрацьований газ, що містить в основному азот, видаляється в атмосферу.

2.2.2 Власне амонізація (поз. 8)

Розсіл із промивача газів поз. 7 надходить в абсорбер поз. 8, де поглинає гази NH₃ і CO₂, що надходять з дистиляційної колони поз. 14. Гази, що не поглинулись в абсорбері поз. 8, направляються вакуум-насосом до промивача поз. 7, де вони попередньо насичують розсіл.

2.3 Третя стадія. Карбонізація

Амонізований розсіл, попередньо охолоджений в холодильнику поз. 9, безперервно надходить у верхню частину карбонізаційної колони поз. 6, що майже до верху заповнена рідиною. Тут відбувається карбонізація розсолу.

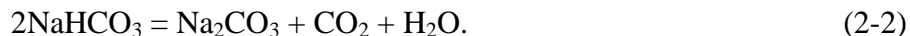
У нижню частину карбонізаційної колони надходить газова суміш, що містить CO₂.

Один потік газу, що містить (37 – 40) % CO₂, – це газ, отриманий у вапняно-випалювальній печі поз. 1 за рівнянням



та очищений в апараті поз. 2.

Інший потік - газ содової печі поз.12, що містить (85 - 90)% CO₂. У содових печах CO₂ отримується за рівнянням



Концентрація змішаного газу при двох введеннях в карбонізаційну колону – (60 – 80) % CO₂. При одному введенні – приблизно 50 % CO₂.

Найчастіше, як це показано на рис. 2.1 використовують два введення в карбонізаційну колону: перше введення в нижню частину карбонізаційної колони - газ содової печі; друге введення у верхню частину – газ тільки з вапняно-випалювальної печі.

У карбонізаційній колоні поз. 6 протікає основна реакція перетворення розсолу NaCl і вуглекислого газу CO₂ на гідрокарбонат NaHCO₃ за рівнянням



З верхньої частини карбонізаційної колони газ, що містить деяку кількість CO₂, надходить у промивач поз. 7, де CO₂ поглинається свіжим розсолом.

2.4 Четверта стадія. Фільтрування та промивання осаду

У карбонізаційній колоні поз. 6 утворюється суспензія кристалічного гідрокарбонату натрію в розчині хлориду амонію NH₄Cl і хлориду натрію NaCl, що не прореагував. Крім того, в розчині містяться як побічний продукт солі амонію NH₄HCO₃ і (NH₄)₂CO₃. Ця суспензія подається з нижньої частини карбонізаційної колони поз. 6 у вакуум-фільтр поз. 10 відділення гідрокарбонату.

Осад гідрокарбонату натрію NaHCO_3 промивається на вакуум-фільтрі поз. 10. Сирий гідрокарбонат (NaHCO_3) подається потім на кальцинування в содову піч поз. 12, що обертається, а маточна рідина - в дистиляційну колону поз. 14 на регенерацію аміаку.

2.5 П'ята стадія. Кальцинування

Кальцинування - це розкладання гідрокарбонату натрію NaHCO_3 з утворенням соди, води та діоксиду вуглецю. Процес протікає в содовій печі поз. 12, що обертаються, за рівнянням



Кальцинована сода з содової печі поз. 12 надходить на склад і далі на упаковку.

2.6 Шоста стадія. Регенерація аміаку

Регенерація аміаку проводиться у двох апаратах і має дві стадії.

2.6.1 Регенерація аміаку в дистиляційній колоні (поз. 14)

Маточна рідина (фільтрат) подається з вакуум-фільтрів поз. 10 дистиляційну колону поз. 14, де відбувається регенерація аміаку в результаті розкладання солей амонію, що йде при нагріванні газами, що виходять з апарату поз. 13. З цього апарату пором відганяється аміак, тому газ має температуру $70 - 80^\circ\text{C}$, містить аміак та частково діоксид вуглецю.

Вуглекислі солі амонію розкладаються в дистиляційній колоні поз. 14 при температурі $70 - 80^\circ\text{C}$ за рівняннями реакцій

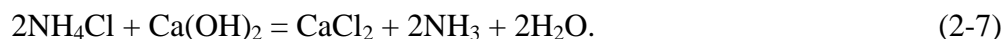


2.6.2 Регенерація аміаку в дистилері-змішувачі (поз. 13)

Для розкладання хлориду амонію рідина з дистиляційної колони поз. 14 подається в дистилер-змішувач поз. 13, куди надходить вапняне молоко, одержуване в апараті поз. 4 гасінням вапна за рівнянням реакції



У дистилері-змішувачі поз. 13 протікає реакція, що описується рівнянням



Аміак, що виділяється при розкладанні солей амонію, відганяється парою, яка подається в нижню частину апарату поз. 13.

Регенеровані в апаратах поз. 13 і поз. 14 аміак і діоксид вуглецю направляються абсорбер поз. 8 на поглинання розсоллом.

Розчин, отриманий після відгону аміаку, містить в основному хлорид кальцію і хлорид натрію, який не вступив в реакцію. Цей розчин називається дистилерною рідиною. Дистилерна рідина є відходом виробництва. Раціональне використання цього відходу має важливе значення у виробництві.

Внаслідок розкладання гідрокарбонату натрію в содовій печі утворюється газ, що містить $85 - 90\%$ CO_2 . Газ содової печі проходить холодильник-промивач поз. 11, очищається там, і потім

надходить у компресор поз. 5 де змішується з іншим газом – промитим та охолодженим газом з вапняно-випалювальної печі поз. 1.

Змішаний компресором поз. 5 газ (60 - 80% CO₂) під надлишковим тиском 0,3 МПа подається в нижню частину карбонізаційної колони поз. 6.

Виробництво кальцинованої соди за аміачним способом у промисловості здійснюється майже за однаковим принципом. Різняться лише конструкція, внутрішній устрій, розміри та продуктивність окремих апаратів.

2.7 Висновки щодо оптимального ведення технологічного процесу

Аналіз літературних джерел [5-7] дозволяє зробити узагальнені висновки щодо оптимального режиму ведення технологічного процесу виробництва кальцинованої соди, а саме:

– необхідно використовувати насичені розчини хлориду натрію (реально використовуються розчини концентрації 270 г/дм³);

– розчин хлориду натрію максимально насичують аміаком (реально до концентрації 90 г/дм³);

– амонізований розчин хлориду натрію максимально насичують діоксидом вуглецю, а ступінь абсорбції залежить від концентрації CO₂ у газі (реально газ, що подається в карбонізаційну колону, містить 45 – 50 % об. CO₂);

– температуру процесу карбонізації підтримують близько 30°C, застосовуючи охолодження.

Підвищення температури хоч і уповільнює карбонізацію і випадання кристалів, але в початковій стадії це підвищення температури є сприятливим для утворення досить великих кристалів, що добре відфільтровуються. Тому вгорі осадової колони підтримують температуру близько 60°C, внизу колони, де потрібно прискорення кристалізації та виділення з розчину останніх порцій NaHCO₃, знижують температуру до 22 - 25°C за допомогою спеціальних холодильників.

2.8 Технологічні змінні керування, контролю та сигналізації

Спираючись на виконаний вище конструктивно-технологічний аналіз об'єкту управління був складений перелік основних технологічних змінних, які підлягають управлінню, контролю чи сигналізації, приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Перелік технологічних змінних, що підлягають управлінню, контролю, сигналізації

Технологічна змінна	Точка технологічного процесу	Операції управління	Регламентне значення
1	2	3	4
Температура	Вапняно-випалювальна піч	Управління, контроль, сигналізація	990±100 °C
Температура	Барботажна карбонізаційна	Управління, контроль	40-50 °C

	(осаджувальна) колона		
Температура	Охолоджувальна частина барботажної карбонізаційної колони	Управління, контроль, сигналізація	0-15 °С
Температура	Піч кальцинації бікарбонату натрію	Управління, контроль	140-170 °С
Рівень	Рідина у барботажній абсорбційній колоні	Управління, контроль, сигналізація	3.2 м

3 Вибір каналів керування, контролю, сигналізації та блокування

3.1 Канали управління, сигналізації та блокування

3.1.1 Температура у вапняно-випалювальній печі

Для запобігання спіканню суміші вугілля і вапняку та отримання максимальної кількості вуглекислого газу необхідно підтримувати температуру 990 ± 100 °С Для цього в печі встановлено датчик температури і в нижній частині печі встановлено клапан для регулювання об'єму повітря, що подається. Функціональна схема локального контуру сигналізації та керування температурою в вапняно-випалювальній печі наведена на рис. 3.1.

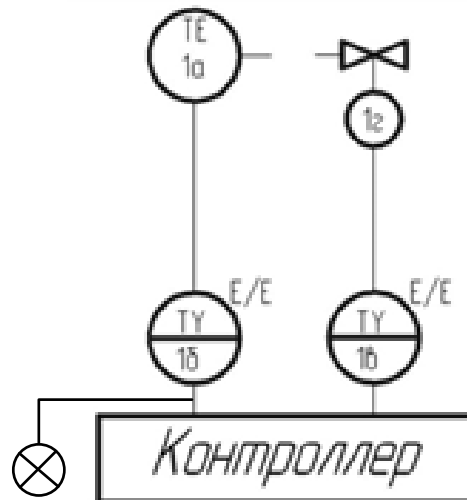


Рис. 3.1 - Локальний контур сигналізації та керування температурою в вапняно-випалювальній печі

3.1.2 Температура в барботажній карбонізаційній (осаджувальній) колоні

Необхідно підтримувати температуру в межах 40-50 °С, що сприяє формуванню великих кристалів, що добре фільтруються. Для цього в колоні встановлений датчик температури, а на трубопроводі подачі пари, необхідної для підтримки температури, встановлений регулюючий клапан. Функціональна схема локального контуру керування температурою в барботажній карбонізаційній (осаджувальній) колоні наведена на рис. 3.2.

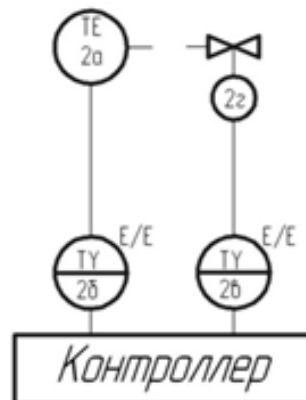


Рис. 3.2 - Локальний контур керування температурою в барботажній карбонізаційній (осаджувальній) колоні

3.1.3 Температура в охолоджувальній частині барботажної карбонізаційної колони

Необхідно знижувати температуру в межах 0-15° для зменшення розчинності NaHCO₃ і

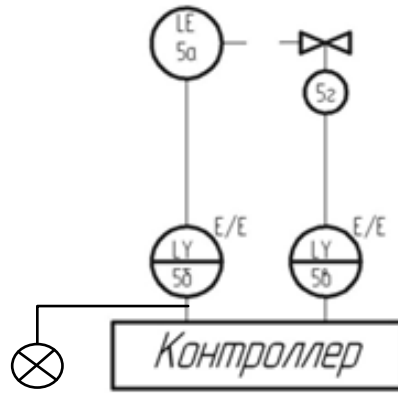


Рис. 3.5 - Локальний контур сигналізації та керування рівнем рідини в барботажній абсорбційній колоні

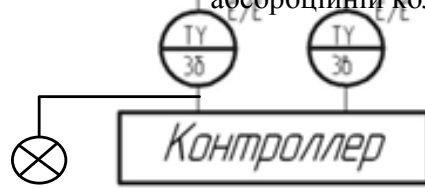


Рис. 3.3 - Локальний контур сигналізації та керування температурою в охолоджувальній частині барботажної карбонізаційної колони

збільшення його виходу в результаті додаткового виділення кристалів при охолодженні. Для цього в колоні встановлено датчик температури, а на трубопроводі подачі розсолу, необхідного для охолодження, встановлений регулюючий клапан. Функціональна схема локального контуру сигналізації та керування температурою в охолоджувальній частині барботажної карбонізаційної колони наведена на рис. 3.3.

3.1.4 Температура в печі кальцинації бікарбонату натрію

Необхідна температура всередині печі становить 140-170 ° С. Для цього в печі встановлений датчик температури, а на трубопроводі подачі природного газу, необхідного для підтримки температури, встановлений регулюючий клапан. Функціональна схема локального контуру керування температурою в печі кальцинації бікарбонату натрію наведена на рис. 3.4.

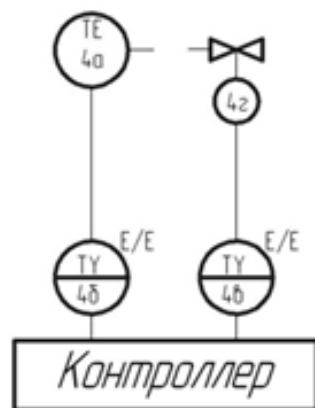


Рис. 3.4 - Локальний контур керування температурою в печі кальцинації бікарбонату натрію

3.1.5 Рівень рідини в барботажній абсорбційній колоні

Граничний рівень рідини у колоні становить 4 метри, а рівень необхідний нормального перебігу технологічного процесу становить 3.2 метра. Для уникнення переливу рідини та підтримки необхідного рівня в колоні встановлено рівнемір і на трубопровід подачі технологічного розсолу з напірного бака встановлено регулюючий клапан. Функціональна схема локального контуру сигналізації та керування рівнем рідини в барботажній абсорбційній колоні наведена на рис. 3.5.

4 Вибір сучасних засобів автоматизації

Взявши до уваги організацію виробництва кальцинованої соди, топологію об'єкта, вимоги щодо організації автоматизованого робочого місця (АРМ) та розміщення функціональних елементів технологічного процесу на підприємстві. Вибираємо 3-х рівневу систему керування.

4.1 Нижній рівень автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСУ ТП)

На цьому рівні знаходяться датчики та виконавчі пристрої.

Виконаємо вибір датчиків [9-11].

4.1.1 Контроль температури у вапняно-випалювальній печі

Для вимірювання температури у вапняно-випалювальній печі можливе використання таких датчиків:

а) Давач температури ІТ-1

Давач температури: термоперетворювач з уніфікованим вихідним сигналом ІТ-1. Вимірювач температури ІТ-1.1Е-Ех, 0.. +1500 °С, Токр -10..+50 °С, L=1600 мм.

Є термоелектричним перетворювачем опору в захисній гільзі, в головку якого вбудований нормуючий перетворювач НІТТ-1. Призначений для вимірювання та перетворення в уніфікований сигнал струму температуру рідин, парів та газів. Зовнішній вигляд датчика ІТ-1 наведено на рис. 4.1.



Рис. 4.1 - Давач температури ІТ-1

Основні технічні характеристики датчика ІТ-1 наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Основні технічні характеристики датчика ІТ-1

Основна похибка	+1,0 %
Діапазон вимірювання	0..+1500 °С
Тип НСХ	100М
Вихідний аналоговий сигнал	0..5 mA
Напруга живлення	30 В

Споживана потужність	0,6 ВА
Кліматичне виконання	УХЛ 3.1
Температура навколишнього повітря	-10..+50 °С
Тиск робочого середовища	< 6,3 МПа
Ступінь захисту от води та пилу по ГОСТ 14254	IP54 (IP65 для корпусу Е)
Стійкість до механічних впливів	V2
Довжина монтажної частини	1600 мм
Матеріал захисної арматури	Сталь 12Х18Н10Т
Ціна (с урахуванням доставки)	435,7 грн

б) Термоперетворювач ТПР-0192-09

Вимірювані середовища: газоподібні нейтральні та окислювальні середовища, повітря, інертні гази, що не взаємодіють з матеріалом термоелектродів і не руйнують матеріал захисної арматури.

Діапазони виміру: 0 .. +1500 °С ($t_{ном} = +1200$ °С),

Номинальні статичні характеристики: (за ГОСТ Р 8.585).

Клас допуску чутливого елемента: 2 (за ГОСТ 6616).

Основна похибка вимірів від 0 до 800 °С - 1,0%; від 800 до 1500 °С-2,0%.

За стійкістю до механічних впливів: віброміцна група N2 за ГОСТ 12997.

Основні технічні характеристики термоперетворювача ТПР-0192-09 наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Основні технічні характеристики термоперетворювача ТПР-0192-09

Конструктивні особливості	Захисна арматура без штуцера, матеріал - сталь ХН78Т (ХН45Ю), D=20 мм. Матеріал головки - алюмінієвий сплав. Термоелектроди Ж0.5-0.5мм. Один чутливий елемент. Посилений захист термоелектродів за рахунок внутрішнього чохла із кераміки МКРЦ. Робочий спай ізольований.
Показник теплової інерції, с, не більше	180
Довжина монтажної частини L, мм	2000
Маса, кг	6,15
Ціна (з урахуванням доставки)	620 грн.

Порівнявши технічні характеристики давачів ІТ-1 та ТПР-0192-09, а також їх вартість можна зробити висновок, що термоперетворювач ІТ-1 має більш високу точність вимірювань і має вартість нижчу ніж у ТПР-0192-09. Тому вибираємо термоперетворювач ІТ-1.

4.1.2 Контроль рівня рідини в барботажній абсорбційній колоні

Для вимірювання рівня рідини в барботажній абсорбційній колоні можливе використання наступних давачів:

а) Давач рівня Deltapilot S DB 50

Компактний давач рівня для гідростатичного вимірювання рівня. Призначений для вимірювання рівня рідин (при зондовому виконанні до 4 метрів), тиску і диференціального тиску при використанні вторинного перетворювача в умовах агресивних, вибухонебезпечних середовищ при значних перепадах температури навколишнього середовища та навколишнього повітря, і може бути використаний для обчислення та індикації рівня, обсягу, різниці тисків, маси, густини рідини в ємності.

Застосовується практично в будь-якій галузі промисловості, на станціях водообробки: у розподілених системах автоматичного управління технологічними процесами, а також в автономному режимі.

Основні технічні характеристики давача рівня Deltapilot S DB 50 наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Основні технічні характеристики давача рівня Deltapilot S DB 50

Діапазон виміру тиску, бар	Коефіц. Перенастройки діапаз. виміру	Приведена погрішність вимірів, %	Температура робочого середовища, °С	Температура навкол. повітря, °С	Ступінь захисту	Вихідні сигнали	Живл. напр. пост. струму	Маса, кг
- 0,9...4	10:1	± 0,2	- 1 ... + 100	- 40 ... + 85	IP 66	0...5 мА	36 В	7.2

Ціна (з урахуванням доставки): 2487,2 грн.

б) Рівномір УГЦ-2.

Призначений для автоматичного контролю та сигналізації рівня рідин. Комплект складається з первинного перетворювача з тензорезистивним датчиком та вимірювального приладу типу ПКЦ. У складі первинного перетворювача датчик з перетворювачем тиску, гідрометричний кабель з внутрішньою пустотілою трубкою для компенсації похибки при зміні атмосферного тиску з двома нерозтяжними нитками для механічної міцності, клемна коробка.

Основні технічні характеристики давача рівня УГЦ-2 наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Основні технічні характеристики давача рівня УГЦ-2

Основна погрішність	+ 1%
Верхня межа вимірювання	от 1 до 10 м
Температура робочого середовища	-40..+150 °С
Вихідний сигнал	4..20 мА
Вихідний дискретний сигнал ІІІ	сухий контакт, ~220 В, 3А
Напруга живлення	~220 В
Споживана потужність	5 ВА
Тип и діаметр кабелю первинного перетворювача	оболонка поліетилен, поліуретан, діаметр 6мм
З'єднання кабелю ІІІ з клемною коробкою	фланець по ГОСТ 12815-80

Ступінь захисту клемної коробки ПП по ГОСТ 14254	IP54
Температура навколишнього повітря для первинного перетворювача	-40..+50 °С (клемна коробка)
Температура навколишнього повітря для вимірювального приладу	+5..+50 °С
Ціна (з урахуванням доставки)	3120,5 грн.

Порівнявши технічні характеристики датчиків Deltapilot S DB50 і УГЦ-2, а також їх вартість можна зробити висновок, що датчик рівня Deltapilot S DB50 має більш високу точність вимірювань і має вартість нижчу ніж УГЦ-2. Тому вибираємо термоперетворювач Deltapilot S DB50.

4.1.3 Контроль температури в барботажній карбонізаційній (осаджувальній) колоні

Для вимірювання температури в барботажній карбонізаційній (осаджувальній) колоні можливе використання наступних датчиків:

а) Давач температури ДТ-1-А-25Д

Давач температури ДТ-1-А-25Д ТУ, Троб = 50 °С, l = 50 мм, L = 80 мм. Датчик призначений контролю температури газоподібних і рідких середовищ у технологічних апаратах хімічної, нафтохімічної, харчової, медичної та інших галузей промисловості, і навіть контролю температури підшипникових вузлів агрегатів, зокрема у вибухонебезпечних умовах.

Основні технічні характеристики ДТ-1-А-25Д:

Параметри контрольованого середовища: температура-0-300 °С; максимальний тиск робочого середовища – 60 кгс/см².

Тип термочутливого елемента: напівпропідниковий.

Область контрольованих температур: 0...125°С.

Довжина занурювальної частини: L=22 мм.

Виконання: з уніфікованим струмовим сигналом 0-5 мА.

Напруга живлення датчика ДТ-1-Р: від мережі постійного струму напругою від 36 В.

Споживана електрична потужність: трохи більше 0,5 Вт.

Маркування вибухозахисту: ОЕхІаІСТ5Х;

Можливість переналаштування, встановлення на місці установки переносним блоком.

Габаритні розміри: 67х44х(56+L).

Маса датчика: від 0,6 кг.

Основна похибка вимірів: 0,5 %.

Ціна (з урахуванням доставки): 420 грн.

б) датчик температури ТХА-0395.

Діапазон виміру: 0...+100°С

Основна похибка вимірів: 1% від 0 до 50°С; 1,5% від 50 до 100°С.

Ресурс, годин (при t вим.=t ном.), щонайменше 8000 год.

Основні технічні характеристики давача температури ТХА-0395 наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 - Основні технічні характеристики давача температури ТХА-0395

Тип і виконання давача	Конструктивні особливості	Ціна, з урахуванням доставки	Вид вихідного сигналу	Маса, кг
ТХА-0395	Матеріал монтажної частини захисної арматури – сталь. Термоелектроди 3.2 мм. Робочий спай ізолюваний. Умовний тиск вимірюваного середовища $P_y=4$ МПа.	1900 грн	0..5 mA	3,87

Порівнявши технічні характеристики датчиків ДТ-1-А-25 і ТХА-0395, можна зробити висновок, що обидва датчики мають вихідний уніфікований сигнал для зв'язку з пристроєм управління. Але датчик ДТ-1-А-25 має більшу точність вимірювань та меншу вартість – тому слід використовувати датчик температури ДТ-1-А-25.

