

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему Автоматизація процесу термообробки скляних виробів побутового призначення

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кривенко К.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Леві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Освітній рівень магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри автоматки,
електроніки та телекомунікацій

_____ д.т.н., проф. О.В. Шефер
“ ___ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кривенку Костянтиновичу Олександровичу

1. Тема проекту (роботи) **«Автоматизація процесу термообробки скляних виробів побутового призначення»**

керівник проекту (роботи) Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор
затверджена наказом вищого навчального закладу від 04.09. 2023 року № 986-фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 13.12. 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи). Діапазон зміни швидкості обертання привідних роликів 0,052 - 10 об/хв; повинна забезпечуватись стабільність привідного моменту на всьому діапазоні регулювання швидкості; Максимальна потужність електродвигуна – не більше 1,5 кВт.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ та характеристика технологічного обладнання й процесу термообробки скловиробів, як об'єкта керування. Оцінка стану автоматизації процесу термообробки скловиробів та постановка завдань дослідження. Розроблення і дослідження математичної моделі температурного поля. Побудова математичної моделі відпалу для скловиробу. Аналіз механізму виникнення напруженого стану скловиробу в тепловому полі. Адаптація та модифікація математичних моделей до умов температурного поля. Розроблення методики формування технологічних режимів відпалу. Синтез системи автоматизації печі та розроблення апаратних засобів мікропроцесорної системи автоматизації печі. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Загальний вигляд відпалювальної електропічі безперервної дії з сітчастим конвеєром ПЕУ- 323. Алгоритм побудови централізованої АСК ТП. Графічні залежності розподілу температури різних шарів скловиробу. 3D модель скловиробу. Блок схема алгоритму комп'ютерного моделювання температурного поля виробу при відпалі в печі. Результати моделювання потоків розподілу енергії

при відпалі скловиробу. Блок-схема алгоритму розрахунку міцнісного скловиробу при його відпалі. Блок-схема алгоритму формування температурно-часових параметрів технологічного режиму відпалу скла. Ієрархічна структура функціональної схеми системи автоматизації ТП відпалу стекловиробів в печі. Схема електрична принципова керування живленням нагрівачів в зоні печі. Будова ієрархічної розподіленої АСК ТП на базі модульного виконання мікроконтролерів. Варіанти підключення обладнання до мікроконтролерів. Схема керування асинхронним трифазним двигуном приводу печі. Діаграма керування електронагрівачем

6. Дата видачі завдання 04.09.23 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| По р. № | Назва етапів магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | | | Примітка (плакати) |
|---------|---|--------------------------------|-----------|----------|--------------------|
| | | Дата | Категорія | Відсоток | |
| 1 | Вступ та характеристика тех. обладнання і процесу термообробки скловиробів, як об'єкта керування. | 11.10.23 | | 15% | Пл. 1 |
| 2 | Оцінка стану автоматизації процесу термообробки скловиробів та постановка завдань дослідження. | 18.10.23 | I | 30% | Пл. 2 |
| 3 | Розроблення і дослідження математичної моделі температурного поля. | 25.10.23 | | 40% | Пл. 4 |
| 4 | Побудова математичної моделі відпалу для скловиробу. | 14.11.23 | | 50 % | Пл. 5 |
| 5 | Аналіз механізму виникнення напруженого стану скловиробу в тепловому полі. | 21.11.23 | II | 60% | Пл. 6 |
| 6 | Адаптація та модифікація математичних моделей до умов температурного поля з розробленням методики формування технологічних режимів відпалу. | 28.11.23 | | 70% | Пл. 7 |
| 7 | Синтез системи автоматизації печі та розроблення апаратних засобів мікропроцесорної системи автоматизації печі. | 06.12.23 | | 90% | Пл. 8 |
| 8 | Висновки. Оформлення кваліфікаційної роботи та формування додатків. | 13.12.23 | III | 100% | Пл. 9-10 |

Студент _____
(підпис)

Кривенко К. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Шефер О.В.
(прізвище та ініціали)

Зміст

| | |
|---|-----------|
| Вступ..... | 6 |
| 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА..... | 8 |
| 1.1. Характеристика технологічного обладнання і процесу термообробки скловиробів, як об'єкта керування..... | 8 |
| 1.2. Оцінка стану автоматизації процесу термообробки скловиробів з метою реалізації енергозбереження..... | 17 |
| 1.3. Постановка завдань дослідження..... | 21 |
| 2. ДОСЛІДНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА..... | 24 |
| 2.1. Розроблення і дослідження математичної моделі температурного поля скловиробу циліндрично-конічної форми при його відпалі..... | 24 |
| 2.2. Побудова математичної моделі відпалу для скловиробу призматично-циліндричної конфігурації..... | 34 |
| 3. ДОСЛІДНО КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА..... | 41 |
| 3.1. Аналіз механізму виникнення напруженого стану скловиробу в тепловому полі..... | 41 |
| 3.2. Модифікація математичної моделі поля механічної напруги скляних труб при їх відпалі в печі стосовно процесу відпалу скловиробів циліндрично-конічної конфігурації..... | 44 |
| 3.3. Адаптація математичних моделей до умов температурного поля..... | 50 |
| 3.4. Розроблення методики формування технологічних режимів відпалу скловиробів у печі..... | 55 |
| 4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДПАЛУ СКЛОВИРОБІВ | 61 |
| 4.1. Формування принципів, покладених в основу автоматизації печі..... | 61 |
| 4.2. Синтез системи автоматизації печі ПЕУ-323 з комплексними джерелами енергії на функціональному рівні..... | 64 |
| 4.3. Розроблення апаратних засобів мікропроцесорної системи автоматизації печі з комплексними джерелами енергії..... | 70 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4.Розробка програмного забезпечення функціонування мікропроцесорної системи автоматизації процесу відпалу скловиробів..... | 86 |
| Висновки..... | 94 |
| Список використаних джерел..... | 96 |
| Додатки..... | 97 |

Вступ

Скло належить до універсальних матеріалів, що знайшли широке застосування в різноманітних сферах людської діяльності. Це будівництво, де скловироби застосовуються в якості будівельного матеріалу, використовуючи їх не лише для застеклення світлових отворів і дверей, але й використовуючи в якості художнього оздоблення інтер'єрів і перегородок із скловиробів складної конфігурації. Це медична і харчова промисловості, де в силу високої гігієнічності і хімічної стійкості скловиробів інші матеріали є неконкурентоздатними при створенні технологічних ліній по виробництву і транспортуванню харчових продуктів і медичних препаратів з використанням скляних труб для транспортування в самому технологічному процесі або тарного скла різної конфігурації при постачаннях продукту і препаратів для реалізації.

Важливою сферою є побутове призначення скловиробів. Потреба в скловиробах з кожним роком росте, при цьому ускладнюється конфігурація скловиробів. Вони приймають усе більш вишукані художні форми, проте поява переходів складної форми, різного роду звужень, ребер, овальних і еліптичних сполучень, потовщень стінки і тому подібне створює передумови до зниження стану міцності виробу за рахунок можливого зростання залишкової механічної напруги у виробі, зниження якої можна досягти тільки правильно вибраним режимом відпалу, що враховує особливості геометричної конфігурації виробу.

При виробництві скловиробів процес відпалу за енергоємністю стоїть на другому місці після варіння скломаси. Реалізація режимів відпалу скла породжує наступні конфліктуючі ситуації: зниження тривалості відпалу вигідне з точки зору енергетичних витрат, але веде до збільшення тимчасової і залишкової напруги в склі, що негативно позначається на міцності виробу і може спричинити їх руйнування як на етапі термообробки, так і при подальшій експлуатації; навпаки, збільшення часу відпалу добре позначається на споживчих властивостях продукції, але веде до зростання енергетичних витрат, а також до зниження продуктивності. Отже, вибір раціональних режимів

відпалу скловиробів з урахуванням вимог, що пред'являються до якості виробів складної геометричної конфігурації, дозволить понизити собівартість продукції, що випускається, за рахунок впровадження енергозберігаючих технологій.

Розширення номенклатури скловиробів, поява оригінальних геометричних форм, які використовуються в архітектурі при оформленні внутрішніх інтер'єрів будівель, або при виробництві тарного скла, висунули ряд актуальних завдань, пов'язаних з відпалом скловиробів складної конфігурації. Передусім це розробка універсальних інженерних методик розрахунку оптимальних або раціональних режимів термообробки скловиробів заданої конфігурації в автоматизованому діалоговому режимі, для чого необхідно мати в розпорядженні такі динамічні моделі процесу відпалу, які б включали інформацію геометричного характеру, що якраз і породжує основні математичні труднощі при рішенні завдань. Маючи в розпорядженні синтезовані режими термообробки скловиробів заданої конфігурації, виникає завдання точної реалізації цих режимів, що поза сумнівом вимагає створення сучасної мікропроцесорної системи автоматизації технологічного процесу відпалу. Застосування автоматизованих систем керування процесом термообробки скловиробів складної геометричної конфігурації з розвиненими функціями контролю і управління дозволить зменшити енергоспоживання і питомі енергетичні витрати і, зрештою, понизити собівартість продукції, що випускається, при збереженні її споживчих властивостей.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Характеристика технологічного обладнання і процесу термообробки скловиробів, як об'єктів керування

Під час виробництва скловиробів важливою операцією технологічного процесу являється відпал, що забезпечує в результаті певного режиму охолодження виробу розподіл механічної напруги в склі, що гарантують відсутність мимовільних руйнувань або руйнувань від зовнішніх механічних та теплових впливів при експлуатації. Особливу цінність процес відпалу набуває для виробів складної конфігурації, оскільки поява переходів складної форми (кут, ребро, еліпс, звуження, потовщення стінки і тому подібне) призводить до зміни температурного поля, а разом з ним і до істотного зростання залишкової механічної напруги.

На сьогодні для відпалу скловиробів в промисловості застосовуються конвеєрні печі безперервної дії з конвективним способом теплообміну, так як наукові розробки, спрямовані на інтенсифікацію процесу відпалу за рахунок поєднання конвективного і радіаційного теплообміну, не знайшли реального втілення у вигляді промислового тепло технологічного обладнання. Хоча слід зазначити, що існують як вітчизняні - ПКЕ-324, так і зарубіжні KNUD(Бельгія), Pennekamp (Німеччина) теплотехнологічні агрегати відпалу, побудовані на вказаному принципі поєднання різних видів теплообміну. Крім того розроблені печі відпалу нового покоління (1991-1997 рр.), створені переважно на радіаційному способі переносу енергії в ІЧ-спектрі (установки терморадіаційного відпалу серії "Ранок-N", N - кількість тисяч порожнистих виробів в годину) в системі теплообміну "джерело випромінювання - скло - стінка печі". Відмічені наступні переваги печей відпалу нового покоління :

- прискорений відпал(560-420°C) в 3-4 рази;
- зменшена площа по габаритах в 3-5 разів;
- маса металоконструкцій зменшена в 4-5 разів;

- витрата енергії знижена в 2 рази;
- товщина теплоізоляції зменшена в 6-8 разів, зведена до 10-50 мм;
- піч екологічно чиста, не видуває пилових часток шкідливих речовин, безшумна;
- ККД водоохолоджувального пристрою печі відпалу збільшений до 80% використанням селективно-відбиваючих покриттів;
- мала інерційність печей робить можливою комп'ютерну синхронізацію роботи установки "Ранок-N" із склоформуючою машиною при продуктивності 90-150 шт виробів в хвилину.

Такі переваги дозволяють при заміні існуючих конвективних печей вивільнити 75% площі цеху, збільшити його продуктивність.

Теплотехнологічні агрегати відпалу нового покоління хоча і дозволяють істотно інтенсифікувати процес термообробки та все ж таки мають тільки одиничне застосування в промисловості, а економічний стан підприємств доки не створює умов для швидкого впровадження нової техніки. У зв'язку з цим необхідно йти шляхом інтенсифікації тепло технологічного обладнання для відпалу, яке зараз експлуатується, шляхом розробки раціональних режимів термообробки скловиробів на основі енергозберігаючих технологій.

Широко поширеним технологічним агрегатом відпалу скловиробів є відпалювальна піч ПЕУ-323. В якості палива для відпалювальних печей використовують газоподібне і рідке паливо, а також електричну енергію. Використання твердого палива недоцільне, оскільки припускає додаткові витрати на його подрібнення, крім того необхідно боротися з сажею в топці і димарі печі.

Якщо в якості джерела енергії вибрати рідке або газоподібне паливо, то процес регулювання температури зведеться до керування полум'ям факела пальника. У разі, коли нагрівачем є ТЕН, то завдання керування спрощується, оскільки знімати інформацію про параметри такого пристрою і керувати ним набагато легше, що дозволяє досягнути кращої якості керування.

Відпалювальні печі безперервної дії, до яких відноситься піч ПЕУ-323, застосовують для відпалу скловиробів масового виробництва, що мають досить невеликі розміри і просту форму. У цих печах здійснюється безперервний рух виробів, що проходять послідовно температурні зони, що відповідають стадіям режиму відпалу.

Завдяки своїм виробничим характеристикам застосування печей безперервної дії є найбільш виправдане, оскільки дотримується беззупинність процесу виробництва і висока продуктивність.

Найбільш зручна з точки зору реалізації керування горизонтальна конструкція відпалювальних печей безперервної дії з сітчастим конвеєром та електрообігрівом (електропіч ПЕУ-323). Нагрівальні елементи(опори) встановлюють всередині тунеля в місцях, що відповідають температурній кривій відпалу скловиробів.

Для забезпечення заданого температурного режиму по довжині тунеля разом з нагрівачами передбачені і охолоджувальні пристрої - вентилятори, що подають зовнішнє повітря в канали, які примикають до верхньої та бічним сторонам частини тунеля, що обігрівається. Ці вентилятори автоматично включаються у тому випадку, коли температура у відповідній секції перевищує задану.

Переміщуючись за допомогою стрічки сітчастого конвеєра, скляні вироби проходять послідовно чотири зони печі - нагріву(охолодження), витримки, повільного охолодження, швидкого охолодження. Також в печі присутня ділянка зрівнювання температур, розташована конструктивно після зони швидкого охолодження безпосередньо перед розвантажувальним лотком. На цій ділянці температура скловиробів зрівнюється з температурою цехового приміщення, знижуючись до 30-50 °С, тут нагрівачі не встановлюються.

Піч ПЕУ-323(рис.1.1) складається з тунеля відпалу 2, камер 1 для електронагрівачів, каналів 3 для охолоджувального повітря, системи конвективних вентиляторів 5, трьох вентиляторів обдування і вентилятора охолодження 6, сітчастого конвеєра 4, приводної та натяжної станцій. Загальні

зовнішні розміри печі, м: довжина 23,67, максимальна ширина 3,26, максимальна висота 2,51. Тунель відпалу має довжину 18,4, ширину 1,9 і висоту 0,45, а ширина сітки конвеєра 1,8.

Електронагрівні елементи(опори) розміщені всередині тунеля печі в місцях, що відповідають температурній кривій відпалу скловиробів. Всього встановлена чотири секції нагрівачів по 6 в кожній. Сумарна встановлена потужність електронагрівачів складає 250 кВт.

Продуктивність печі ПЕУ-323 складає до 50 тонн виробів в добу. Швидкість руху транспортуючого пристрою можна встановлювати в межах від 0,04 до 0,8 метрів за хвилину.

Відпалювальна електропіч безперервної дії має декілька теплових зон з самостійним регулюванням температури, що дає можливість реалізовувати різні температурні режими. Довжина зони печі зазвичай дорівнює 1,5-2 метри, але для реалізації розрахункового теплового режиму процесу відпалу може бути збільшена до 2,5 - 3 метрів, або, навпаки, зменшена до 0,8 - 1,2 метра.

Нагрівачі в електропечах встановлюються на зведенні, черені і бічних стінках. В основному, конструкція конкретної електричної печі відпалу безперервної дії визначається механізмом переміщення виробів по печі і температурним режимом, що реалізовується при цьому.

Для переміщення виробів всередині робочого простору електропечі застосовується конвеєр, натягнутий між двома валами, один з яких є ведучим, а інший - веденим. Щоб не підтримувати на вазі стрічку конвеєра при транспортуванні по печі виробів, стрічка пересувається по рольгангу.

Для обертання ведучого валу застосовується електропривод. В якості стрічки конвеєра використовується металева сітка, виконана з жароміцних хромонікелевих сплавів. У печі ПЕУ-323 здійснено винесення валів конвеєра і його нижньої гілки із зони високих температур, тобто винесення кінців конвеєра за межі футерування. Перевага такого методу полягає в довговічності служби конвеєра, а недоліком є винесення деякої кількості тепла за межі каналу відпалу печі, що збільшує теплові втрати.

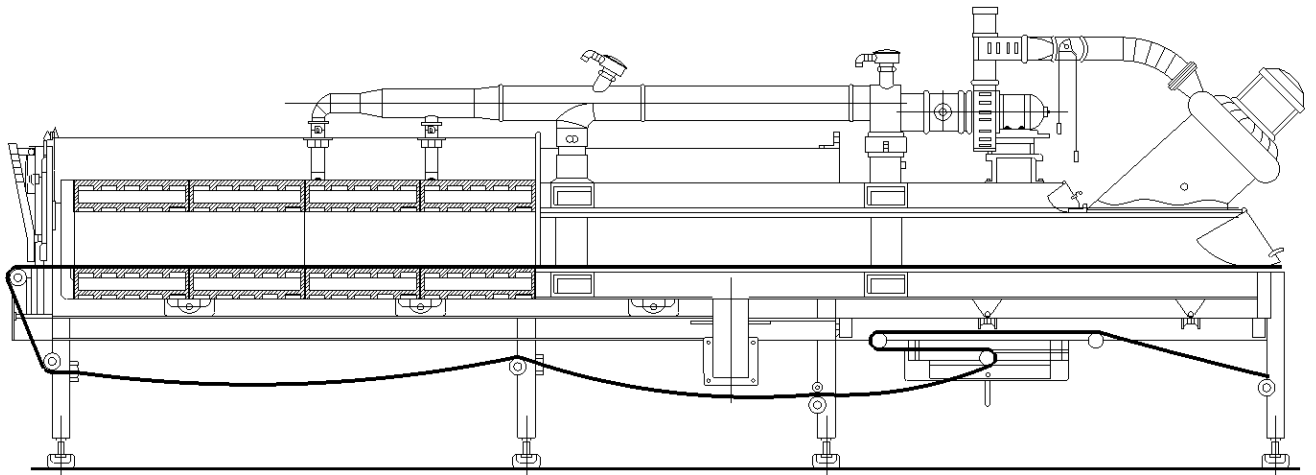


Рисунок 1.1- Відпалювальна електропіч безперервної дії з сітчастим конвеєром ПЕУ- 323

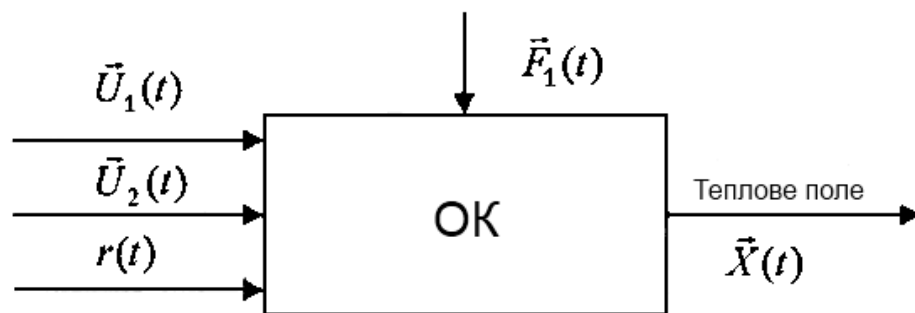


Рисунок 1.2 - Піч для відпалу скловиробів як об'єкт керування (OK)

Керуючи роботою електронагрівачів і вентиляторів, можна створювати в залежності від об'єму печі потрібне поле температур, а керуючи приводом стрічки конвеєра, можна регулювати швидкість процесу відпалу. Таким чином, піч як об'єкт керування можна представити у вигляді багатозв'язкового об'єкту керування (рис.1.2) з декількома входами і одним виходом : вектор $U_1(t)$ є вектором керуючих впливів, компонентами якого є парціальні керування $\{u_i(t)\}$, що визначають стан електронагрівачів при використанні ТЕНів, а у разі застосування газового палива - стан дросельних заслінок подачі газу на форсунки; $U_2(t)$ - вектор керуючих впливів, що визначає режими роботи вентиляторів та її інтенсивність; $r(t)$ – керуючі впливи, що визначають стан приводу решітчастого конвеєра, тобто що здійснюють стабілізацію швидкості

протягування скловиробів; $F(t)$ - вектор обурюючих впливів, компоненти якого визначаються з одного боку температурним станом зовнішнього середовища, а з іншого боку характеризують коливання завантаження конвеєра; $X(t)$ - вектор стану об'єкту керування, тобто теплового поля, що створюється в секціях печі.

Завдання керування процесом відпалу скловиробів полягає в забезпеченні розрахункового режиму відпалу, що призводить до послаблення залишкової механічної напруги до норми, що гарантує тривалу і надійну експлуатацію скляних виробів.

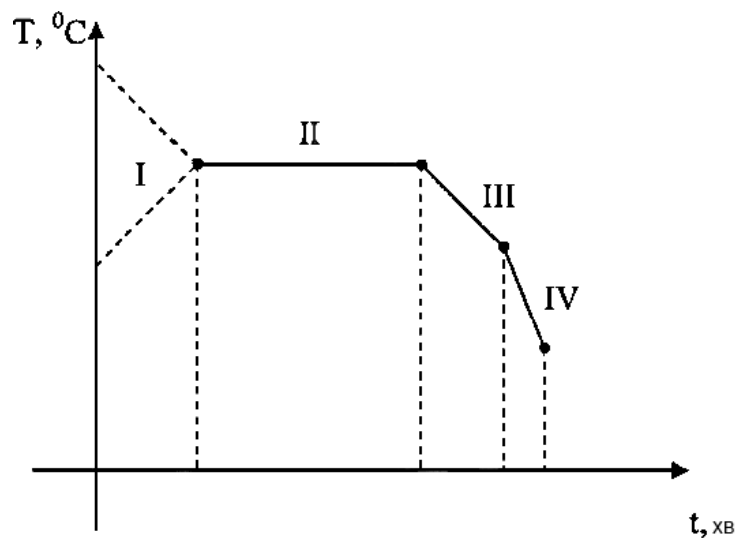


Рисунок 1.3 - Режим відпалу скловиробів

В промисловості процес відпалу більшості скляних виробів проводять в чотири стадії (рис.1.3). Основними показниками режиму відпалу скляних виробів є температура відпалу та режим охолодження виробів. Температура відпалу залежить від хімічного складу скла, а режим охолодження, тобто по суті, сам процес відпалу - від вимог по надійності і експлуатації, що пред'являються до скловиробу, що відпалюється, його товщина, конфігурація, температура відпалу і конструкція печі.

Для встановлення режиму відпалу скловиробів визначають температурний інтервал, в якому можуть виникнути або зникнути залишкова напруга. Цей інтервал характеризується двома критичними температурами відпалу : вищою і нижчою.

Під вищою температурою відпалу мають на увазі температуру, при якій напруга в склі зменшується в 10 разів за час, рівний 5 хв.

Під нижчою температурою відпалу мають на увазі температуру, при якій напруга зменшується в 10 разів за час, в 100 разів більше, ніж при верхній температурі відпалу, тобто за 500 хв. Їй відповідає в'язкість 10^{16} пз. Відпал може йти і нижче цієї температури, що відповідає в'язкості 10^{16} пз, проте у край повільно. При ній напруга зменшується в 10 разів за час в 1000 разів більше, ніж при верхній температурі.

Вища температура відпалу теоретично відповідає межі крихкого стану скла, і, отже, її можна визначити по кривій теплового розширення, по якій знаходять фізико-хімічні параметри скла цього хімічного складу. Через можливу деформацію виробу температуру відпалу в печах встановлюють на 20-30° С нижче.

Знаючи хімічний склад цього скла і температуру відпалу, можна приблизно визначити вищу температуру відпалу розрахунковим шляхом.

Оскільки реально у відпалювальних печах вищу температуру відпалу занижують щоб уникнути руйнування виробів, то її можна прийняти рівною 550°С.

Нижча температура відпалу скла за теоретичними даними на 48-58° нижче вищої температури відпалу. Практично цю різницю для звичайних стекол приймають рівною 100°, а для оптичного скла - 150°. Означає нижча температура відпалу рівна 450°С.

Розрахованого діапазону температур необхідно дотримуватися при проведенні процесу відпалу скляних пляшкових виробів. Для отримання міцного і надійного в експлуатації виробу немає необхідності повністю усувати залишкову напругу. Досить її ослабити до певних норм, які задаються стандартами і технічними умовами залежно від виду, призначення виробів і умов їх подальшої експлуатації.

Найбільш точним при розрахунку температурних режимів відпалу вважається метод Даувальтера, ґрунтований на вимірі характеристик

відповідних властивостей скла(щільність, модуля Юнга, модуля зрушення, в'язкості, теплопровідності та ін.) та на обчисленні по них усіх параметрів відпалу. Метод досить трудомісткий, припускає наявність інформації про процеси, що протікають при відпалі.

Розрахунок режимів відпалу полягає у визначенні координат точок зламів температурної кривої (рис.1.3), тобто для кожної із стадій I - IV знаходяться значення температур і інтервали часу відпалу на цій стадії. Стадія попереднього нагріву або охолодження (відрізок I) - вироби мають бути доведені до заданої вищої температури відпалу зі швидкістю, що не викликає їх руйнування. Скло нагрівають(охолоджують) до температури відпалу зі швидкістю від $20/a^2$ до $30/a^2$ град/хв, де a – напівтовщина суцільних скляних виробів (наприклад, листів, плиток) і товщина порожнистих скляних виробів в сантиметрах. Ця швидкість залежить від хімічного складу скла, форми виробу і тому подібне. Так, порожнистий пляшковий виріб завтовшки 3,5 мм можна нагрівати(охолоджувати) зі швидкістю(град/хв.):

$$\tau = \frac{23}{(0,35)^2} = 187,75$$

Відповідно, тривалість охолодження виробу, що має при виході з формувальної машини середню температуру близько 850°C , до вищої температури відпалу 550°C , складатиме:

$$t = (850^\circ\text{C} - 550^\circ\text{C}) / 187,75 \text{ град /хв} = 1,6 \text{ хв.}$$

Стадія витримки при постійній температурі(відрізок II) - вироби витримуються при вищій температурі відпалу впродовж часу, достатнього для заданого зменшення напруги. Час витримки розраховують по формулі $\tau = 102a^2$, де a - напівтовщина порожнистих і суцільних виробів в см. Для даного прикладу з пляшковим склом час витримки складе:

$$\tau = 102 \cdot (0,35)^2 = 12,5 \text{ хв.}$$

Стадія повільного охолодження(відрізок III) - вироби охолоджуються з досить малою швидкістю, що не допускає виникнення нової залишкової напруги, що перевищує задану для цієї стадії. Ця стадія є найбільш

відповідальною з усього процесу відпалу. Якщо форсувати охолодження скла в цьому інтервалі, то в ньому може виникнути руйнівна залишкова напруга, яку в процесі подальшого охолодження вже не можна усунути.

Швидкість охолодження виробів в небезпечному інтервалі найбільш залежить від товщини виробу і його конфігурації, від допустимої величини залишкової напруги.

Критерієм хорошого відпалу відповідальних скляних виробів вважається наявність в них залишкової напруги що за значенням не перевищують 5% величини допустимої напруги.

При небезпечному інтервалі між верхньою і нижньою температурами відпалу, рівному 100°C, тривалість охолодження складе:

$$t = 100 \text{ }^\circ\text{C} / 2,7 \text{ град / хв} = 37 \text{ хв} .$$

Стадія швидкого охолодження(відрізок IV) - вироби охолоджуються зі швидкістю, що забезпечує допустиму тимчасову напругу. На цій стадії охолодження слід вести гранично обережно, оскільки надмірна тимчасова напруга може також викликати руйнування виробу. Швидкість швидкого охолодження Адамс і Вільямсон рекомендують визначати по формулі:

$$v = \frac{10}{a^2} \text{ град / хв} = \frac{10}{(0,35)^2} \text{ град / хв} = 81,6 \text{ град / хв}$$

Час, що витрачається на цій стадії, при охолодженні виробу від нижньої температури відпалу 450°C до температури 100°C складе:

$$t = (450^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) / 81,6 \text{ град / хв} = 4,3 \text{ хв}$$

Зона зрівнювання температур передує безпосередньому виходу виробів з печі. Таким чином, сумарний час, що витрачається на відпал одного виробу, дорівнюватиме 55,4 хвилинам.

На рис.1.4 приведено графічне зображення розрахункового режиму відпалу скловиробів, виконане в масштабі часу(у хвиликах) та масштабі температур(у °C). За цим законом, що показує характер зміни температури в часі, повинна змінюватися температура кожного скловиробу в печі.

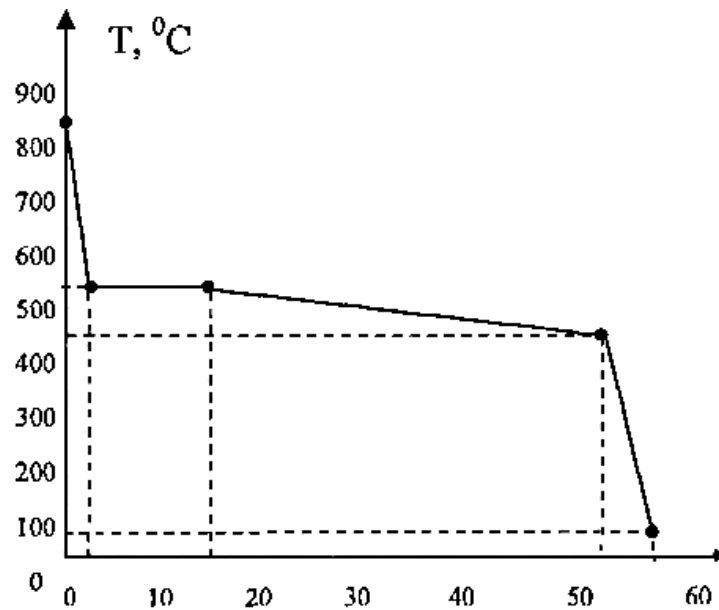


Рисунок 1.4 - Температурний режим відпалу штучних скловиробів

Як видно, наведений приклад розрахунку режимів відпалу на основі емпіричних залежностей слабо враховує конфігурацію скловиробів, крім того через відсутність математичної моделі процесу зміни теплового поля і пов'язаної з ним зміни поля механічної напруги в скловиробах важко дати рекомендації по інтенсифікації процесу відпалу, які могли б привести до зниження енерговитрат. У зв'язку з цим було б доцільно скористатися для розрахунку режимів відпалу не емпіричними залежностями, а точнішими математичними моделями тепло технологічного процесу відпалу.

1.2. Оцінка стану автоматизації процесу термообробки скловиробів з метою реалізації енергозбереження

Існуючі системи автоматичного керування печою підрозділяються на безперервні системи стабілізації температури та швидкості протягування сітчастого конвеєра і цифрові (мікроконтролерні) системи керування із змінюваною програмою стабілізації тих же змінних технологічного процесу, що являється, двозв'язковим об'єктом керування (рис.1.2). У безперервних системах керування прийнята класична схема побудови системи стабілізації по

каналу регулювання температури, де як датчики температури використовуються термопари або терморезистори, а пристрій керування побудований на базі автоматичного потенціометра, що виконує функції задаючого і порівнюючого пристроїв. Сигнал розузгодження є основою для керування нагрівачами. Заданий температурний режим по довжині тунеля електропечі ПЕУ-323 забезпечується разом з нагрівачами ще і охолоджувальними пристроями - вентиляторами, що подають зовнішнє повітря в канали, що примикають до бічних сторін і верхньої частини тунеля, що обігрівається. Керування вентиляторами здійснюється підсистемою програмно-логічного керування. Стрічка сітчастого конвеєра керується за допомогою системи стабілізації швидкості обертання двигуна, побудованої за принципом зворотного зв'язку. Впровадження обчислювальних машин, що керують, при створенні систем автоматизації технологічного процесу відпалу привело до створення централізованих АСК ТП, при цьому функції керування намагалися в максимальному ступені зосередити в центральному керуючому обчислювальному комплексі.

При такій побудові АСК ТП живучість всієї технологічної системи значною мірою залежала від надійності КОК. Відмова КОК була пов'язана з великими втратами, могла привести до зупинки обладнання і навіть до аварії на технологічній лінії.

Існуючий автоматизований комплекс на базі промислового контролера "Реміконт Р-130" ефективно вирішує завдання безперервного і логічного регулювання технологічних величин, має органи оперативного керування, контролю і індикації. Його функціональні можливості включають:

- строгу номенклатуру електричних сигналів входів/виходів;
- реалізацію широкого кола алгоритмів керування;
- наявність готових алгоритмічних блоків;
- ручне налаштування параметрів;
- безударна зміна режимів роботи;

- об'єднання до 15 контролерів в єдину обчислювальну мережу, що вирішує загальну задачу керування;
- запис в ППЗП запрограмованої інформації.

На рис.1.5 показаний приклад побудови центральної АСК ТП, яка була реалізована на мікроконтролері "Реміконт Р-130". В якості КОК був використаний мікроконтролер, функції диспетчера мережі виконував контролер СК-9600, а інформація з об'єкту керування поступала через ряд спеціалізованих перетворювачів, працюючих безпосередньо з датчиками.

Застосування застарілих мікропроцесорних комплексів, незважаючи на ряд достоїнств, має істотні недоліки, які впливають з умови морального старіння такого обладнання, що несе інтелектуально-інформаційне навантаження в системі, і рішення схемотехніки :

- в таких системах відсутня можливість гнучкої перебудови режимів відпалу при переході до інших типорозмірів скловиробу з причини обмеженості обчислювальної потужності, що не дозволяє реалізовувати складні алгоритми розрахунку раціональних режимів відпалу;
- системи такого типу критичні до відстаней між функціональними елементами, які не повинні допускати падіння рівня інформаційного сигналу при його проходженні по лініях зв'язку, що обмежує охоплювану площу технологічного процесу і примушує застосовувати додаткові транслятори і репітери сигналів;
- при відмові одного з локальних регуляторів системи потрібна зупинка усього технологічного процесу, або відключення одного локального контура регулювання для заміни пошкодженого блоку;
- при відмові керуючого обчислювального комплексу або диспетчера мережі потрібна зупинка усього технологічного процесу;

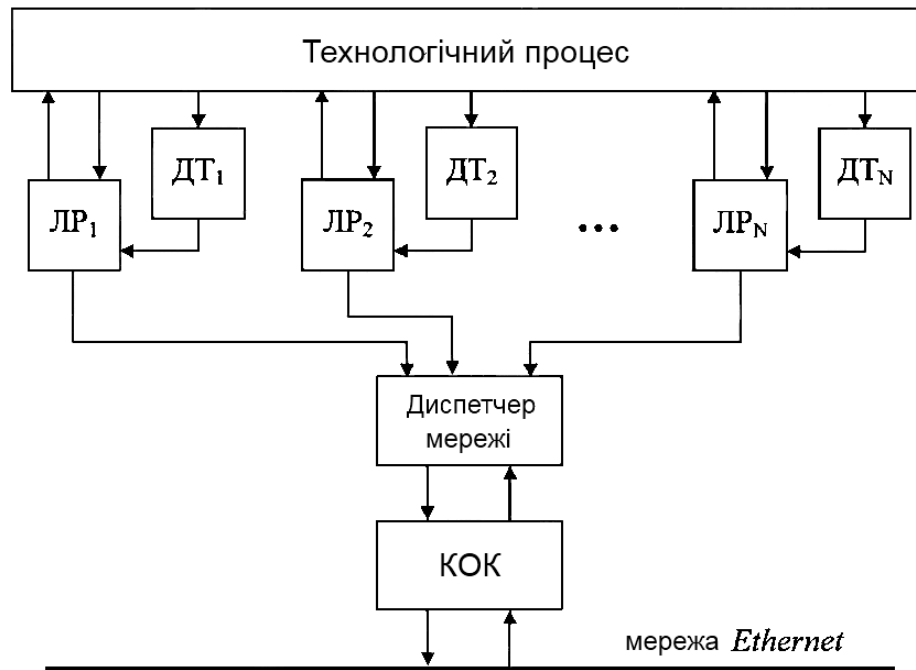


Рисунок 1.5 - Принцип побудови централізованої АСК ТП;
 КОК –керуючий обчислювальний комплекс; ЛР - локальний регулятор;
 ДТ - датчик технологічного процесу

- обслуговування централізованої САК такого типу вимагає висококваліфікованих робочих кадрів, що вміють без наявного діагностичного обладнання або програмного забезпечення швидко і точно визначити причину несправної роботи системи;

- існує обмеження в застосуванні такого мікропроцесорного обладнання по причині складності, а іноді і неможливості поєднань функцій контролю і керування, з одного боку, і діагностики технічного стану газового обладнання, яке використовується при реалізації принципу комплексування енергоносіїв, з іншого боку, що дуже важливо через високу вибухонебезпеку газу.

Перераховані недоліки вимагають їх обов'язкового усунення шляхом розробки як досконаліших методів розрахунку режимів відпалу та їх швидкого введення в якості параметричних уставок, так і застосування сучасних технічних засобів керування, що допускають швидку і гнучку зміну законів керування, наприклад, шляхом створення керуючих програм для мікроконтролерів системи автоматизації, написаних в середовищі TraceModeLagoon.

1.3. Постановка завдань дослідження

Як видно з проведеного аналізу технологічного обладнання, методів отримання параметрів режимів відпалу скловиробів і існуючих систем автоматизації, що використовуються для реалізації розрахункових режимів відпалу і стабілізації їх параметрів, нині у зв'язку з ускладненням конфігурації скловиробів виникають певні труднощі у виробництві продукції, точності, що відповідає нормативним вимогам. Це викликано відсутністю математичних моделей теплового поля і поля залишкової напруги, що показує їх характер при зміні температури середовища для скловиробів складної конфігурації, а застосування емпіричних методик розрахунку, що добре зарекомендували себе для плоскої скляної пластини, не дозволяють враховувати концентрацію напруги при різких вигинах, появі ребер і тому Математичні моделі відпалу скляних труб і будівельних склоблоків можуть послужити основою для їх адаптації стосовно виробів складної геометричної конфігурації з метою отримання динамічних моделей теплового поля і поля механічної напруги в скловиробі при його охолодженні. Судячи з початкових моделей для труб і склоблоків, розрахунок параметрів режиму відпалу для виробів складної конфігурації вимагає застосування персональних ЕОМ, в силу чого при рішенні задачі автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів доцільно змінити підхід до проектування системи керування в цілому, оскільки існуючі системи автоматизації мають значні обмеження по виконуваних функціях. наприклад, безперервні системи позбавлені можливості визначення параметрів режиму відпалу по геометричній конфігурації скловиробу і його математичної моделі відпалу, а цифрові системи, побудовані на базі промислового контролера "Реміконт-130", також не мають необхідної обчислювальної потужності, щоб вирішувати завдання цифрового моделювання процесу відпалу скловиробів, в результаті якого синтезується алгоритм відпалу, що реалізовується нижнім рівнем системи автоматизації. Крім того, в приведених системах неможливо здійснити автоматично діагностику технічного стану

обладнання як з точки зору його працездатності, так і в порядку отримання інформації про наявність або відсутність полум'я, продуванню пічного простору з метою усунення газу перед розпалом пальників і тому подібне, що дуже важливо в силу вибухонебезпеки газу, особливо у разі застосування комплексних джерел енергії(газу і електроенергії) в печі.

Удосконалення систем автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів складної геометричної конфігурації повинно здійснюватися у напрямі подолання відмічених недоліків існуючих систем автоматизації і інженерних методик синтезу алгоритмів відпалу. Останні повинні базуватися не на емпіричних розрахунках, а на математичних моделях відпалу, побудованих для скловиробів з урахуванням їх геометричної конфігурації і наявності внутрішньої повітряної порожнини.

Отже, є об'єктивні передумови для вирішення наступного науково-технічного завдання : розробити інженерну методику проектування і структуру автоматизованої системи керування відпалом скловиробів в конвеєрних печах безперервної дії з комплексуванням енергоджерел, що реалізовує синтезовані алгоритми раціональних режимів відпалу скловиробів складної геометричної конфігурації.

Рішення поставленої задачі здійснюється поетапно шляхом послідовного розгляду наступних завдань:

- отримання математичних моделей теплового поля і поля механічної напруги в скловиробі складної конфігурації при його відпалі в конвеєрних печах безперервної дії;
- розробка інженерної методики синтезу раціональних режимів відпалу скловиробів складної геометричної конфігурації на основі цифрового моделювання процесу відпалу конкретних виробів;
- розробка інженерної методики проектування і структури системи автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів складної конфігурації в конвеєрних печах безперервної дії з комплексуванням джерел енергії.

Поставлена мета досягається шляхом адаптації математичних моделей процесу відпалу скляних труб і будівельних склоблоків, які можна використати щодо скловиробів циліндрично-конічної і призматично-циліндричної конфігурації з подальшим використанням кінцево-різницевих рівнянь для побудови цифрової моделі динаміки теплового поля і поля механічної напруги в скловиробі при його охолодженні в процесі відпалу. Для вирішення поставлених завдань застосовані методи математичного моделювання, диференціального і інтегрального числення, теорії автоматичного керування і системного аналізу, а також використані відомості про програмно-апаратні засоби сучасної електроніки і обчислювальної техніки.

2. ДОСЛІДНО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1. Розроблення і дослідження математичної моделі температурного поля скловиробу циліндрично-конічної форми при його відпалі

Аналіз номенклатури скловиробів різного призначення, що випускаються скляними заводами, показує, що форми скловиробів складної конфігурації, що найчастіше зустрічаються, містять такі форми як циліндр, усічений конус, прямокутну призму. У зв'язку з цим доцільно провести розробку і дослідження математичних моделей температурних полів скловиробів при їх відпалі на прикладі універсального скловиробу пляшкової форми як найбільш поширеного виробу з підвищеними експлуатаційними вимогами, що пред'являються до нього.

Розглянемо спочатку простішу форму, а саме, циліндрично-конічний виріб, який використовується як тарне скло. Скляна тара має бути механічно міцною, термостійкою при встановленому перепаді температур, мати достатній опір гідростатичному тиску і розчавлюванню під навантаженням.

При нагріві та охолодженні скловиробу в ньому утворюється напруга стискування і розтягування, яка розподіляється по товщині скла. При цьому внутрішньою(власною) називають напругу, урівноважену в межах тіла без участі механічних або температурних дій. Розрізняють тимчасову і постійну(залишкові) напругу.

Перші виникають при нагріванні і охолодженні скла внаслідок нерівномірності температурного поля в об'ємі виробу, що викликає нерівномірні пружні деформації, зникаючі при вирівнюванні температури; напруга, що залишилася в склі після вирівнювання температур, називається постійною.

У склі, як у будь-якому ізотропному твердому тілі, деформації (розтягування, стискування), що з'являються при зміні температури, не викликають напруги за умови, якщо усі елементарні об'єми скла прогріваються

одночасно і рівномірно, тобто мають однакову температуру. Проте в дійсності ця умова не виконується: у зв'язку з низькою теплопровідністю скла у виробі виникає градієнт температури, елементарні об'єми розширюються(стискаються) нерівномірно, що призводить до утворення внутрішньої пружної напруги. При охолодженні скловиробу вказана властивість призводить до виникнення постійної, або залишкової механічної напруги в скловиробі. Як видно, величина і характер розподілу механічної напруги залежить як від форми скловиробу, так і від температурного поля в ньому, яке виникає та змінюється в процесі відпалу в печі. У зв'язку з цим побудова моделі розподілу поля механічної напруги припускає спочатку отримання математичної моделі температурного поля. Виберемо скловиріб, форма якого буде комбінацією циліндричних і конічних форм (таблиця.2.1).

Таблиця 2.1 - Форми скловиробів для аналітичних досліджень

| Виріб | Розміри в мм | | | Вид скла |
|----------|--------------|--------|-------|-------------|
| | Горло | Корпус | Виріб | |
| Виріб №1 | 40,5±1 | 85±1 | 203±1 | Напівбіле |
| Виріб №2 | 30 | 45 | 55 | Знебарвлене |

При моделюванні температурного поля, що виникає в склотарі при її відпалі в печі, у відповідність з особливостями ускладнення завдання через складність геометричної конфігурації, приймемо наступні обмеження:

- теплообмін між поверхнею пляшки і повітряним простором зовні пляшки здійснюється, в основному, конвекцією;
- теплообмін між поверхнею пляшки і повітряним простором усередині пляшки здійснюється, в основному, теплопровідністю;
- повітряний простір усередині пляшки є замкнутим об'ємом;
- температура повітря усередині пляшки змінюється у відповідність з рівнянням теплопровідності;

- конічна частина пляшки розглядається як сукупність циліндричних елементів (рис.2.1);

- теплоємність(c), щільність(ρ) скла вважаються постійними величинами;

- радіаційна складова теплообміну враховується ефективною теплопровідністю скла.

Як впливає з таблиці 2 для моделювання температурного поля скловиробу при відпалі вибрані два вироби ідентичної конфігурації, але різних типорозмірів.

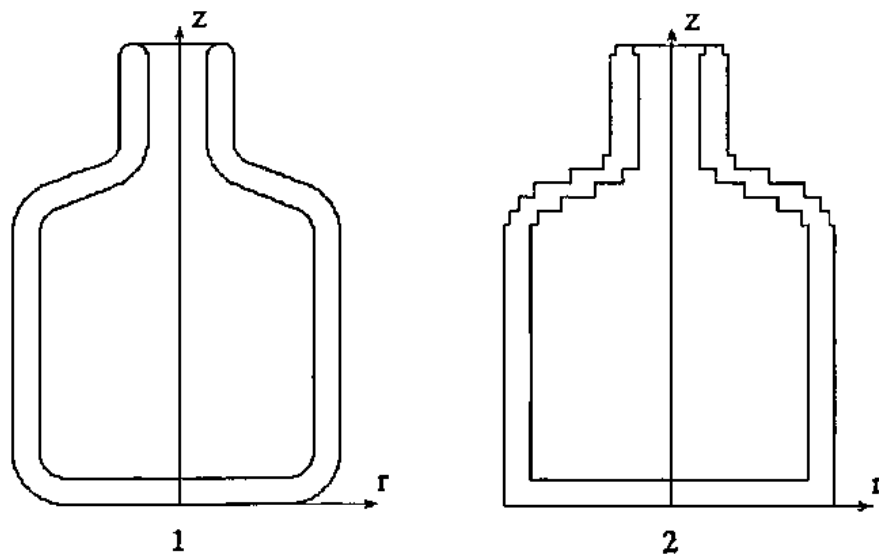


Рисунок 2.1 – Скловиріб, що досліджується

а - початкова форма; б - спрощена розрахункова форма

Для отримання температурного поля досліджуваних зразків можна скористатися двовимірними рівняннями теплообміну. Вони дозволяють врахувати кожен циліндричний елемент пляшки і взаємозв'язок між ними. Диференціальне рівняння, що описує процес зміни температури в часі в скловиробі циліндрично-конічної форми при відпалі в циліндричних координатах записується у вигляді:

$$\frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda_1(T_1(r, z, t))}{c_1 \rho_1} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

де $T(r,z,t)$ - функція розподілу температури; $\lambda_1(T_1(r,z,t)), c, \rho$ - фізико-хімічні параметри скла; r, z - циліндричні координати; t - час. Граничні умови зовні скловиробу описуються як:

$$\lambda_1(T_1(r,z,t)) \frac{\partial T_1(r,z,t)}{\partial r} = h(T_1(r,z,t) - T_{cp}). \quad (2.2)$$

Граничні умови всередині виробу задаються системою рівнянь :

$$\begin{cases} \lambda_1(T_1(r,z,t)) \frac{\partial T_1(r,z,t)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(r,z,t)}{\partial r}, \\ T_1(r,z,t) = T_2(r,z,t), \end{cases} \quad (2.3)$$

де $r = R_2$ внутрішній діаметр циліндричного елемента, λ_2 - теплопровідність повітря, $T_2(r,z,t)$ - температура повітря всередині циліндричного елемента.

Початкові умови приймаються у виді:

$$T_1(r,z,t_0) = T_2(r,z,t_0) = T_0. \quad (2.4)$$

Теплообмін повітря, що знаходиться всередині скловиробу, також описується диференціальним рівнянням другого порядку :

$$\frac{\partial T_2(r,z,t)}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r,z,t)}{\partial z^2} \right), \quad (2.5)$$

Таким чином, спільно вирішуючи рівняння(2.1) -(2.5), можна отримати шукане температурне поле даного скловиробу при відпалі. Аналітичне рішення такої системи рівнянь дуже складне, тому скористаємося чисельним методом рішення. Для цього переведемо рівняння(2.1) - (2.5) в кінцево-різницеву форму і складемо систему кінцево-різницевих рівнянь, що описують температурне поле в циліндрично-конічному скловиробі з урахуванням представлення конічної частини у формі послідовності кілець різного діаметру.

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\min(c_1) \min(\rho_1) \Delta r_1^2}{3 \max(\lambda_1)}, \frac{c_2 \rho_2 \Delta r_2^2}{3 \lambda_2} \right\}. \quad (2.7)$$

Рішення проведемо методом сіток. Його застосування полягає в послідовному розбитті розглядуваної форми на вкладені одна в одну циліндричні області - шари. По черзі розраховується кожен шар на кожному кроці часу. Загальне рішення формується з сукупності розрахунків усіх циліндричних фігур(з урахуванням сполучення усіх кілець), якими представлений скловиріб.

Комп'ютерне моделювання процесу зміни температурного поля скловиробу циліндрично-конічної форми з урахуванням геометричних розмірів виробу (№1, №2) при відпалі виробів в печі здійснено у відповідність з розробленою програмою, приведеною нижче і що реалізовує метод сіток стосовно математичної моделі відпалу (2.6).

Маючи в розпорядженні цифрову модель процесу відпалу скловиробів циліндрично-конічної форми(вироби №1 і №2), реалізованої у формі приведеної програми ПР-1, проведено дослідження температурних полів для різних ділянок скловиробу по координаті Z та різних шарів по товщині виробу, тобто по координаті r . З безлічі температурних полів вибрані найбільш показові для ілюстрації з точки зору критичних швидкостей охолодження - середній і внутрішній шари, для яких наведено розподіл температур по осі Z (кожна крива відповідає певному рівню по висоті виробу) (рис.2.2, рис.2.3).

Як видно з приведених рисунків (рис.2.2 та рис.2.3), криві температурного поля як для середнього, так і для внутрішнього шару скловиробу мають явно виражену міноранту (крива 1) і мажоранту(крива 2), причому міноранта відповідає розподілу температур в часі в області конічної частини скловиробу, відповідній напіввисоті усіченого конуса, що утворює перехід до горлової частини, а мажоранта характеризує розподіл температур в часі для циліндричної частини(корпуса) біля дна пляшки.