4.1.4 Контроль температури в охолоджувальній частині барботажної карбонізаційної колони

Так як межі вимірювання температури охолоджувальної частини барботажної карбонізаційної колони аналогічні межах вимірювання температури в барботажної карбонізаційної (осаджувальної) колоні і взявши до уваги можливість зменшення вартості автоматизації виробництва та стандартизації устаткування, що встановлюється, слід використовувати давач температури ДТ-1-А-25.

4.1.5 Контроль температури печі кальцинації бікарбонату натрію

Для вимірювання температури у печі кальцинації бікарбонату натрію можливе використання наступних датчиків:

а) Датчик температури ТХА-0499

Діапазон виміру: 0...+250°C.

Основна похибка вимірів: 1% від 0 до 100°C; 1,5% від 100 до 250°C.

Ресурс, годин (при t вим.= t ном.), щонайменше 9000 год.

Основні технічні характеристики давача температури ТХА-499 наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.6 - Основні технічні характеристики давача температури ТХА-0499

Тип і виконання давача	Конструктивні особливості	Ціна, з урахуванням доставки	Вид вихідного сигналу	Маса, кг
ТХА-0499	Матеріал монтажної частини захисної арматури – сталь. Термоелектроди 3.2 мм. Робочий спай ізолюваний. Умовний тиск вимірюваного середовища $P_y=4$ МПа.	2300 грн	0..5 mA	4,05

б) Термоперетворювач МЕТРАН-271МП.

Термоперетворювачі мікропроцесорні призначені для вимірювання температури рідких і газоподібних середовищ. Чутливий елемент первинного перетворювача і вбудований в головку датчика мікропроцесорний перетворювач перетворюють вимірювану температуру в уніфікований вихідний сигнал постійного струму, що дає можливість побудови АСУТП без застосування додаткових перетворювачів, що нормують. Загальний вигляд термоперетворювача МЕТРАН-271МП наведено на рис. 4.2.

Основні технічні характеристики:

- діапазон виміру: 0...+300°C;
- ціна (з урахуванням доставки): 1800 грн.;
- основна похибка вимірів: 0,15 %;
- вид вихідного сигналу: 0-5 мА.

До переваг даного термоперетворювача можна віднести наступне:

- ігноризація обриву чи короткого замикання первинного перетворювача (сенсора);
- мінімізація похибки вимірювань рахунок температурної компенсації. Додаткова похибка від впливу температури навколишнього середовища у 5-10 разів менша, ніж у аналогових перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом;
- лінеаризація мікропроцесором номінальної статичної характеристики сенсора підвищення точності вимірювань; можливість інверсного виходу 0-5 мА; вбудований фільтр радіоперешкод.



Рис. 4.2 - Термоперетворювач МЕТРАН-271МП

Порівнявши технічні характеристики датчиків ТХА-0499 та МЕТРАН-271МП, можна зробити висновок, що обидва датчики мають уніфікований вихідний сигнал для зв'язку з пристроєм управління. Але датчик МЕТРАН-271МП має більшу точність вимірювань та меншу вартість – тому слід використовувати термоперетворювач МЕТРАН-271МП.

Виберемо датчик полум'я для контролю наявності факела та уникнення аварійної ситуації.

4.1.6 Датчик полум'я АДП-01

Призначений для індикації наявності або відсутності полум'я, вид вихідного сигналу: 0-5 мА.

Відмінні риси: можливість реакції на пульсації полум'я; як чутливий елемент використовується фотодіод; динамічний діапазон щонайменше 90 дБ. стійкий до вібрації елементів конструкції.

4.2 Обґрунтування та вибір регулюючих органів

Одним з головних завдань вибору технічних засобів є перевірка поєднання каналів управління контролера з приводами. На рис. 4.3 зображено схему управління двигуном з

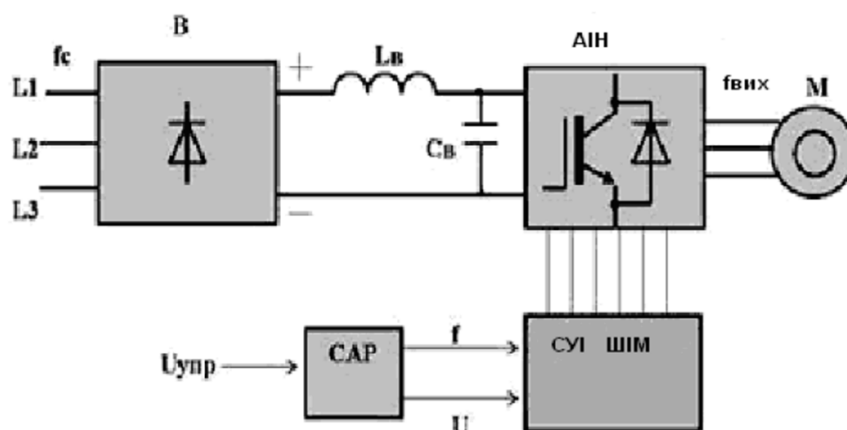


Рис. 4.3 - Схема підключення перетворювача частоти до асинхронного двигуна:
В - некерований діодний силовий випрямляч; АІН - автономний інвертор; ШІМ - широтно-імпульсний модулятор; Lв,Св - фільтр

використанням перетворювача частоти.

Серед різних способів керування приводами в даний час є частотне та широтно-імпульсне (ШІМ). Великою перевагою ШІМ є її висока завадостійкість та простота організації на мікропроцесорному контролері.

Додатковою перевагою використання ШІМ управління є можливість типізації алгоритму управління типу ШІМ.

В даному випадку для керування перетворювачем частоти використовується ШІМ. Далі перетворювач під дією керуючих сигналів керує двигуном.

4.2.1 Канал управління температурою у вапняно-палювальній печі

Зі сформульованої задачі управління слідує, що для регулювання температури у вапняно-випалювальній печі, необхідно регулювати витрату повітря шляхом зміни положення засувки.

Відповідно до регламенту технологічного процесу номінальна витрата повітря становить 8000 м³/год.

Зробимо розрахунок діаметра трубопроводу та діаметра засувки для управління подачею повітря. Для забезпечення регулювання подачі повітря в межах 0 – 10 000 м³/год розрахуємо необхідний діаметр трубопроводу та швидкість подачі повітря.

Внутрішній діаметр трубопроводу d , м, визначається як

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785 * v}},$$

де Q - витрата, м³/год, v --швидкість потоку, м/с.

$$Q = 10000 \text{ м}^3/\text{год} = 2.78 \text{ м}^3/\text{с}; v = 6 \text{ м/с}.$$

$$\text{Тоді: } d = \sqrt{\frac{2.78}{0.785 * 6}} = 0.77 \text{ м}.$$

Отже вибираємо засувку чавунна паралельна дискова 30ч936бк DN800 з діаметром проходу ДК = 0,8 м, основні технічні характеристики якої приведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Основні технічні характеристики засувки 30ч936бк DN800

Найменування параметра	Показники
Умовний прохід Ду, мм	800
Умовний тиск Ру, кгс/см ²	1,6
Робоче середовище	Коксовий і природний газ
Температура робочого середовища, С°	до +250
Тип приєднання	фланцеве за ГОСТ 12815-80
Тип привода	електропривод

Відсоток діаметра проходу від максимального, при номінальному режимі роботи – 86%

Порівняльний аналіз електричних приводів:

а) Привід електричний багатооборотний ПЕМ-Б1.

Привід призначений для дистанційного та місцевого керування запірною трубопровідною арматурою, що встановлюються безпосередньо на арматурі. Робоче положення приводу – будь-яке.

Основні вузли приводу: електродвигун, ручний привід, блок кінцевих вимикачів БКВ, двосторонній обмежувач крутного моменту.

Блок кінцевих вимикачів БКВ забезпечує сигналізацію та (або) блокування вихідного валу приводу в крайніх або проміжних положеннях.

Призначення двостороннього обмежувача моменту:

- автоматичне відключення приводу при досягненні запірним органом арматури крайніх (закрито, відкрито) та (або) будь-яких проміжних положень при досягненні заданого моменту, що крутить, на вихідному валу;
- забезпечення початку руху запірного органу з крайнього положення з максимальним моментом, що крутить, завдяки наявності блокуючих кулачків (цим запобігається відключення електродвигуна в межах величини налаштування ходу вихідного валу).

Основні технічні характеристики приводу електричного багатооборотного ПЕМ-Б1 приведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 - Основні технічні характеристики приводу електричного багатооборотного ПЕМ-Б1

Виконання приводу	Діапазон налаштування крутячого моменту на вихідному валу, Н.м	Число оборотів вихідного валу		Частота обертання вихідного валу, об/хв	Потужність електродвигуна, не більше, Вт	Вид і розмір вихідного валу, мм
		min, об.	max, об.			
ПЕМ-Б1	100-300	1	6	25	550	58

б) Привід електричний однооборотний ПЕОЗ-100-0,6-03К

Привід призначений для керування заслінками, кульовими та корковими кранами, затворами та іншою запірною арматурою, що вимагає повороту робочого органу на кут від 0 до 225°.

Привід встановлюється безпосередньо на трубопровідній арматурі та з'єднується зі штоком регулюючого органу за допомогою втулки. Робоче положення приводу – будь-яке.

Основні вузли приводу: електродвигун, планетарна передача, ручний привід, блок кінцевих вимикачів БКВ, обмежувач граничного моменту.

Блокування обертання вихідного валу відбувається за допомогою обмежувача граничного моменту або блоку кінцевих вимикачів БКВ. БКВ забезпечує сигналізацію та (або) блокування вихідного валу приводу в крайніх або проміжних положеннях.

Обмежувач граничного моменту забезпечує відключення приводу при досягненні запірним пристроєм арматури крайніх положень (<Відкрито>, <Закрито>) або при аварійному заїданні рухомих частин арматури.

Основні технічні характеристики приводу електричного однооборотний ПЕОЗ-100-0,6-03К приведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 - Основні технічні характеристики приводу електричного ПЕОЗ-100-0,6-03К

Виконання приводу	Крутячий момент на вихідному валу, Н.м		Частота обертання вихідного валу, об/хв	Повний хід вихідного валу об. (град.)	Номінальний час повороту вихідного валу, с		Споживана потужність, не більше, Вт	Вид і розмір вихідного валу, мм
	min	max			на 90°	на 225°		
ПЭОЗ-100-0,6-03К	60	140	0,6	0,25 (90о) або 0,63 (225о)	25	63	500	58

Кліматичне виконання – УЗ.1 за ГОСТ 15150.

Ступінь захисту – IP54 за ГОСТ 14254.

Електричне живлення - однофазне, напругою 220 або 24 В частоти 50 Гц.

Управління приводом - як безконтактне, за допомогою пускача безконтактного реверсивного ПБР-2М, так і контактне - за допомогою електромагнітного пускача (наприклад, типу ПМЛ).

Відмінні риси приводу:

- привід має блок сигналізації критичних ситуацій та граничних поворотів валу;
- обмежувач граничного моменту забезпечує можливість встановлення моменту вимикання в діапазоні від 63 до 100% максимального моменту. Відхилення моменту вимкнення не перевищує $\pm 10\%$ від настроєного значення;
- ручний привід працює незалежно від стану електродвигуна (увімкнене або вимкнено);
- привід може бути налаштований на повний хід вихідного валу від 30 до 290о при збереженні швидкості переміщення вихідного валу;
- невеликі габаритні розміри та невелика маса;

- мікровимикачі допускають комутацію постійного струму від 5мА до 1А при напрузі до 48В, змінного струму від 20мА до 500мА при напрузі до 220В.

Обґрунтування вибору електричного приводу.

Проаналізувавши характеристики приводів ПЕМ-Б1 та ПЕОЗ-100-2,5-03К можна зробити висновок, що, так як його відмінною особливістю є блоки сигналізації стану приводу, що забезпечує інтеграцію зі SCSDA, то системами слід вибрати привід ПЕОЗ-100-2,5-03К.

4.2.2 Вибір перетворювача EI-MINI-FP7

Зовнішній вигляд перетворювача EI-MINI-FP7 наводиться на рис. 4.4.

Основні технічні характеристики:

- функція реверсу;
- двохпровідне курування;
- цифровий вихід для діагностики приводу;
- максимальна частота 100 Гц;
- Джерело живлення +15 В для зовнішніх приладів;
- Наявність зовнішніх входів для керування та скидання помилки.



Рис. 4.4 - Перетворювач EI-MINI - FP7

Основні технічні характеристики перетворювача EI-MINI-FP7 наводяться в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 - Основні технічні характеристики перетворювача EI-MINI-FP7

Характеристика	Модель EI-MINI- FP7
Напруга живлення мережі, В	220-240
Частота мережі, Гц	45-60
Вихідна потужність, кВт	0,75
Номінальний вихідний струм, А	4
Максимально допустимий струм, А (150% I _{ном} на протязі 60 с)	6
Несуча частота ШИМ, кГц	16
Режими управління	2-х проводное
Режими гальмування	Плавна зупинка, інерційна зупинка або гальмування постійним струмом
Навантаження	З постійним моментом або з вентиляторною характеристикою
Ступінь захисту	IP00
Робоча температура	От 0 до + 50°C
Температура зберігання	От - 40 до + 65°C
Відносна вологість	не більше 93%, відсутність конденсату

Обґрунтування вибору перетворювача.

До переваг даного перетворювача насамперед слід віднести: низьку вартість, простоту експлуатації, малі габарити.

Так само даний перетворювач забезпечує ШІМ модуляцію. Тому вибираємо перетворювач EI-MINI-FP7. Надалі для зменшення вартості автоматизації виробництва та однотипності (стандартизації) встановлюваного обладнання використовуватимемо приводи серії ПЕОЗ-100 та перетворювачі серії EI-MINI.

4.2.3 Канал управління рівнем рідини у барботажній колоні.

Зі сформульованої задачі управління випливає, що для регулювання рівня рідини в барботажній колоні необхідно регулювати витрату технологічного розсолу шляхом зміни положення засувки.

Відповідно до регламенту технологічного процесу номінальною витрата розсолу на годину становить $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$.

Зробимо розрахунок діаметра трубопроводу та діаметра засувки для управління подачею розсолу.

Для забезпечення регулювання подачі розсолу в межах $0 - 1 \text{ м}^3/\text{год}$ розрахуємо необхідний діаметр трубопроводу та швидкість подачі розсолу:

- внутрішній діаметр трубопроводу d , м, визначаємо як:

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785 * v}},$$

де Q - витрата, $\text{м}^3/\text{год}$, v - швидкість потоку, м/с.

Так як $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год} = 2.83 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ а $v = 0,1 \text{ м/с}$

тоді: $d = \sqrt{\frac{2.83 \times 10^{-4}}{0.785 * 0.1}} = 0.06 \text{ м}$

Вибираємо засувку 33a921p DN100 з діаметром умовним проходу $DУ = 0,1 \text{ м}$, основні технічні характеристики якої приведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 - Основні технічні характеристики засувки 33a921p DN100

Найменування параметра	Показники
Умовний прохід $Dу$, мм	100
Умовний тиск $Pу$, кгс/см^2	6
Робоче середовище	Слабкі розчини кислот та лугів, двоокис титану, агресивні абразивні пульпи
Температура робочого середовища, $С^\circ$	до +110
Тип приєднання	фланцеве за ГОСТ 12815-80
Тип привода	електропривод

Відсоток діаметра проходу від максимального, при номінальному режимі роботи – 60%

Вибрані електричний привід та перетворювач.

Привід електричний однооборотний ПЕОЗ-100-0,6-03К.

Перетворювач EI-MINI-LP4.

4.2.4 Канал управління температурою в карбонізаційній колоні

Зі сформульованої задачі управління слідує, що для регулювання температури в карбонізаційній колоні, необхідно регулювати витрату пари шляхом зміни положення засувки.

Відповідно до регламенту технологічного процесу номінальною витрата пари на годину становить 1 м³/год.

Зробимо розрахунок діаметра трубопроводу та діаметра засувки для управління подачею пари.

Відповідно до параметрів технологічного процесу номінальна витрата пари на годину становить 1 м³/год. Для забезпечення регулювання подачі пари в межах 0 – 1,5 м³/год розрахуємо необхідний діаметр трубопроводу та швидкість подачі пари:

Внутрішній діаметр трубопроводу d , м, визначається як

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785 * v}}$$

де Q - витрата, м³/год, v - швидкість потоку, м/с; $Q = 1,5 \text{ м}^3/\text{год} = 4,17 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $v = 0,1 \text{ м/с}$,

$$\text{тоді } d = \sqrt{\frac{4.17 \times 10^{-4}}{0.785 * 0.1}} = 0.08 \text{ м.}$$

Вибираємо засувку 33a921p DN100 з діаметром проходу ДУ = 0,1 м.

Таблиця 4.12 – Основні технічні характеристики засувки 33a921p DN100

Найменування параметра	Показники
Умовний прохід Ду, мм	100
Умовний тиск Ру, кгс/см ²	6
Робоче середовище	Слабкі розчини кислот та лугів, двоокис титану, агресивні абразивні пульпи
Температура робочого середовища, С°	до +110
Тип приєднання	фланцеве за ГОСТ 12815-80
Тип привода	електропривод

Відсоток діаметра проходу від максимального, при номінальному режимі роботи – 67%

Вибрані електричний привід та перетворювач:

Привід електричний однооборотний ПЕОЗ-100-0,6-03К.

Перетворювач EI-MINI-LP4.

4.2.5 Канал управління температурою у печі кальцинації

Зі сформульованої задачі управління випливає, що для регулювання температури в печі кальцинації необхідно регулювати витрату природного газу шляхом зміни положення засувки.

Відповідно до регламенту технологічного процесу номінальною витрата природного газу на годину становить $1000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Зробимо розрахунок діаметра трубопроводу та діаметра засувки для управління подачею природного газу.

Для забезпечення регулювання подачі газу в межах $0 - 1200 \text{ м}^3/\text{год}$. розрахуємо необхідний діаметр трубопроводу та швидкість подачі газу:

Внутрішній діаметр трубопроводу d , м, визначається як

$$d = \sqrt{\frac{Q}{0.785 * v}}$$

де Q - витрата, $\text{м}^3/\text{год}$, v - швидкість потоку, м/с.

Так як $Q = 1200 \text{ м}^3/\text{год} = 0,33 \text{ м}^3/\text{с}$; $v = 0,6 \text{ м/с}$ то

$$\text{тоді: } d = \sqrt{\frac{0.033}{0.785 * 0.3}} = 0.14 \text{ м}$$

Вибираємо засувку 33a921p DN150 з діаметром проходу $DУ = 0,15 \text{ м}$.

Таблиця 4.13 – Основні технічні характеристики засувки 33a921p DN150

Найменування параметра	Показники
Умовний прохід Ду, мм	150
Умовний тиск Ру, кгс/см ²	6
Робоче середовище	Слабкі розчини кислот та лугів, двоокис титану, агресивні абразивні пульпи
Температура робочого середовища, С°	до +100
Тип приєднання	фланцеве за ГОСТ 12815-80
Тип привода	електропривод

Відсоток діаметра проходу від максимального при номінальному режимі роботи – 87%

Вибрані електричний привід та перетворювач:

Привід електричний однооборотний ПЕОЗ-100-1,5-03К.

Перетворювач EI-MINI-LP7.

З урахуванням розроблених локальних контурів і схем сигналізації побудована функціональна схема автоматизації процесу (див. Додаток А).

4.3 Середній рівень АСУ ТП

На середньому рівні знаходиться контролер який, в зв'язку з тим, що окремі ділянки виробництва віддалені один від одного, необхідний для їх зв'язку, забезпечення необхідної швидкодії системи та для зв'язку середнього та верхнього рівня АСУТП.

Структурна схему АСУТП наведена на рис. 4.5

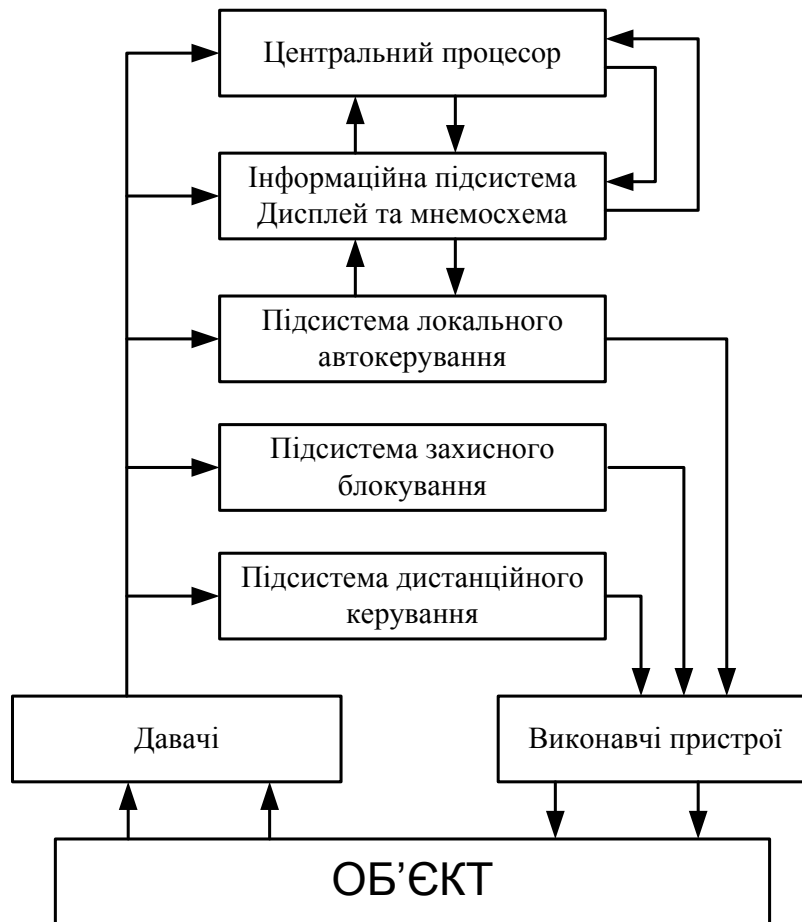


Рис. 4.5 - Структурна схема АСУ ТП

4.3.1 Вибір контролера

На протязі останніх років відзначається постійне зростання популярності PC-based автоматки, а також намітилась тенденція до витіснення класичних закритих PLC і пов'язаних з ними технологій з ринку АСУ ТП контролерами, що мають архітектуру персонального комп'ютера.

Дані останніх років підтверджують існування цієї тенденції. Випереджаюче зростання PC-based автоматки продовжується. Нові дослідження агентства VDC показали, що PC-based автоматка залишається найбільш швидко зростаючим сегментом ринку.

Також триває випереджальне зростання відкритих технологій передачі даних (насамперед Ethernet) порівняно з польовими шинами та мережами із закритими протоколами.

ARC Advisory Group передбачає подальше зростання Industrial Ethernet у наступні 5 років. Журнал Control називає перемогу Ethernet над такими шинами Foundation fieldbus, Profibus та Modbus однією з головних тенденцій наступних років. Сьогодні майже всі виробники польових шин випустили версії, що працюють під Ethernet.