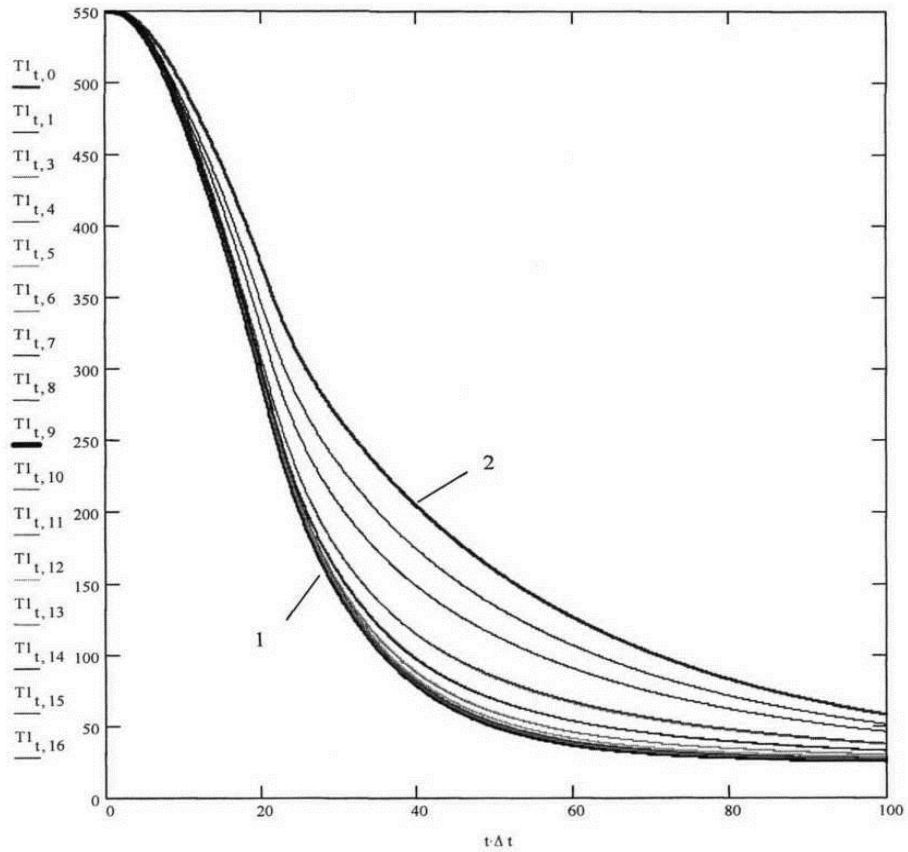


Рисунок 2.2 - Розподіл температури середнього шару по осі z для виробу №1

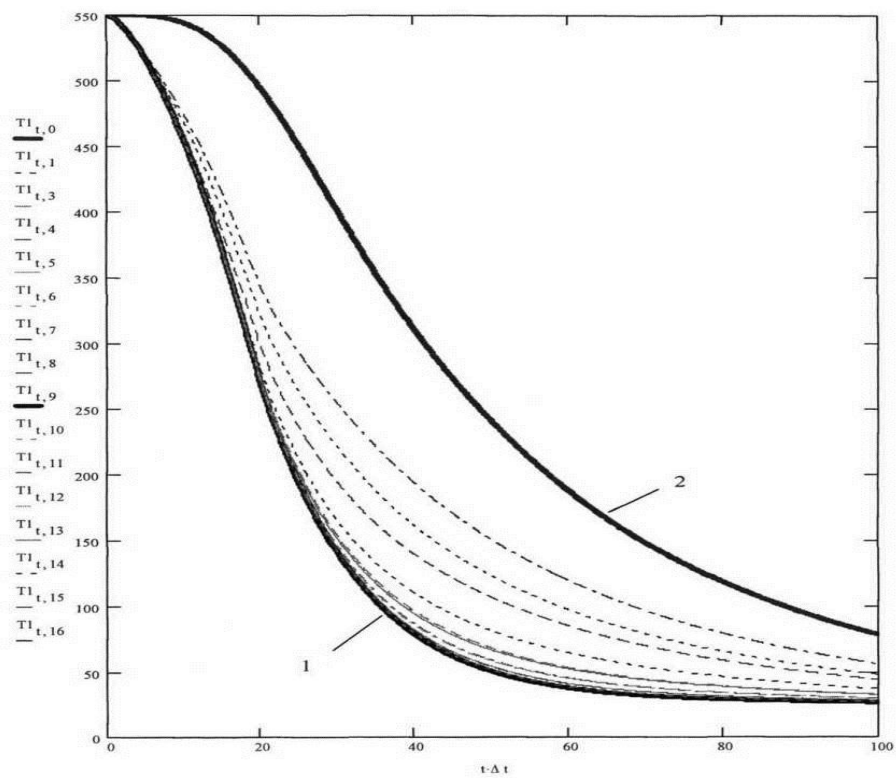


Рисунок 2.3 - Розподіл температури внутрішнього шару по осі z для виробу №1

Проміжні криві, розташовані між мінорантою і мажорантою відповідають іншим значенням координати Z .

Комп'ютерне моделювання температурних полів, проведене для виробу №2, дало аналогічну закономірність розподілу температур в часі по висоті скловиробу залежно від виду елементарних геометричних форм, що визначають загальну конфігурацію тарного скла і шару(рис.2.4-середній, рис.2.5-внутрішній). Проте, якщо порівнювати картину температурних полів для виробу №1 і №2, що відповідають одному і тому ж шару (див рис.2.4, рис.2.2 і 2.5), то легко помітити, що для ідентичної геометричної конфігурації(в даному випадку циліндрично-конічної форми) виробу якісний характер температурних полів аналогічний, причому критичні ділянки по висоті скловиробу залишаються тими ж, але в кількісному відношенні існують дуже помітні відмінності, що визначають ширший розкид температурних полів. На це вказує величина площі, що укладається між мінорантою і мажорантою для виробів №1 і №2. З цього виходить, що нерівномірність охолодження скловиробу по шарах для виробу №2 істотно вище, ніж для виробу №1.

Виявивши на основі комп'ютерного моделювання процесу відпалу міноранту і мажоранту температурного поля вздовж осі Z для даних скловиробів, можна досліджувати детальніший розподіл температур та їх змін в часі по товщині, тобто по радіусу для характерних областей скловиробу, відповідній міноранті і мажоранті, а саме, для циліндричної частини корпусу біля дна(мажоранта) і на напіввисоті конічної частини сполучення корпусу з горлом(міноранта). Результати моделювання для вказаних областей приведені на рис.2.6 і рис.2.7 для виробу №1 та на рисунках 2.8 і 2.9 для виробу №2.

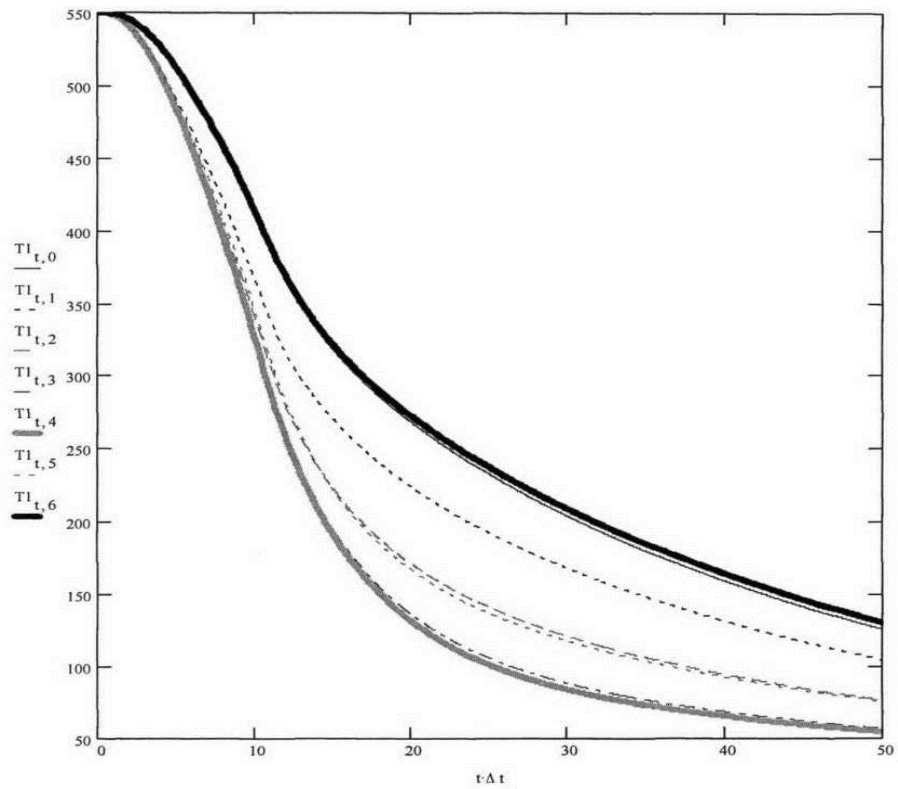


Рисунок 2.4 - Розподіл температури середнього шару по осіз для скловиробу №2

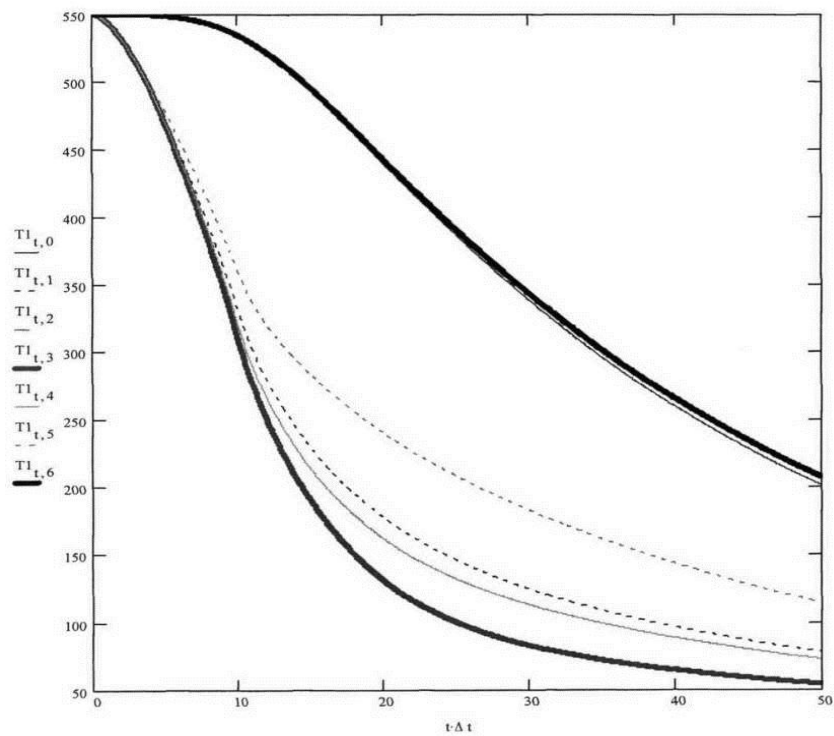


Рисунок 2.5 - Розподіл температури внутрішнього шару по осіз для скловиробу №2

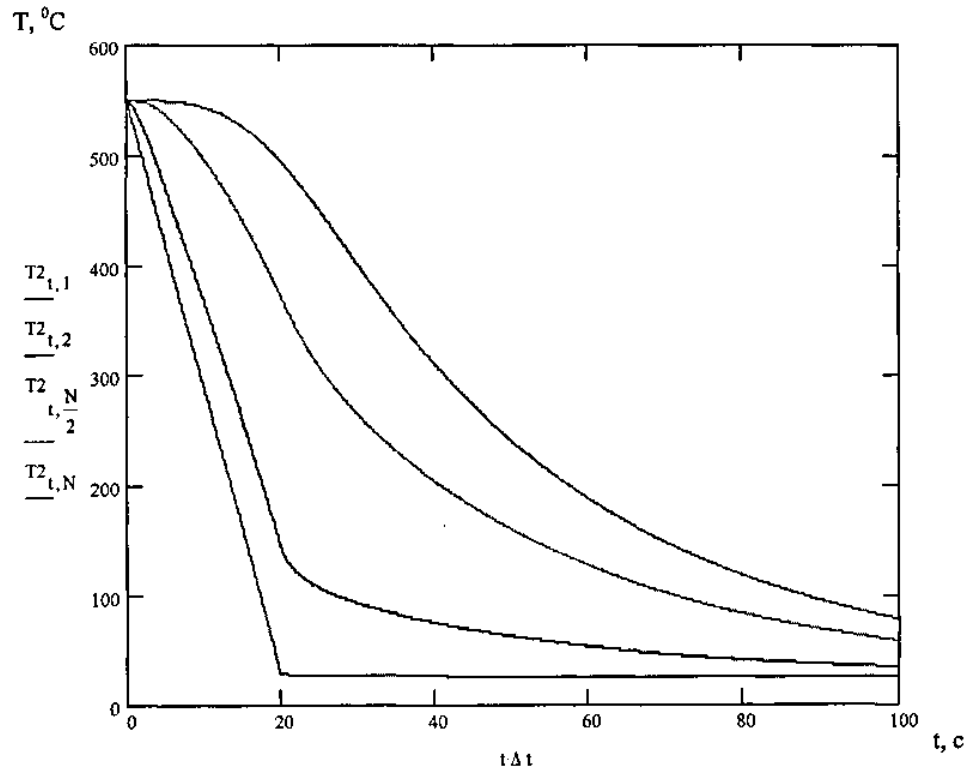


Рисунок 2.6 - Розподіл температури для мажоранти (виріб №1)

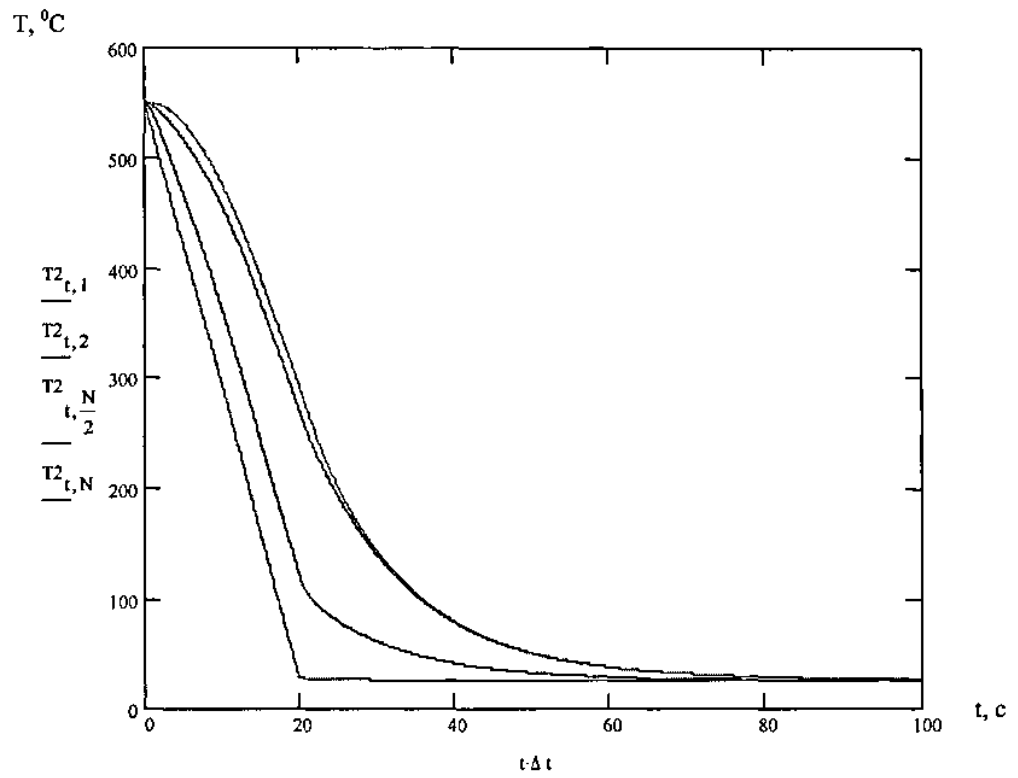


Рисунок 2.7 - Розподіл температури для міноранти (виріб №1)

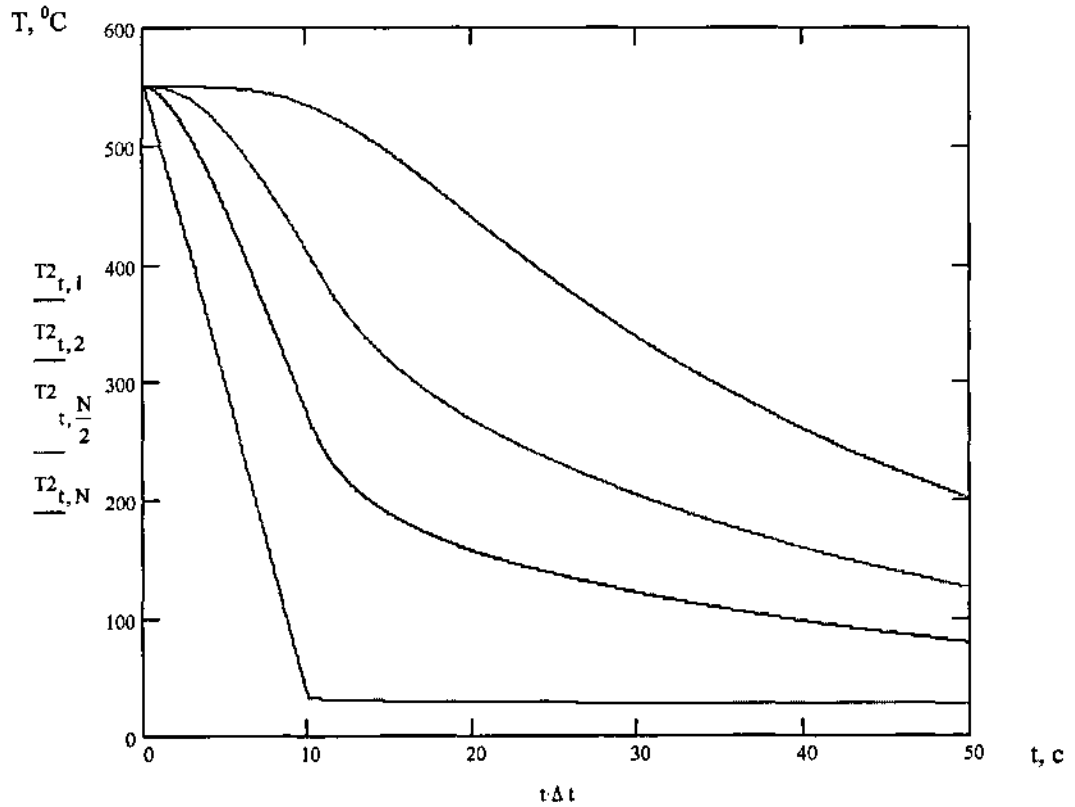


Рисунок 2.8 - Розподіл температури для мажоранти (виріб №2)

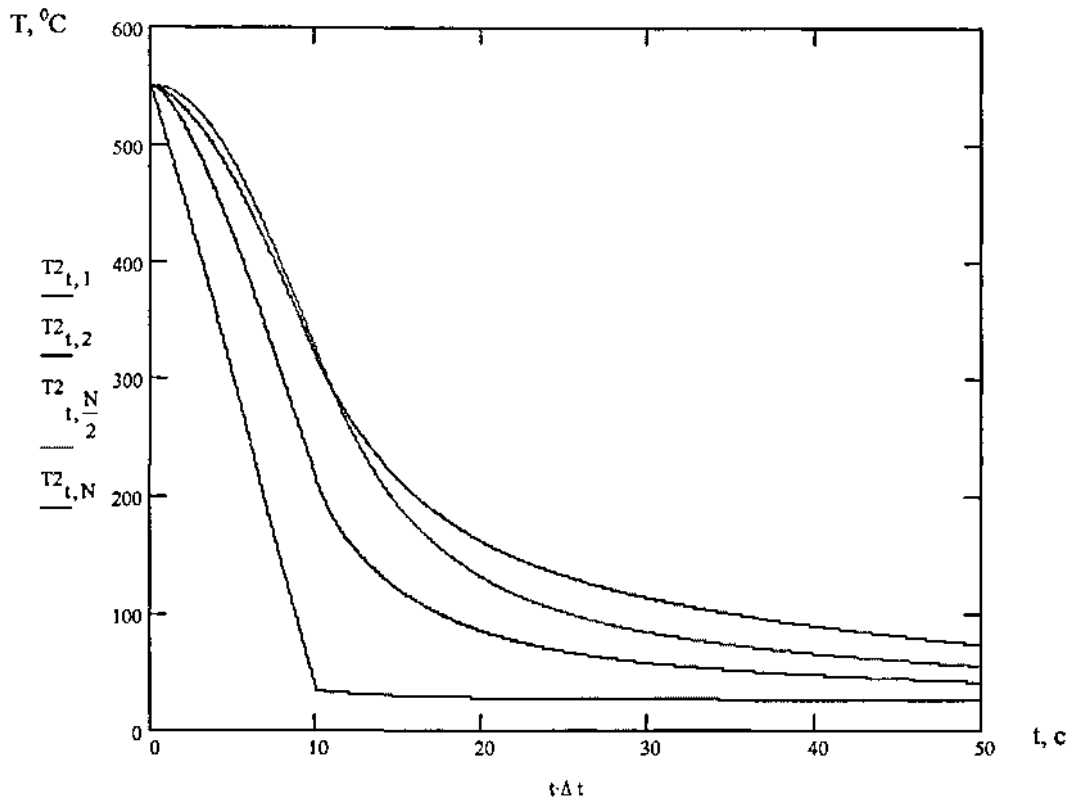


Рисунок 2.9 - Розподіл температури для міноранти (виріб №2)

Аналізуючи графіки, зображені на рис.2.2 - рис.2.9, можна зробити висновок, що температурне поле скловиробів при відпалі, розподілене по

шарах(див. рис.2.6 - рис.2.9), має такий же характер, як і температурне поле, розподілене по висоті(осі Z) для крайніх критичних областей(див.рис.2.2 - рис. 2.5), проте оскільки ми розглядаємо зовнішній перший шар скловиробу, який охолоджується з найвищою швидкістю, то на рисунках 2.6-2.9 спостерігається різкий злам першої кривої(шар $T_{2,t,1}$), що пояснюється зростаючою погрішністю за рахунок крайового ефекту.

Крім того, введення другої похідної по координаті Z , тобто по висоті виробу дозволило врахувати взаємний вплив циліндричних кілець, що сполучалися, за допомогою яких утворюється конічна частина скловиробу. Оскільки охолодження по міноранті відбувається значно швидше, то і напруги, що виникають при відпалі ймовірно будуть більш високими в області конічного переходу, з іншого боку температурний режим по тривалості охолодження виробу обмежений мажорантою. Таким чином, мажоранта і міноранта для кожного конкретного скловиробу визначатимуть в цілому технологічний режим відпалу скловиробу в печі. Надалі при моделюванні міцнісного стану скловиробів необхідно досліджувати два встановлені критичні випадки.

2.2. Побудова математичної моделі відпалу для скловиробу призматично-циліндричної конфігурації

Для виробів циліндрично-конічної форми необхідно в першу чергу побудувати математичну модель процесу відпалу скловиробів призматично-циліндричної конфігурації, причому перехід від призматичної форми корпусу до циліндричного горла доцільно відразу розглядати у формі набору кілець овально-конічної або овально-пірамідальної форми, які сполучаються, що в загальному випадку можна ототожнити з циліндричною формою неправильного виду. Побудову математичної моделі процесу відпалу таких скловиробів можна здійснити шляхом модифікації відомих математичних моделей відпалу склоблоків і циліндричних труб, причому призматичний корпус слід розглядати як склоблок, висота якого дорівнює висоті корпусу

пляшки, з негерметичною внутрішньою повітряною порожниною, а перехід від корпусу до горла та горло представлятимемо у формі набору кілець, що сполучаються, з циліндричною трубою(горлом). Обмеження, що накладаються на процес теплообміну в самому скловиробі і між скловиробом та зовнішнім середовищем, тобто повітряним простором зовні та всередині скловиробу призматично-циліндричної форми, при його відпалі в печі, залишаються такими ж як і для скловиробу циліндрично-конічного типу, за винятком тих обмежень, які стосуються представлення скловиробу у вигляді елементарних складових, а саме:

- основне тіло скловиробу(корпус) розглядається як сукупність елементарних паралелепіпедів;
- перехід від корпусу до горла представляється як сукупність циліндричних елементів(кілець різного радіусу малої висоти);
- горло скловиробу розглядається як труба малого радіусу.

Для отримання температурного поля досліджуваного об'єкту скористаємося рівнянням теплообміну для склоблока та скляної труби або їх початковими аналогами у безперервній формі. В силу повної симетрії скловиробу відносно вертикальної осі z і осей горизонтальної площини(x, y) з метою скорочення об'єму обчислень(пам'яті і часу) обмежимося розглядом чверті скловиробу, поміщеної в перший квадрант (рис.2.10).

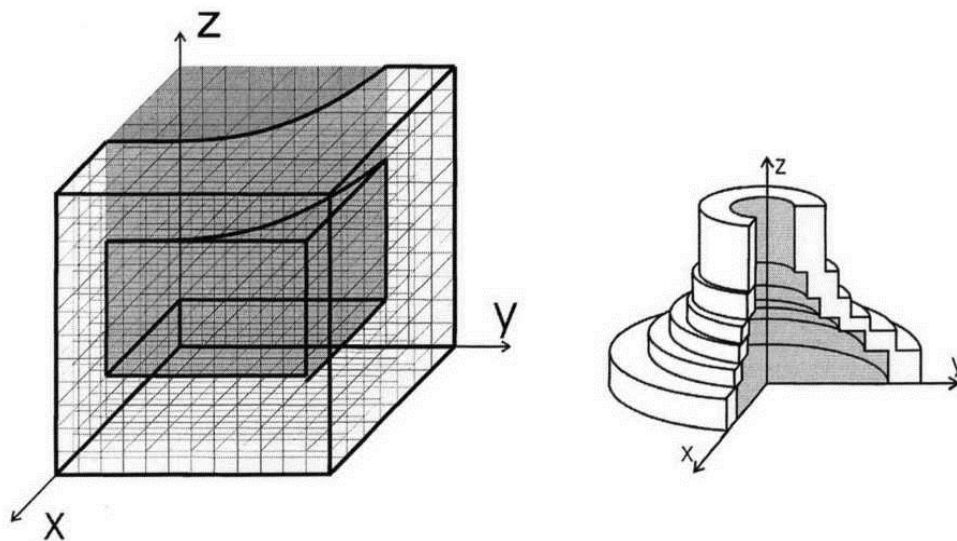


Рисунок 2.10 - Представлення скловиробу у вигляді елементів призматичної і циліндричної форм.

В силу відмінності коефіцієнтів тепловіддачі між основним тілом та газовим довкіллям печі неоднакові, коефіцієнти теплообміну будуть різними для дна скловиробу(h_p) і вертикальної частини корпусу (h).

Враховуючи вищевикладене, представимо тепер модифіковану математичну модель температурного поля даного скловиробу у вигляді системи кінцево-різницевого рівнянь, що описують теплообмін для кожної елементарної ділянки скловиробу. При цьому призматичний корпус разом з повітряною порожниною розглядатимемо як об'єднання безлічі паралелепіпедів (N_x, N_y, N_z) із взаємозв'язаними тепловими полями(див.рис.2.10), що характеризуються геометричними розмірами $D1$ (ширина), $D2$ (довжина), $D3$ (висота). Отже:

$$\Delta x = \frac{D1}{N_x}, \Delta y = \frac{D2}{N_y}, \Delta z = \frac{D3}{N_z}.$$

Положення кожного елементу паралелепіпеда в просторі визначатиметься трьома індексами:

$$i \in [1, N_x] \text{ -по вісі } x, j \in [1, N_y] \text{ -по вісі } y, v \in [1, N_z] \text{ -по вісі } z.$$

Стінку переходу від корпусу виробу до горла і горлову частину виробу разом з внутрішньою повітряною порожниною, що примикає до цих елементів, представимо у вигляді елементарних циліндричних кілець, розчленованих на N шарів, для кожного з яких задамо геометричні розміри $R1$ (зовнішній радіус кільця), $R2$ (внутрішній радіус), $R3$ (висота кільця). Тоді, значення кроків визначається в циліндричних координатах як

$$\Delta r_1 = \frac{R1 - R2}{N}, \Delta r_2 = \frac{R2}{N}, \Delta z = \frac{DL}{N_z},$$

а положення кожного з шарів для послідовності циліндричних кілець характеризуватиметься наступними індексами:

$$i = j \in [1; 2Nr] \text{ -по вісям } x \text{ і } y; v \in [N_z + 1; N_z + Nr] \text{ - по вісі } z.$$

Крок дискретизації за часом, який використовується при переході від моделі у формі диференціальних рівнянь в похідних до моделі у формі системи

кінцево-різницевих рівнянь, згідно з відомим методом сіток, визначається з умови збіжності рішення системи кінцево-різницевих рівнянь:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\min(c_i) \min(\rho_i) (\min\{\Delta x, \Delta y, \Delta z\})^2}{\max(\lambda_i)}, \frac{c_0 \rho_0 (\min\{\Delta x, \Delta y, \Delta z\})^2}{\lambda_0} \right\}.$$

Моделювання температурного поля призматично-циліндричного скловиробу за допомогою цифрової моделі пов'язано з високими вимогами до обчислювальних ресурсів використовуваної техніки, що пояснюється великим об'ємом інформації, який необхідно одночасно зберігати в ЕОМ для подальшого застосування. Програма, що реалізує процес комп'ютерного моделювання відпалу досліджуваного скловиробу в печі, розроблена як консольний додаток до середовища BorlandDelphi 7.0. 32-бітове середовище програмування дало можливість зберігання в пам'яті декількохчотиривимірних масивів результатів моделювання $=54 \cdot 10^7$ елементів в кожному. Блок-схема алгоритму комп'ютерного моделювання температурного поля скловиробу призматично-циліндричної конфігурації в печі приведена на рис.2.11.

Результати комп'ютерного моделювання температурного поля досліджуваного об'єкту представлені на рис.2.12 для середнього шару виробу.

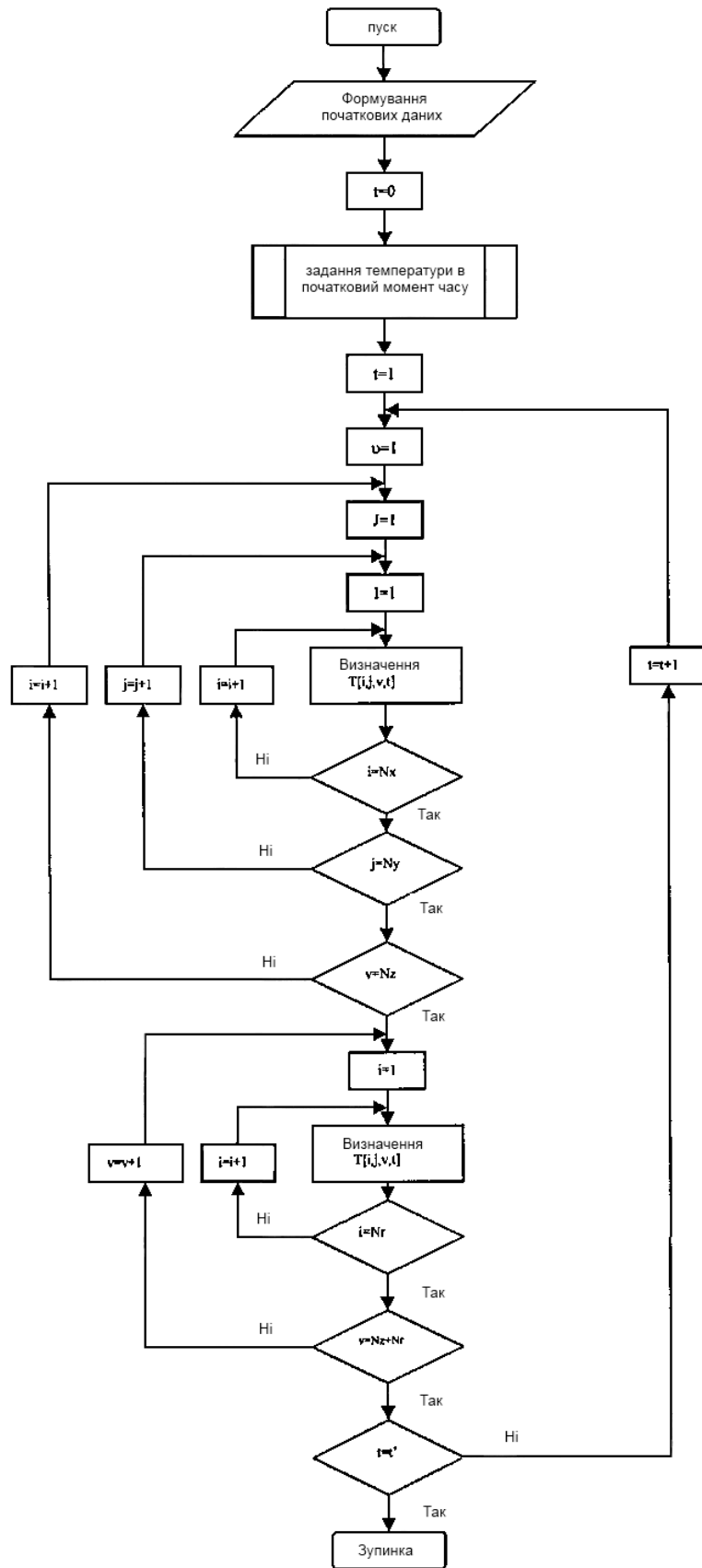


Рисунок 2.11 - Блок схема алгоритму комп'ютерного моделювання температурного поля виробу складної конфігурації при відпалі в печі

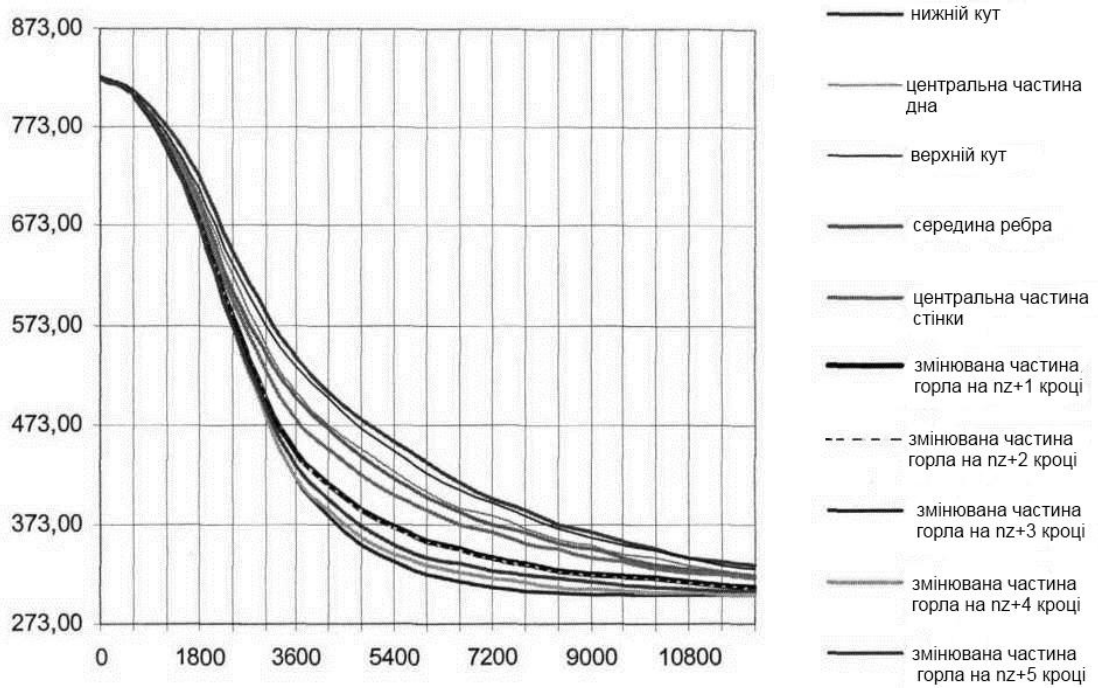


Рисунок 2.12 - Розподіл температури середнього шару по осі z

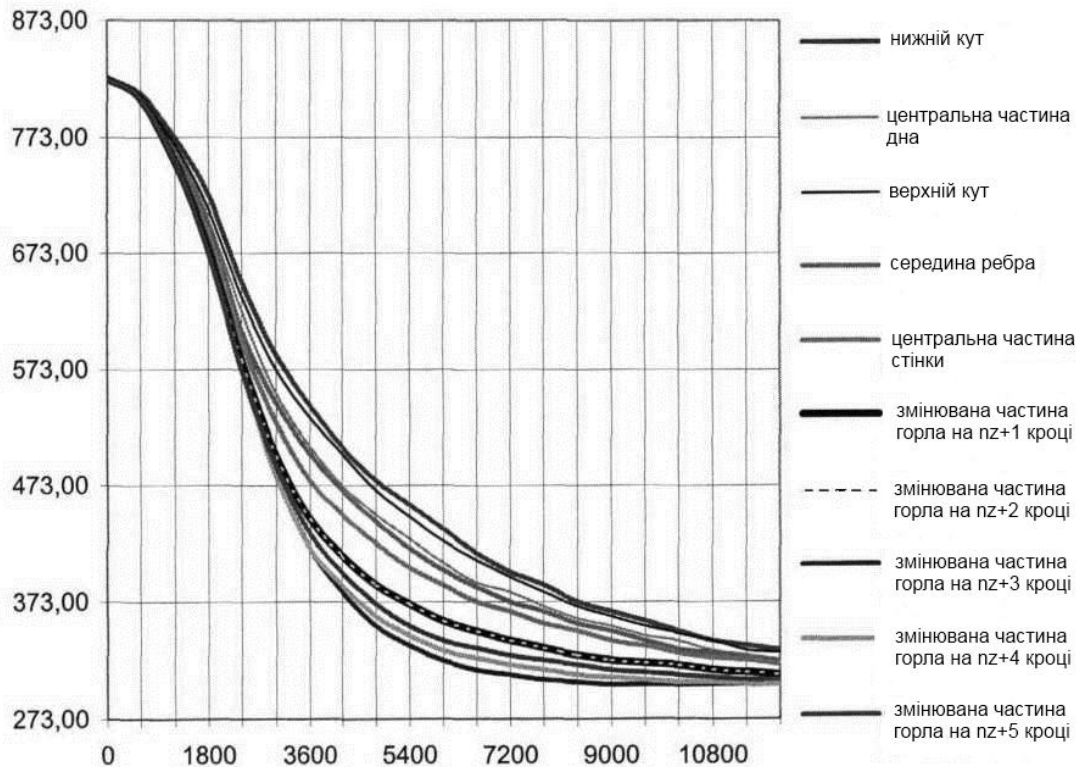


Рисунок 2.13 - Розподіл температури внутрішнього шару по осі z

на рис.2.13 для внутрішнього шару, причому із зіставлення безлічі кривих, отриманих для різних областей виробу по висоті, можна виділити залежно від характеру протікання процесу охолодження найбільш критичні

ділянки, в яких процес протікає найшвидше (міноранта) і найповільніше(мажоранта). Виявляється, що найбільш швидке охолодження виробу відбувається, як і в разі відпалу скловиробів циліндрично-конічної конфігурації, в області середньої частини переходу від призматичного корпусу до циліндричного горла. Найповільніше охолоджується виріб по кутах дна. Це підтверджується розрахунками температурного поля цієї частини скловиробу. Результати комп'ютерного моделювання поля температур середнього шару дна виробу приведені на рис.2.14.

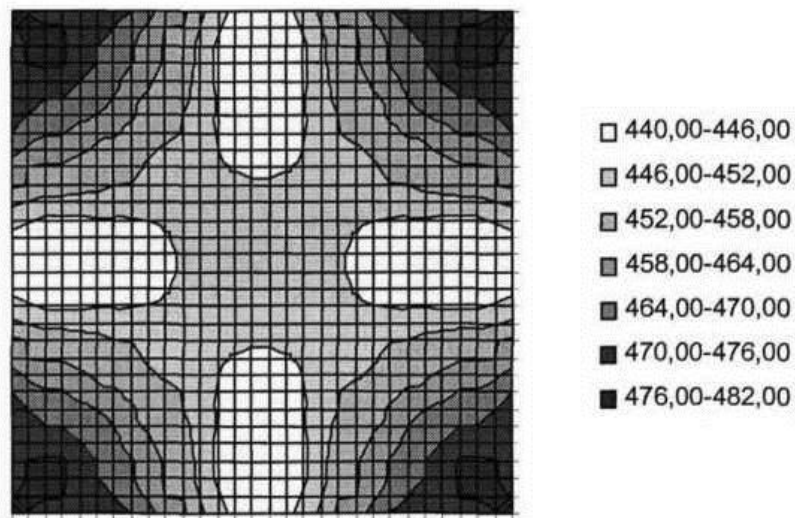


Рисунок 2.14 - Розподіл температур середнього шару дна скловиробу

Таким чином, виявивши міноранту і мажоранту розподілу температур можна надалі при рішенні задачі синтезу керування процесом відпалу скловиробів користуватися не повною математичною моделлю відпалу скловиробів складної конфігурації, а обмежитися тією частиною моделі, яка відповідає його критичним ділянкам, що істотно прискорить процедуру отримання параметрів режимів відпалу при переході від виробів однієї конфігурації до іншої або при зміні типорозмірів скловиробу.

3. ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз механізму виникнення напруженого стану скловиробу в тепловому полі

Розіб'ємо торцеву сторону плоскої пластини на три шари - орієнтовно по межах, на яких змінюється знак механічної напруги(рис.3.1).

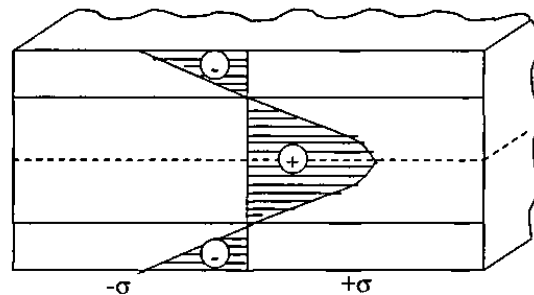


Рисунок 3.1 - Розподіл механічної напруги по товщині пластини скла

Нехай початковий зразок стандартної температури середовища(20°C) має таку малу напругу, що нею можна знехтувати. При переміщенні зразка в теплове поле з підвищеною температурою його поверхня нагріватиметься швидше, ніж середина, внаслідок чого з'явиться температурний градієнт, що викликає поле механічної напруги, причому знаки напруги в поверхневій зоні і в серединній частині будуть протилежними. У механіці прийнято вважати при стискуванні - напруга негативна, а при розтягуванні - напруга позитивна. Прослідкуємо механізм виникнення механічної напруги внаслідок дії теплового поля на простій моделі, що представляє тришарову скляну пластину(рис.3.2). Якщо температура зовнішніх шарів пластини $T_{\text{н}}$ дорівнює температурі внутрішнього шару $T_{\text{вн}}$ (рис.3.2,а), то напруга в пластині як було відмічено раніше відсутня. Припустимо, що по межах шарів розібрано пластини на три частини(рис.3.2,б), тоді при нагріві скла в тепловому полі температура зовнішніх шарів буде рости швидше, ніж температура внутрішнього шару. Внаслідок цього лінійні розміри зовнішніх шарів виявилися б більше, ніж внутрішнього шару(рис.3.2,в). Розміри, які б відповідали температурам

незв'язаних між собою шарів пластини, називаються "вільними розмірами". Але оскільки насправді шари пов'язані один з одним, тобто пластина є єдиним тілом, то фактичний лінійний розмір усіх шарів має бути однаковий. Щоб привести усі шари з різним значенням температури до одного розміру, виходячи з використовуваної моделі, слід зовнішні шари стиснути, а внутрішній - розтягнути, що дійсно і відбувається в процесі нагріву скляної пластини(рис.3.2,г).

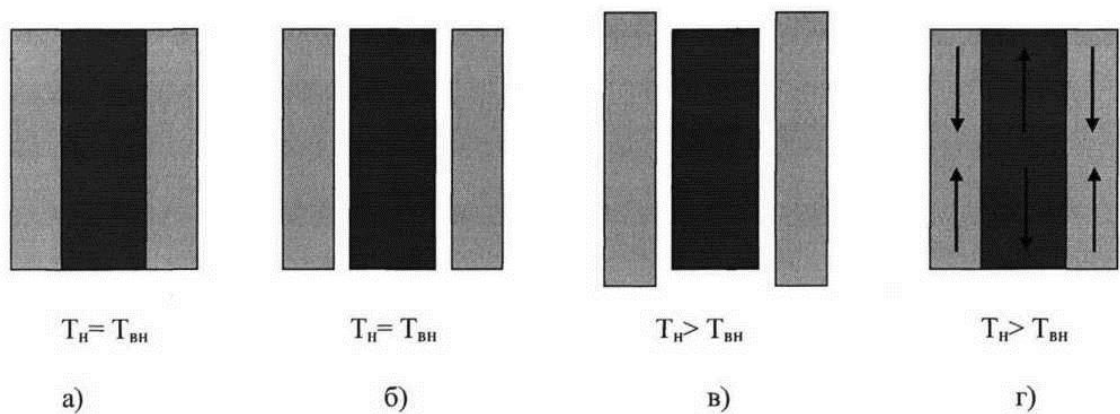


Рисунок 3.2 - Механізм появи напруги в пластині скла при дії теплового поля

Легко дійти висновку, що в процесі охолодження скляної пластини в ділянці температур нижче температури склування на поверхневих шарах з'являється напруга розтягування, а в середньому шарі - напруга стискування. Як видно, ця напруга з'являється при виникненні температурного градієнта по товщині пластини і зникає після того, як зникає цей градієнт. Вони називаються тимчасовими(поточними) напругами.

Розглянемо тепер механізм утворення напруги при охолодженні скла від значень температур, що істотно перевищують температуру склування. Припустимо, що при деякій високій температурі T_0 зразок скляної пластини знаходиться в тепловому полі впродовж досить тривалого інтервалу часу, такого, що температурний градієнт по товщині пластини зник. Після цього температуру докільля почали знижувати з постійною швидкістю, внаслідок чого почнуть охолоджуватися спочатку зовнішні шари, а потім середній шар

пластини. Швидкість зміни температури серединного шару скла спочатку буде нижча швидкості охолодження поверхні, але з часом ці швидкості вирівнюються, отже виникнуть умови, при яких величина градієнта температур по товщині скла не змінюватиметься в процесі охолодження.

Очевидно, що як тільки почнеться охолодження скляної пластини від температури T_0 , виникає і поступово зростатиме градієнт температури по товщині скла, в скляній пластині виникає напруга розтягування на поверхнях і стискування всередині пластини. Проте в'язкість скла при цих температурах не велика, і напруги будуть швидко релаксувати.

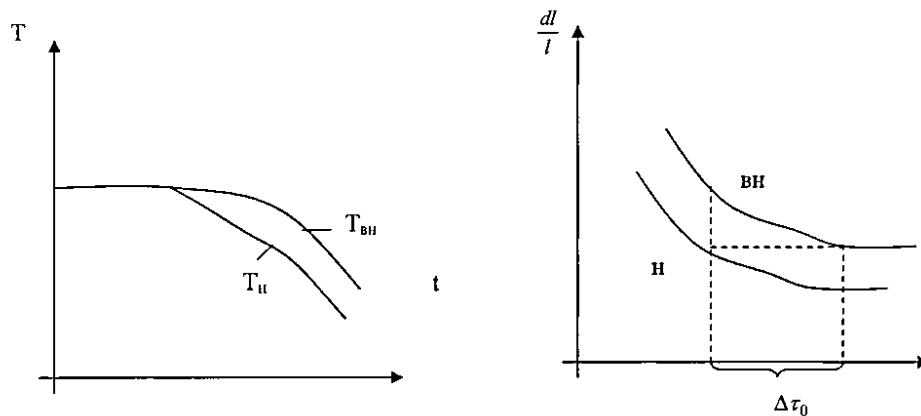


Рисунок 3.3 а) зміна температури шарів скла при охолодженні; б) дилатометричні криві, що характеризують зміну лінійних розмірів

Після того, як будуть досягнуті умови охолодження скла з постійною однаковою швидкістю для всіх шарів пластини, нові напруги не виникнуть внаслідок постійності градієнта температури. Це справедливо аж до того моменту, коли температура поверхневих шарів не досягне інтервалу склування, при якому різко зменшиться термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) скла. Через різницю температур поверхневих і середнього шарів скляної пластини дилатометричні криві, що характеризують зміну лінійних розмірів відповідних шарів в часі, зміщені один відносно одного (рис.3.4). У досить широкому інтервалі часу ($\Delta\tau_0$) ТКЛР внутрішнього і зовнішніх шарів виявляються різними. Це означає, що вільний розмір внутрішнього шару зменшуватиметься швидше, ніж вільний розмір зовнішніх

шарів. На поверхні скла виникає напруга стискування, в середньому шарі - розтягування. Ці напруги також будуть релаксувати, проте в інтервалі температур склування в'язкість вже відносно велика, і процеси релаксації напруг тепер відбуваються з набагато меншою швидкістю, ніж при більш високих температурах. Отже, велика частина напруг в даній ділянці температур зберігається, і рівномірно охолоджувана скляна пластина після повного затвердіння знаходиться в напруженому стані. При цьому в пластині зберігається постійний градієнт температур. З наближенням до стандартної температури швидкість охолодження затверділого скла починає зменшуватися. Одночасно зменшується і градієнт температур, який при завершенні охолодження повністю зникає. Температура середнього шару на заключному етапі охолодження зміниться сильніше, ніж температура зовнішніх шарів, внаслідок чого вільний розмір внутрішнього шару зменшиться більшою мірою, чим вільні розміри поверхневих шарів. Це приведе до зростання напруги стискування на поверхні пластини. Згідно з розглянутим механізмом виникнення поля напруг при охолодженні скла від температур істотно вище температури склування виникають постійні(залишкові) напруги, на зменшення яких і спрямований процес відпалу. Як видно, зменшення залишкових напруг можна досягти шляхом зниження швидкості охолодження в інтервалі температур склування.

3.2. Модифікація математичної моделі поля механічної напруги скляних виробів

Як раніше було показано тарне скло циліндрично-конічного виду може бути представлене у вигляді двох циліндричних труб різного діаметру, що сполучаються між собою набором кілець(див.рис.2.1). Тому для розрахунку стану міцності виробу пляшкової форми при його відпалі в печі в якості

початкової можна скористатися математичною моделлю теплового поля механічної напруги, що виникає в циліндричних трубах при відпалі, адаптуючи

$$T_{1minor}^f[i, k+1] = T_{1minor}[i, k] + (T_{1minor}^f[i, k] - T_{1minor}[i, k]) \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_s[i, k]}\right)^{b_1}\right), \quad (3.1)$$

$$T_{1maj}^f[i, k+1] = T_{1maj}[i, k] + (T_{1maj}^f[i, k] - T_{1maj}[i, k]) \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_s[i, k]}\right)^{b_1}\right). \quad (3.2)$$

особливостей теплового поля для тарного скла. Як видно, громіздкість системи(2.6) може спричинити істотне ускладнення початкової математичної моделі поля механічної напруги скляної труби, проте вже проведені дослідження температурного поля циліндрично-конічного скловиробу при його відпалі в печі показав, що немає необхідності детального опису стану міцності виробу по вертикалі, досить обмежитися критичними ділянками, яким відповідає міноранта і мажоранта теплового поля.