Так як PC-based контролер і PC-комп'ютер (який знаходиться на верхньому рівні АСУ ТП) мають Ethernet адаптери, слід використовувати саме цю мережу для обміну даними між PC-based

контролером та автоматизованим робочим місцем (АРМ). В таблиці 4.14 наведені основні причини використання ПК замість PLC.

Таблиця 4.14 – Десять основних причин використання ПК замість PLC

1	Мережа передачі даних на верхній рівень АСУ
2	Просунуті алгоритми управління
3	Розширені можливості управління базою параметрів
4	Можливість підключення зовнішніх засобів відображення інформації
5	Можливість вбудовування алгоритмів користувача
6	Комплексне моделювання процесу
7	Дуже висока продуктивність процесора
8	Пам'ять ширша, ніж у PLC
9	Декілька протоколів зв'язку
10	Бездротовий доступ

Як контролер [12] вибираємо промисловий PC-сумісний комп'ютер **SIMATIC BOX PC** (виробник Siemens) із встановленою платою вводу/виводу, що працює під керуванням операційної системи MS DOS. А оскільки у виробничому процесі використовуються небезпечні, легкозаймисті речовини, необхідно передбачити резервування керуючого пристрою та встановити дублюючий промисловий комп'ютер.

4.3.2 Вибір плати вводу/виводу

Так як управління технологічним процесом буде здійснюватися з використанням SCADA системи, для зменшення матеріальних витрат на додаткові перетворювачі та спрощення написання та налагодження програмного забезпечення, слід використовувати плату вводу/виводу, сумісну з SCADA системами.

Прикладом такої плати є плата введення/виведення А-8111 (рис. 4.6). Зваживши на її низьку вартість, порівняно з аналогами, і великий набір функціональних можливостей, для зв'язку з нижнім рівнем АСУТП вибираємо плату вводу/виводу А-8111.



Рис. 4.6 - Плата вводу/виводу А-8111

Наведемо її основні характеристики (табл. 4.15). Багатофункціональний адаптер ISA має:

- 8 аналогових входів із загальним проводом, АЦП 12 біт, 30 кГц, 1 канал ЦАП, 16 дискретних входів, 16 дискретних виходів;
- число каналів аналогового введення (всього): 8;
- число каналів аналогового виводу: 1;
- число каналів дискретного введення (всього): 16;
- число каналів дискретного виводу (всього): 16.

Таблиця 4.15 – Основні технічні характеристики плати вводу/виводу А-8111.

Конструкція:	Адаптер ISA
Інтерфейс:	ISA
Аналоговий ввід	
Навантаження по входу:	35 В
АЦП: Тип: Розрядність: Режими запуску:	ADS774 12 біт Програмний
Підсилювач: Коефіцієнти підсилення: Установка коефіцієнта підсилення:	1, 2, 4, 8, 16 Програмна для всіх каналів
Режими передачі даних:	Програмний, По переривання, По каналу ПДП
Похибка:	0.02 %
Каналів аналогового виводу:	1
ЦАП: Кількість: Розрядність: Тип: Час встановлення:	1 12 біт AD7948 30 мкс
Вихід: здатність навантаження:	5 мА
Тактова частота: Програмне забезпечення:	2 МГц DOS утиліта для перевірки и калібрування, бібліотеки и драйвери під MS DOS, Widows 95/98/NT, Trace Mode
Ціна, грн	888.93

4.4 Верхній рівень АСУТП (АРМ)

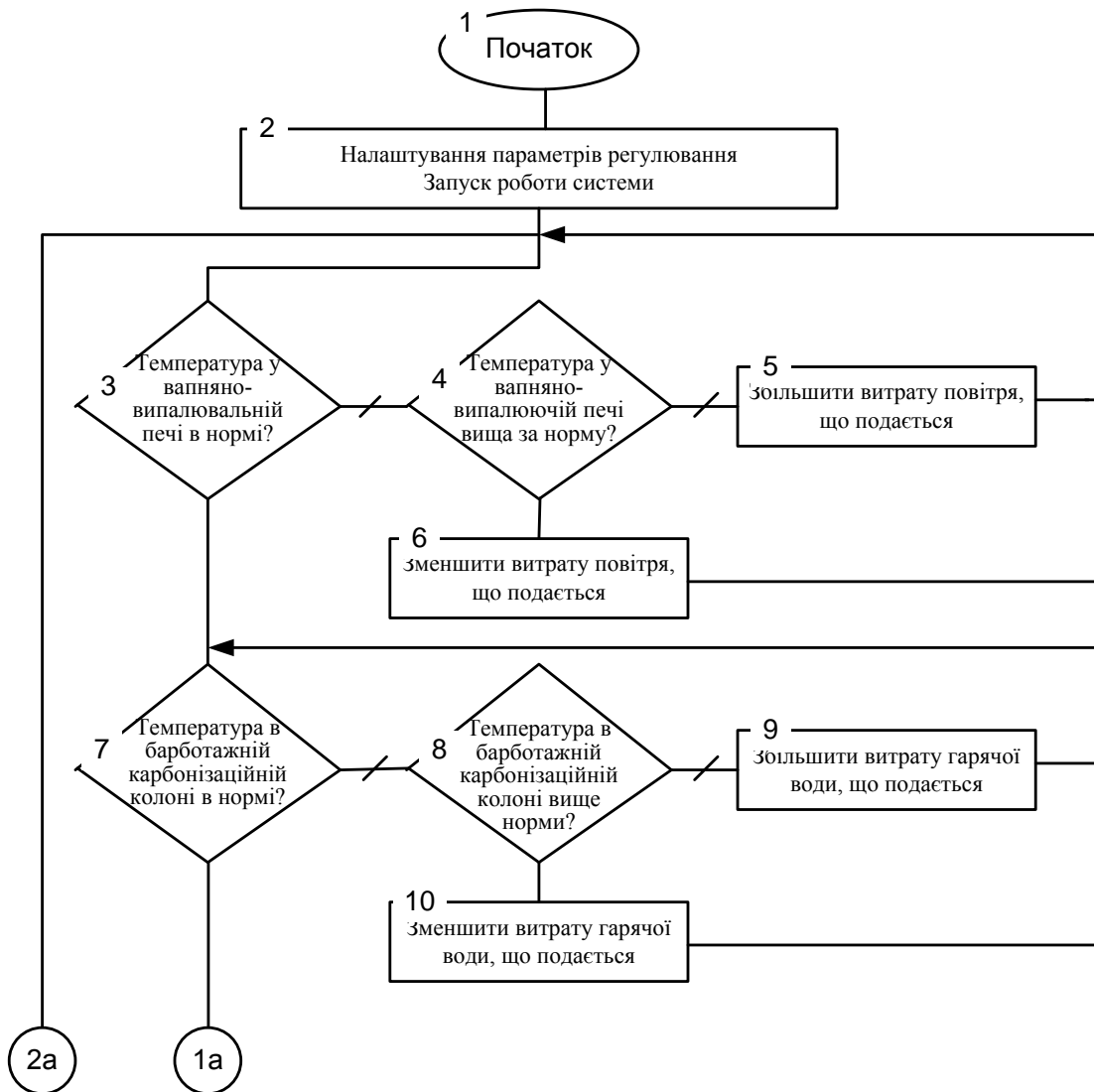
Автоматизоване робоче місце (АРМ) до складу якого входить IBM PC комп'ютер із встановленою операційною системою Windows XP, процесором Intel Pentium 4, ОЗП 512МВ та встановленим програмним комплексом TRACE MODE 6.

TRACE MODE 6 – це програмний комплекс, призначений для розробки та запуску в реальному часі розподілених автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП) та вирішення низки завдань управління підприємством (АСУП).

5 АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ

Система управління працює наступним чином: перед запуском система здійснює встановлення параметрів регулювання; потім система розпочинає цикл контролю параметрів технологічного процесу. Якщо будь-який параметр технологічного процесу виходить за задані межі, системи видає керуючий вплив і повертає параметр технологічного процесу в задані межі, а у разі аварійної ситуації припиняє подачу хімічних та легкозаймистих речовин та зупиняє технологічний процес.

Алгоритм роботи системи представлений на рис. 4.1.



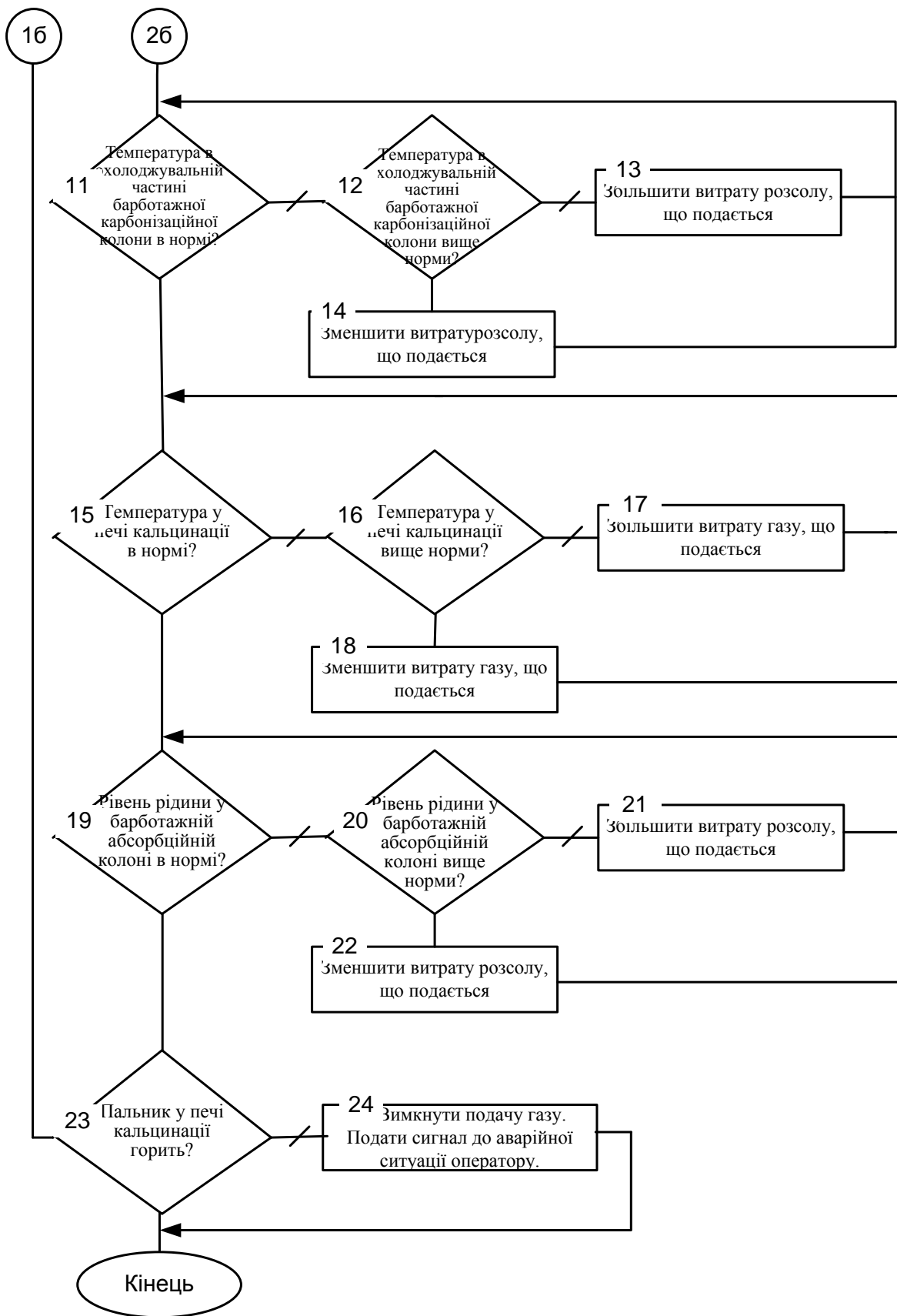


Рис. 5.1 - Алгоритм роботи системи

6 Розрахункова частина

6.1 Конструкція та принцип дії содової печі

Основним агрегатом для кальцинації соди є содова піч, що обертається. Конструкція такої печі продуктивністю 215 т/добу приведена на рис. 6.1 [8].

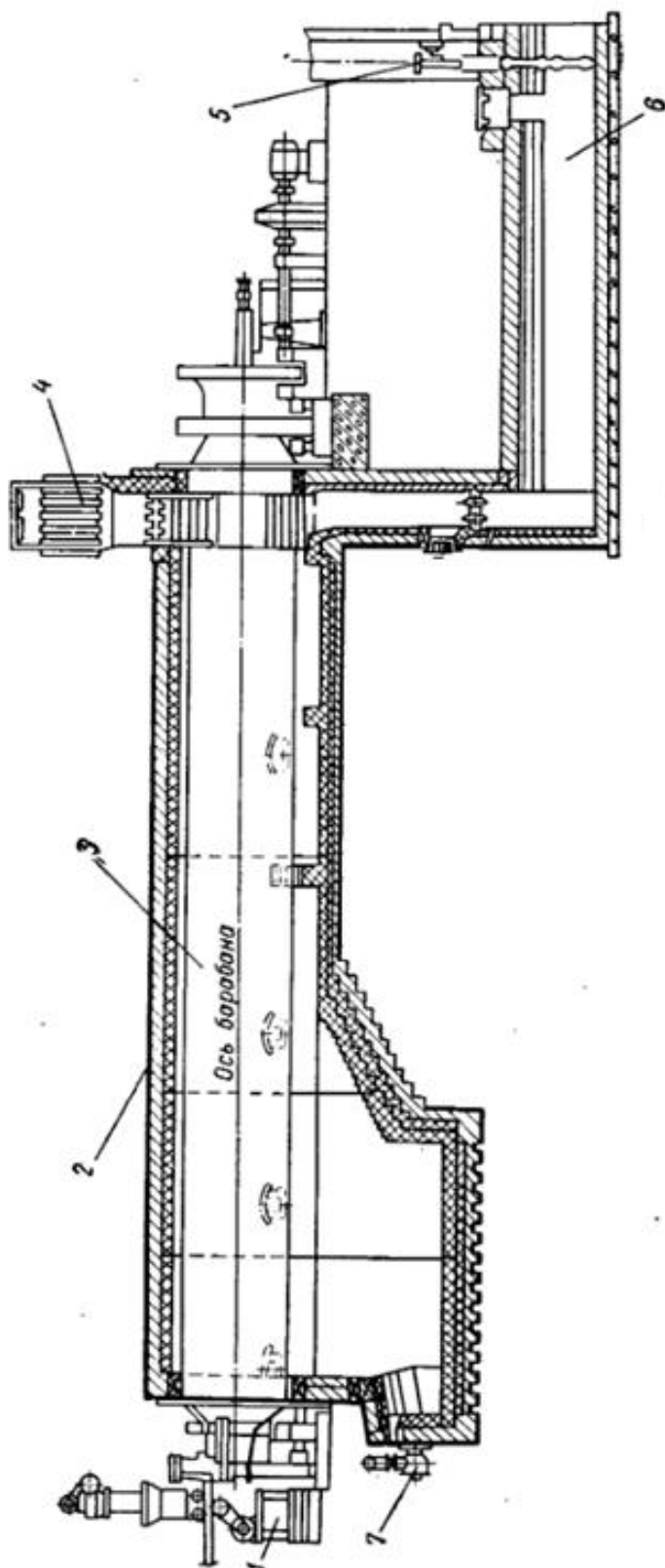


Рис. 6.1 - Содова піч в подовжньому розрізі
1 - механізм завантаження; 2 - футерування; 3 - барабан; 4 - рекуператор; 5 - шліфер; 6 - боров; 7 - пальник

Реакційною камерою є барабан, вироблений з листової сталі товщиною 32 мм, барабан має діаметр 2.8 м і довжину циліндричної частини, що дорівнює 24.5 м. Поверхня барабана, що обігривається – 205 м². До обох кінців барабану приварені конуси довжиною 1.27 м: передньою вважається частина барабану зі сторони завантаження продукту. До вузьких горловин конусів прикріплюються спеціальні чавунні кільця, до яких прикріплюються бандажі діаметром 2.8 м та виготовлені зі сталевого лиття з профілем шарової форми. В середині барабану встановлений ланцюг, який призначений для очищення внутрішньої поверхні стінок від налиплих соди та бікарбонату натрію. Цей ланцюг при обертанні барабану розбиває грудки, що виникають, і сприяє їх переміщенню вздовж барабану з одночасним їх переміщенням.

Барабан содової печі спирається бандажем на дві пари опорних роликів, які мають діаметр 1100 мм і фасонний профіль, що відповідає профілю бандажу. Така конструкція роликів дозволяє переміщуватись вподовж осей разом з рухливим, переднім кінцем барабану содової печі. Осі передніх роликів довші, чим осі задніх, що дозволяє барабану вільно переміщуватись в сторону завантаження.

Обертання барабана виконується механізмом приводу, який складається з електродвигуна, редуктора та малої шестерні, що знаходиться в зачепленні з великою вінцевою шестернею.

Завантаження барабана печі виконується завантажувачем бікарбонату, який має незалежний привід, що приводить в рух механізм закидання сирого і малорухливого бікарбонату натрію в піч.

Пристрій для вивантаження содової печі складається з циліндричного сита і шнека, який приводиться в рух привідною зірочкою від основного привідного механізму. При обертанні барабана ківші шнека, які знаходяться в нижньому положенні, зачерпують соду; коли вони досягають верхнього положення, сода вивалюється з них через дірчатий циліндр в середину корпусу шнека вивантаження. Нахил і обертання барабану содової печі забезпечує переміщення вмісту від завантажувача до пристрою для вивантаження, а величина об'єму вивантаження в одиницю часу визначається швидкістю обертання.

Нагрів бікарбонату натрію виконується за рахунок передавання тепла через корпус барабану димовими газами, отриманими від спалювання природного газу або мазуту. Барабан, що обертається, розміщується камері, що нагрівається. В передній частині печі під барабаном розміщена відкрита камера горіння палива. На торці камери нагріву розміщуються пристрої для приготування паливо-повітряної суміші для спалювання.

Об'єм та конфігурація камери для згоряння розраховані для спалювання 800 кг мазуту або 900 м³ природного газу в годину.

В передню частину барабана печі завантажують сирий бікарбонат натрію і тут особливо необхідний інтенсивний підвід тепла. Далі камера нагріву поступово переходить в кільцевий газохід, всередині якого і розміщується барабан. На цій ділянці тепло від газів передається

барабану в основному за рахунок конвекції, чому сприяє велика швидкість газів, викликана звуженням газоходу і завихреннями потоку при обтіканні спеціальних перемичок.

Температура газів на виході з барабану приблизно дорівнює $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а його об'єм складає $14\ 000\ \text{м}^3/\text{год}$. Гази, що створюються при згорянні, проходять через трубчатий рекуператор і підігрівають повітря, що поступає на горіння палива до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрідження в камері горіння $20\ \text{Па}$, а за барабаном $50\ \text{Па}$.

Димові газы відводяться з печі через горизонтальні борова в димову трубу і викидуються в атмосферу.

Отримання з барабана печі газу з високою концентрацією CO_2 потребує зведення до мінімуму підсосу повітря в нього, що досягається шляхом герметизації вузла завантаження та вивантаження спеціальними пристроями для герметизації.

6.2 Особливості режиму кальцинації в содовій печі

Нормальний процес кальцинації протікає при такому складі бікарбонату натрію (в %):

NaHCO_3	82 – 84
NaCl	0.2 – 0.4
H_2O	13 – 15.

Вихід карбонату натрію в цьому випадку складає $52 - 54\%$, при чому продукт на виході повинен мати кальцинованої соди Na_2CO_3 не менше 95% .

Якість отримувано кальцинованої соди в значній ступені залежить від температури, при якій її вивантажують з печі. Ця температура повинна знаходитись в межах $140 - 190\text{ }^{\circ}\text{C}$. При вивантаженні соди з печі при більш низькій температурі вологість її буде вище норми, але сода отримується більш пушистою, з меншою об'ємною масою. Вивантаження при більш високій температурі пов'язане зі збільшенням витрати палива, а при температурі вище $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ отримується пережарена сода, яку важко вивантажувати з печі. Температура соди на виході з печі залежить від кількості завантаженого в неї бікарбонату натрію, від його вологості і від режиму роботи пальника.

Також дуже важливо підтримувати постійний надлишковий тиск газів в печі, так як наявність вакууму неминуче супроводжується підсосом повітря і, відповідно, зменшенням концентрації CO_2 , а підвищення тиску – до втрати CO_2 .

Склад і кількість газів, що виділяються в процесі кальцинації бікарбонату натрію, залежить від складу останнього і досяжного ступеню кальцинації в печі, а також від кількості повітря, що засмоктується з зовні. Тому необхідно, щоб розкладання бікарбонату натрію проходило якомога повніше, так як при недостатній кальцинації вміст CO_2 в газах помітно зменшується.

Досвід експлуатації показав, що в передній частині содової печі проходить поступовий підігрів сирого бікарбонату натрію і випаровування з нього вологи. Основна маса бікарбонату натрію розкладається в другій половині содової печі, де цей процес і завершується.

Одним з найбільш важливих показників режиму роботи содової печі є величина подовження барабана, яке залежить від температури барабана, яка в свою чергу пов'язана з нехваткою чи надлишком бікарбонату натрію в содовій печі. Тому на содовій печі встановлюється автоматичний вказівник, що контролює величину подовження барабану. Максимально допустиме подовження барабана складає 80 мм, що відповідає середній температурі барабана 270 °С.

6.4 Розроблення математичної моделі процесу кальцинації аналітичним методом

6.4.1 Обґрунтування та прийняття припущень, що спрощують, та ідеалізація режимів

Як можна побачити з попереднього аналізу, технологічний процес кальцинації бікарбонату натрію є достатньо складним насамперед через наявність низки реакцій, що протікають паралельно основній, а також в зв'язку з наявністю двофазних («тверде, сипуче» - «газ») потоків та розподілу параметрів (температури, концентрації) по координатах.