Фіктивна температура T_f , що є кількісною характеристикою структури речовини і відповідає знаходженню речовини в рівновазі після стрибка температури ΔT на попередньому кроці, для критичних зон пляшки циліндрично-конічної форми(області конічної частини скловиробу, відповідній напіввисоті усіченого конуса, що утворює перехід до горлової частини; область циліндричної частини корпусу, що примикає до дна), визначається на підставі першого рівняння системи, причому змінні беруться з розрахунків температурного поля після моделі(2.6),що відповідають міноранті (minor) та мажоранті (maj) цього поля. Величини дилатометричних радіусів шарів $r_d[i, k]$,що визначаються тепловим розширенням скла, можна знайти для міноранти і мажоранти теплового поля по формулах:

$$r_d^{minor}[i, k+1] = r_0^{minor}[i] \left(1 + \alpha_1 (T_{1minor}^f[i, k] - T_0) + \alpha_2 (T_{1minor}[i, k] - T_{1minor}^f[i, k])\right) \quad (3.3)$$

$$r_d^{maj}[i, k+1] = r_0^{maj}[i] \left(1 + \alpha_1 (T_{1maj}^f[i, k] - T_0) + \alpha_2 (T_{1maj}[i, k] - T_{1maj}^f[i, k])\right) \quad (3.4)$$

Враховуючи зв'язок між радіальними ε_r і тангенціальними ε_t відносними деформаціями та напругами σ_r і σ_t , а також співвідношення $\sigma_t = 2\sigma_r$, знайдемо вільний радіус шару $r^{minor}[i, k]$ та $r^{maj}[i, k]$ як

$$r_f^{minor}[i, k] = r_d^{minor}[i, k] \left(1 + \sigma_{r_{minor}}^{re} \frac{1 - 2\mu}{E} \right), \quad (3.5)$$

$$r_f^{maj}[i, k] = r_d^{maj}[i, k] \left(1 + \sigma_{r_{maj}}^{re} \frac{1 - 2\mu}{E} \right), \quad (3.6)$$

де $\sigma_{r_{minor}}$ та $\sigma_{r_{maj}}$ - радіальні напруги, які релаксували в i - шарі скла в інтервалі часу від 1-го до k -ого кроку в областях, що відповідають міноранті і мажоранті теплового поля скловиробу, що визначаються із співвідношень:

$$\sigma_{r_{minor}}^{re}(maj)[i, k] = \sigma_{r_{minor}}^{re}(maj)[i, k - 1] + \sigma_{r_{minor}}(maj)[i, k] \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\Delta t}{\tau_{\sigma}[i, k]} \right)^{b_2} \right) \right], \quad (3.7)$$

Зміна вільного радіусу i -го шару скла на k -тому кроці рівна:

$$\Delta r_f^{(maj) minor}[i, k] = r_f^{(maj) minor}[i, k] - r_f^{(maj) minor}[i, k - 1]. \quad (3.8)$$

Оскільки

розділення пологого циліндричного тіла на шари (N шарів) умовно, то враховуючи їх взаємозв'язок можна розрахувати приріст радіусу скляної труби, користуючись вираженням:

$$\Delta r_f^{(maj) minor}[k] = \left(\sum_{i=1}^N \Delta r_f^{(maj) minor}[i, k] \right) / N \quad (3.9)$$

Приріст радіальної напруги i - того шару на k -тому кроці для даних областей скловиробу знайдемо як:

$$\Delta \sigma_{r_{minor}}(maj)[i, k] = \frac{E}{1 - 2\mu} \left\{ \left(r_d^{(maj) minor}[i, k] - \Delta r_f^{(maj) minor}[k] \right) - r_d^{(maj) minor}[i, k - 1] \right\}, \quad (3.10)$$

а радіальні напруги визначимо по формулі:

$$\sigma_{r_{minor}}(maj)[i, k] = \sigma_{r_{minor}}(maj)[i, k - 1] + \Delta \sigma_{r_{minor}}(maj)[i, k] \exp \left(- \left(\frac{\Delta t}{\tau_{\sigma}[i, k]} \right)^{b_2} \right). \quad (3.11)$$

Об'єднуючи рівняння (3.1) - (3.11) в систему рівнянь, отримаємо модифіковану математичну модель, що показує динаміку поля механічних

напруг, що знаходяться скловиробі циліндрично-конічної форми в критичних зонах(minoranta, majoranta) з точки зору напруженого стану при відпалі в печі:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 T_{l\,minor}^f [i, k+1] = T_{l\,minor} [i, k] + (T_{l\,minor}^f [i, k] - T_{l\,minor} [i, k]) \exp \left(- \left(\frac{\Delta t}{\tau_s [i, k]} \right)^{b_1} \right), \\
 r_d^{(maj)\,minor} [i, k+1] = r_0^{(maj)\,minor} [i] \left(1 + \alpha_1 (T_{l\,minor}^f [i, k] - T_0) + \alpha_2 \left(T_{l\,minor} [i, k] - T_{l\,minor}^f [i, k] \right) \right), \\
 r_f^{(maj)\,minor} [i, k] = r_d^{(maj)\,minor} [i, k] \left(1 + \sigma_{r\,minor}^{re} \frac{1-2\mu}{E} \right), \\
 \sigma_{r\,minor}^{re} [i, k] = \sigma_{r\,minor}^{re} [i, k-1] + \sigma_{r\,minor} [i, k] \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, k]} \right)^{b_2} \right) \right), \\
 \Delta r_f^{(maj)\,minor} [i, k] = r_f^{(maj)\,minor} [i, k] - r_f^{(maj)\,minor} [i, k-1], \\
 \Delta r^{(maj)\,minor} [k] = \left(\sum_{i=1}^N \Delta r_f^{(maj)\,minor} [i, k] \right) / N \\
 \Delta \sigma_{r\,minor}^{(maj)} [i, k] = \frac{E}{1-2\mu} \left\{ \left(r_d^{(maj)\,minor} [i, k] - \Delta r^{(maj)\,minor} [k] \right) - r_d^{(maj)\,minor} [i, k-1] \right\}, \\
 \sigma_{r\,minor} [i, k] = \sigma_{r\,minor} [i, k-1] + \Delta \sigma_{r\,minor}^{(maj)} [i, k] \left(- \left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, k]} \right)^{b_2} \right), \\
 \sigma_{\tau\,minor} [i, k] = 2\sigma_{r\,minor} [i, k].
 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Користуючись математичною моделлю(3.12), можна здійснити цифрове моделювання процесу зміни поля механічної напруги при відпалі даного скловиробу в печі, тобто розробити алгоритм розрахунку поточної і залишкової напруги в критичних зонах. Програма, що реалізовує вказаний алгоритм приведена нижче.

Результати цифрового моделювання поля механічних напруг, що виникають в двох критичних зонах, що відповідають міноранті і мажоранті поля температур, при відпалі двох типів виробів(№1 і №2) циліндрично-конічної форми приведені у вигляді графіків, зображених на рисунках 3.4-3.5 для поточних напруг та на рисунках 3.6-3.7 для залишкових напруг по шарах.

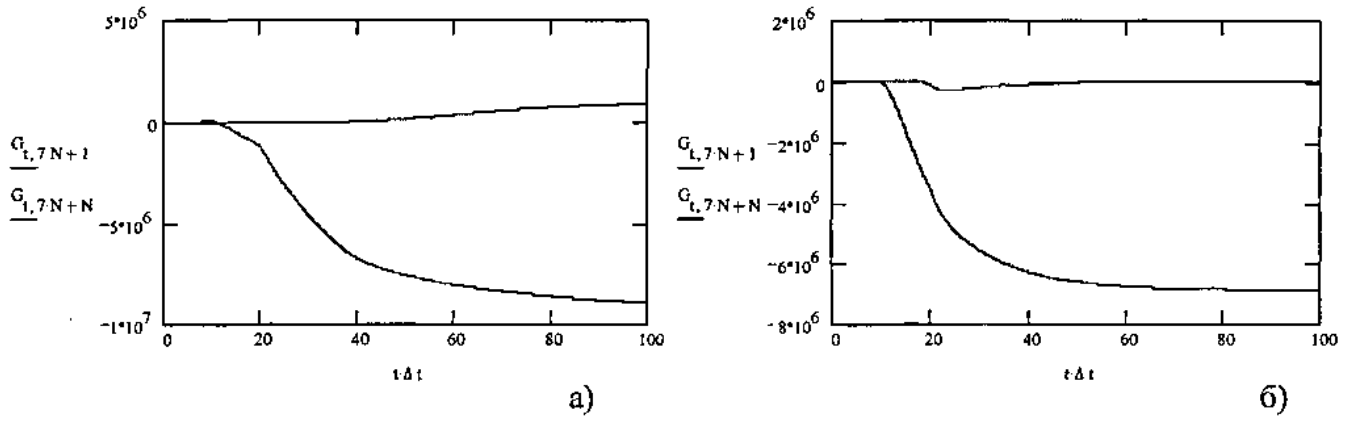


Рисунок 3.4 - Поточні напруги по шарах для виробу №1: а) - для мажоранти; б) - для міноранти

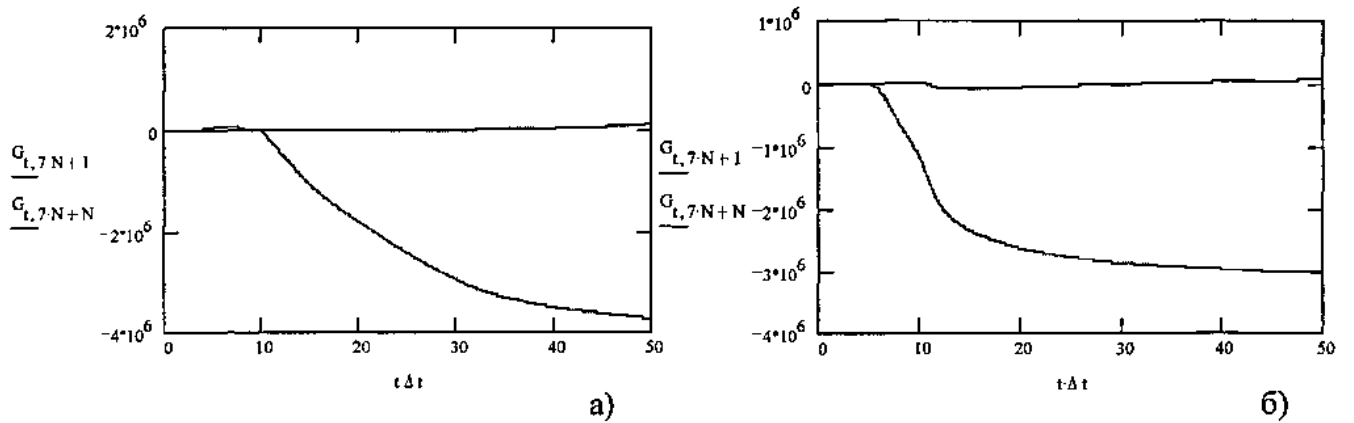


Рисунок 3.5 - Поточні напруги по шарах для виробу №2: а) - для мажоранти; б) - для міноранти

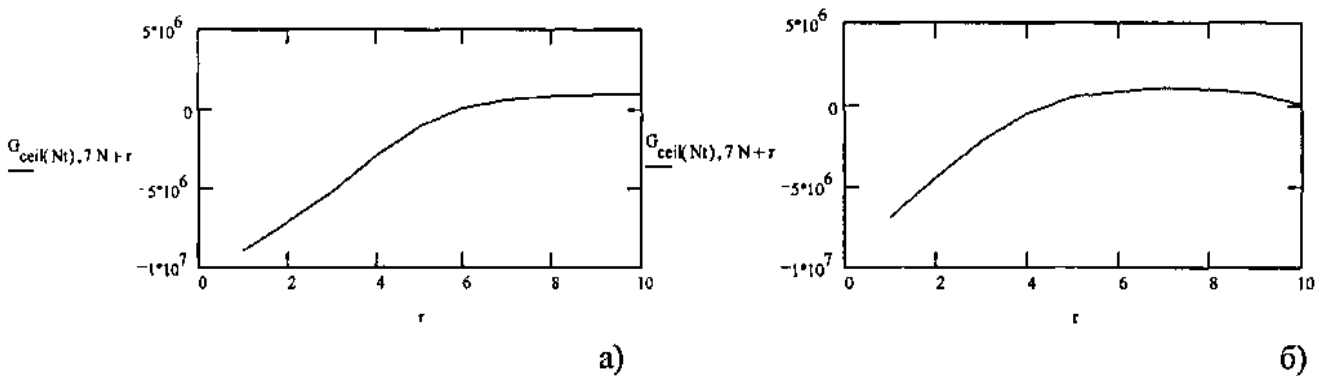


Рисунок 3.6 - Розподіл залишкових напруг по шарах для виробу №1: а) - для мажоранти; б) - для міноранти

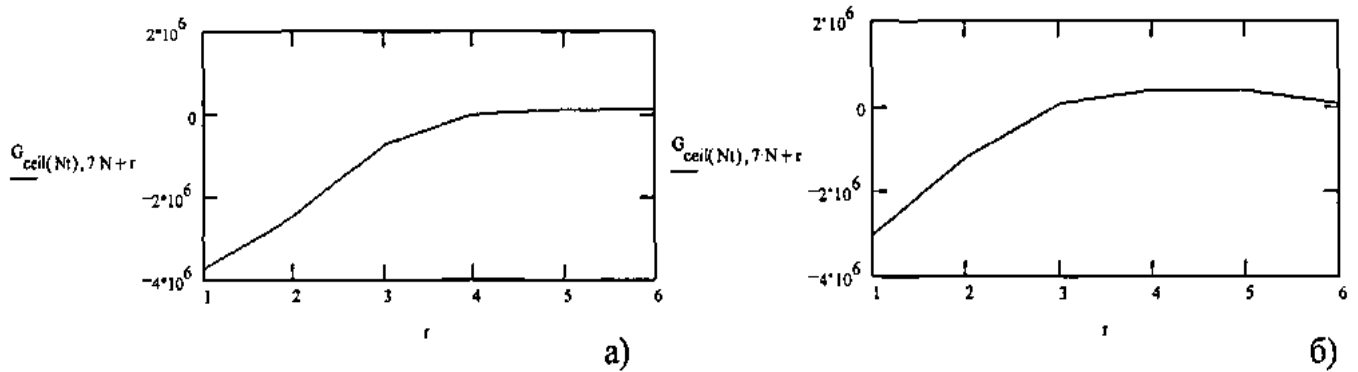


Рисунок 3.7 - Розподіл залишкових напруг по шарах для виробу №2: а) - для мажоранти; б) - для міноранти

Як видно з рис.3.4- рис.3.7, якісний характер зміни поточної напруги в обох скловиробах(№1, №2) однаковий, відмінність складають кількісні значення напруги, що пояснюється товщиною стінок скловиробів різних типів, тобто загальною масою скла в стінці скловиробу. Подібність якісного характеру є наслідком подібності конфігурації скловиробів. Крім того, з аналізу результатів цифрового моделювання видно, що математична модель(3.12) показує якісну картину зміни поля механічних напруг при відпалі - з часом, тобто у міру охолодження поточна напруга зростає як у внутрішньому, так і в зовнішньому шарах обох виробів, причому для внутрішнього шару ці напруги позитивні, що відповідає розтягуванню, а в зовнішньому шарі - негативні, що відповідає деформації стискування, що повністю відповідає раніше розглянутому механізму виникнення і зміни напруженого стану скловиробу в тепловому полі. Слід зазначити ще одну важливу деталь, яка показує чутливість отриманої моделі, а саме невеликі "провали" кривої напруги внутрішнього шару для обох скловиробів в початковий період охолодження, що відповідає мінорантному тепловому полю скловиробу, тобто області кінцевого переходу. Це пояснюється особливістю кінчної конфігурації, а також способом представлення кінчної частини у формі циліндричних кілець, що примикають один до одного.

Окрім поточних напруг інтерес представляє розподіл залишкових напруг, які власне і визначають експлуатаційну якість скловиробів, що відпалюють (рис.3.6, рис.3.7). Як видно з порівняння напружених станів придонної частини

корпусу і конічного переходу від корпусу до горла(див. рис.3.6,а і рис.3.6, б) або (див.рис.3.7,а і рис.3.7,б), визначальною залишковою напругою є напруга стискування зовнішнього шару, причому для вибраних критичних зон скловиробу ця напруга являється одного порядку. З іншого боку геометричні розміри виробу істотно впливають на значення залишкових напруг, що впливає з порівняння кривих, зображених на рис.3.6 і рис.3.7, що відповідає різним типам виробів однакової конфігурації, причому зі зменшенням товщини стінок скловиробу крива залишкових напруг стає рівнішою, а максимальні значення напруг - нижче.

3.3. Адаптація математичних моделей до умов температурного поля

Даний скловиріб складної конфігурації складається з двох фігур, що сполучаються між собою, а саме, прямокутної призми, що є корпусом з дном, що конструктивно подібне до негерметично подовженого по висоті склоблоку, і циліндричної труби малого діаметру, що являється горловою частиною скловиробу. Призматична частина, як і в разі опису будівельного склоблока розділяється на безліч елементарних паралелепіпедів, які відчують всебічну дію розподіленого навантаження, що породжує нормальні напруги σ_x , σ_y , σ_z , тангенціальні напруги рівні нулю.

Тоді, користуючись математичною моделлю об'ємної напруги будівельного склоблоку, що описує динаміку поля механічних напруг при відпалі склоблоків, можна адаптувати її до випадку відпалу скловиробів призматично-циліндричної конфігурації, а саме до опису характеру зміни поля напруги в призматичній частині виробу, для циліндричної ж частини необхідно використати раніше отриману модель у формі (3.12). Крім того, як і в попередньому розділі доцільно обмежити розрахункову цифрову модель тільки критичними зонами скловиробу, які були встановлені раніше при дослідженні теплового поля скловиробу призматично-циліндричної конфігурації, тобто зоною призматичної частини, що примикає до дна виробу(мажоранта) і зоною

сполучення циліндричної частини(горла) з призматичною на рівні половинної її висоти (міноранта), яка також як і горлова частина представляється у вигляді елементарного циліндричного або овального кільця. Прийmemo наступні позначення: (i, j, v) - координати елементарних областей(для паралелепіпедів або шарів циліндрів), з яких складається скловирібскладної конфігурації; $V_d^{maj}[i, j, v, t]$ - дилатометричний об'єм елемента, який визначається значеннями координат i, j, v в момент часу t для мажоранти(maj); $r_d^{minor}[i, j, v]$ - дилатометричний радіус шару для мінорантного температурного поля; $V_f^{maj}[i, j, v, t]$ - вільний об'єм відповідного елемента; $r_f^{minor}[i, j, v]$ - вільний радіус шару; $V^{maj}(t)$ - поточний об'єм призматичної частини; $r^{minor}(t)$ - поточний радіус циліндричної частини скловиробу; $\Delta\sigma_{maj}^*[i, j, v, t]$ - приріст об'ємної напруги; $\Delta\sigma_{rminor}[i, j, t]$ - приріст радіальної напруги; $\sigma_{maj}^*[i, j, v, t]$ - поточні об'ємні напруги; $\sigma_{rminor}[i, j, t]$ - поточні радіальні напруги; $\sigma_{maj}^{*re}[i, j, v, t]$ - об'ємні напруги, відрелаксувавши від початку розрахунку до моменту t ; $\sigma_r^{re}[i, j, t]$ - радіальні напруги, відрелаксувавши від початку розрахунку до моменту t .

Тоді математична модель поля механічних напруг для критичних зон скловиробу призматично-циліндричної конфігурації, що відповідають міноранті і мажоранті температурного поля, при відпалі скловиробу в печі може бути представлена у формі дискретної динамічної моделі наступного виду :

$$\begin{aligned}
T_{f\ maj}[i, j, v, t] &= T_{maj}[i, j, v, t-1] + (T_{f\ maj}[i, j, v, t-1] - T_{maj}[i, j, v, t]) \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_s[i, j, v, t-1]}\right)^{b_s}\right), \\
V_d^{maj}[i, j, v, t] &= 1 + 3\alpha_1(T_{f\ maj}[i, j, v, t-1] - T_0) + 3\alpha_2(T_{maj}[i, j, v, t-1] - T_{f\ maj}[i, j, v, t]), \\
r_d^{minor}[i, v, t] &= r_0^{minor}(1 + \alpha_1(T_{f\ minor}[i, j, v, t-1] - T_0)) + \alpha_2(T_{minor}[i, j, v, t-1] - T_{f\ minor}[i, j, v, t]), \\
V_f^{maj}[i, j, v, t] &= V_d^{maj}[i, j, v, t] - \sigma_{maj}^{re}[i, j, v, t-1] \frac{1-2\mu}{E}, \\
r_f^{minor}[i, v, t] &= r_d^{minor}[i, v, t-1] \left(1 + \sigma_{r\ minor}^{re}[i, j, v, t-1] \frac{1-2\mu}{E}\right), \\
V^{maj}[t] &= \frac{1}{N^2} \cdot \frac{1}{N_z} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^{N_z} V_f^{maj}[i, j, v, t], \\
r^{minor}[t] &= \frac{1}{N_r^2} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{v=1}^{N_r} \Delta r_f^{minor}[i, v, t], \\
\Delta \sigma_{maj}^* [i, j, v, t] &= \left((V^{maj}[t] - V^{maj}[t-1]) - (V_d^{maj}[i, j, v, t] - V_d^{maj}[i, j, v, t-1]) \right) \frac{1-2\mu}{E}, \\
\Delta \sigma_{r\ minor} [i, v, t] &= \frac{E}{1-2\mu} \left((r_d^{minor}[i, v, t] - r^{minor}[t]) - r_d^{minor}[i, v, t-1] \right), \\
\sigma_{maj}^* [i, j, v, t] &= \left(\sigma_{maj}^* [i, j, v, t-1] + \Delta \sigma_{maj}^* [i, j, v, t] \right) \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, j, v, t-1]}\right)^{b_\sigma}\right), \\
\sigma_{r\ minor} [i, v, t] &= \left(\sigma_{r\ minor} [i, v, t-1] + \Delta \sigma_{r\ minor} [i, v, t] \right) \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, j, t]}\right)^{b_\sigma}\right), \\
\sigma_{re\ maj}^* [i, j, v, t] &= \sigma_{re\ maj}^* [i, j, v, t-1] + \sigma_{maj}^* [i, j, v, t-1] \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, j, v, t-1]}\right)^{b_\sigma}\right), \\
\sigma_{r\ minor}^{re} [i, v, t] &= \sigma_{r\ minor}^{re} [i, v, t-1] + \sigma_{r\ minor} [i, v, t] \exp\left(-\left(\frac{\Delta t}{\tau_\sigma [i, j, t]}\right)^{b_\sigma}\right).
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Дискретна математична модель (3.13) дозволяє реалізувати цифрову модель процесу відпалу скловиробу в печі шляхом розробки блок-схеми алгоритму розрахунку міцнісного стану скловиробу призматично-циліндричної конфігурації при його відпалі (рис.3.9).

Опишемо функцію основних блоків блок-схеми алгоритму. Тут - I, J, V - просторові координати, обмежені значеннями N_x, N_y, N_z для призматичної частини. $T[i, j, v, t]$ - температура у відповідній координаті призматичної частини скловиробу в t -й момент часу, $T[i, v, t]$ - температура у відповідній координаті циліндричної частини скловиробу в t -й момент часу, $G[i, j, v, t]$ - механічна напруга у відповідній координаті призматичної частини скловиробів в t -й момент часу, $G[i, v, t]$ - механічна напруга у відповідній координаті циліндричної частини скловиробу.

Блок "Розрахунок температурного поля" здійснює розрахунки зміни теплового стану скловиробу у відповідній секції печі згідно з програмним забезпеченням, приведеним в п.3.2, та ідентифікацію "міноранти" і

"мажоранти" з усієї безлічі температурних кривих, а також прив'язку міноранти та мажоранти до зони скловиробу, яка надалі розглядається як критична і використовується при розрахунку поля механічних напруг.

Блок "Визначення $G[i,j,v,t]$ " робить розрахунок поля механічних напруг в критичній зоні призматичної частини скловиробу, використовуючи як початкову інформацію мінорантну температурну криву.

Блок "Визначення $G[i,v,t]$ " здійснює розрахунок поля механічних напруг в критичній зоні циліндричної частини скловиробу, використовуючи як початкову інформацію мажорантну температурну криву.

Функціонування цих блоків відбувається у відповідність з розробленим програмним забезпеченням, приведеним в п.3.2.

Один з варіантів розрахунку поточної і залишкової напруги для скловиробу типового виробу призматично-циліндричної конфігурації приведений на рис.3.9-3.10.

Як показує порівняльний аналіз отриманих результатів цифрового моделювання процесу відпалу скловиробів, характер поля механічних напруг скловиробів призматично-циліндричної форми подібний до поля механічних напруг скловиробів циліндрично-конічної форми, проте існують невеликі відмінності в значеннях максимальних напруг, як поточної, так і залишкової, що пояснюється відмінністю форм як в придонній частині виробів, так і в перехідній частині від корпусу до горла. Усі закономірності в зміні залишкових напруг зовнішнього і внутрішнього шарів критичних зон, що відповідають температурним мажорантам і мінорантам.