Разом з тим, базуючись на аналізі особливостей механізму процесу кальцинації (див. п.6.2) та маючи на увазі цілі побудови математичної моделі, які складаються в створенні системи управління цим процесом, нами були прийняті наступні припущення та ідеалізації, що спрощують процес розробки адекватної моделі, а саме:

1. Фізико-хімічні властивості матеріалів, що приймають участь в процесі, є величинами константними і від технологічного режиму ведення процесу не залежать;
2. Процес кальцинації визначається лише реакцією термічного розкладання бікарбонату натрію (1-2);
3. Час перебування бікарбонату натрію в барабані содової печі більше необхідного для повного завершення реакції (1-2), що дозволяє не враховувати залежність швидкості реакції від температури. Це ствердження вимагає окремого пояснення. Так в [8] наводяться залежності швидкості розкладання NaHCO_3 та випаровування вологи від температури (див. рис. 6.2), які показують, що при робочих температурах процес

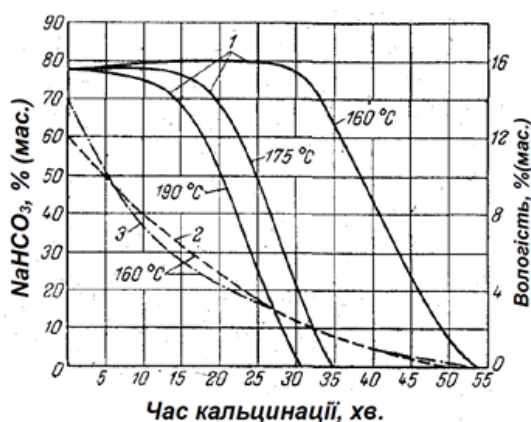


Рис. 6.2 - Динаміка розкладання NaHCO_3 і випаровування вологи при різних температурах кальцинації

кальцинації повинен завершитись за час близько однієї години, а час перебування сирого

бікарбонату натрію в зоні прожарювання досягає двох годин [5], тобто можна вважати, що в содовій печі процес кальцинації закінчується гарантовано.

4. Відносно невисока температура проведення процесу кальцинації дозволяє вважати, що нагрівання матеріалу в барабані виконується виключно теплопровідністю;
5. Гідродинамічний режим як в барабані, так і в камері нагріву содової печі приймаємо таким, що відповідає режимові ідеального перемішування.
6. В процесі кальцинації об'єм завантаженої маси в барабані не змінюється.
7. Операції завантаження бікарбонату натрію та вивантаження соди механічно синхронізовані, так, що рівень маси в барабані залежить лише від витрати сирого бікарбонату натрію на вході і швидкості обертання барабана.

6.4.2 Формування рівнянь математичної моделі

Аналітичний метод побудови математичної моделі передбачає детальне вивчення та глибоке розуміння фізико-хімічних закономірностей, що протікають в об'єкті моделювання [15]. В результаті до складу математичного опису зазвичай включаються залежності, що пов'язують між собою змінні та параметри об'єкта, який моделюється, і які складають систему рівнянь математичної моделі. В першу чергу використовуються залежності, що відображають фундаментальні закони збереження речовини та енергії (матеріальний та тепловий баланси), а також інші співвідношення, що описують фізичні чи хімічні явища в об'єкті моделювання. З цієї причини система рівнянь математичного опису в своєму складі завжди має рівняння матеріального балансу (загального або за конкретною речовиною), а рівняння теплового балансу використовуються лише в тому випадку, коли теплові явища в об'єкті відіграють суттєву роль.

Виконаний аналіз процесу кальцинації в содовій печі показує, що теплові явища тут відіграють провідну роль, а значить в складі математичної моделі повинні бути присутніми рівняння як матеріального, так і теплового балансу. Разом з тим аналіз (див. п.6.4.1) показує, що для запису матеріального балансу можна обмежитись використанням рівнянь статки.

6.4.2.1 Тепловий баланс об'єкта управління відносно бікарбонату натрію

Складемо тепловий баланс об'єкта управління – содової печі, схема матеріальних та теплових потоків якої з урахуванням прийнятих вище ідеалізацій та спрощень представлена на рис. 6.3.

Рівняння теплового балансу відносно матеріалу, що кальцинується (бікарбонату натрію)

$$\Delta Q_{bk} = Q_{nag} + Q_2 - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6, \quad (6-1)$$

де ΔQ_{bk} – швидкість накопичення (зменшення чи збільшення) ентальпії матеріалу (бікарбонату натрію, соди та отриманих при прожарюванні бікарбонату натрію вуглекислого газу та водяної пари) в межах барабану, $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$, яка може бути виражена через швидкість зміни усередненої температури всередині барабану T_{bk} в вигляді

$$\Delta Q_{bk} = (G_{bk}^t c_{p,bk}^t + G_{bk}^g c_{p,bk}^g) \frac{dT_{bk}}{dt}, \quad (6-2)$$

де G_{bk}^t, G_{bk}^g – маса твердої (суміш бікарбонату натрію та соди) та газової (суміш вуглекислого газу та водяної пари) фази відповідно, що одночасно знаходиться в барабані, кг. Якщо позначити робочий об'єм барабана $V_{bb} = \pi R^2 L$, де $R=1,4\text{м}$ – радіус барабана печі; $L=23,5\text{м}$ – довжина

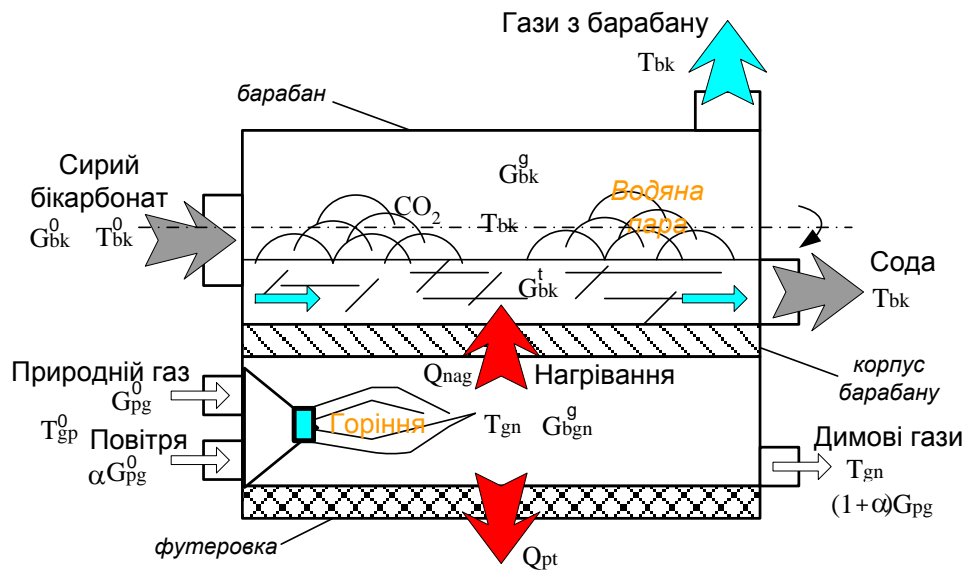


Рис. 6.3 - Схема матеріальних та теплових потоків процесу кальцинації

циліндричної частини барабана ($V_{bb} = 145\text{м}^3$), а ступінь заповнення об'єму барабану твердою фазою як δ (безрозмірний аналог середнього рівня заповнення барабану), то маса твердої фази може бути визначена як $G_{bk}^t = \delta V_{bb} \rho_{bk}$, де $\rho_{bk} = 2260\text{кг/м}^3$ – питома щільність твердої фази; маса газової фази відповідно $G_{bk}^g = (1 - \delta) V_{bb} \rho_{gg}$, $\rho_{gg} = 1,28\text{кг/м}^3$ – питома щільність газової фази, а рівняння (6-2) можна переписати в вигляді

$$\Delta Q_{bk} = V_{bb} (\delta \rho_{bk} c_{p_{bk}}^t + (1 - \delta) \rho_{gg} c_{p_{bk}}^g) \frac{dT_{bk}}{dt}; \quad (6-2a)$$

$c_{p_{bk}}^t$ та $c_{p_{bk}}^g$ – питома ізобарна теплоємність відповідно твердої та газової фази. Маючи на увазі, що теплоємність сирого бікарбонату на вході в піч дорівнює $c_{p_{bk}} = 1,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ і теплоємність соди - $c_{p_{sd}} = 1,13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, а в границях барабана содової печі зберігається приблизно співвідношення цих речовин як 1:1, то питому ізобарну теплоємність твердої фази можна прийняти як середню, а саме $c_{p_{bk}}^t = \frac{1,84+1,13}{2} = 1,485 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$. Аналогічно і в газовій фазі маси вуглекислого газу та водяної пари приблизно рівні і тому, якщо ізобарна теплоємність вуглекислого газу дорівнює $c_{p_{wg}} = 0,83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, а водяної пари - $c_{p_{wp}} = 2,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, то питома ізобарна теплоємність газової фази обчислюється як $c_{p_{bk}}^g = \frac{0,83+2,2}{2} = 1,51 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$;

Q_{nag} – кількість теплоти, що надходить в барабан содової печі для підігріву через стінку корпусу за виразом для теплопередачі в вигляді формули Ньютона

$$Q_{nag} = k_{st} \cdot F_{st} \cdot (T_{gn} - T_{bk}), \quad (6-3)$$

де k_{st} – коефіцієнт теплопередачі через стінку, $\text{кДж}/(\text{кг}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{год})$; $F_{st} = 205\text{м}^2$ – площа поверхні теплопередачі; T_{gn} - усереднена температура продуктів згорання в камері підігріву барабану, $^{\circ}\text{C}$;

Q_2 - кількість теплоти, що надходить в барабан содової печі з сирим бікарбонатом натрію визначається виразом

$$Q_2 = G_{bk}^0 \cdot c_{p_bks} \cdot T_{bk}^0 \quad (6-4)$$

де G_{bk}^0 – масова витрата сирого бікарбонату натрію, що поступає в барабан содової печі, $\frac{\text{кг}}{\text{год}}$; $c_{p_bks} = 2,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – усереднена ізобарна теплоємність сирого карбонату натрію визначається (при умові, що кількість вологи в сирому бікарбонаті натрію дорівнює приблизно 15%, а питома ізобарна теплоємність води $c_{p_wd} = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$); T_{bk}^0 – температура сирого карбонату натрію, $^{\circ}\text{C}$;

Q_3 - кількість теплоти, що покидає барабан содової печі з кальцинованою содою визначається виразом

$$Q_3 = \gamma_1 \cdot 0,85 \cdot G_{bk}^0 \cdot c_{p_sd} \cdot T_{bk}, \quad (6-5)$$

де $\gamma_1 = \frac{106}{168} = 0,63$ – доля отримуваної кальцинованої соди в відношенні до масової витрати сухого бікарбонату натрію (168 і 106 – молекулярні маси бікарбонату натрію і соди відповідно) з ізобарною теплоємністю $c_{p_sd} = 1,13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ та усередненою температурою T_{bk} ; 0,85 – доля сухого бікарбонату натрію в сирому на вході в барабан; G_{bk}^0 – витрата сирого бікарбонату натрію на вході в барабан;

Q_4 - кількість теплоти, що покидає барабан содової печі з газами реакції визначається виразом

$$Q_4 = [0,15 + (1 - \gamma_1)0,85] \cdot G_{bk}^0 \cdot c_{p_bk}^g \cdot T_{bk}, \quad (6-6)$$

де $0,15 + (1 - \gamma_1)0,85$ – доля газової складової в перерахунку на сирій бікарбонат натрію, де 0,15 та 0,85 долі води та сухого бікарбонату натрію в сирому, відповідно;

Q_5 - кількість теплоти, що витрачається в барабані содової печі на проведення процесу кальцинації, пропорційне масі виникаючої кальцинованої соди $\gamma_1 \cdot G_{bk}^0$ та питомій теплоті дисоціації, яка за літературними джерелами дорівнює $i_{sd} = 950 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, а саме

$$Q_5 = \gamma_1 \cdot 0,85 \cdot G_{bk}^0 \cdot i_{sd}; \quad (6-7)$$

Q_6 - кількість теплоти, що витрачається в барабані содової печі на випаровування гігроскопічної вологи з сирого бікарбонату натрію, пропорційне масі вологи, що поступає в барабан содової печі в складі сирого бікарбонату натрію, і питомій теплоті випарування, що дорівнює $i_{wd} = 2300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, а саме

$$Q_6 = 0,15 \cdot G_{bk}^0 \cdot i_{wd}. \quad (6-8)$$

В результаті рівняння теплового балансу (6-1) набуде вигляду

$$\frac{dT_{bk}}{dt} V_{bb} (\delta \rho_{bk} c_{bk}^t + (1 - \delta) \rho_{gg} c_{bk}^g) = k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) + G_{bk}^0 c_{p_bks} T_{bk}^0 -$$

$$-\gamma_1 0,85 G_{bk}^0 c_{p_sd} T_{bk} - [0,15 + (1 - \gamma_1) 0,85] G_{bk}^0 c_{p_bk}^g T_{bk} - \gamma_1 G_{bk}^0 i_{sd} - 0,15 G_{bk}^0 i_{wd} \quad (6-9)$$

При початкових умовах $T_{bk}(0) = T_{bk0}$.

6.4.2.2 Визначення залежності ступеню заповнення об'єму барабану твердою фазою від режиму функціонування содової печі

При математичному моделюванні роботи содової печі, що обертається, однією з проблем, що вимагає свого вирішення, є формування залежностей, що дозволяють ув'язати величину завантаження печі матеріалом G_{bk}^0 (т/год) при відомому куті нахилу φ_p та заданій швидкості обертання печі n (об/хв) з параметрами h_z і β_z шару, зайнятого матеріалом (див. рис. 6.4). Для цього потрібний математичний опис переміщення матеріалу в робочому просторі печі.

Вивід формул для розрахунку параметрів h_z і β_z шару, зайнятого матеріалом, для трубчатої печі, що обертається, наведено в роботі [5].

Ступень заповнення об'єму барабану матеріалом визначається

(враховуючи скорочення в чисельнику і знаменнику довжини барабану) як відношення площі сегмента до площі поперечного розрізу барабану (циліндра)

$$\delta = \frac{\frac{1}{2} R_p^2 (\frac{\pi \beta_z}{180} - \sin(\beta_z))}{2\pi R_p^2}, \quad (6-10)$$

де R_p – радіус барабану печі, м; β_z - величина центрального кута сегменту, що займає матеріал.

Величина центрального кута сегменту, що займає матеріал

$$\beta_z = 2 \arccos(1 - \frac{h_z}{R_p}), \quad (6-11)$$

де h_z - висота сегмента перерізу циліндру барабану, зайнятого матеріалом

$$h_z = \frac{1,6 G_{bk}^0}{R_p^2 \sin(\varphi_p) \rho_{bk} \omega_p}, \quad (6-12)$$

де ρ_{bk} – щільність сирого бікарбонату на вході до печі, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\omega_p = \pi n / 30$ – кутова швидкість обертання печі.

6.4.2.3 Тепловий баланс об'єкта управління відносно пічних газів

Рівняння теплового балансу відносно пічних газів для нагріву барабану содової печі (див. рис. 6.3)

$$\Delta Q_{pg} = -Q_{nag} + Q_7 + Q_8 + Q_9 - Q_{10} - Q_{pt}, \quad (6-13)$$

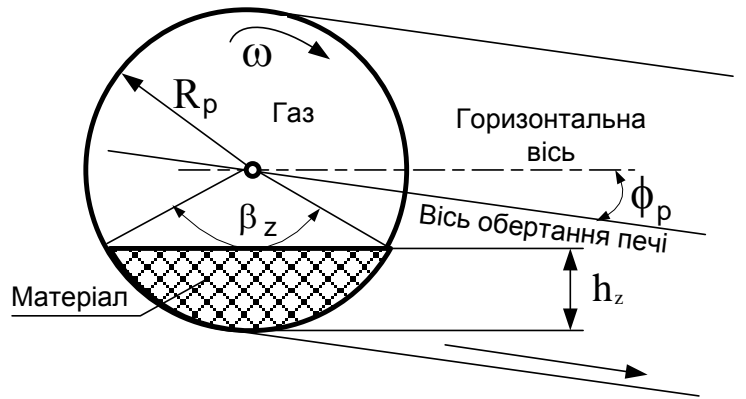


Рис. 6.4 - Схема руху матеріалу в содовій печі

де ΔQ_{pg} – швидкість накопичення (зменшення чи збільшення) ентальпії в межах камери підігріву, $\frac{\text{кДж}}{\text{год}}$, яка може бути виражена через швидкість зміни усередненої температури в камері T_{gn} в вигляді

$$\Delta Q_{gn} = G_{gn}^g c_{p_gn} \frac{dT_{gn}}{dt}, \quad (6-14)$$

де $G_{gn}^g = V_{gn} \rho_{gn}$ – маса димових газів в камері згорання, кг; $c_{p_gn} = 1,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ – питома теплоємність димових газів (при умові, що склад димових газів визначається таким: CO_2 – 9%, H_2O – 18%, N_2 – 73%); $\rho_{gn} = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – щільність димових газів;

Q_{nag} – кількість теплоти, що віддається в барабан содової печі для підігріву з виразу (6-3);

Q_7 – кількість теплоти, що поступає в камеру згорання з природнім газом з початковою температурою T_{gp}^0 визначається як

$$Q_7 = G_{pg}^0 \cdot c_{p_gn} \cdot T_{gp}^0, \quad (6-15)$$

де G_{pg}^0 – масова витрата природного газу на підігрів барабану содової печі, $\frac{\text{кг}}{\text{год}}$; $c_{p_gp} = 2,17 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ – питома теплоємність природнього газу, що поступає на спалювання (при умові, що природній газ в основному складається з метану);

Q_8 – кількість теплоти, що поступає в камеру згорання з повітрям з початковою температурою T_{gp}^0 та коефіцієнтом співвідношення до одної частини природного газу $\alpha = 9,5$ [x1] визначається як

$$Q_8 = \alpha \cdot G_{pg}^0 \cdot c_{p_pw} \cdot T_{gp}^0, \quad (5-16)$$

де $c_{p_pw} = 1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ – питома теплоємність повітря;

Q_9 – кількість теплоти від згорання природного газу визначається з виразу

$$Q_9 = G_{pg}^0 \cdot q_{pg}, \quad (6-17)$$

де $q_{pg} = 33500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – середня теплота згорання природного газу;

Q_{10} – кількість теплоти, що покидає камеру згорання з димовими газами з температурою T_{bgn} визначається з виразу

$$Q_{10} = (\alpha + 1) \cdot G_{pg}^0 \cdot c_{p_gn} \cdot T_{gn}, \quad (6-18)$$

де $(\alpha + 1)G_{pg}^0$ – сумарна масова витрата димових газів;

$Q_{pt} = 0,1 \cdot Q_9 = 0,1G_{pg}^0 \cdot q_{pg}$ – кількість теплоти, що втрачається через футеровку содової печі (приймається приблизно рівною 10% від загальної кількості енергії від згорання палива.

В результаті рівняння теплового балансу (6-13) набуде вигляду

$$V_{gn} \rho_{gn} c_{p_gn} \frac{dT_{gn}}{dt} = G_{pg}^0 q_{pg} + G_{pg}^0 c_{p_gn} T_{gp}^0 + \alpha G_{pg}^0 c_{p_pw} T_{gp}^0 - \\ - k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) - (\alpha + 1) G_{pg}^0 c_{p_gn} T_{gn} - 0,1 G_{pg}^0 q_{pg}. \quad (6-19)$$

Після деяких перетворень отримаємо

$$V_{gn}\rho_{gn}c_{p_gn}\frac{dT_{gn}}{dt} = 0.9G_{pg}^0q_{pg} + G_{pg}^0T_{gp}^0(c_{p_gn} + \alpha c_{p_pw}) - k_{st}F_{st}(T_{gn}-T_{bk}) - (\alpha + 1)G_{pg}^0c_{p_gn}T_{gn} \quad (6-20)$$

При початкових умовах $T_{gn}(0) = T_{gn0}$.

6.4.2.4 Складання математичної моделі об'єкта та її аналіз

Як відомо [15] створення математичної моделі - це одержання сукупності математичних співвідношень, які описують поведінку і властивості об'єкта моделювання. Формально математична модель являє собою сукупність залежностей між вхідними і вихідними змінними, що відображають фізичну сутність процесів, що відбуваються в об'єкті з тією чи іншою точністю.

Для отримання математичної моделі содової печі формально зведемо отримані вище вирази (6-9) та (6-20) для визначення теплових та матеріальних балансів в систему двох диференціальних рівнянь першого порядку в вигляді

$$\frac{dT_{bk}}{dt}V_{bb}(\delta\rho_{bk}c_{p_bk}^t + (1-\delta)\rho_{gg}c_{p_bk}^g) = k_{st}F_{st}(T_{gn}-T_{bk}) + G_{bk}^0c_{p_bks}T_{bk}^0 - \gamma_1 0.85G_{bk}^0c_{p_sd}T_{bk} - [0.15 + (1-\gamma_1)0.85]G_{bk}^0c_{p_bk}^gT_{bk} - \gamma_1 G_{bk}^0i_{sd} - 0.15G_{bk}^0i_{wd}, \quad (6-21a)$$

$$V_{gn}\rho_{gn}c_{p_gn}\frac{dT_{gn}}{dt} = 0.9G_{pg}^0q_{pg} + G_{pg}^0T_{gp}^0(c_{p_gn} + \alpha c_{p_pw}) - k_{st}F_{st}(T_{gn}-T_{bk}) - (\alpha + 1)G_{pg}^0c_{p_gn}T_{gn}, \quad (6-21б)$$

при початкових умовах: $T_{bk}(0) = T_{bk0}$, $T_{gn}(0) = T_{gn0}$, та рівнянь (6-10)..(6-12) для визначення ступеню заповнення об'єму барабану твердою фазою від режиму функціонування содової печі

$$\delta = \frac{\frac{1}{2}R_p^2(\frac{\pi\beta_z}{180} - \sin(\beta_z))}{2\pi R_p^2}, \quad (6-21в)$$

$$\beta_z = 2\arccos(1 - \frac{h_z}{R_p}), \quad (6-21г)$$

$$h_z = \frac{1.6G_{bk}^0}{R_p^2\sin(\varphi_p)\rho_{bk}\omega_p}. \quad (6-21д)$$

Аналіз розробленої математичної моделі (6-21а) – (6-21д) показав, що динамічні характеристики процесів, що описуються диференційними рівняннями (6-21а) та (6-21б) суттєво

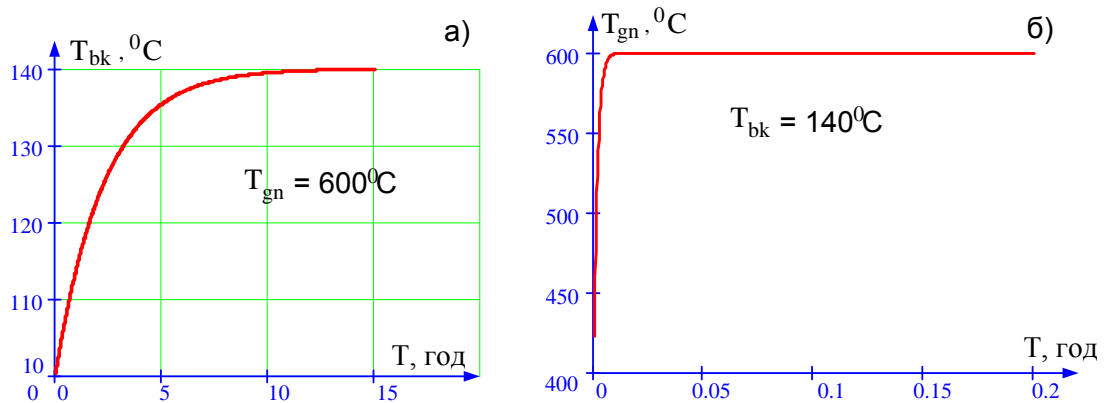


Рис. 6.5 - Динамічні характеристики теплових процесів:
а) температура в барабані содової печі; б) температура в камері згоряння

різняються. Розв'язок рівняння (6-21а) відносно змінної T_{bk} при фіксації змінної T_{gn} наведено на

рис. 6.5а, а розв'язання рівняння (6-21б) відносно змінної T_{gn} при фіксації змінної T_{bk} наведено на рис. 6.5б. Порівняння графіків показує (подібний підхід впливає на форму кривих, але в цілому дає вірне уявлення про інерційні властивості), що інерційні властивості розглянутих процесів відрізняються на декілька порядків. Це дозволяє, маючи на увазі значну інерційність теплових процесів в барабані содової печі в порівнянні з інерційністю теплових процесів в камері згоряння, знехтувати інерційністю останніх, що, безумовно, спрощує математичну модель.

В результаті математична модель процесу кальцинації в содовій печі набуде такого вигляду

$$\frac{dT_{bk}}{dt} V_{bb} (\delta \cdot \rho_{bk} c_{bk}^t + (1 - \delta) \rho_{gg} c_{bk}^g) = k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) + G_{bk}^0 c_{p_bks} T_{bk}^0 - \gamma_1 0,85 G_{bk}^0 c_{p_sd} T_{bk} - [0,15 + (1 - \gamma_1) 0,85] G_{bk}^0 c_{p_bk}^g T_{bk} - \gamma_1 G_{bk}^0 i_{sd} - 0,15 G_{bk}^0 i_{wd}, \quad (6-22a)$$

$$0,9 G_{pg}^0 q_{pg} + G_{pg}^0 T_{gp}^0 (c_{p_gn} + \alpha c_{p_pw}) - k_{st} F_{st} (T_{gn} - T_{bk}) - (\alpha + 1) G_{pg}^0 c_{p_gn} T_{gn} = 0, \quad (6-22б)$$

$$\delta = \frac{\frac{1}{2} R_p^2 \left(\frac{\pi \beta_z}{180} - \sin(\beta_z) \right)}{2\pi R_p^2}, \quad (6-22в)$$

$$\beta_z = 2 \arccos \left(1 - \frac{h_z}{R_p} \right), \quad (6-22г)$$

$$h_z = \frac{1,6 G_{bk}^0}{R_p^2 \sin(\varphi_p) \rho_{bk} \omega_p} \quad (6-22д)$$

при початкових умовах: $T_{bk}(0) = T_{bk0}$.

Для отриманої математичної моделі (6-22а) – (6-22д) було виконано математичне моделювання в середовищі математичного пакета **MathCad** з використанням тестових вихідних даних. Результати моделювання представлені на рис. 6.6.

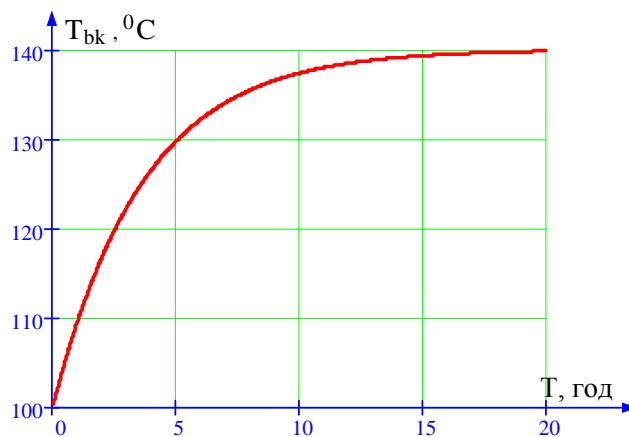


Рис. 6.6 - Результат математичного моделювання содової печі при продуктивності по бікарбонату натрію 17т/год

Можна відмітити, що отримана математична модель нелінійною з значним числом параметрів, більшість з яких можуть бути визначені з необхідною для практики точністю за довідковими та літературними джерелами. Однак для визначення таких параметрів як коефіцієнт теплопередачі через стінку - k_{st} та добуток параметрів $a1 = \rho_{bk} c_{p_bk}^t$ – усереднене значення добутку щільності на питому теплоємність продукту в содовій печі необхідно виконати ідентифікацію цих параметрів спираючись на дані експериментального визначення динаміки розігріву содової печі.

6.4.3 Ідентифікація параметрів математичної моделі содової печі

Після підстановки значень відомих параметрів математична модель (6-22а – 6-22д) набуде виду

$$\frac{dT_{bk}}{dt} V_{bb}(\delta \cdot a1 + (1 - \delta)280) = k_{st}205(T_{gn} - T_{bk}) + 2.2G_{bk}^0 T_{bk}^0 - 1.3G_{bk}^0 T_{bk} - 943G_{bk}^0, \quad (6-23a)$$

$$T_{gn}(205 \cdot k_{st} + 22.78G_{pg}^0) = 205 \cdot k_{st} T_{bk} + 301500G_{pg}^0 + 11.67G_{pg}^0 T_{gp}^0, \quad (6-23б)$$

$$\delta = 0.16\beta_z - 0.16 \sin(\beta_z), \quad (6-23в)$$

$$\beta_z = 2 \arccos\left(1 - \frac{h_z}{1.4}\right), \quad (6-23г)$$

$$h_z = 0.57 \cdot 10^{-4} G_{bk}^0 \quad (6-23д)$$

при початкових умовах: $T_{bk}(0) = T_{bk0}$, де $a1$ та k_{st} – невідомі параметри моделі.

На базі рівнянь моделі (6-23а – 6-23д) була розроблена імітаційна модель (рис. 6.7) в

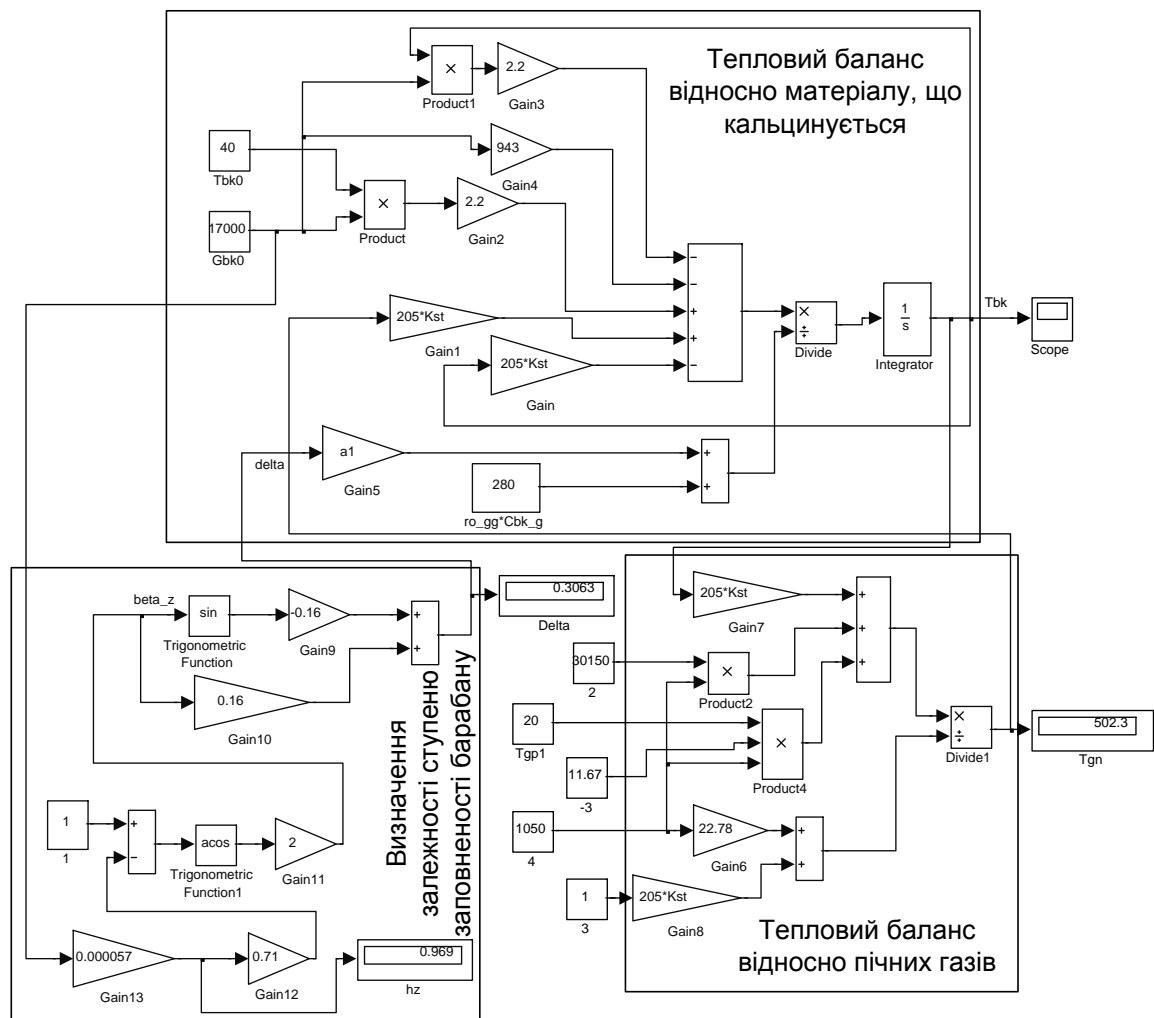


Рис. 6.7 - Імітаційна модель об'єкту управління - содової печі

середовищі математичного пакету Simulink (MatLab) та виконане пробне моделювання (рис. 6.8), результати якого показали хороший збіг з результатами моделювання за п.6.4.2.4, що вказує на відсутність принципових помилок, допущених при складанні моделі, та дозволяє використовувати останню для цілей ідентифікації невідомих параметрів за результатами натурального експерименту.

Один із можливих способів визначення параметрів математичної моделі – це безпосередній вимір їх величин на об'єкті або використання довідкових значень. Наприклад, теплоємність деяких матеріалів можна взяти з довідника, а геометричні розміри (площа, об'єм) можуть бути обраховані.

Однак не всі параметри моделі можуть бути виміряні та визначені безпосередньо. Строго кажучи, не всі параметри моделей об'єктів управління

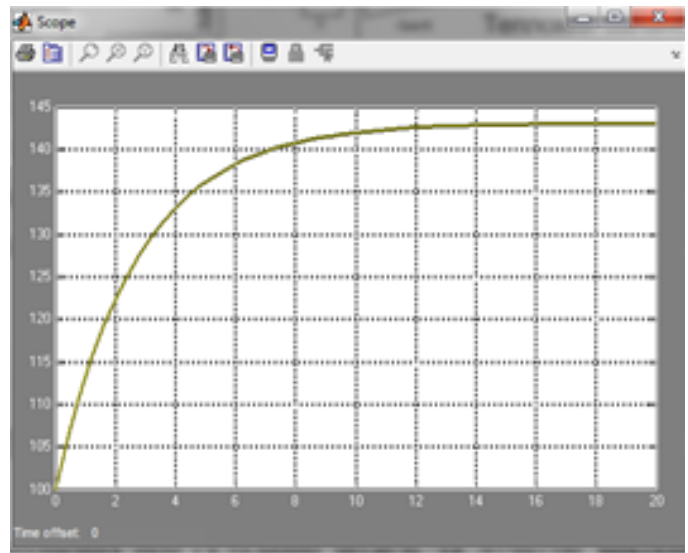


Рис. 6.8 - Результат імітаційного моделювання

мають однозначний фізичний смисл. Наприклад, коефіцієнт теплопередачі дуже складно виміряти чи обчислити, оскільки він відображає загальну теплопровідність через матеріали різних геометричних розмірів і конфігурацій, а також з різними теплофізичними властивостями. У цьому випадку використовується дещо інший підхід – ідентифікація невідомих параметрів моделі [14].

З математичної точки зору, ідентифікація параметрів – це оптимізація. Нехай $u(t)$ – вплив, який подається на реальний об'єкт управління, а $y(t)$ – виміряна результуюча реакція об'єкта на цей вплив на виході. Зауважимо, що $u(t)$ і $y(t)$ - експериментальні дані, які несуть у собі інформацію про конкретну поведінку об'єкта управління та різні збурення.

Нехай є деяка модель об'єкта з набором параметрів $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) = \Lambda$. При подачі на вхід моделі сигналу $u(t)$ (такого ж, як і на реальний об'єкт), на виході моделі отримується відгук $y_\Lambda(t)$, вигляд якого залежить від значень параметрів моделі Λ . Тоді задача мінімізації різниці між відгуком моделі $y_\Lambda(t)$ і вимірним відгуком реального об'єкта $y(t)$ при тому самому вхідному сигналі $u(t)$ може бути представлена у вигляді інтеграла

$$I(\Lambda) = \int_0^T (y_\Lambda(t) - y(t))^2 dt \rightarrow \min ,$$

де T - час виміру вихідного сигналу на об'єкті управління.

Цю задачу мінімізації функції $I(\Lambda)$ щодо вектора Λ можна розв'язати чисельно. В результаті отримуємо параметри моделі Λ^* , які найкраще відповідають експериментальним даним (тобто найкраще їх наближують).

Як було вже вказано вище, в розробленій математичній моделі содової печі ідентифікації підлягають два параметри: коефіцієнт теплопередачі через стінку - k_{st} та $a1 = \rho_{bk} c_{p,bk}^t$ – усереднене значення добутку щільності на питому теплоємність продукту в содовій печі. Для можливості їх ідентифікації ці параметри прописуються в відповідних блоках імітаційної моделі

(рис. 6.7) та для них задаються довільні початкові наближення в командному вікні **MatLab** в вигляді

```
>> kst=100; a1=1000;
```

Після цього ці параметри оголошуються в робочому просторі **Workspace MatLab** и стають доступними для моделей **Simulink**.

В результаті вимірювань, виконаних на содовій печі (за літературними джерелами) були отримані та збережені у текстових файлах такі дані: Gpg0.txt – вимірювання витрати природного газу на спалювання (змінна керування); T_{bk}.txt – вимірювання температури матеріалу на виході з содової печі (вихідна змінна); Gbk0.txt - вимірювання величини витрати сирого бікарбонату натрію на ході в піч (вхідне збурення) і tout.txt - відліки часу вимірювань, які проводилися протягом 20 годин з інтервалом в 6 хвилини, що в результаті склало число вимірювань, що дорівнює 201. Результати вимірювань надані в вигляді графіків на рис. 6.9.

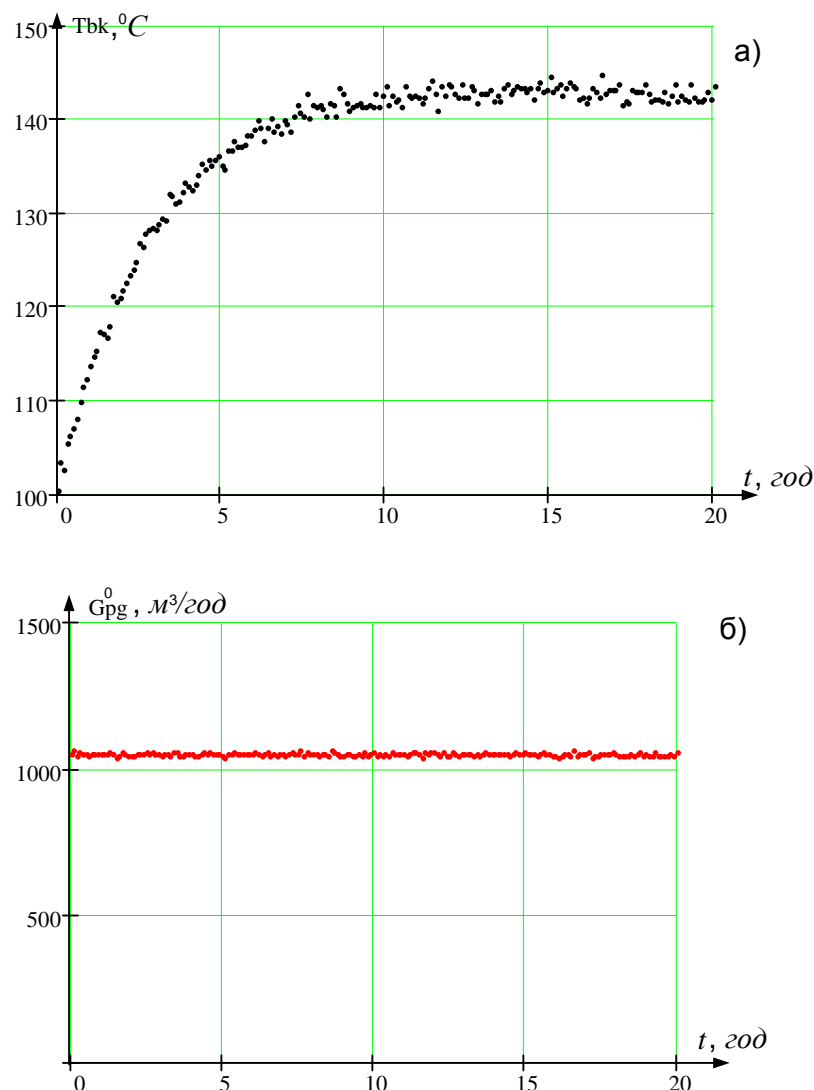


Рис. 6.9 - Результати вимірювань:
а) - температури на виході з содової печі; б) - витрати природного газу на спалювання

Для можливості проведення ідентифікації засобами **Simulink (MatLab)** в створеній моделі ОУ замінюємо всі блоки генерації впливів та відображення сигналів на спеціальні блоки, що є портами введення та виведення моделі:

- блок Step замінюємо на блок введення In1 та надаємо ім'ям сигналу Gpg0;
- блок Constant замінюємо на блок введення In1 та надаємо йому ім'ям Gbk0;
- Блок Scope замінюємо на блок введення Out1 та надаємо ім'ям сигналу Tbk.

Для виконання ідентифікації параметрів моделі содової печі скористаємось додатком Simulink **Design Optimization** [14]. Для цього необхідно завантажити програму *Control and Estimation Tools Manager* з текстового меню **Simulink: Tools/Parameter Estimation...**, після чого з'явиться вікно ідентифікації параметрів и синтезу регуляторів, показано на рис. 6.10.

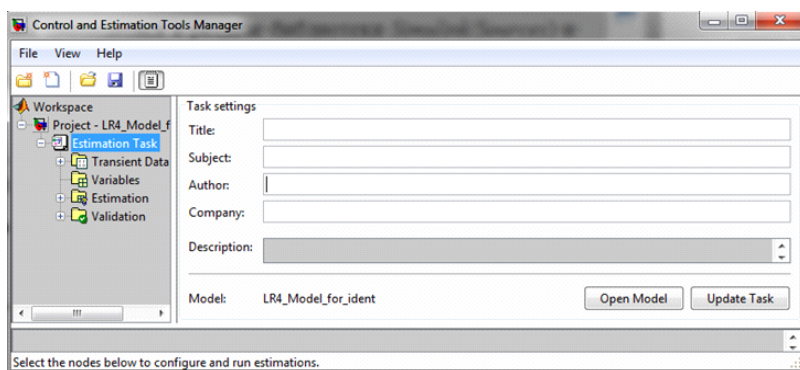


Рис. 6.10 - Робоче вікно *Control and Estimation Tools Manager*

Процес ідентифікації в середовищі математичного пакету Simulink (MatLab) виконується в декілька послідовних етапів.

На першому етапі створюється набір експериментальних даних шляхом завантаження текстових файлів: Gpg0.txt – вимірювання витрати природного газу на спалювання; Tbk.txt – вимірювання температури матеріалу на виході з содової печі; Gbk0.txt - вимірювання величини витрати сирого бікарбонату натрію на ході в піч і tout.txt - відліки часу вимірювань. Результати імпорту вхідних змінних наведені на рис. 6.11, вихідної змінної Tbk – на рис. 6.12.

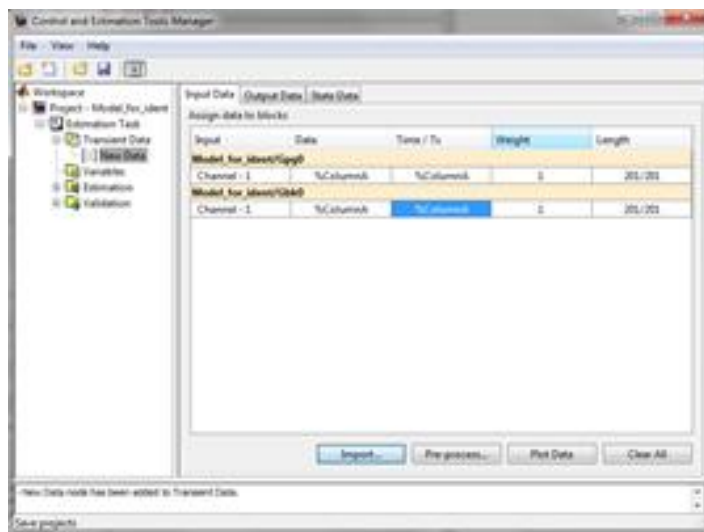


Рис. 6.11 - Вхідні дані моделі: Gpg0 - витрата природного газу на спалювання; Gbk0 - витрати сирого бікарбонату натрію на ході в піч

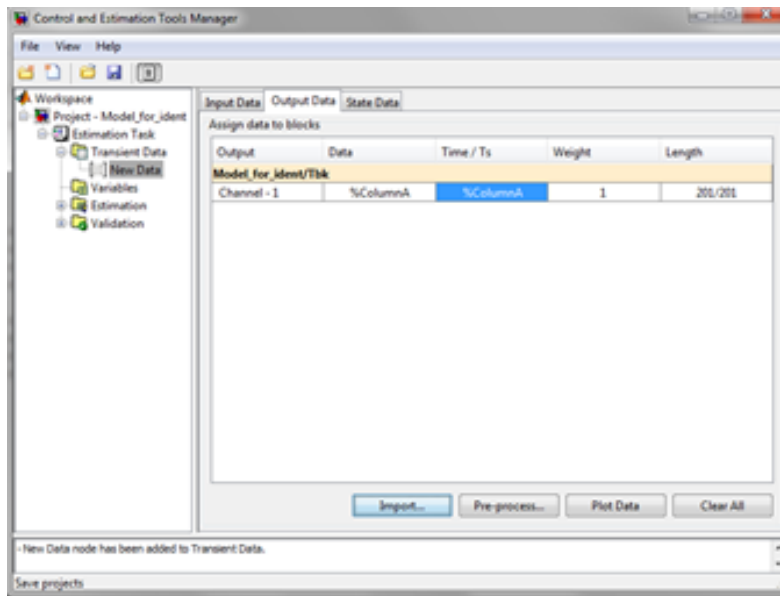


Рис. 6.12 - Вихідні дані моделі: Т_{bk} - температура матеріалу на виході з содової печі

Наступний етап процесу приготування ідентифікації – виконання специфікації параметрів моделі, які необхідно визначити при проведенні ідентифікації. Результат виконання цього етапу наведено на рис. 6.13.