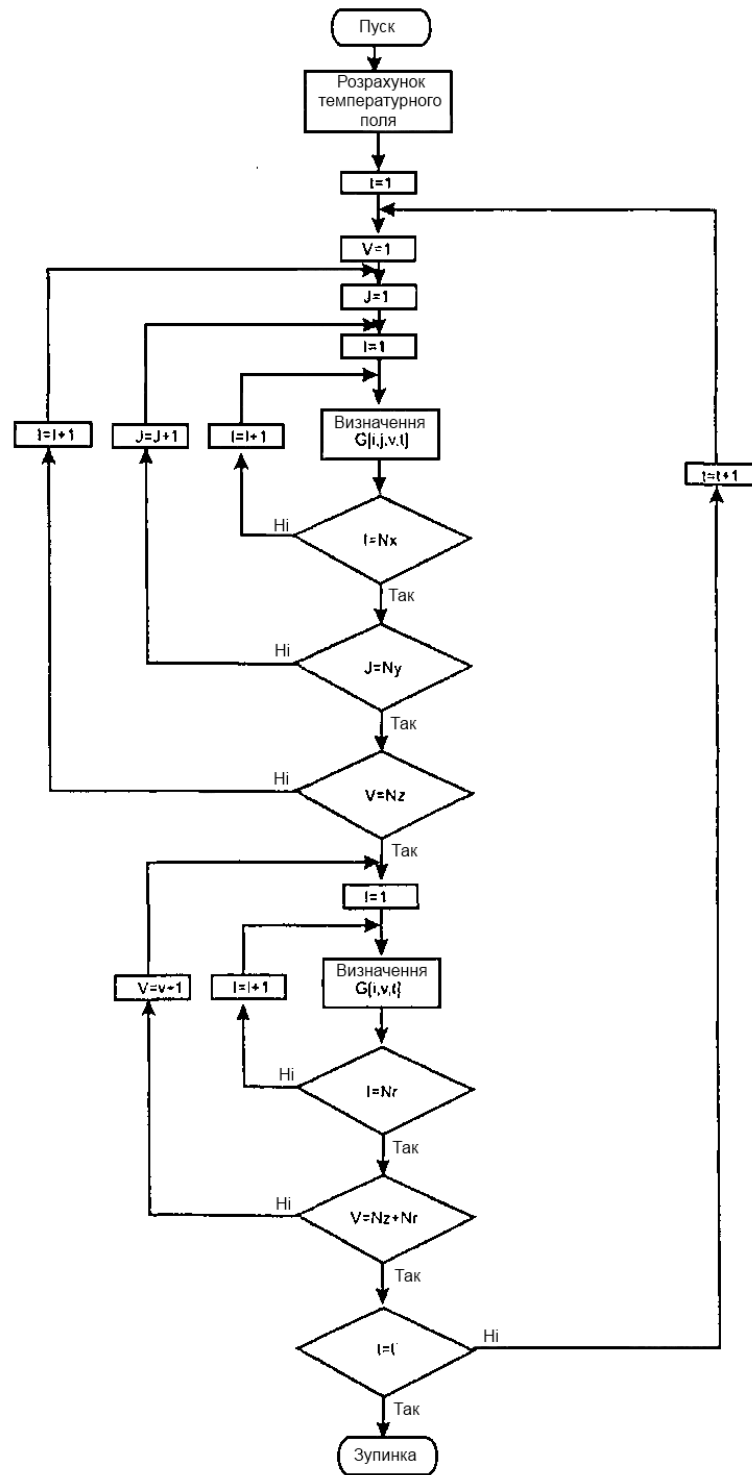


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритму розрахунку міцнісного стану скловиробу призматично-циліндричної конфігурації при його відпалі

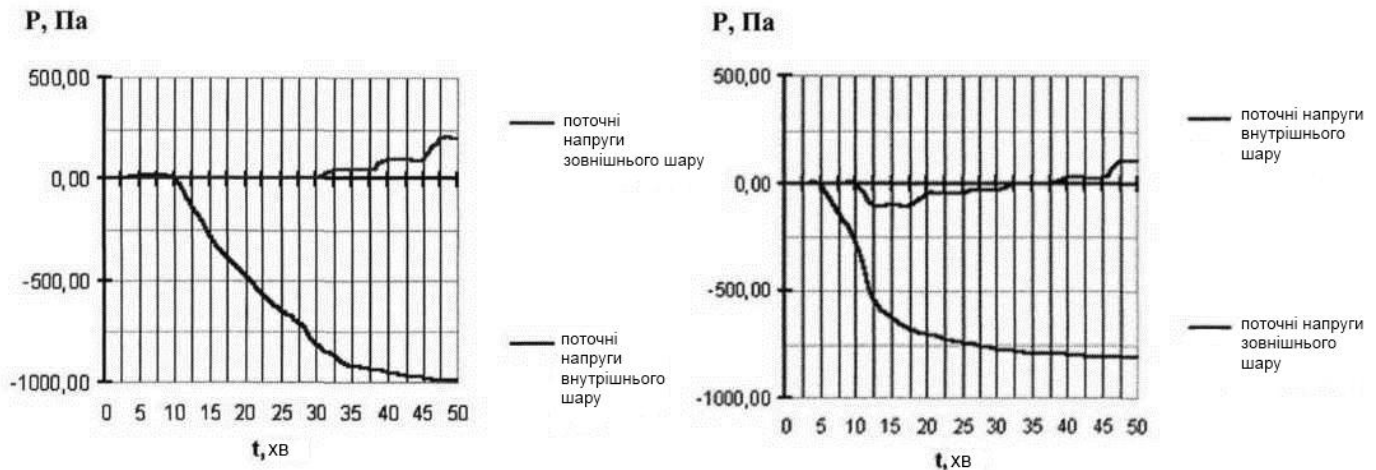


Рисунок 3.10 - Поточні напруги при відпалі скловиробів призматично-циліндричної форми в критичних зонах, що відповідають : а) - мажоранті; б) – міноранті

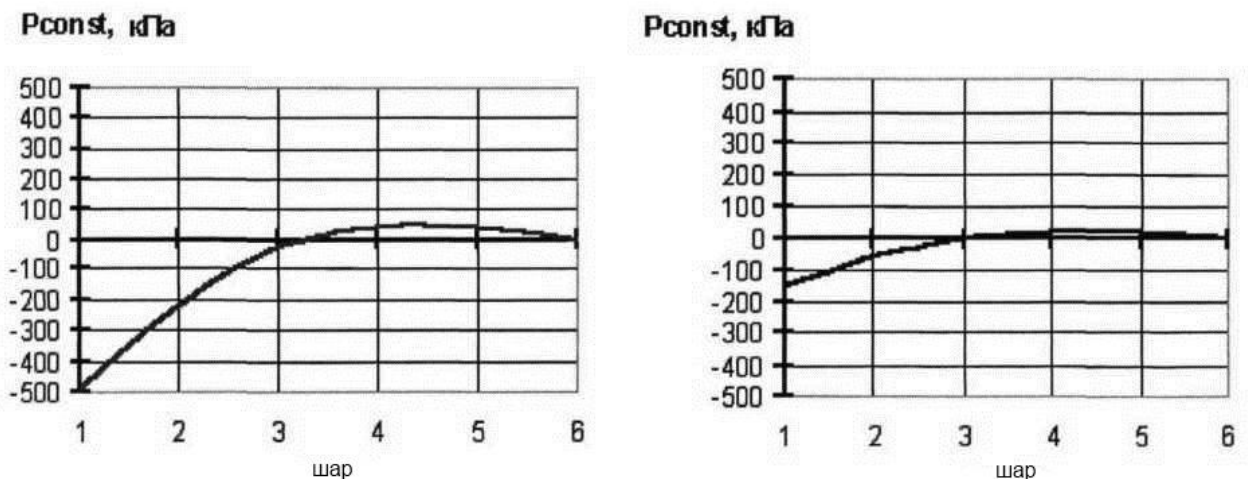


Рисунок 3.11- Розподіл залишкових напруг в скловиробі призматично-циліндричної форми після відпалу в критичних зонах, що відповідають : а) - мажоранті; б) – міноранті

3.4.Розроблення методики формування технологічних режимів відпалу скловиробів у печі

Створення ефективної системи автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів складної конфігурації припускає в першу чергу отримання раціонального технологічного режиму відпалу скловиробу з урахуванням його конфігурації, який би забезпечував досить високу продуктивність при

досягненні необхідних міцнісних властивостей, причому при переході від одного типорозміру до іншого така система забезпечувала б швидке переналаштування на новий технологічний режим. Як видно, в цих випадках потрібна інженерна методика отримання параметрів технологічного режиму, що дозволяє швидке відтворення процесу відпалу, що відповідає вимогам стандарту до тарної продукції, яка виробляється. Реалізація такої процедури можлива шляхом застосування цифрового моделювання технологічного процесу відпалу і на його основі машинного формування параметрів технологічного режиму для кожного типорозміру скловиробу, причому вказана процедура повинна виконуватися машиною верхнього рівня, що входить в структуру мікропроцесорної системи автоматизації розподіленого класу. Тоді, алгоритм функціонування ЕОМ верхнього рівня при рішенні задачі розрахунку технологічного режиму для конкретного заданого типорозміру скловиробу повинен спиратися на математичне забезпечення, представлене в п.2.1, п.2.2, п.3.2 і п.3.3, що дозволяє здійснити імітаційне моделювання процесу відпалу скловиробів (2.6),(2.8-2.48),(3.12),(3.13).

Маючи математичні моделі при відпалі скловиробів циліндрично-конічної і призматично-циліндричної конфігурації можна запропонувати наступну інженерну методику формування параметрів технологічних режимів відпалу.

Етап 1. Формування бази даних по номенклатурі продукції, що випускається, технічних умов, міцнісним характеристикам(допустимій механічній напрузі);

Етап 2. Установка програмного забезпечення для розрахунку температурного поля та поля механічної напруги при відпалі скловиробів для різних конфігурації(п.2.1);

Етап 3. Введення типорозміру скловиробу, що випускається;

Етап 4. Налаштування програмного забезпечення на заданий типорозмір скловиробу;

Етап 5. Визначення міноранти і мажоранти теплового поля та критичних зон скловиробу, що відповідають їм;

Етап. 6. Визначення міцнісних характеристик скловиробу в критичних зонах, що відповідають міноранти і мажоранти температурного поля;

Етап 7. Формування температурно-тимчасових параметрів технологічного режиму відпалу для заданого скловиробу, виходячи з виконання технологічних і експлуатаційних обмежень виду:

$$\begin{cases} \max\{\sigma^{тек}\} \leq \sigma_{\max}^{var}, \\ \max\{\sigma^{ост}\} \leq \sigma_{\max}^{const}, \end{cases} \quad (3.14)$$

де $\sigma^{тек}$ - поточна напруга по шарах в зразку; $\sigma^{ост}$ - залишкова напруга по шарах в зразку.

Крім того, повинні виконуватися умови підтримки температури в секціях печі:

$$\begin{cases} T_{нар} \leq U[k] = T_r[k] \leq T_{\max}, k = 1, \\ T_{нар} \leq U[k] \leq U[k-1], k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3.15)$$

Тут $T_{нар}$ - температура скловиробу, що поступає в першу секцію печі; T_{\max} - максимальне значення температури, що відповідає високій температурі відпалу; $U[k]$ – керуючий вплив, що являється температурою газового середовища T_r в секціях печі; k - номер секції печі.

Структура алгоритму формування температурно-тимчасових параметрів технологічного режиму відпалу скловиробів з розподілом температур по секціях печі представлена на рис.3.12.

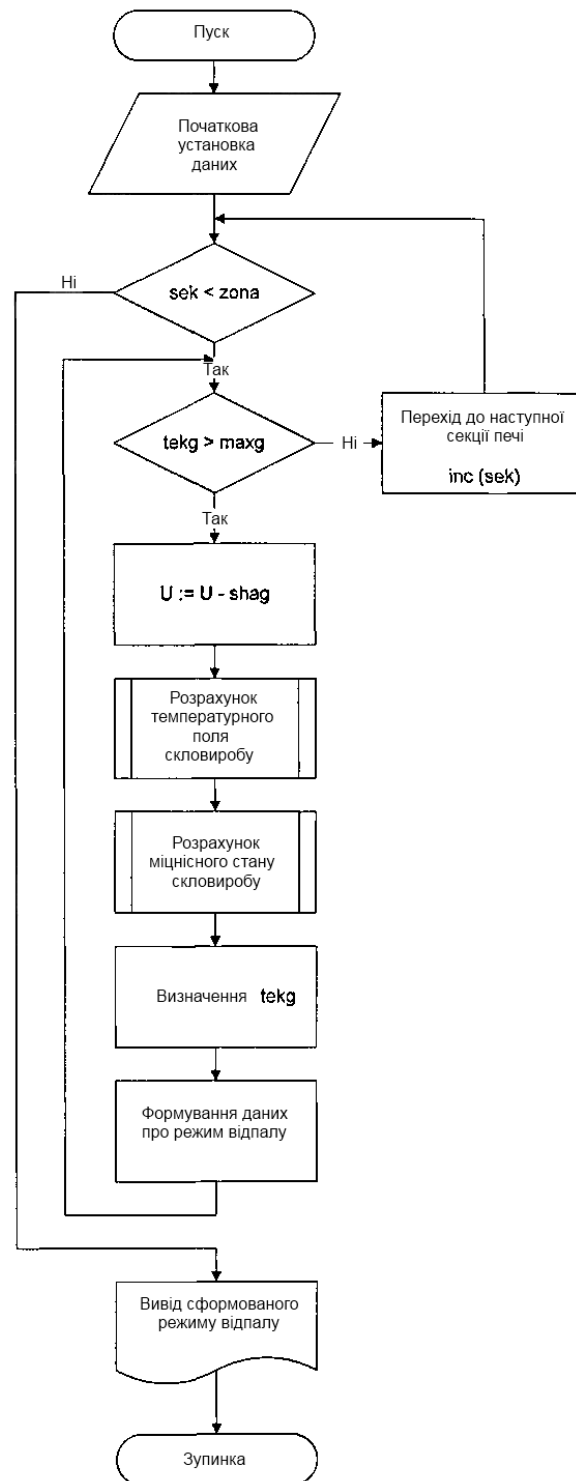


Рисунок 3.12 - Блок-схема алгоритму формування температурно-тимчасових параметрів технологічного режиму відпалу тарного скла

Як видно, ця структура включає блоки розрахунку температурного поля і стану міцності виробу та на їх основі здійснює за допомогою блоку "Формування даних про режим відпалу" і блоку порівняння "tek g > max g" вивід про величину необхідної температури U [k] у відповідній секції печі або про

необхідність переходу до наступної секції, в якій відбувається стрибкоподібна зміна керуючої змінної $U[k+1]$. Тут поточно σ^{var} і максимально допустима $\max\{\sigma^{max}\}$ напруга з вираження (3.14), а "zona" і "sek" означають кількість секцій печі та номер секції відповідно.

Проілюструємо результати застосування запропонованої інженерної методики машинного формування температурно-тимчасових параметрів технологічного режиму відпалу скловиробу на прикладі виробу №2, описаного в п. 2.1(таблиця 2.2) та п. 3.2, порівняємо характеристики міцності скловиробу, що відпалений по отриманому режиму та існуючому. Для існуючого режиму відпалу на рис.3.13 приведені криві температурного поля в секціях печі для критичних зон скловиробу, що відповідають мажорантній і мінорантній зміні температур.

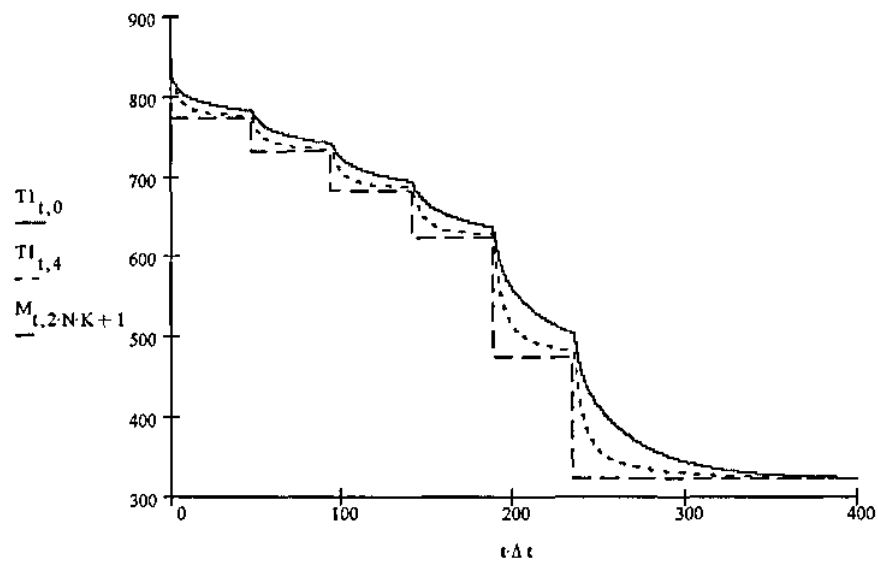


Рисунок 3.13 - Криві, що показують зміну поля температур в секціях печі та критичних зонах скловиробу, які відповідають мажоранті($T1_{t,0}$) і міноранті($T1_{t,4}$) (існуючий режим відпалу)

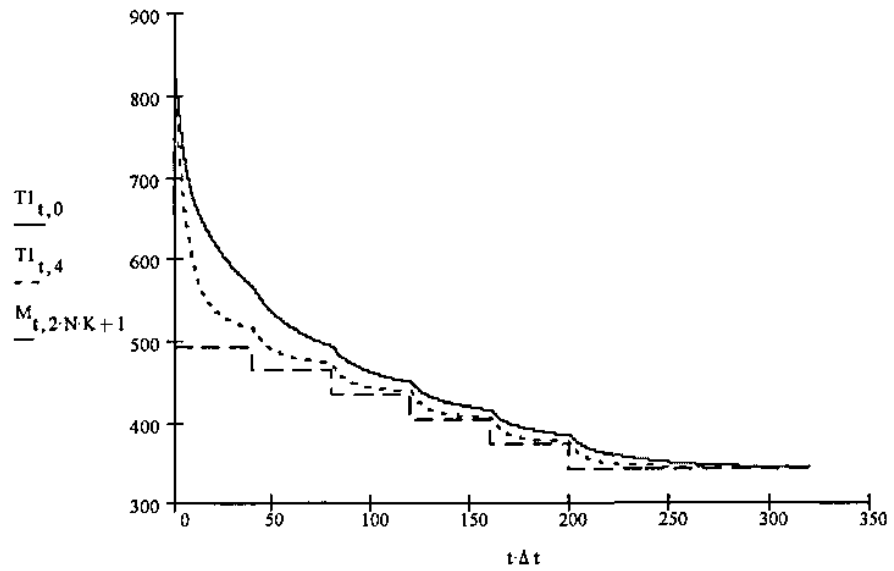


Рисунок 3.14 - Криві зміни полів температур в секціях печі та в критичних зонах скловиробу : $T1_{t,0}$ - для мажоранти, $T1_{t,4}$ - для міноранти (раціональний режим відпалу)

4. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВІДПАЛУ СКЛОВИРОБІВ

4.1. Формування принципів, покладених в основу автоматизації печі

Принципи побудови систем автоматизації мікропроцесорного класу повинні відбивати тенденції техніки автоматичного керування на сучасному етапі та органічно вписуватися в системний рівень проектування, що відповідає масовій комп'ютеризації. Стосовно об'єктів автоматизації, що є технологічними процесами і обладнанням підприємств будівельних матеріалів, найчіткіше тенденції вдосконалення систем керування викладені в роботі, де одночасно сформовані загальні принципи проектування сучасних мікропроцесорних систем автоматизації. Керуючись вказаними положеннями приведемо ряд визначальних принципів стосовно проектування системи автоматизації печі відпалу скловиробів складної конфігурації :

- принцип ієрархічності структури і ранжирування функцій;
- принцип агрегації;
- принцип безпечного функціонування і високої надійності;
- принцип високої інтелектуальності;
- принцип вільної нарощуваності(розширюваності);
- принцип інтегрованості в мережі;
- принцип економічності.

Розглянемо змістовну сторону приведених принципів проектування систем автоматизації.

Принцип ієрархічності структури системи автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів в печі впливає з двох особливостей виробництва скловиробів : перша - полягає в територіальній розосередженості об'єктів контролю і керування, що являють собою елементи і вузли печі відпалу, керування якими вимагає єдиної координації, яка визначається вимогами технологічного процесу відпалу; друга особливість витікає з орієнтації

керування на сучасні засоби мікропроцесорної техніки, з властивим їй розділенням функцій, їх розподілом між окремими мікроконтролерами, встановленням пріоритетів, тобто ранжируванням функцій. Таким чином, технічна реалізація системи автоматизації процесу відпалу скловиробів у формі ієрархічної багаторівневої обчислювальної мережі з розподіленою обробкою даних є як би відображенням різноманітності територіально розосереджених об'єктів керування та специфіки вирішуваних завдань, що впливають з характеру виконуваних функцій.

Універсальна САК процесу відпалу скловиробів в печі ПЕУ-323 з комплексними джерелами енергії повинна забезпечувати наступні функції:

- розрахунок технологічних режимів відпалу скловиробу для заданого оператором типорозміру на основі математичного моделювання;
- контроль і діагностику технологічного і електронного обладнання системи;
- пуск технологічного обладнання, безпечний розпал та керування процесом горіння газових пальників;
- виведення печі на розрахунковий технологічний режим;
- збір, обробку і аналіз інформації про стан об'єкту керування (по різних координатах керування);
- формування керуючих впливів;
- передачу керуючих впливів на виконання і контроль цієї передачі;
- реалізацію і контроль керуючих впливів;
- обмін інформацією між різними рівнями ієрархії та з взаємозв'язаними автоматизованими системами.

Аналізуючи перераховані функції з позиції особливостей інформаційних потоків, існуючих в системах автоматизації, характеру їх обробки і подальшого застосування, можна виділити наступний ряд узагальнених функцій :

- моделювання;
- контролю стану;
- контролю працездатності і діагностики;

- керування;
- сигналізації і сповіщення;
- моніторингу і переналаштування параметрів.

Реалізація кожної з узагальнених функцій припускає певну сукупність дій і заходів, які повинні виконуватися системою, причому існує зазвичай жорстка взаємність між функціями, що зумовлює ієрархічність структури обчислювальної керуючої мережі і периферійних пристроїв, що утворюють систему автоматизації, тобто система будується у формі вертикально-послідовного розташування підсистем, при цьому існує залежність дій підсистем верхнього рівня від фактичного виконання нижніми рівнями своїх функцій, крім того, на підсистему верхнього рівня покладаються завдання стратегічного класу, наприклад, формування мети керування на основі моделювання, архівація результатів поточного моніторингу, переналаштування параметрів і тому подібне. Реальними фізичними змінними повинен керувати лише нижній рівень ієрархії.

Принцип агрегації в проектуванні систем забезпечує зведення різних видів засобів автоматизації до обмеженого їх числа із створенням умов для розширення функціональних можливостей за рахунок застосування уніфікованих взаємозамінних агрегатів і модулів. Функціональні модулі базової апаратури контролю і керування повинні мати такі властивості як функціональна закінченість, нормованість функцій перетворення, стандартність конструктивного виконання, гальванічна розділеність ланцюгів живлення і керування, дистанційність керування режимами роботи. Побудова агрегованого комплексу для автоматизації технологічного процесу відпалу скловиробів в печі зв'язане з рішенням завдань по забезпеченню інформаційною, метрологічною, програмною, конструктивною і експлуатаційною сумісністю агрегуючих між собою модулів, а також з об'єктами керування і підсистемами контролю працездатності і діагностики систем автоматизації.

Принцип безпечного функціонування і високої надійності припускає створення розвинених структур систем автоматизації мікропроцесорного класу

з апаратною і тимчасовою надмірністю, вбудованими або паралельно працюючими підсистемами контролю працездатності. Особливу актуальність набувають вказані властивості у разі використання в печі комплексних джерел енергії - електроенергії і природного газу, що мають високу вибухонебезпеку.

Принцип високої інтелектуальності системи припускає використання лінгвістичних і програмних засобів, що забезпечують простоту доступу користувача, що не володіє основами програмування, до мікропроцесорних систем автоматизації.

Принцип розширюваності мікропроцесорних систем автоматизації реалізується шляхом використання узгоджувачів введення-виведення, спеціалізованих контролерів, розширювачів інтерфейсу. При цьому спрощується компонування, наладка і експлуатація системи.

Принцип інтегрованості в мережі диктується тенденцією розвитку мікропроцесорних систем автоматизації і переслідує мету більшого задоволення вимог замовника, забезпечення високої гнучкості виробництва і зростання коефіцієнта використання обладнання. Інтегрованість підсистем в мережу повинна давати більший ефект, ніж сума ефектів частин, що входять в систему. При цьому розширюються можливості ре конфігурації технічних і програмних засобів, завдань керування.

4.2. Синтез системи автоматизації печі ПЕУ-323 з комплексними джерелами енергії на функціональному рівні

В основу синтезу системи автоматизації печі, а точніше технологічного процесу відпалу скловиробів складної конфігурації в печі покладені принципи проектування, сформульовані в п.4.1, і математичні моделі процесу відпалу скловиробів, розроблені в розділах 2 і 3. Виходячи з цих положень, універсальна система автоматичного керування процесом відпалу в печі будується як розподілена ієрархічна система, причому розподіл завдань між рівнями ієрархії здійснюється на основі диференціації функцій, покладених на

систему, і їх ранжирування. Приведемо як приклад процедуру диференціації узагальнених функцій, описаних в п.4.1. Функції моделювання можна розподілити:

- формування моделі на базі її математичного і програмно-алгоритмічного забезпечення;
- завдання конфігураційних параметрів скловиробу;
- завдання температурних і міцнісних обмежень;
- отримання параметрів технологічного режиму відпалу скловиробів.

Функції контролю стану припускають:

- контроль температури в кожній зоні відпалювальної печі;
- контроль температури цехового приміщення;
- контроль стану електроустаткування печі(включено-виключено);
- контроль наявності тиску газу;
- контроль наявності полум'я кожного пальника.

Функції контролю працездатності і діагностики можна розбити на такі елементарні операції:

- діагностика електроживлення;
- діагностика хибного спрацьовування;
- діагностика окремих блоків системи керування розпалом і горінням газових пальників;
- діагностика вузлів і електронних блоків приводів вентиляторів та сітчастого конвеєра.

Функції керування представляються у формі наступної декомпозиції дій :

- стабілізація значень температури в кожній зоні(секції) відпалювальної печі у відповідність з режимним значенням температури, отриманим в результаті моделювання;
- включення і виключення циркуляційних вентиляторів;
- каскадне включення вентиляторів обдування при підвищенні температури в зоні швидкого охолодження вище встановленого порогового рівня;

- керування швидкістю стрічки сітчастого конвеєра для забезпечення розрахованого часу відпалу скловиробу на основі моделювання;

- керування процесом горіння газових пальників.

Функції моніторингу і переналаштування параметрів припускають:

- відображення на екрані АРМ оператора усіх контрольованих параметрів системи в реальному часі;

- відображення на екрані АРМ оператора стану електроустаткування печі і газових пальників;

- архівація даних з метою перегляду графіків зміни усіх контрольованих параметрів за будь-який інтервал часу з моменту початку роботи системи;

- оперативна зміна налаштувань контролерів і параметрів регулювання як з верхнього рівня, так і з віддаленого терміналу введення-виведення.

Функції сигналізації включають:

- видачу звукової і світлової сигналізації при аварійних ситуаціях, а також при відхиленні температури в кожній секції печі від заданого значення в межах $\pm 10\%$;

- відображення на екрані АРМ оператора критичних значень параметрів технологічного процесу і системи червоним кольором.

Легко помітити, що в кожній групі функцій можна виділити локальні завдання і глобальні, що вирішуються вже на основі інтегрованої інформації. У відповідності з цими властивостями потрібно всі вирішувані завдання сформулювати в три групи і кожен з груп віднести до відповідного рівня ієрархії розподіленої системи автоматизації. Завдання збору і первинної обробки інформації звичайно віднести до нижнього рівня ієрархії, тому цей рівень апаратно являє собою сукупністю периферійних пристроїв по відношенню до обчислювальної керуючої мережі. Сюди окрім інтелектуальних датчиків входять виконавчі пристрої. Чим вище по рівню ієрархії знаходиться пристрій, тим більше функцій на нього покладається і тим більшим об'ємом інформації

він може оперувати. На другому рівні ієрархії вирішуються завдання безпосереднього цифрового керування, що реалізуються на базі мікропроцесорного контролера. Одночасно тут закладаються можливості по рішенню завдань контролю працездатності і діагностики, що забезпечує надійність системи і безпеку функціонування.

Верхній рівень ієрархічної системи автоматичного керування будується на основі персонального IBM - сумісного комп'ютера. Він повинен задовольняти ряду вимог, а саме: мати плату ISA або com- порт для зв'язку з пристроями контролю і керування, мати відповідне програмне забезпечення і операційну систему Windows, оскільки більшість засобів програмного забезпечення, а також використовувана для написання керуючих програм SCADA - система TraceModeLagoon написані під цю операційну систему.

Таким чином, функціональна схема системи автоматизації технологічного процесу відпалу виробів складної конфігурації в печі з комплексними джерелами енергії може бути представлена у вигляді 3-рівневої ієрархічної структури (рис.4.1).

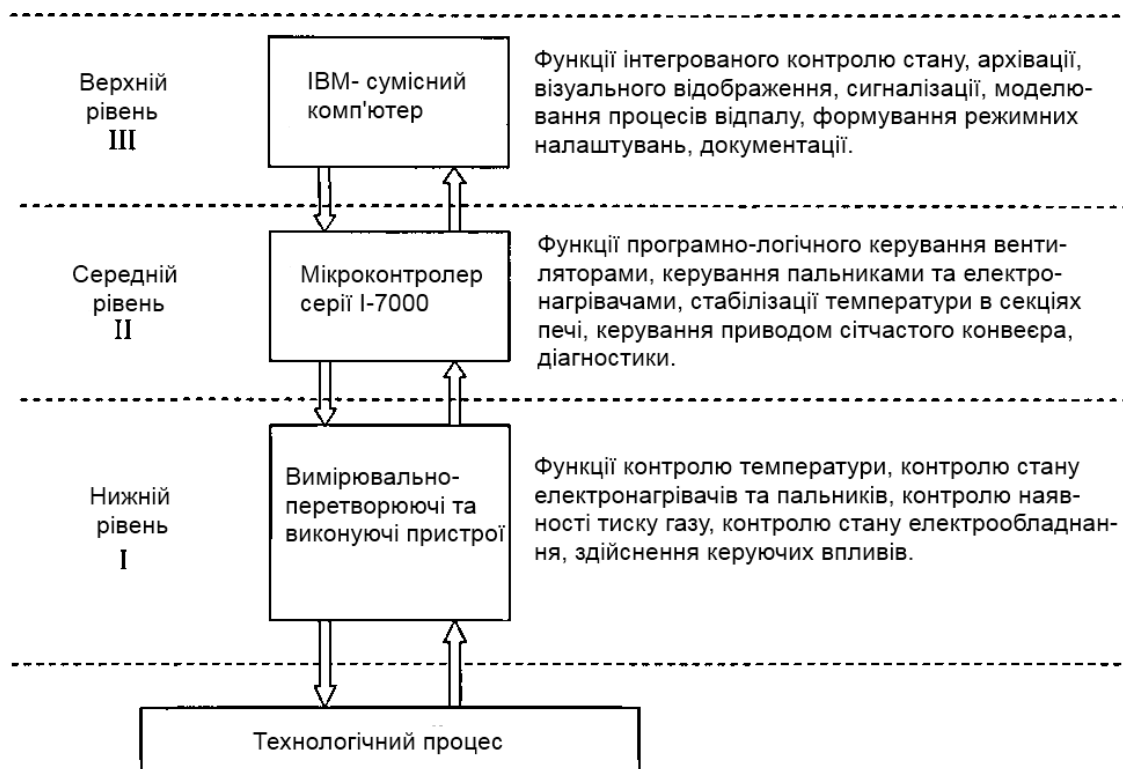


Рисунок 4.1 - Трирівнева ієрархічна структура функціональної схеми системи автоматизації ТП відпалу стекловиробів в печі

Використання персонального комп'ютера(ПК) як пристрою верхнього ієрархічного рівня відображення інформації дозволяє стежити за ходом технологічного процесу з місця оператора, що важливо при роботах з агресивними середовищами та позбавляє людину від роботи в небезпечній зоні, крім того він дозволяє передавати необхідну інформацію по мережі Internet на віддалені термінали.

На рис.4.2 представлений варіант реалізації ієрархічної мережевої обчислювальної керуючої системи, на модулях серії I7000.

Для зв'язку ПК з мікроконтролерами середнього рівня ієрархії можуть використовуватися модуль I7520 або плата ISA-7520R. Модуль I7520 перетворює сигнали інтерфейсу RS-232 в RS-485. Плата ISA-7520R встановлюється в ISA-роз'єм комп'ютера і виконує ті ж функції, що і однойменний модуль. Цей модуль можна застосовувати в структурі системи без мікропроцесора. Мікропроцесор за допомогою своїх портів має можливість працювати з приведеними інтерфейсами сигналів залежно від порту- приймача.

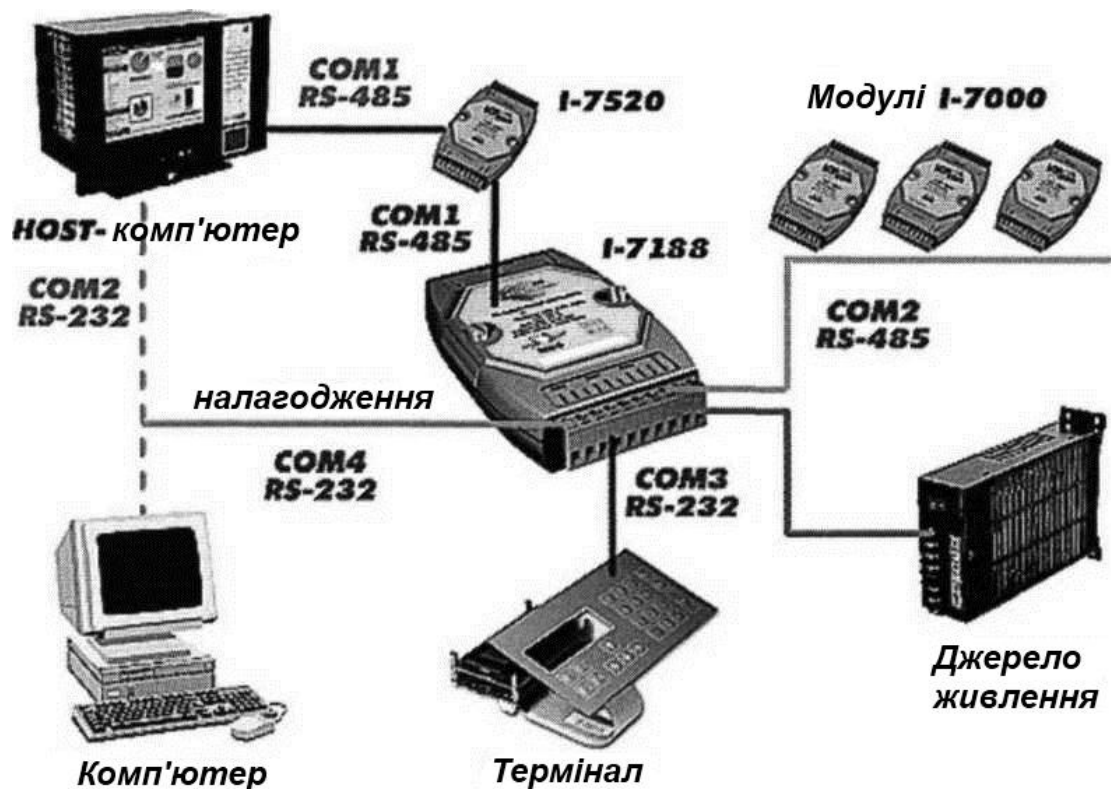


Рисунок 4.2 - Приклад побудови ієрархічної розподіленої АСК ТП на базі модульного виконання мікроконтролерів серії I7000

Модуль I7520 служить для перетворення інтерфейсу RS-232 в інтерфейс RS-485 і навпаки. Одночасно він може виконувати функцію збільшення перетворюваного сигналу. Служить для зв'язку модулів серії I7000 в межах системи керування одного технологічного процесу.

Модуль I7188 є процесорним модулем. З його допомогою і під його контролем здійснюється процес керування одним технологічним об'єктом. Модуль має чотири СОМ-порта для зв'язку з різними пристроями перетворення інформації. В числі таких пристроїв комп'ютер, модем дротяного або безпроводного зв'язку. Модуль може здійснювати контроль роботи не лише своєї локальної частини виробничого циклу, але і використовуватися як дублюючий пристрій на випадок відмови такого ж блоку суміжної ділянки технологічного процесу. Для цього схемотехнічно має бути реалізована можливість обміну технологічними змінними між цими блоками.

Віддалений термінал введення-виведення з чотирьохрядковим дисплеєм DK-8070 призначений для введення і виведення інформації за допомогою системи меню. Є можливість програмування клавіш цього функціонального блоку, задання режимів роботи з клавіатури, діагностика обладнання, тобто такий блок може як дублювати роботу ПК, так і повністю замінювати його на етапі експлуатації обладнання.

Для реалізації роботи процесорного модуля I7188 існує цілий ряд пристроїв збору інформації про технологічний процес, що включають блоки введення-виведення аналогових сигналів, розраховані на 1-8 каналів; блоки введення-виведення дискретних сигналів(до 16 каналів); введення сигналу з термодатчиків різних уніфікованих типів, терморезисторів, тензодатчиків; лічильники частоти; блоки релейного виведення та ін. На базі пристроїв цього типу можливе сполучення пристроїв автоматики і технологічного процесу, тобто об'єкту автоматизації.

4.3. Розроблення апаратних засобів мікропроцесорної системи автоматизації печі з комплексними джерелами енергії

Під апаратними засобами мікропроцесорної системи автоматизації печі слід розуміти периферійні пристрої, що забезпечують спостереження за станом об'єкту і виконання керуючих дій, що формуються мікроконтролерами, схемну організацію введення-виведення інформації, тобто схеми комутації каналів введення і виведення, що забезпечує обмін між нижнім рівнем ієрархії і її середнім рівнем.

Модулі введення. Оскільки інформація про стан параметрів контролю і керування технологічним процесом та технологічним обладнанням має як аналоговий, так і дискретний характер, то необхідно передбачити застосування модулів аналогового введення I7018 і модулів дискретно введення I7053. Кожен модуль I7018 має 16 клемних контактів для підключення 8-ми термопар будь-якого типу (зокрема E, J, K, N, R, S, T). Внутрішня структура модуля представлена на рис.4.3.

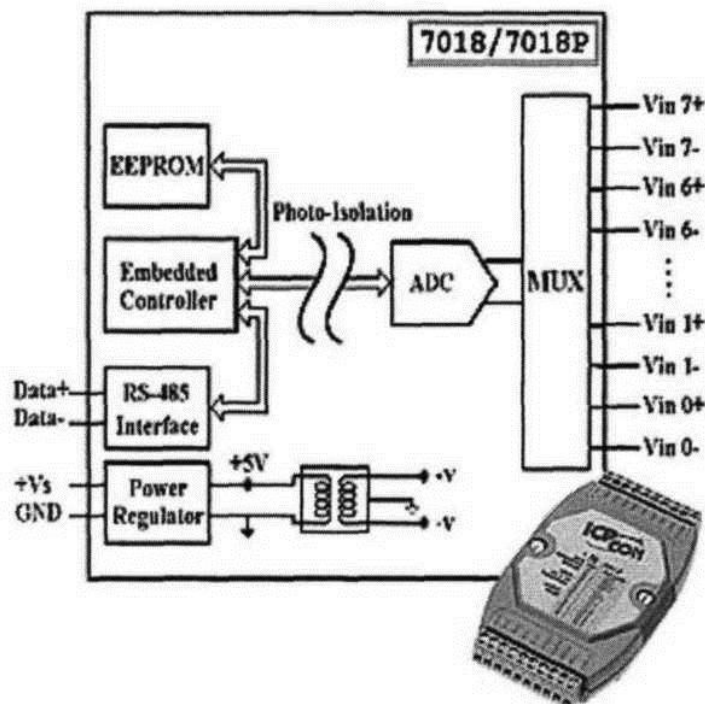


Рисунок 4.3 - Внутрішня структура модуля аналогового введення I7018

Як видно з рисунка, окрім контактів кріплення провідників термопар модуль має два виводи живлення і два виводи інтерфейсу RS-485, призначені для об'єднання контролерів в мережу. Також, в модулі схемно реалізована фото-ізоляція між силовою частиною, що включає в себе клема під'єднання датчиків температури, мультиплексор і АЦП, та інтерфейсною частиною модуля.

Оскільки піч для зняття значень температури в каналі відпалу має 15 термопар, то для охоплення всіх датчиків необхідно використати 2 модулі аналогового введення сигналу з термопар I7018. Варіант підключення датчиків об'єкту керування до клем мікроконтролерів показаний на рис.4.4, який дає також уявлення про розподіл датчиків температури по каналу відпалу і, відповідно, по зонах відпалу печі.

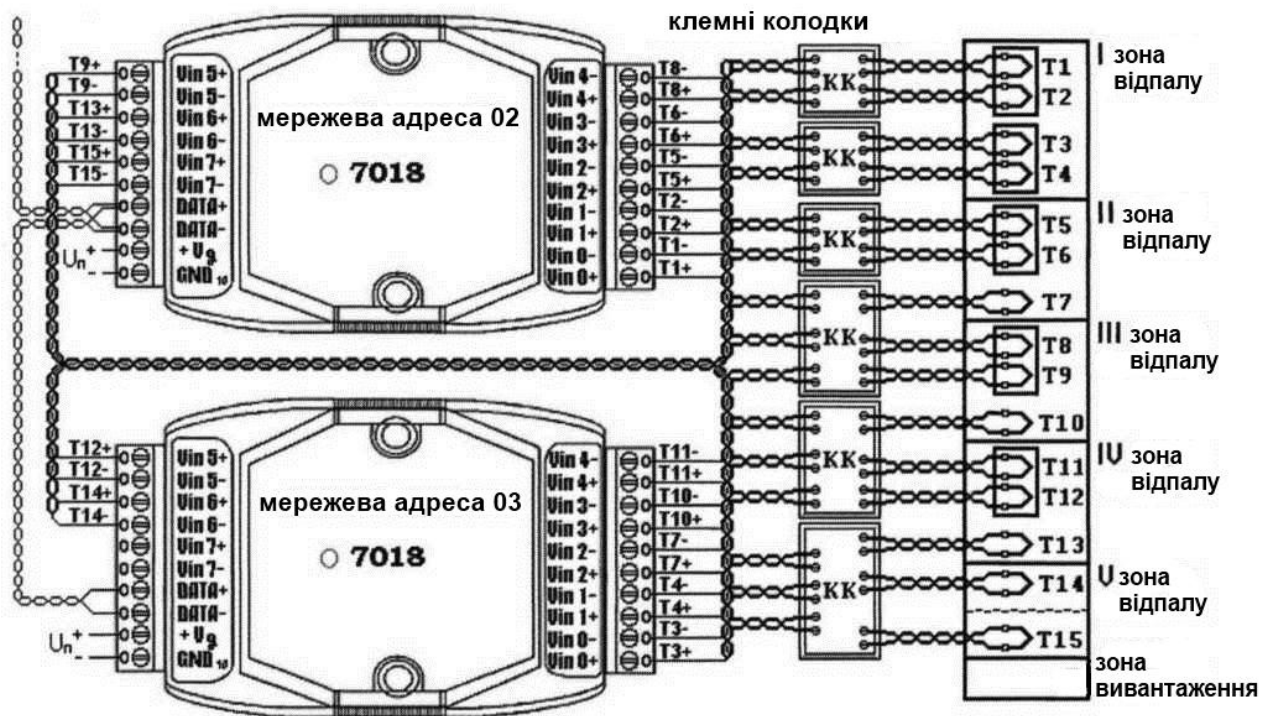


Рисунок 4.4 - Варіант підключення термопар печі до мікроконтролерів I7018

Термопари розподілені між мікроконтролерами так, щоб навіть при відмові одного модуля інформація про об'єкт керування не була втрачена повністю, тобто модулі частково дублюють інформацію один одного. Між

датчиками і клеммами модулів аналогового введення в якості проміжної комутаційної ланки, що полегшує монтаж датчиків на об'єкті керування, використовуються клемні колодки(КК). КК і додаткові провідники не вносять істотних перешкод в процес виміру, оскільки можна вважати, що всі виникаючі додаткові контакти провідників знаходяться при однаковій температурі.

Модулі I7018 об'єднані за допомогою витої пари в мережу інтерфейсу RS-485. Це досягається шляхом з'єднання однойменних контактів DATA+ і DATA- обох мікроконтролерів, а також комутації цих контактів одного з модулів далі в мережі з іншими периферійними пристроями системи, тобто здійснено послідовне підключення контролерів один до одного.

Оскільки для виміру температури використовуються ідентичні термопари, то, знаючи характеристику термопари цього типу і межу зміни температури в процесі відпалу в печі, можна зробити висновок, що для виміру температури термопарою типу R досить використати уніфіковане значення сигналу входу модуля по напрузі в межах $\pm 15\text{мВ}$. Перед початком функціонування модуля в системі його необхідно налаштувати на роботу в цьому діапазоні напруги вхідних сигналів.

Використання мікроконтролера I7018 в якості пристрою, що здійснює переробку і передачу сигналу з датчика температури, і термопари типу R в якості первинного датчика, дозволяє вимірювати температуру в зоні відпалу печі ПЕУ-323 з точністю до 1°C .

Модулі дискретного введення I7053 вводяться в структуру системи автоматизації для збору інформації про стан технологічного обладнання печі та засобів автоматизації самої системи з точки зору їх працездатності і готовності до виконання штатної процедури. Модуль I7053 має 16 каналів виведення дискретних сигналів. Ці канали можуть бути розподілені між обладнанням, наприклад, приводами вентиляторів, тенами, газовими пальниками.

Підсистема керування газовим пальником. В якості ілюстрації локальної керуючої системи, на базі мікроконтролера розглянемо оригінальну

мікропроцесорну систему автоматичного керування газовим пальником, розроблену автором (рис.4.5).

Мікроконтролерна система автоматичного керування пальником містить блок завдання режиму роботи навантажень 1(11, 12,13), мікроконтролер 2, блок датчиків 3(датчик витрати палива 9, датчик витрати повітря 10), блок підсилення і перетворення сигналів датчиків 4, блок керування навантаженнями 5, блок індикації 6(рідкокристалльні індикатори 15,16, 17, 18), блок зв'язку з ЕОМ верхнього рівня 7, блок живлення і синхронізації 8, резистори 14, 19.

Лінії зв'язку мікроконтролера 2 з периферійними пристроями позначимо як - РХ.У. Тут РХ - ознака порту мікроконтролера, де Х - цифра, що вказує на номер порту(наприклад, Р1 - перший порт мікроконтролера), а У - цифра, що вказує номер лінії(розряду) порту(наприклад Р3.1 - перша лінія(перший розряд) третього порту).

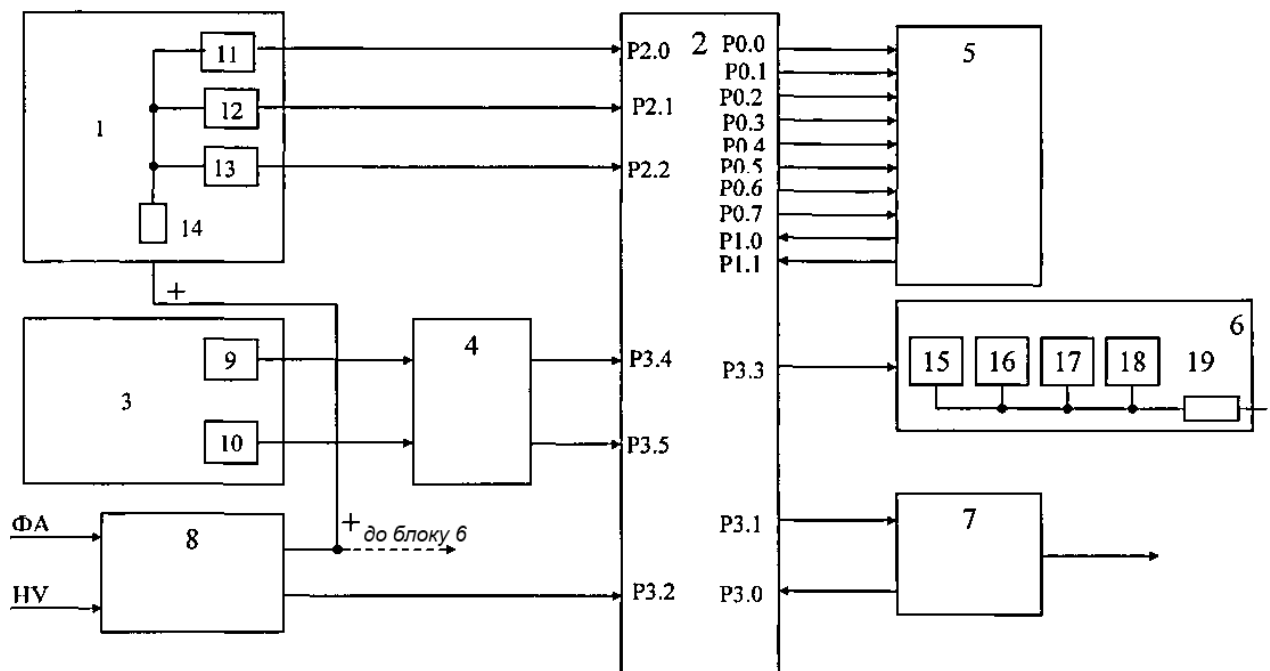


Рисунок 4.5 - Мікропроцесорна система керування газовим пальником печі

Блок завдання режиму роботи навантажень 1 призначений для введення завдання по витраті палива і коефіцієнтів надлишку повітря в мікроконтролер 2. Блок датчиків 3 призначений для отримання інформації про витрати повітря і палива. Блок підсилення та перетворення сигналу датчиків 4 здійснює

підсилення сигналів датчиків і їх перетворення в послідовність імпульсів різної частоти залежно від рівня сигналу датчика. Блок керування навантаженнями 5 призначений для здійснення плавної зміни витрат повітря і палива. Блок індикації 6 здійснює індикацію поточних і заданих витрат палива і коефіцієнта надлишку повітря. Блок зв'язку з ЕОМ верхнього рівня 7 призначений для отримання і передачі інформації від мікроконтролера 2 на ЕОМ верхнього рівня. Блок живлення і синхронізації 8 призначений для синхронізації і отримання напруги живлення для елементів пристрою. Блок датчиків 3 складається з датчика витрати палива 9, встановленого в трубопроводі подання палива, і датчика витрати повітря 10, встановленого в трубопроводі подання повітря. Блок завдання режиму роботи навантажень 1 виконаний у вигляді трьох кнопок 11, 12, 13, які живляться напругою живлення від блоку живлення і синхронізації 8 через резистор 14, який призначений для обмеження струму. Блок індикації 6 виконаний на чотирьох рідкокристалічних індикаторах 15, 16, 17, 18, які живляться напругою живлення від блоку живлення і синхронізації 8 через резистор 19, призначений для обмеження струму.