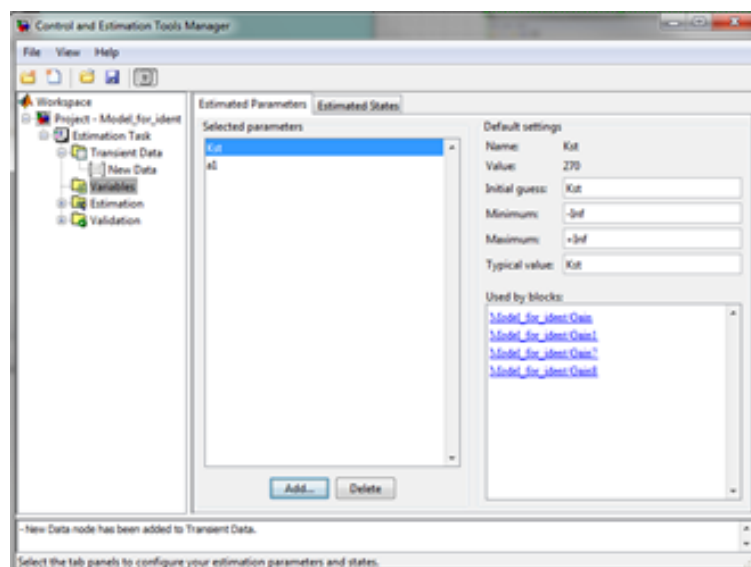


Рис. 6.13 - Специфікація параметрів моделі для ідентифікації

Наступний етап – безпосередньо ідентифікація параметрів.

Виділяємо у дереві ліворуч (рис. X.13) пункт **Estimation** і у вікні, що змінилося, праворуч натисніть кнопку **New**, створивши, таким чином, нову задачу ідентифікації з іменем за умовчанням **New Estimation**, яка відображається в дереві ліворуч. Виділяємо у дереві **New Estimation**. Вид вікна праворуч зміниться: буде сформовано кілька закладок, призначених для налаштування та виконання процесу ідентифікації параметрів.

На закладці **Data Sets** встановлюємо прапорець у списку доступних наборів даних проти створеного раніше набору з ім'ям **New Data** – це означає, що цей набір даних буде використаний під час ідентифікації.

Перейдемо на закладку *Parameters* і позначимо параметри моделі, що підлягають ідентифікації.

Для безпосередньої ідентифікації параметрів перейдемо на закладку *Estimation* і натиснемо кнопку *Start*. На кожній ітерації оптимізаційної процедури в таблицю *Estimation progress* виводиться значення кроку зміни параметрів (*Iteration*) і цільової функції (*Cost Function*). Процедура оптимізації автоматично завершиться у разі досягнення локального мінімуму цільової функції або після заданої кількості ітерацій (за замовчуванням – після 100). Натиснувши кнопку *Estimation Options*, можна налаштувати параметри процесу ідентифікації, наприклад, вибрати інший алгоритм і критерії завершення оптимізації.

В разі успішного завершення процесу ідентифікації буде отримано повідомлення, що наведене на рис. 6.14.

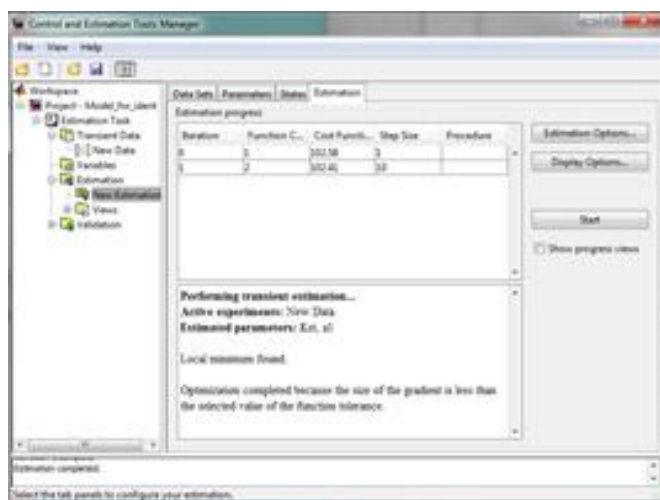


Рис. 6.14 - Завершення процесу ідентифікації параметрів моделі

Після завершення процесу ідентифікації можна порівняти вимірні дані температури та дані, отримані в результаті моделювання.

Для цього виділяємо ліворуч у дереві пункт *Estimation/Views* і натискаємо праворуч кнопку *New*, що створює нове сімейство графіків з ім'ям за замовчуванням *New View*. Виділивши в дереві *New View* підпункт *Estimation/Views*, отримаємо праворуч таблицю графіків, у першому рядку якої (кліком) у колонці *Plot Type* виберемо *Measured and simulated*, а також відзначимо прапорцем у *Options* пункт *New Estimation* (для зв'язування майбутніх графіків з задачею ідентифікації). Натискання кнопки *Show Plots* призведе до побудови двох суміщених графіків (вимірної та промодельованої за ідентифікованими параметрами, як показано на рис. 6.16).

На графікові (рис.6.16) сіром кольором зображені вимірні значення температури матеріалу (соди) на виході содової печі (з урахуванням шумів виміру) з файлу Tvk.txt та синім кольором (на рис. 6.16 товстою лінією), отримана в результаті моделювання. Як можна помітити, обидва графіки досить добре збігаються (у середньому), що дозволяє зробити висновок про задовільність ідентифікації параметрів моделі.

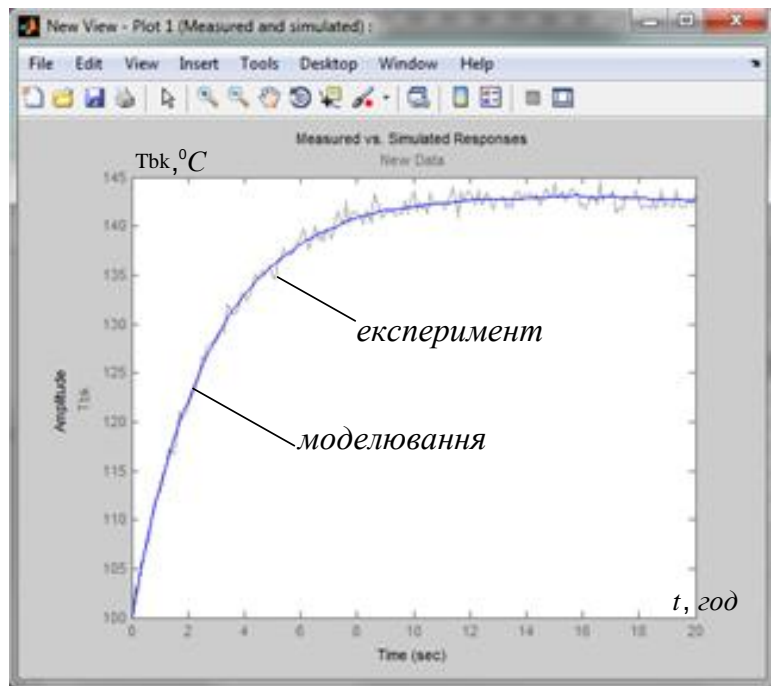


Рис. 6.16 - Графіки температури матеріалу на виході содової печі: виміряної в ході експерименту і отримана моделюванням

Чисельні значення знайдених в результаті ідентифікації параметрів можна отримати, набравши їхні імена в командному вікні *MatLab* і натиснувши *Enter*, як показано нижче:

```
>> Kst = 269.8;
```

```
>> a1 = 4.8388e+005.
```

6.4.4 Лінеаризація математичної моделі содової печі

Аналіз математичної моделі (6-23а – 6-23д) показує, що вона є нелінійною за каналом управління «Витрата природного газу на спалення G_{pg}^0 – Температура матеріалу на виході T_{bk} ».

Особливості поведінки нелінійних систем і різноманіття процесів, що протікають в них, створюють істотні труднощі при їх математичному описі та дослідженні їх точними методами. Лінеаризація як подача моделі нелінійної системи у лінійному вигляді є найпростішим методом, який дозволяє використовувати тією чи іншою мірою аналітичний апарат теорії лінійних систем для аналізу та синтезу нелінійних систем.

Відомі три основні методи лінеаризації: дотична, гармонійна та стохастична.

- ✓ Дотична («звичайна») лінеаризація (апроксимація) здійснюється в припущенні, що рух нелінійної системи відбувається в досить малій околиці «робочої точки» простору стану системи. Параметри лінеаризованої системи знаходять з розкладання нелінійної системи в ряд Тейлора за ступенями малих відхилень від робочої точки або методом найменших квадратів Гауса [13]. Цей метод використовується переважно для слабких нелінійностей, коли обидва підходи призводять до однакових результатів.
- ✓ Гармонійна лінеаризація здійснюється не в часовій області, як дотична, а в частотній, для систем із сильними нелінійностями, що працюють лише з гармонійними сигналами.

- ✓ Стохастична лінеаризація здійснюється в часовій області для систем, схильних до дії випадкових збурень.

Якщо в математичній моделі (6-23а – 6-23д) прирівняти похідну $\frac{dT_{bk}}{dt}$ до нуля, то отримаємо математичну модель статички, або статичну характеристику, вигляд якої при найдених значеннях параметрів $Kst = 269.8$ та $a1 = 4.8388e+005$ в околиці робочої точки $G_{pg}^0 = 1000 \frac{m^3}{год}$ та $T_{bk} = 196^\circ C$ наводиться на рис. 6.17.

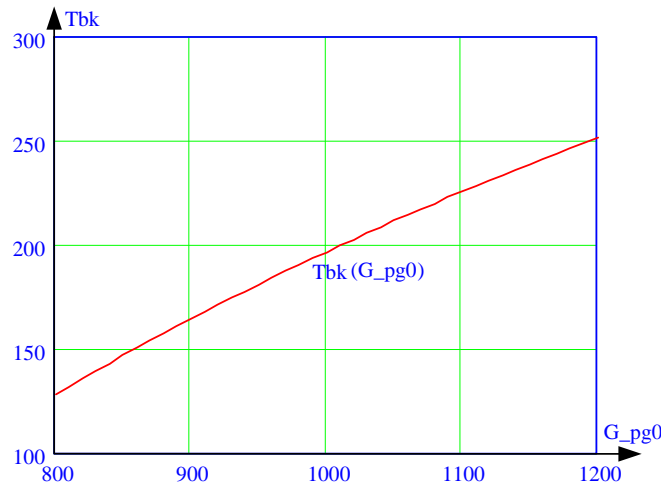


Рис. 6.17 - Статична характеристика содової печі за каналом “Температура матеріалу на виході T_{bk} - витрата природного газу на нагрів G_{pg0} ”

Як можна побачити нелінійність відноситься до класу «слабких», а тому для лінеаризації доцільно використати один з варіантів «дотичної» лінеаризації, а наявність аналітичного математичного опису дозволяє скористатися визначенням параметрів лінеаризованої системи розкладання нелінійної системи в ряд Тейлора за ступенями малих відхилень від робочої точки.

Статична характеристика об’єкту управління після підстановки відомих параметрів

$$T_{bk}(G_{pg}^0) = 186 \frac{152G_{pg}^0 + 277T_{bk}}{1,39 \cdot 10^5 + 57G_{pg}^0} - 0,55T_{bk} - 87.9 \quad (6-24)$$

Нехай усталений (робочий) режим роботи ОУ відповідає значенням вхідної x_0 і вихідної y_0 величин і відхилення x від x_0 в процесі роботи досить малі. У цьому випадку вихідну (гладку) нелінійну залежність $y = f(x)$ або $T_{bk} = f(G_{pg}^0)$ можна розкласти в ряд Тейлора на околицях точки режиму, що встановився $(x_0; y_0)$

$$y(x) = f(x_0) + \left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0} (x - x_0) + O^2 \quad (6-25)$$

и, відкинувши члени ряду вище першого порядку малості O^2 , отримати наближену лінійну залежність

$$y(x) \approx f(x_0) + \left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0} (x - x_0)$$

де $\left(\frac{df(x)}{dx}\right)_{x_0}$ - значення похідної функції $f(x)$ за x при підстановці в вираз цієї похідної $x = x_0$.

Розкладання в ряд Тейлора виразу (6-24) дає

$$T_{bk}(G_{pg}^0) = -31 - 0.287T_{bk} + (0.1 - 7.6 \cdot 10^{-5}T_{bk}|_{T_{bk} = 196})(G_{pg}^0 - 1000) + (-3.0 \cdot 10^{-5} + 2.2 \cdot 10^{-8}T_{bk}|_{T_{bk} = 140})(G_{pg}^0 - 1000)^2 + (8.7 \cdot 10^{-9} - 6.5 \cdot 10^{-12}T_{bk}|_{T_{bk} = 196})(G_{pg}^0 - 1000)^3. \quad (6-26)$$

Після відкидання нелінійних членів отримаємо

$$T_{bk}(G_{pg}^0) = -31 - 0.287T_{bk} + (0.1 - 7.6 \cdot 10^{-5}T_{bk}|_{T_{bk} = 196})(G_{pg}^0 - 1000). \quad (6-27)$$

Графічна ілюстрація результату лінеаризації статичної характеристики содової печі за каналом “Температура матеріалу на виході T_{bk} - витрата природного газу на нагрів G_{pg}^0 ” представлена на рис. 6.18.

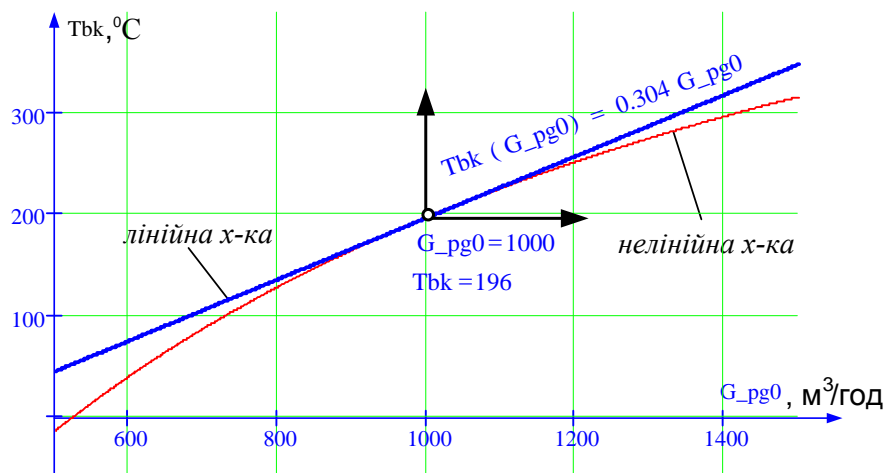


Рис. 6.18 - Результат лінеаризації статичної характеристики содової печі за каналом “Температура матеріалу на виході T_{bk} - витрата природного газу на нагрів G_{pg}^0 ”

З урахуванням (13) та після переходу від приросту змінних до безпосередньо змінних лінеаризовану математичну модель динаміки процесів в содовій печі в околиці робочої точки $(T_{bk} = 196; G_{pg}^0 = 1000)$ можна представити в вигляді лінійного диференційного рівняння першого порядку

$$\frac{dT_{bk}}{dt} + 0.287T_{bk} = 0.0873 G_{pg}^0 \quad (6-28)$$

при початкових умовах: $T_{bk}(0) = T_{bk0}$.

На рис. 6.19 для порівняння приводяться графіки перехідних характеристик, отриманих для вихідного нелінійного об'єкту за каналом управління «Температура матеріалу на виході T_{bk} - витрата природного газу на нагрів G_{pg}^0 » і його лінеаризованої моделі. Можна побачити, що графіки перехідних характеристик практично не відрізняються, що вказує на обумовлену можливість в подальших розрахунках використовувати лінеаризовану модель (14).

Із диференціального рівняння (14) при нульових початкових умовах $T_{bk}(0) = 0$ отримаємо передаточну функцію в вигляді

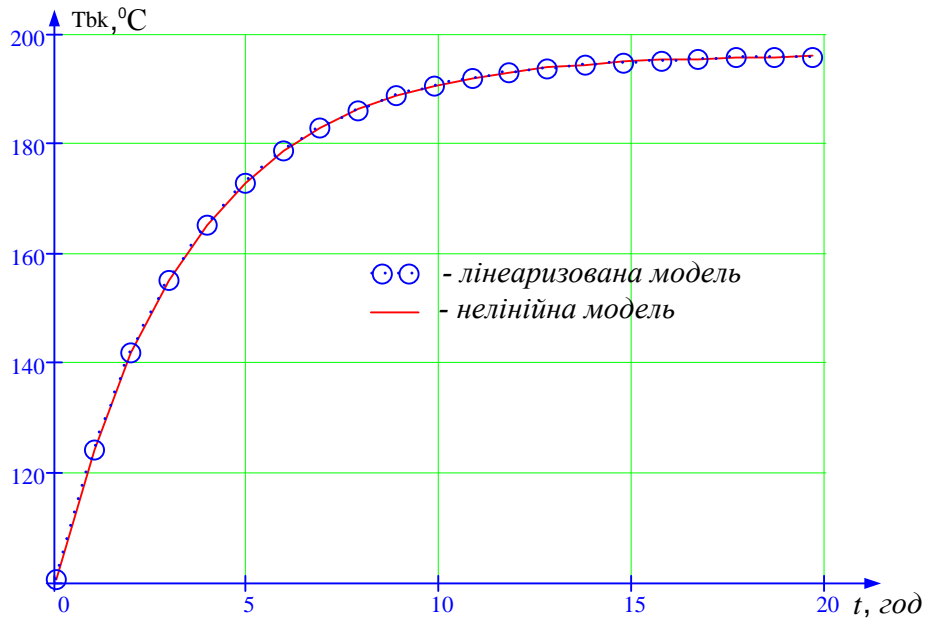


Рис. 6.19 - Перехідні характеристики вихідного нелінійного та лінеаризованого об'єктів управління

$$W_{об}(s) = \frac{G_{pg}^0(s)}{T_{bk}(s)} = \frac{0.304}{3.48s+1}. \quad (6-29)$$

6.5 Синтез регулятора температури в содовій печі методом логарифмічних характеристик

6.5.1 Теоретичні основи методу

Частотні характеристики системи дають достатньо інформації якості перехідних процесів у системах управління [13]. Зокрема, за логарифмічною амплітудною частотною характеристикою (ЛАЧХ) розімкнутої мінімально-фазової системи можна досить точно оцінити статичну та динамічну точність, коливальність, швидкодію та перерегулювання перехідного процесу у разі її замикання одиничним від'ємним зворотним зв'язком. Таким чином, основні прямі показники якості проектованої системи визначають необхідну форму та параметри частотних характеристик.

Формування необхідних частотних характеристик замкнутої системи, а значить і розв'язання задачі синтезу, може бути досягнуто шляхом введення в систему послідовних елементів, що коригують (видозмінюють) її динамічні властивості.

Нескладність побудови асимптотичних ЛАЧХ спричинила широке поширення методів синтезу, базованих на використанні логарифмічних характеристик, в інженерній практиці. І у сучасних умовах ця група методів, незважаючи на деяку архаїчність графоаналітичних розрахунків, знаходить гідне застосування.

Ідея методів ЛАЧХ при послідовній корекції [13] полягає у наступному (див. рис 6.30). При заданій (або відомій) логарифмічній частотній характеристиці незмінної частини системи управління (об'єкта управління) $L_n(\omega)$, $\Psi_n(\omega)$, яка при одиничному зворотному зв'язку представляє, по суті, розімкнену систему, і сформованою на основі вихідних вимог до якості

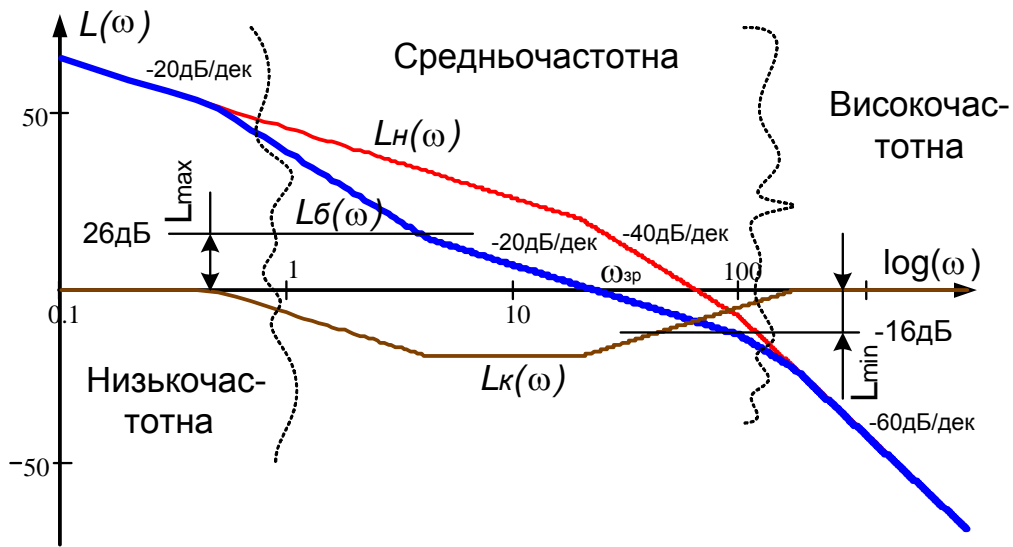


Рис. 6.30 - Ілюстрація до синтезу САУ методом ЛАЧХ

перехідних процесів «бажаної» ЛАЧХ розімкнутого контуру $L_B(\omega)$, $\Psi_B(\omega)$, шукана логарифмічна коригувальний елемент $L_K(\omega)$, $\Psi_K(\omega)$ визначається виразами

$$L_K(\omega) = L_B(\omega) - L_H(\omega), \quad (6-30a)$$

$$\Psi_K(\omega) = \Psi_B(\omega) - \Psi_H(\omega). \quad (6-30б)$$

Таким чином, синтез системи управління зводиться до підбору динамічної ланки з частотними характеристиками $L_K(\omega)$ та $\Psi_K(\omega)$ з подальшим визначенням параметрів.

Цей метод синтезу застосовуються тільки для систем мінімально-фазового типу, що дозволяє всі побудови виробляти, використовуючи тільки ЛАЧХ розімкнутої системи, а логарифмічну фазо-частотну характеристику (ЛФЧХ) використовувати тільки для контролю.

Припускаємо, що передатна функція об'єкта управління (незмінної частини) представлена у вигляді відношення двох поліномів $R_n(s)$ та $Q_n(s)$ з вільними членами рівними одиниці, коефіцієнтом підсилення k та порядком астатизму ν

$$W_n(s) = \frac{kR_n(s)}{s^\nu Q_n(s)}. \quad (6-31)$$

«Бажану» ЛАЧХ будують виходячи з вимог, що висуваються до властивостей замкнутої системи, що синтезується. Вимоги до статичних властивостей задають у вигляді порядку астатизму ν та передаточного коефіцієнта (добротності) k розімкнутої системи. Іноді для систем із астатизмом першого порядку задають коефіцієнти помилок C_0 та C_1 . Вимоги до динамічних властивостей системи визначаються заданими значеннями перерегулювання σ і часу регулювання t_p . Іноді задається обмеження як максимально допустимого прискорення w_{max} регульованої величини при заданому початковому неузгодженні між фактичним і заданим значеннями вихідного сигналу Δx_0 .

Порядок синтезу систем керування методом ЛАЧХ наступний [13]:

1. Будується асимптотична ЛАЧХ незмінної частини розімкнутої системи $L_n(\omega)$ за передаточною функцією(6-31). Попередньо кожен із поліномів $R_n(s)$ і $Q_n(s)$ необхідно розкласти на співмножники виду $(T_i s + 1)$ і $(T_j^2 s + 2T_j \zeta s + 1)$, де $\zeta < 1$. При розкладанні серед співмножників можуть виявитися такі, які мають дуже малі постійні часу $T_i \leq \frac{1}{100 \cdot \omega_{cp}}$, де ω_{cp} - частота зрізу незмінної частини системи. Їх вплив на властивості системи незначний, і при побудові характеристики $L_n(\omega)$ такими співмножниками можна знехтувати. Можливий вид асимптотичної ЛАЧХ незмінної частини системи $L_n(\omega)$ показано на рис. 6.30.

2. Будується «бажана» асимптотична ЛАЧХ розімкнутої системи $L_6(\omega)$, яка забезпечує необхідні (тобто «бажані») статичні та динамічні властивості замкнутої системи. Для конкретного варіанта методу синтезу цей етап має особливості, однак загальними для них усіх є поділ ЛАЧХ на три ділянки: низькочастотну, середньочастотну і високочастотну, і набір вимог, що висувуються до цих ділянок.

Низькочастотна частина «бажаної» ЛАЧХ визначає статичну точність системи - точність в усталеному режимі. У статичній системі низькочастотна асимптота паралельна осі абсцис (частот). В астатичних системах нахил цієї асимптоти становить «мінус» 20ν дБ/дек, де ν - порядок астатизму ($\nu=1,2,\dots$). Ордината низькочастотної асимптоти $L_6(\omega)$ при $\omega=1c^{-1}$ формується значенням передаточного коефіцієнта k розімкнутої системи. Якщо передаточна функція розімкнутої системи (6-31) має передаточний коефіцієнт k і порядок астатизму ν , що задовольняють вимогам до створюваної системи, то низькочастотна асимптота «бажаної» ЛАЧХ $L_6(\omega)$ збігається з низькочастотною асимптотою незмінної ЛАЧХ. Чим ширша низькочастотна частина $L_6(\omega)$, тим більше високих частот відтворюється системою без помітного послаблення.

Середньочастотна частина «бажаної» ЛАЧХ і її сполучення з низькочастотною при синтезі є найбільш важливими, так як ці відтинки ЛАХ визначає динамічні властивості системи - стійкість, запас стійкості, тобто якість перехідного процесу. Саме ця частина ЛАЧХ найчастіше корегується.

З середньочастотною частиною ЛАЧХ пов'язане поняття області суттєвих частот, як тієї частини частотної характеристики, яка в основному визначає динамічні властивості системи та за межами якої характер поведінки частотної характеристики вже не здійснює помітного впливу. Діапазон області суттєвих частот визначається з таких міркувань:

- нижня частота ω_n визначається статичною точністю $\varepsilon_{уст} = C_0 = \frac{1}{1+k} \approx 0.05$ при ступінчастому впливі, що відповідає рівню сигналу приблизно плюс 26 дБ. Лівише цієї частоти ЛАЧХ повинна мати ординату не менше 26 дБ, якщо не потрібно астатизму, або нахил залежно від порядку астатизму;

- верхня частота ω_g визначається необхідністю придушення високочастотних складових перехідного процесу у вихідному сигналі до 10% від рівня вхідного сигналу, що відповідає мінус 16 дБ.

Основні параметри середньочастотної асимптоти «бажаної» ЛАЧХ – це її нахил та частота зрізу. Чим більший нахил середньочастотної асимптоти (крутизна АЧХ в області частоти зрізу), тим важче технічно забезпечити хороші динамічні властивості системи. Найбільш прийнятним вважається нахил мінус 20 дБ/дек, рідше використовується нахил мінус 40 дБ/дек. Частота зрізу $\omega_{зр}$ визначає швидкодію системи. Чим вона більша, тим вище швидкодія і тим менший час перехідного процесу t_p .

Високочастотна частина "бажаної" ЛАЧХ слабо впливає на динамічні властивості системи. Бажано в цій частині мати якомога більший нахил асимптот, що зменшує вимоги до необхідної потужності виконавчого механізму та знижує вплив на роботу системи високочастотних завад, однак ускладнює передаточну функцію коригуючого пристрою. На практиці нахил асимптот «бажаної» ЛАЧХ у високочастотній ділянці вибирають таким, що збігається з нахилом $L_n(\omega)$. У деяких випадках при розрахунках високочастотну частину ЛАЧХ взагалі не беруть до уваги.

При побудові «бажаної» ЛАЧХ важливо, щоб вона забезпечила необхідний запас стійкості в області частоти зрізу системи. Для цього використовують спеціальні номограми або виконують розрахунки з використанням ЛФЧХ.

3. Визначається передаточна функція коригувального пристрою $W_k(s)$, що необхідно включити в прямий ланцюг системи керування, для забезпечення необхідних властивостей. Ця операція може бути виконана двома способами:

а) спочатку графічно – відніманням безпосередньо на графіку ЛАЧХ відповідно до виразу (6-30а) – будується ЛАЧХ коригувального пристрою і за її виглядом складається вираз передаточної функції $W_k(s)$;

б) за видом «бажаної» ЛАЧХ $L_b(\omega)$ відтворюється відповідна їй передаточна функція, після чого визначається передаточна функція $W_k(s)$ із співвідношення:

$$W_k(s) = \frac{W_b(s)}{W_n(s)}. \quad (6-32)$$

4. Вибирається (з довідкової літератури) або розраховується схема фізичної реалізації отриманої передавальної функції (при використанні мікропроцесорної системи управління на цьому етапі складається програма реалізації синтезованого закону).

5. Завершує процедуру синтезу перевірочний розрахунок або моделювання перехідних процесів у скоригованій системі з використанням одного з доступних комп'ютерних засобів для перевірки на відповідність заданим показникам якості. Якщо в результаті моделювання виявлено

невідповідність фактичних показників якості заданим, виконується коригування «бажаної» асимптотичної ЛАЧХ розімкнутої частини системи та повторюються розрахунки за п.2...п.5.

6.5.2 Вихідні дані для синтезу регулятора

Відповідно до завдання необхідно виконати структурно-параметричний синтез послідовного коригуючого пристрою (регулятора) для регулювання температури кальцинованої соди в содовій печі, якщо передаточна функція по каналу управління (6-29) $W_{об}(s) = \frac{0.304}{3.48s+1}$, при наступних показниках якості перехідного процесу: порядок астатизму $\nu = 1$; добротність $D = 0.0001c^{-1}$; перерегулювання $\sigma = 20\%$ і час перехідного процесу $t_p = 820$ с.

6.5.3 Виконання синтезу регулятора методом ЛАЧХ при побудові «бажаної» характеристики за Солодовниковим

6.5.3.1 Побудова асимптотичної ЛАЧХ незмінної частини системи $L_n(\omega)$

Оскільки параметри передаточної функції (6-29) отримані в процесі розробки математичного опису з урахуванням часу в годинах, необхідно їх перевести в параметри з урахуванням часу в секундах. В результаті отримаємо

$$W_{об}(s) = \frac{G_{pg}^0(s)}{T_{bk}(s)} = \frac{k_{об}}{T_{об}s+1} = \frac{0.000084}{12500s+1}, \quad (6-33)$$

де $k_{об} = 0.000084 \frac{m^3}{c \cdot c}$ – коефіцієнт підсилення; $T_{об} = 3.48 \text{ год} = 12500 \text{ с}$.

Низькочастотна асимптота ЛАЧХ має нахил (0) дБ/дек і фіксується на частоті $\omega = 1 \text{ Гц}$ на рівні, що визначається виразом $L_n(1) = 20 \lg(k_{об}) = 20 \lg(0.000084) = -81 \text{ дБ/дек}$.

Визначаємо сполучні частоти (в нашому випадку це одна частота) - $\omega_{об} = \frac{1}{T_{об}} = 0.00008c^{-1}$. Після цієї сполучної частоти нахил асимптоти збільшується і стає (-20) дБ/дек. Побудована таким чином ЛАЧХ незмінної частини розімкнутої САУ (об'єкту) $L_n(\omega)$ наведена на рис. 6.31.

6.5.3.2 Побудова «бажаної» асимптотичної ЛАЧХ $L_б(\omega)$ за методикою Солодовникова

Нахил і положення низькочастотної асимптоти «бажаної» ЛАЧХ залежить від вимог, що висуваються до статичної точності проектованої системи.

Відповідно до завдання САУ повинна мати астатизм першого порядку (повна відсутність статичної похибки), що вказує на те, що низькочастотна асимптота «бажаної» ЛАЧХ повинна мати нахил (-20) дБ/дек. Фіксація рівня низькочастотної асимптоти «бажаної» ЛАЧХ визначається необхідною добротністю, тобто повинна проходити через точку на осі частот, що дорівнює заданій добротності $D = 0.0001c^{-1}$ (див. рис.6.31).

Побудова середньочастотної частини «бажаної» асимптотичної ЛАЧХ.

а) Визначення частоти зрізу системи $\omega_{зр}$ за В.В.Солодовниковим виконується так, щоб була справедливою нерівність $\omega_{c1} \leq \omega_{зр} \leq \omega_{c2}$, де ω_{c1} , ω_{c2} - значення мінімально та максимально

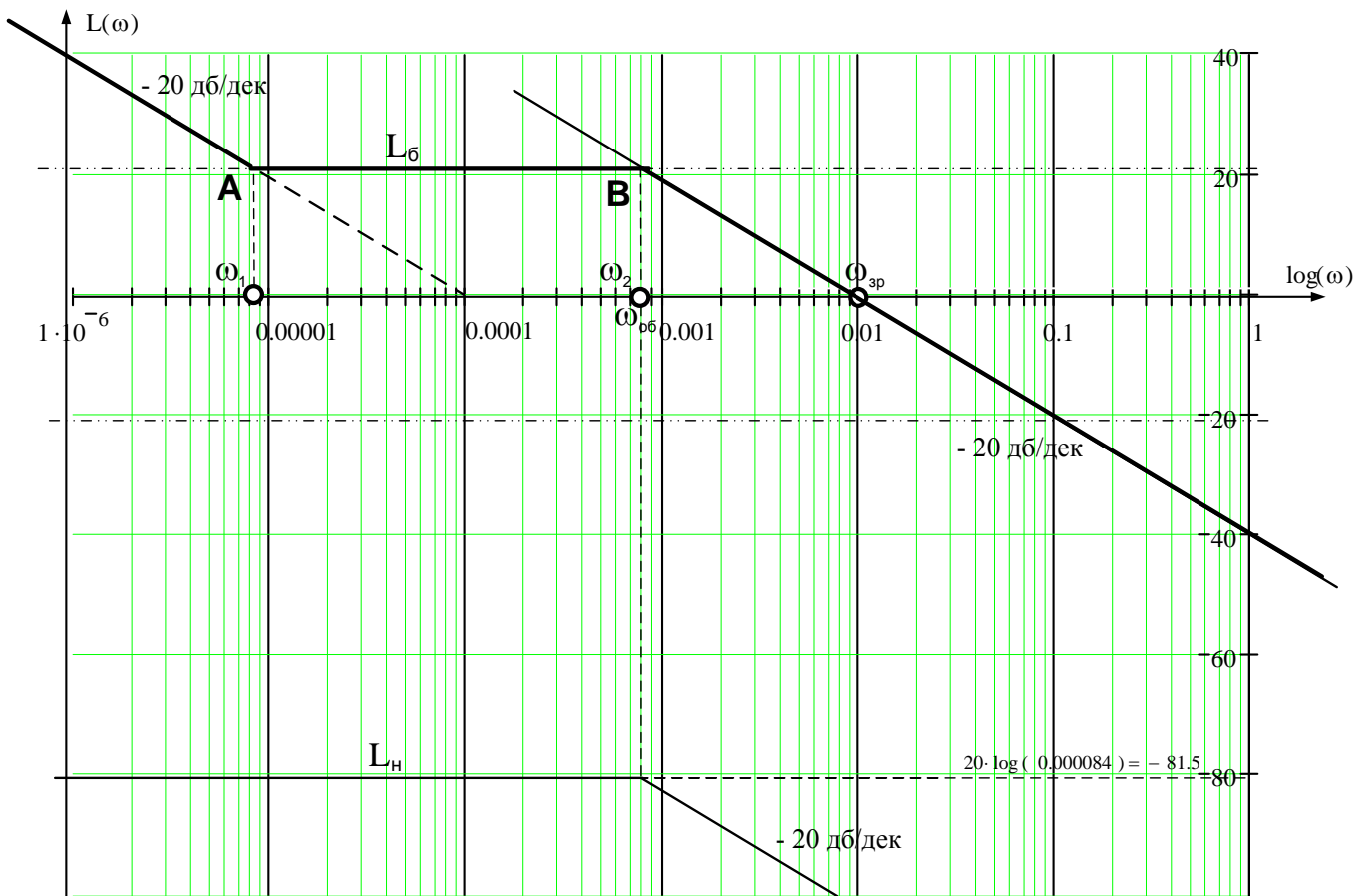


Рис. 6.31 - Синтез САУ температурою кальцинованої соди в содовій печі з астатизмом 1-го порядку з послідовним пристроєм, що корегує допустимої частоти зрізу. Величина ω_{c1} визначає мінімальну частоту зрізу, коли час регулювання не перевищить заданого значення t_p , тобто задану швидкість системи.

Для визначення мінімально допустимого значення частоти зрізу ω_{c1} ЛАЧХ «бажаної» системи скористаємося номограмою Солодовникова (див. рис. 6.32), яка встановлює відповідність між величиною максимального значення дійсної частотної характеристики замкненої системи та величинами перерегулювання σ та часу перехідного процесу t_p для астатичних систем 1-го порядку. Методика визначення частоти зрізу викладена у [13] та продемонстрована на номограмі рис. 6.32.

Для даної задачі за заданим допустимим значенням

перерегулювання $\sigma = 20\%$ за кривою $\sigma(P_{max})$ номограми на рис. 6.32 знаходимо відповідне йому максимальне значення дійсної характеристики $P_{max} = 1.1$, використовуючи яке за допомогою

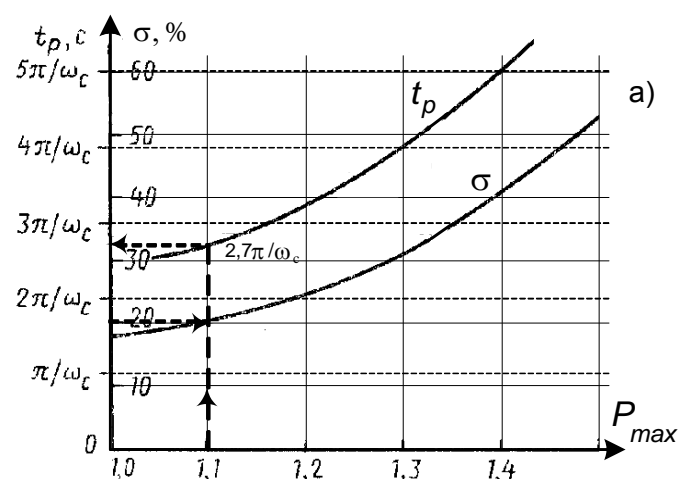


Рис. 6.32 - Номограми якості Солодовникова для астатических систем 1-го порядка

другої кривої $t_p(P_{\max})$ визначаємо значення часу перехідного процесу, виражене через частоту зрізу $\omega_{зр}$ співвідношенням $2.7\pi/\omega_{зр}$. З рівняння $t_p = 2.7\pi/\omega_{зр}$ знаходимо мінімальну частоту зрізу системи з виразу

$$\omega_{с1} = 2.7\pi/t_p = \frac{2.7\pi}{820} = 0.01с^{-1} \quad (6-34)$$

Оскільки за умовою завдання обмеження на максимально допустиме прискорення координати управління не вказується, необхідності виконання оцінки верхньої допустимої межі частоти зрізу немає. Так як за рекомендаціями частота зрізу «бажаної» системи повинна знаходитися, по можливості, ліворуч у знайденому діапазоні, то приймаємо $\omega_{зр} \approx 0,01с^{-1}$.

б) Побудова середньочастотної асимптоти «бажаної» ЛАЧХ.

Проводимо через точку $\omega_{зр} = 0,01с^{-1}$ на осі частот середньочастотну асимптоту з нахилом мінус 20 дБ/дек (див. рис. 6.31). Цей нахил є рекомендованим, але з обов'язковим. Якщо результат синтезу виявляється незадовільними, то, можливо, доведеться збільшити нахил до мінус 40 дБ/дек. Проте треба пам'ятати, що це може погіршити умови забезпечення стійкості.

в) Визначення діапазону частот середньочастотної частини «бажаної» ЛАЧХ.

Визначення діапазону частот середньочастотної частини «бажаної» ЛАЧХ (області значущих частот) є досить складним і важливим завданням, оскільки від нього багато в чому залежать динамічні характеристики системи, що синтезується. При цьому необхідно, щоб «бажана» ЛАЧХ гарантувала забезпечення необхідного запасу стійкості НА частоті зрізу системи. Загалом, бажано, щоб середньочастотна асимптота розташовувалася в діапазоні частот завширшки не менше однієї декади.

На практиці використовують два підходи:

- додатній і від'ємний запаси стійкості по модулю встановлюються під час підготовки технічного завдання з вимог до якості управління;
- вимагають забезпечення заданого надлишку (запасу) фази $\gamma \geq \gamma_{\min}$ в діапазоні частот, в якому виконується умова $L_{m-} \leq L_{жс}(\omega) \leq L_{m+}$. У цьому значення L_{m-} , L_{m+} и γ_{\min} визначають з допомогою номограми (див. рис. 6.33), використовуючи раніше знайдене значення P_{\max} .

Застосовуючи другий підхід (за номограмою рис. 6.33), за визначеним раніше значенням $P_{\max} = 1.1$ знаходимо необхідний запас по фазі $\gamma_{\min} = 58^\circ$ та відповідні йому ординати середньочастотної ЛАЧХ $L_m = \pm 21$ дБ. Лінії паралельні осі частот, проведені на рівні $L_m = \pm 21$ дБ, дають у точках перетину з середньочастотною асимптотою частоти сполучення середньочастотної асимптоти з низькочастотною $\omega_1 = 8.5 \cdot 10^{-6}с^{-1}$ та високочастотною $\omega_2 = 8.0 \cdot 10^{-4}с^{-1}$ асимптотами (точки **А** та **В** на рис. 6.31).

г) Поєднання низькочастотної та середньочастотної частин «бажаної» ЛАЧХ.

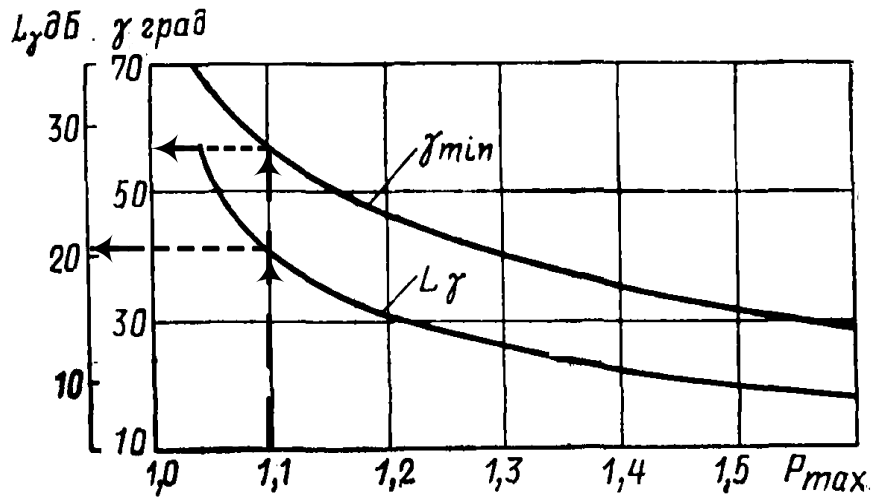


Рис. 6.33 - Номограма для визначення ширини середньочастотної асимптоти та необхідного надлишку фази

Характер сполучення низькочастотної та середньочастотної асимптот «бажаної» ЛАЧХ залежить від їхнього взаєморозташування. Якщо точка перетину цих двох асимптот відсутня (при однаковому нахилі) і низькочастотна асимптота лежить нижче за середньочастотну асимптоту або точка перетину знаходиться зліва при занадто низьких частотах (що характерно для нашого випадку), сполучення рекомендується виконувати асимптотою з нульовим нахилом. Результат побудови наведено на рис. 6.31 відрізком асимптоти **АВ**.

д) Побудова високочастотної частини «бажаної» ЛАЧХ та поєднання її з середньочастотною асимптотою.

Побудова високочастотної частини «бажаної» ЛАЧХ виконується таким чином, щоб вид «бажаної» ЛАЧХ у цій області якнайменше відрізнявся від виду незмінної ЛАЧХ. Так як нахил незмінної ЛАЧХ в області високих частот (-20) дБ/дек, то і нахил «бажаної» ЛАЧХ приймаємо таким же, тобто високочастотна асимптота є продовженням середньочастотної.

Побудована таким способом «бажана» ЛАЧХ розімкнутої системи управління представлена на рис. 6.31 (суцільна лінія).

е) Отримання передаточної функції розімкнутого ланцюга «бажаної» системи.

Відповідно до методики отримання передаточної функції зв виглядом та параметрами асимптотичної ЛАЧХ визначаємо сполучні частоти та розміщаємо їх в порядку зростання, тобто $\omega_1 = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$ та $\omega_2 = 8.0 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$. Коефіцієнт підсилення розімкнутої системи $k_{pc} = 0.0001 \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{с}}$, порядок астатизму $\nu = 1$. Проаналізуємо поведінку «бажаної» ЛАЧХ:

- після частоти сполучення $\omega_1 = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$ (праворуч) нахил асимптоти зменшується на 20дБ/дек, що відповідає появі в чисельнику передаточної функції розімкнутої системи співмножника $\frac{1}{\omega_1} s + 1 = \frac{1}{8.5 \cdot 10^{-6}} s + 1 = 1.2 \cdot 10^5 s + 1$;

- після частоти сполучення $\omega_2 = 8.0 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$ нахил асимптоти збільшується на 20дБ/дек, що відповідає появі в знаменнику передаточної функції розімкнутої системи співмножника $\frac{1}{\omega_2} s + 1 = \frac{1}{8.0 \cdot 10^{-4}} s + 1 = 1.25 \cdot 10^3 s + 1$.

Таким чином, передаточна функція «бажаної» розімкнутої системи матиме вигляд

$$W_{pc}(s) = \frac{0.0001 \cdot (1.2 \cdot 10^5 s + 1)}{s(1.25 \cdot 10^3 s + 1)}. \quad (6-35)$$

ж) Визначення фактичного надлишку фази у області значущих частот «бажаної» ЛАЧХ.

Для перевірки відповідності запасів стійкості за фазою та модулем необхідним (див. рис. 6.33) знаходимо на частоті зрізу розімкнутої системи одним із відомих методів зсув за фазою «бажаної» розімкнутої системи. Як очевидно з побудови (запас по фазі визначається частоті зрізу системи) отриманий фактичний надлишок фази становить $\gamma = 85^\circ$, що цілком достатньо (перевищує необхідний за номограмою $\gamma > \gamma_{min} = 58^\circ$).

з) Моделювання синтезованої системи та визначення показників якості перехідного процесу.

Для визначення показників якості синтезованої системи необхідно отримати перехідну характеристику замкнутої одиничним зворотним зв'язком розімкнутої системи (6-35).

Виконуємо замикання розімкнутої системи, використовуючи вираз для отримання передаточної функції замкнутої системи в вигляді

$$W_{zc}(s) = \frac{W_{pc}(s)}{1 + W_{pc}(s)}. \quad (6-36)$$

Відомо, що передаточна функція визначається як відношення зображень Лапласа вихідного та вхідного сигналів, тобто $W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$, звідки

$$Y(s) = W_{zc}(s) \cdot U(s). \quad (6-37)$$

Зображення за Лапласом вхідної дії - одиничного ступінчастого сигналу $1(t)$ може бути отримано з таблиць перетворень Лапласа []

$$U(s) = L\{1(t)\} = \frac{1}{s}. \quad (6-38)$$

Зображення вихідного сигналу відповідно до (6-37), (6-36) і (6-38)

$$Y(s) = \frac{W_{pc}(s)}{1 + W_{pc}(s)} \cdot \frac{1}{s}. \quad (6-39)$$

Оригінал вихідного сигналу чи, у цьому випадку, перехідну функцію можна отримати шляхом зворотного перетворення Лапласа виразу (6-39). Використовуючи математичний пакет *MathCad*, знаходимо вираз для перехідної функції і будуємо перехідну характеристику, яка наводиться на рис. 6.34.

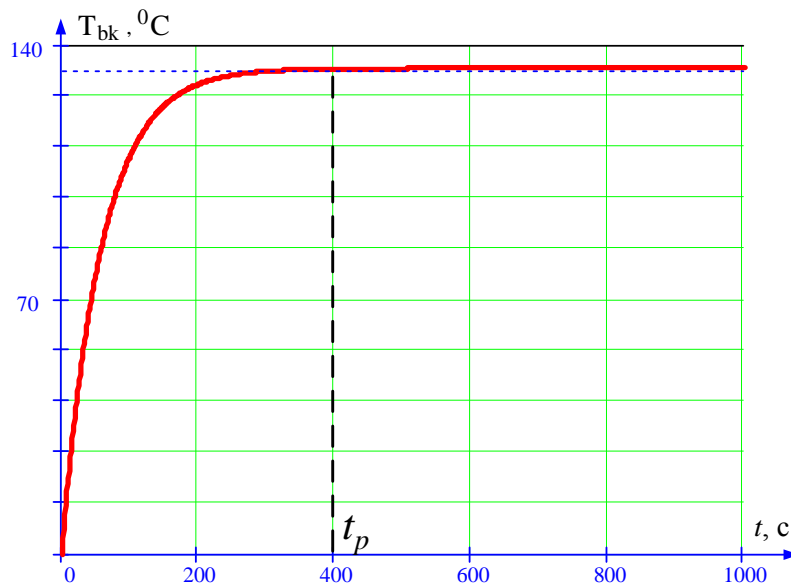


Рис. 6.34 - Перехідна характеристика замкнутої системи за каналом „Температура в содовій печі - Витрата газу на спалювання”

Визначимо основні показники якості: перерегулювання $\sigma = 0\%$ (за завданням ($\sigma \leq 20\%$)) та час регулювання $t_p = 400\text{с}$ (за завданням $t_p < 820\text{с}$). Отримані показники якості перехідного процесу задовольняють заданим, отже, синтез виконано успішно.

i) Отримання передаточної функції коригуючого пристрою.

Передаточну функцію коригувального пристрою $W_k(s)$ можна отримати діленням передаточної функції «бажаної» розімкнутої системи $W_6(s)$ на передаточну функцію незмінної системи, тобто з виразу $W_k(s) = \frac{W_6(s)}{W_{06}(s)}$. В результаті отримаємо

$$W_k(s) = \frac{\frac{0.0001 \cdot (1.2 \cdot 10^5 s + 1)}{s(1.25 \cdot 10^3 s + 1)}}{\frac{0.000084}{1.25 \cdot 10^3 s + 1}} = 1.2 \cdot (1.2 \cdot 10^5 s + 1). \quad (6-40)$$

Як можна побачити як коригуючий пристрій використовується ланка першого порядку, що форсує.

7 РОЗРОБКА АСУТП З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ TRACE MODE 6

Для створення АСУТП у цьому проекті було використано САПР TRACE MODE 6 [20].

7.1 Створення екранної форми АРМ

Екран АРМ служить графічним представленням (поданим у вигляді мнемосхеми) технологічного процесу, за допомогою якого здійснюється індикація основних змінних процесу, а також надається можливість оператору вносити зміни в хід процесів управління.

На рис. 7.1 наведена екранна форма АРМ, створена для автоматизації технологічного процесу отримання кальцинованої соди.

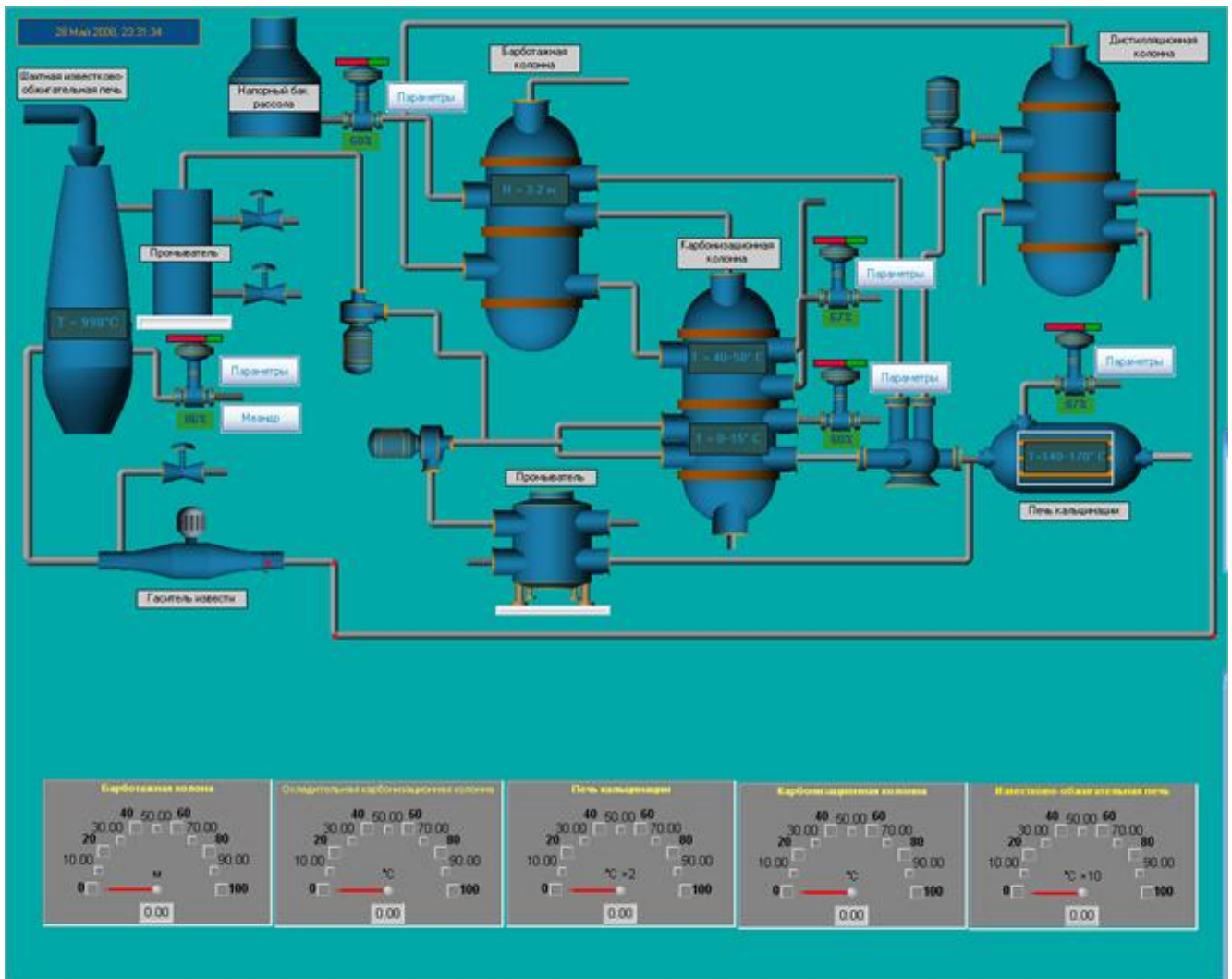


Рис. 7.1 - Екранна форма АРМ оператора технологічного процесу отримання кальцинованої соди

На графічному елементі Тренд (що розташований внизу екрана праворуч) відображаються зміни значень аргументів екрана у часі.

Використовуючи кнопку «Параметри» (рис.7.2), можна викликати спливаюче вікно, в якому можна змінити завдання параметра та закон керування регулятором.



Рис. 7.2 - Вікно установки параметрів

7.2 Створення програмного забезпечення для PC-based контролера

Створимо програму, що реалізує керуючі функції - регулювання температури в печі кальцинації, вапняно-випалюючої печі, барботажно-карбонізаційної колони, охолоджувальної частини барботажно-карбонізаційної колони, а також підтримки рівня рідини в барботажній абсорбційній колоні.

Скористуємось мовою програмування **Техно FBD**. Її характерною рисою є наочність. Складання програми полягає у групуванні відповідних графічних елементів та створенні зв'язків між ними. Використання такого способу програмування практично виключає появу помилок, а також дозволяє легко змінити структуру програми. Отримана схема компілюється засобами TRACE MODE 6, в подальшому отримане математичне забезпечення просто переноситься у PC-based контролер.

Розробимо ПІД-регулятор для управління виконавчим механізмом методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ -вид імпульсної модуляції, при якій під впливом сигналу, що модулює, змінюється тривалість (ширина) імпульсів при постійній частоті їх прямування).

Для цього використовуємо ланку PID (PID), наведену на малюнку 7.3.

Цей блок формує вихідне значення за ПІД-законом від величини, поданої на вхід INP величиною

$$Q_i = KP \times INP_i + \frac{KD \times (INP_i - INP_{i-1})}{\Delta t} + KI \times \Delta t \times \sum_{k=1}^i INP_k,$$

де i – поточний такт перерахунку, KP , KD та KI – відповідно коефіцієнти при пропорційній, диференціальній та інтегральній складових, Δt – період перерахунку блоку в секундах (тривалість такту).

Модуль негативного значення, що подається на вхід KI , передається вихід. Далі при подачі на вхід KI невід'ємного значення, регулювання починається з встановленої (заданої) величини.

Для обмеження величини впливу Q , що управляє, використовуються входи блоку MIN і MAX . Якщо величина управління менша за MIN , то $Q = MIN$, якщо величина управління більша за MAX , то $Q = MAX$, при цьому в обох випадках накопичення інтегральної складової закону регулювання припиняється.

Цей блок обчислює величину керуючого впливу за значенням неузгодження регульованої величини та завдання, яке обчислюється за допомогою блоку X-Y (рис. 7.4), який обчислює неузгодження регульованої величини (Y) із завданням (X).

Введення до алгоритму параметра Δt виключає необхідність перерахунку налаштувань регулятора при зміні періоду перерахунку.

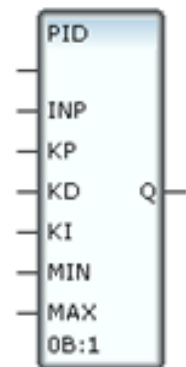


Рис. 7.3 - Ланка PID-регулятора

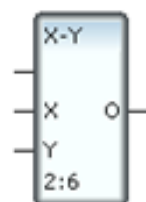


Рис. 7.4 - Блок X - Y

Для формування сигналу управління виконавчим механізмом використовуємо блок ШІМ (PWM), структурна схема якого наведена на рис. 7.5.

При подачі на вхід **INP** сигналу, що модулює, на виході блоку формується широтний модульований імпульсний сигнал одиначної амплітуди з частотою імпульсів $1/2t$, де t - період перерахунку блоку.

Довжина імпульсу округляється до величини, кратної періоду перерахунку блоку. Для компенсації виникаючої у зв'язку з цим помилки всі різниці між округленою та істинною довжиною імпульсів підсумовуються. Коли абсолютне значення цієї суми перевищить тривалість одного такту, один такт додається або віднімається від довжини чергового імпульсу. Подача на вхід блоку **CLR** відмінної від нуля величини скидає (робить рівною нулю) накопичену помилку.

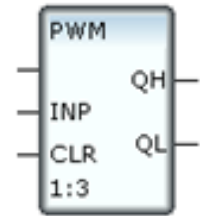


Рис. 7.5 - Блок ШІМ (PWM)

На рис. 7.6 продемонстрована програма на мові Техно FBD, що реалізує ПІД-регулятора з широтно-імпульсним модулятором.

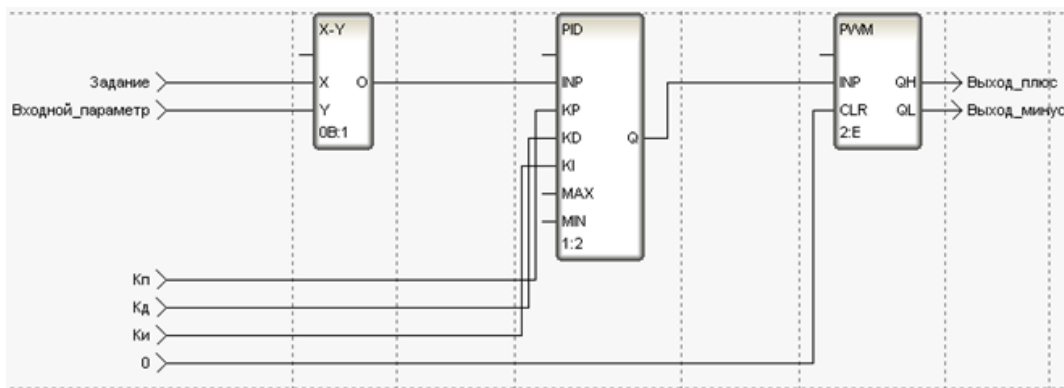


Рис. 7.6 - Програма мовою Техно FBD

За додатного значення вхідної величини імпульси формуються на виході **QH** (при цьому **QL=0**), при від'ємному – на виході **QL** (при цьому **QH=0**). На рис. 7.7 показані вихідні сигнали блоку ШІМ з періодом перерахунку 1 с при синусоїдальному сигналі модулювання (крива 1, амплітуда – відповідно 60 і 100, період – 32 с). Крива 2 відповідає сигналу на виході **QH**, крива 3 на виході **QL**.

Аналогічно складаються програми і для інших контурів управління.

Використовуючи мережу Ethernet, можна перенести створене програмне забезпечення в PC-based контролер.

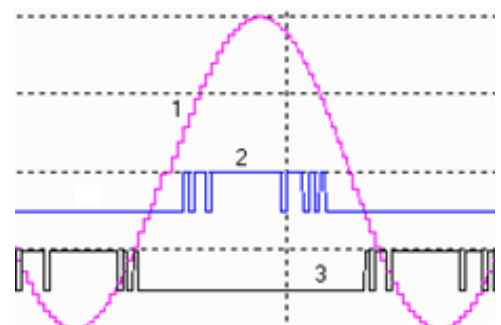


Рис. 7.7 - Ілюстрація роботи блоку ШІМ

ВИСНОВКИ

На підставі завдання розроблено інформаційне, технічне забезпечення та алгоритм роботи системи управління технологічного процесу отримання соди аміачним способом.

Система управління (АСУ ТП) має три рівні, до складу яких входять:

- давачі, встановлені безпосередньо на технологічному обладнанні;
- виконавчі органи, які відпрацьовують отриманий від PC-based контролера сигнал;
- PC-based контролер, який виконує первинну обробку даних отриманих від датчиків, видає керуючий вплив для регулюючих органів, а також виступає сполучною ланкою між об'єктом управління та автоматизованим робочим місцем (АРМ);
- автоматизоване робоче місце (АРМ) до складу якого входить IBM PC комп'ютер із встановленою операційною системою Windows та встановленим програмним комплексом TRACE MODE 6.

В рамках розрахункової частини роботи була розроблена аналітичним способом математична модель содової печі, виконана ідентифікація невідомих параметрів, а також синтезований контур регулювання температурою процесу кальцинування. Розроблено загальний алгоритм роботи системи управління та мнемосхема автоматизованого робочого місця оператора.

Використання сучасних методів управління технологічним процесом, а також новітніх технічних засобів автоматизації дало можливість реалізувати якісно новий рівень управління та підвищило ефективність виробництва, що призвело до:

- підвищення якості продукції, що випускається;
- зниження витрат енергетичних ресурсів за деякими статтями витрат;
- збільшення обсягу продукції, що випускається;
- скорочення термінів простоїв через неполадки та аварії та збільшення міжремонтних термінів роботи обладнання;
- скорочення кількості працівників, необхідних для підтримки процесу у робочому стані та ліквідації аварійних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хімічний комплекс України та світу [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу <https://geografiamozil2.jimdofree.com>.
2. Вікіпедія [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
3. Худолей Г.М., Кушнір'ов В.І., МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КАЛЬЦИНАЦІЇ В ВИРОБНИЦТВІ СОДИ, матеріали ІХ Всеукраїнській науково-методичної конференції «ОСВІТА, НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО: РОЗВИТОК ТА ПЕРСПЕКТИВИ» (Шостка, 25 квітня 2024 року).
4. Вікіпедія [Електронний ресурс], Доступ: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%B4%D0%B0_\(%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%B4%D0%B0_(%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F)).
5. Крашенинников С. А. Технология соды: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1988.
6. Мухленов И.П. и др., Общая химическая технология. В 2-х частях. Часть 2. Уч. для вуза под ред. проф. И.П. Мухленова. Издание 3-е, переработанное и дополненное. 1977.
7. Шевченко, Т. М. Химическая технология неорганических веществ. Основные производства: курс лекций / Т. М. Шевченко, А. В. Тихомирова; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2012. – 198с.
8. Исламов М.Ш. Печи химической промышленности. Изд. 2-е пер. и доп. «Химия», 1975.
9. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: Довідник: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003. – Ч. 1. Вимірювальні пристрої. – 470 с. : іл. – Бібліогр.: с. 467. – ISBN 966-593-232-2. – Доступ: <http://ahv.kpi.ua/promyslovi-zasoby-avtomatyzatsii-dovidnyk-babichenko-ta-in/>.
10. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації [Текст]: Довідник: У 2 ч. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, В. С. Михайлов та ін.; за заг. ред. А. К. Бабіченка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2003. – Ч. 2. Регульовальні і виконавчі пристрої. – 658 с. : іл. – Бібліогр.: с. 644–645. – ISBN 966-593-292-6. – Доступ: <http://ahv.kpi.ua/promyslovi-zasoby-avtomatyzatsii-dovidnyk-babichenko-ta-in/>.
11. Каталоги підприємств-виробників промислових засобі автоматизації [Електронний ресурс] : ВАТ «Підприємство “Мікрол”», ВАТ НВП «МІКРОТЕРМ», ПАТ «ТЕРА», ЗАТ «ПГ “Метран”», «СВ АЛЬТЕРА». – Доступ: <http://ahv.kpi.ua/promyslovi-zasoby-avtomatyzatsii-katalogy-zavodivvyrobnykiv/> – вільний.
12. Офіційний сайт «Neousys Technology» [Електронний ресурс]: Доступ: <https://www.neousys-tech.com/en/news/about-neousys/> - вільний.

13. Теорія автоматичного управління: конспект лекцій: у 2 частинах. Ч. 2 «Синтез лінійних систем автоматичного управління» / укладач Г. М. Худолей. – Суми: Сумський державний університет, 2012. - 87с.
14. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни "Ідентифікація об'єктів управління" [Електронний ресурс] : для студ. спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Г. М. Худолей. — Суми : СумДУ, 2023. — 105 с.
15. Конспект лекцій з дисципліни "Математичне моделювання та застосування ЕОМ в хімічній технології" для студентів спеціальності 6.051301 «Хімічна технологія» усіх форм навчання / Г. М. Худолей. — Суми : СумДУ, 2013. — 183 с.
16. Методичні вказівки щодо оформлення курсових та дипломних проектів. Інструктивні матеріали. Для студентів спеціальності 6.151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології". – Суми.: СумДУ, 1998. – 77 с.
17. Каталог технічних засобів автоматизації Івано-Франківського заводу "Промприлад" / Компанія " Промприлад ". - <https://prylad.com.ua>.
18. Лазарев Ю. Ф. Моделювання на ЕОМ. Навч. посібник. – К.: Корнійчук, 2007. - 290 с.
19. Веремей Е.И, Погожев С.В. Электронное пособие "Nonlinear Control Design Blockset"[Електронний ресурс]. Доступ: <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/index.php>.
20. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності «151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укл.: О.Ю. Олійник, Ю.К. Тараненко, Є.В. Чернецький. – Дніпро:ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 29 с.