Блок живлення та синхронізації 8(рис.4.6) складається з трансформатора 20, діодних мостів 21, 22, стабілізаторів напруги 23, виходом яких є напруга живлення 24 для всіх елементів схеми, діодів 25, 26, резисторів 27, 28, 29, транзистора 30, а блок керування навантаженнями 5(рис.4.6) виконаний у вигляді високовольтних драйверів 31, 32, 33, 34, що здійснюють керування ключами у вигляді, наприклад, польових транзисторів 35 - 42, призначених для ШІМ - керування двигунами подання повітря і подання палива 43, 44. Крім того, цей блок включає резистори 45, 46 і компаратори 47, 48.

Пристрій працює таким чином. Контролер 2 забезпечує можливість програмної зміни режимів з використанням двох блоків: блоку завдання режиму роботи навантажень 1 і блоку індикації 6. За допомогою блоку завдання режиму роботи навантажень можна здійснити зростання або зниження як витрати палива, так і коефіцієнта надлишку повітря(витрати повітря).

Так, при натисненні кнопки 11, або поданню сигналу в ланцюг замикання ключа від мікроконтролера I7053, у блоці індикації 6 починає блимати індикатор 15, який сигналізує задану витрату палива в чисельному виді. При натисненні кнопки 13, або вступі команди від МК I7053 на замикання ключа, відбувається збільшення заданої витрати палива в елементі пам'яті мікроконтролера 2, що відображається на індикаторі 15. Аналогічно при натисненні кнопки 12, або поданню нової команди від МК I7053, відбувається зменшення заданої витрати палива в пам'яті мікроконтролера 2, що також відображається на індикаторі 15. При повторному натисненні кнопки 11, або повторному поданню команди від МК I7053, індикатор 15 перестає блимати, але починає блимати індикатор 17, що вказує заданий коефіцієнт надлишку повітря в чисельному виді. Аналогічно зміні завдання на витрату палива, відбувається зміна заданого коефіцієнта надлишку повітря шляхом натиснення кнопок 12 або 13, або замикання ключів по командах МК I7053, зміна заданого коефіцієнта надлишку палива фіксується у відповідному елементі пам'яті мікроконтролера 2, а також відображається на індикаторі 17. При натисненні кнопки 11 третій раз, або поданню третьої команди від МК I7053, блок індикації 8 переходить в нормальний режим роботи, при якому здійснюється індикація заданої витрати палива на індикаторі 15, на індикаторі 16 виводиться поточна витрата палива, аналогічно індикація заданого коефіцієнта надлишку повітря відбувається на індикаторі 17, а на індикаторі 18 виводиться поточне значення коефіцієнта надлишку повітря. Блок індикації 6 пов'язаний з мікроконтролером 2 по лінії зв'язку Р3.3, яка передає сигнал в послідовному коді.

Датчики витрати палива 9, повітря 10 блоку датчиків 3, роблять вимір поточних витрат. Виходи датчиків сполучені з відповідними входами блоку підсилення і перетворення сигналів датчиків 4, де вони перетворюються в послідовності імпульсів різної частоти залежно від рівня вхідного сигналу.

Частотний сигнал подається по лініях Р3.4, Р3.5, що є входами внутрішніх таймерів/лічильників, в мікроконтролер 2, який за значенням частоти імпульсів

визначає поточне значення витрат палива і повітря. Мікроконтролер 2 робить порівняння поточної витрати палива із заданим і за наявності помилки розбіжності збільшує(чи зменшує) частоту обертання двигуна подання палива 43, шляхом зміни шпаруватості імпульсів ШІМ-керування. По значеннях витрати повітря і палива мікроконтролер 2 робить обчислення поточного коефіцієнта надлишку повітря, як відношення витрати повітря до витрати палива, якщо поточне значення відрізняється від заданого, то він збільшує(чи зменшує) частоту обертання двигуна подання палива 44 шляхом зміни шпаруватості імпульсів ШІМ-керування. Зміна частоти обертання двигуна подання палива здійснюється мікроконтролером 2 по лініях зв'язку P0.0, P0.1, P0.2, P0.3, а зміна частоти обертання двигуна подання повітря по лініях P0.4, P0.5, P0.6, P0.7 шляхом подання по них керуючих сигналів, у блок керування навантаженнями 5, в якому здійснюється ШІМ - керування частотою обертання навантажень.

Зв'язок з ЕОМ верхнього рівня здійснюється мікроконтролером 2 через послідовний інтерфейс, наприклад, по дводротовій витій парі, по лініях зв'язку P3.0, P3.1 шляхом підсилення і узгодження сигналів по потужності у блоці зв'язку з ЕОМ верхнього рівня 7. З ЕОМ верхнього рівня, за бажання користувача, можлива зміна завдання витрати палива і коефіцієнта надлишку повітря, крім того, на ньому можуть створюватися файли звіту про витрату палива та коефіцієнту надлишку повітря.

Живлення усього пристрою здійснюється від блоку живлення і синхронізації 8, який подає синхронізуючі імпульси на мікроконтролер 2 по лінії зв'язку P3.2. Постійною напругою джерела живляться мікроконтролер 2, а також інші елементи пристрою : блок задання режиму роботи навантажень 1, блок датчиків 3, блок підсилення і перетворення сигналів датчиків 4, блок керування навантаженнями 5, блок індикації 6, блок зв'язку з ЕОМ верхнього рівня 7.

Принципова схема блоку керування навантаженнями і блоку живлення та синхронізації представлена на рис.4.6. Напруга живлення подається на

первинну обмотку трансформатора 20, вторинна обмотка якого має середню точку і підключена до діодного моста 22, вихід якого сполучений з входами стабілізаторів напруги 23, які здійснюють стабілізацію постійної напруги для живлення усіх елементів пристрою, виходом стабілізаторів напруги 23 являється напруга живлення для елементів пристрою 24.

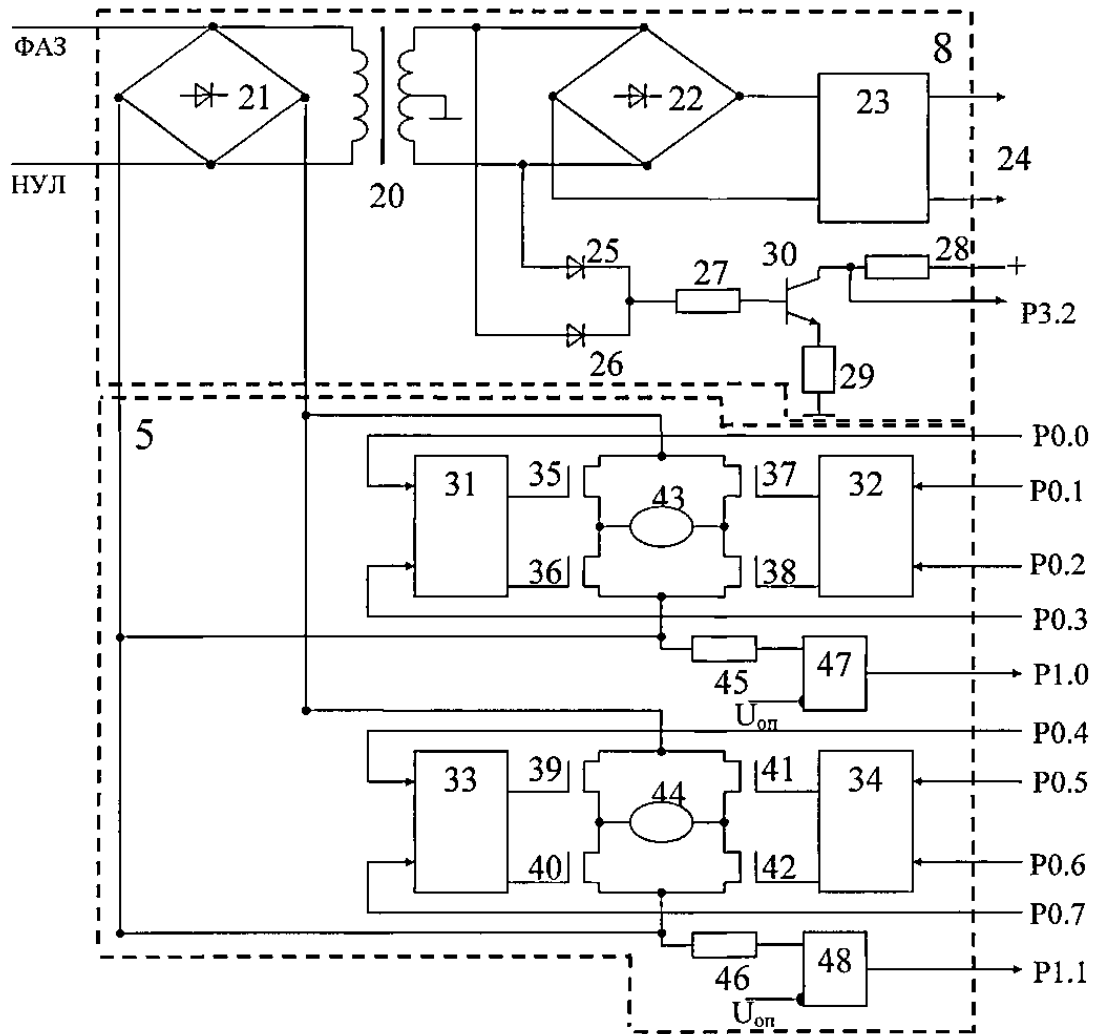


Рисунок 4.6 - Блоки живлення, синхронізації та керування навантаженнями

Вихід вторинної обмотки трансформатора 20 через діоди 25, 26, що здійснює випрямлення напруги, і через резистор 27, призначений для обмеження струму, сполучений з транзистором 30, в емітері якого знаходиться резистор 29, сполучений з нульовим дротом. Напруга живлення через резистор 28 подається на колектор транзистора 30, на якому виникають стробуючі імпульси, що сигналізують про те, що напруга живлення змінює свій знак; ці

імпульси прочитуються мікроконтролером 2 по лінії переривання P3.2 і служать сигналами для перемикання пар ключів при ШІМ-керуванні.

Для організації можливості плавної зміни частоти обертання навантажень передбачено ШІМ-керування двигунами подання палива і повітря. Напруга живлення подається на діодний міст 21, вихід якого сполучений з керуючими ключами 35, 36, 37, 38, виконаними, наприклад, у вигляді потужних польових транзисторів. Для включення відповідної пари ключів призначені високовольтні драйвери 31, 32, входи яких сполучені з мікроконтролером 2 по лініях зв'язку P0.0, P0.3 і P0.1, P0.2 відповідно. Високовольтний драйвер 31 здійснює керування ключами 35, 36, а драйвер 32 - ключами 37, 38. ШІМ-керування двигуном подання палива 43 здійснюється таким чином. Мікроконтролер отримує по лінії P3.2 сигнал про перехід напруги живлення через нуль, одночасно з цим він здійснює перемикання керуючих ключів, з пари 35, 38 на пару 36, 37. Ці перемикання здійснюються мікроконтролером 2 за допомогою подання сигналів керування, на високовольтні драйвери 31, 32, які здійснюють комутацію потрібної пари ключів. При включенні пари ключів 35, 38 протікає струм по ланцюгу: фаза, ключ 35, обмотка двигуна подання палива 43, ключ 38, нуль; при перемиканні пари ключів на 36, 37 протікає струм по ланцюгу фаза, ключ 36, обмотка двигуна подання палива 43, ключ 37, нуль, але за рахунок зміни полярності напруги живлення змінюється полярність струму. Модуляція здійснюється з частотою, заданою користувачем пристрою, шпаруватість імпульсів підбирається мікроконтролером 2 автоматично залежно від заданої витрати і від сигналу датчика витрати. У пристрої передбачений захист від короткого замикання обмотки двигуна подання палива. Резистор 45 вибирається так, щоб падіння напруги на ньому в режимі короткого замикання складало величину порядку $U_{оп}$ яким живиться компаратор 47, де відбувається порівняння $U_{оп}$ та напруги, струму обмотки, що відповідає поточному значенню. Вихід компаратора 47 сполучений з мікроконтролером 2 по лінії P1.0, якщо на виході компаратора утворюється логічна одиниця, що відповідає

режиму короткого замикання, мікроконтролер 2 відключає двигун подання палива і виробляє сигнал про непрацездатність двигуна подання палива.

Здійснення плавної зміни частоти обертання двигуна подання повітря 44 робиться аналогічно, на ключах 39, 40, 41, 42, високовольтних драйверів 33, 34. Захист від короткого замикання здійснюється на резисторі 46 і компараторі 48, вихід якого сполучений з мікроконтролером по P1.1. Для керування ключами 39-42 використовуються драйвери 33, 34 керовані мікроконтролером 2 по лініях P0.4 – P0.7 відповідно.

Модулі дискретного виведення. Керування виконавчими пристроями системи автоматизації (електронагрівачами, підсистемою керування газових пальників, вентиляторами охолодження і конвективними вентиляторами, двигуном приводу стрічки сітчастого конвеєра) здійснюється за допомогою пристроїв дискретного виведення. З метою уніфікації системи доцільно в якості таких пристроїв застосовувати мікроконтролер I7043, що має 16 однобітових каналів дискретного виведення, зібраних за схемою з відкритим колектором.

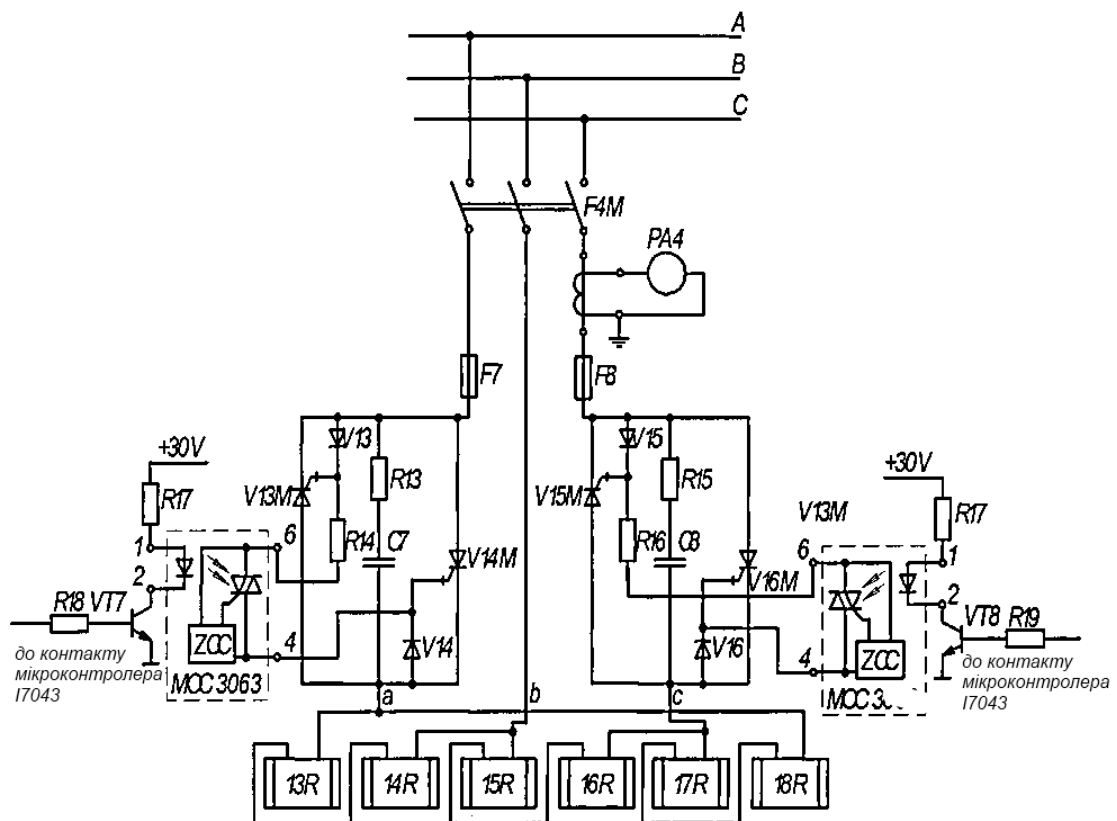


Рисунок 4.7 - Схема електрична принципова керування живленням нагрівачів у IV зоні печі

Для керування електронагрівачами, розташованими в камерах каналу відпалу печі, необхідно комутувати дві фази з трьох, що живлять електронагрівачі в кожній зоні. Схеми керування живленням електронагрівачів від мережі промислової напруги 380В в кожній зоні абсолютно ідентичні. Тому досить привести принципову електричну схему керування живленням електронагрівачів R13 - R18 в IV зоні печі(рис.4.7). Як видно за схемою, комутування силових ліній і виведень живлення нагрівачів здійснюється за допомогою фототиристора, виконаного на одній підкладці і представленого на схемі у вигляді мікросхеми МОС3063. Виведення мікросхеми 4 і 6 є безпосередньо виведеннями тиристора і дозволяють комутувати напругу до 800В і струми до 4 А, що цілком достатньо для нагрівачів печі ПЕУ-323. Керування світлодіодами відбувається за рахунок відкриття транзисторів(VT7, VT8) по ланцюгу бази завдяки поданню струму керування по відповідному каналу виведення модуля I7043.

Оскільки піч має чотири зони відпалу, в яких встановлені електронагрівачі, то для керування усіма ними необхідно використати 8 каналів дискретного виведення. Схема розводки сигналів керування дискретних виведень модуля I7043 з мережевою адресою 04 до електронагрівачів усіх зон відпалу представлена на рис.4.8.

З рисунка видно, що в керуванні електронагрівачами задіяні тільки 8 з 16 виведень мікроконтролера I7043, отже, вільні виходи можна використати для керування електродвигунами і вентиляторами. Схема підключення представлена на рис.4.9.Кількість вентиляторів, розташованих в каналі відпалу печі ПЕУ-323, рівна 8. Це 4 конвективні вентилятори, що перемішують повітря для кращого усереднювання температури по об'ємам зон відпалу, в яких розташовані електронагрівні елементи, та 4 вентилятори охолодження, розташованих в зоні охолодження скловиробів до температури цехового приміщення.

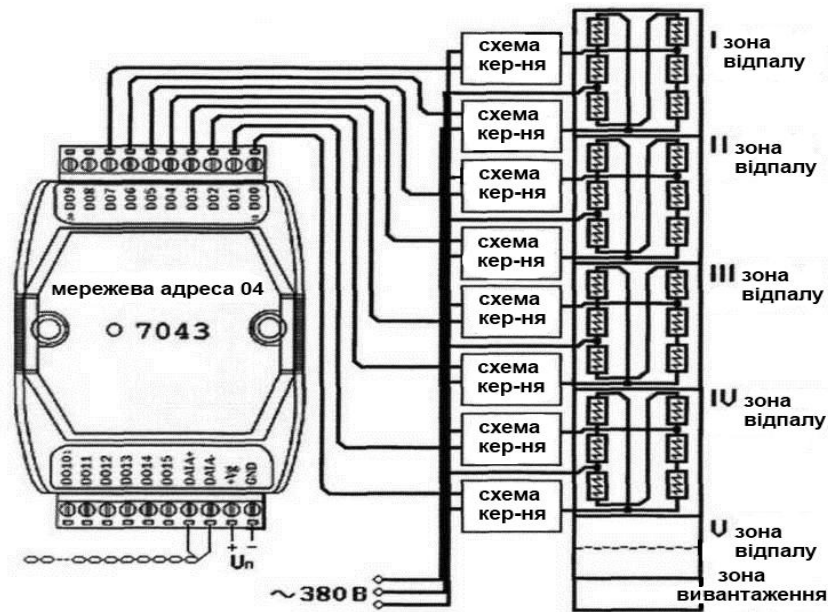


Рисунок 4.8 - Варіант підключення схем керування живленням електронагрівачів і дискретних виходів мікроконтролера I7043



Рисунок 4.9 -Схема комутації виходів модуля I7043, які використовуються для керування асинхронними двигунами

Схема керування приводом вентилятора печі на прикладі конвективного вентилятора показана на рис.4.10. Ідея побудови схеми керування електроживленням вентилятора полягає в тому, що за допомогою вихідних каналів модуля I7043 здійснюється керування силовими ключами, представленими блоками фототиристорів МОС 3063, що комутують 2 фази з 3, що живлять двигун приводу.

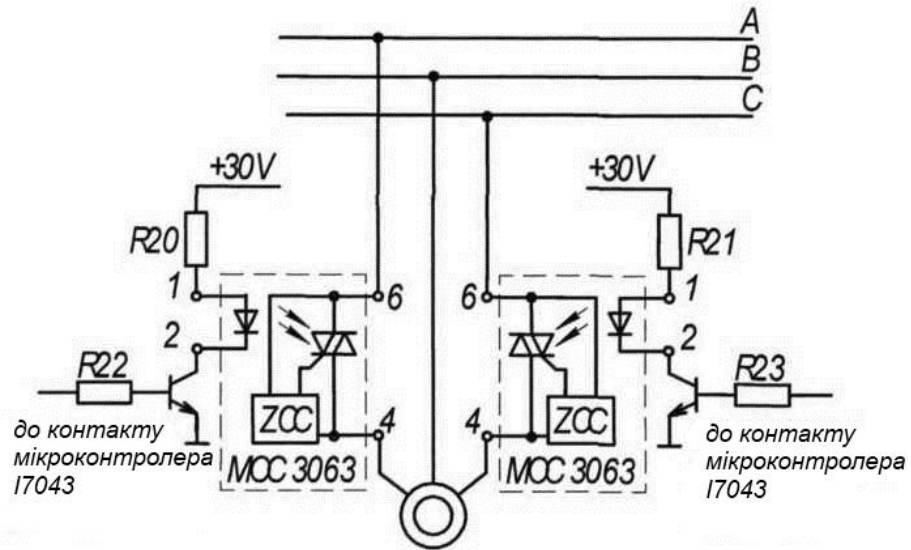


Рисунок 4.10 - Схема керування приводом вентилятора печі

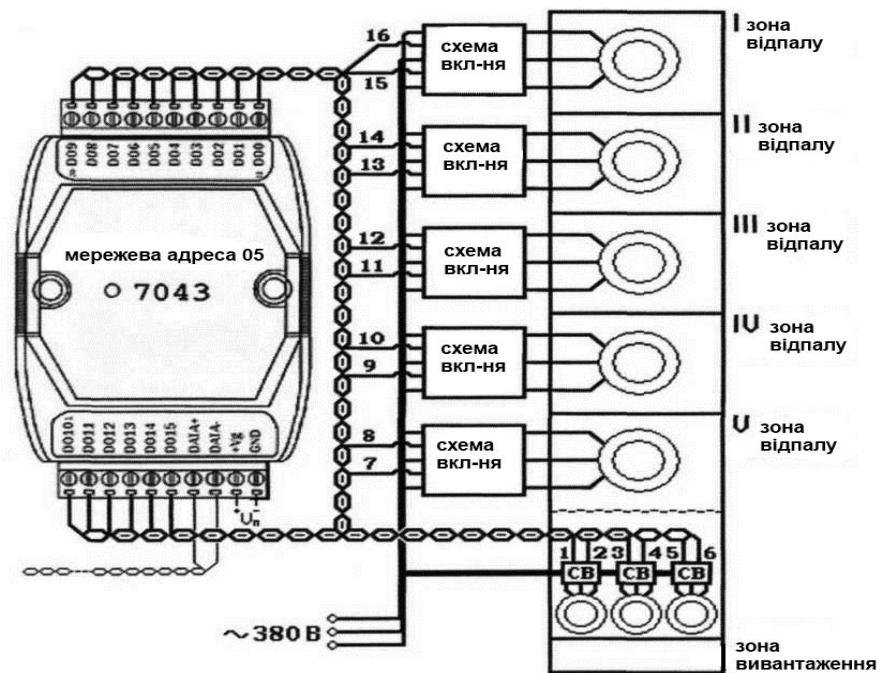


Рисунок 4.11 - Варіант розводки вихідних каналів модуля I7043 за схемами включення вентиляторів

Керування газовими пальниками, розташованими в чотирьох секціях (I - IV), робиться за допомогою оригінальної мікроконтролерної підсистеми відповідно до програмно-алгоритмічного забезпечення, розробленого раніше, що здійснює діагностику, розпал, керування режимом горіння, проте запуск

підсистеми з одночасним вибором режиму горіння і команда гасіння полум'я, тобто керування за принципом " включено - вимкнено" зручніше здійснювати для кожного з чотирьох пальників за допомогою модуля дискретного виведення I7043, причому схеми підключення мікроконтролера I7043 можна реалізувати за принципом фотоелектронного керування. Для керування підсистемою розпалу і горіння чотирьох газових пальників необхідно застосувати один модуль 16 - каналного дискретного виведення I7043.

Таким чином, для керування виконавчими органами ПЕУ-323 досить використати 3 модулі дискретного виведення I7043.

Підсистема керування приводом сітчастого конвеєра. Ця підсистема визначає час відпалу скловиробів відповідно до завдання, отриманого від персонального комп'ютера, що здійснює процедуру моделювання технологічного процесу відпалу, на підставі якої виходять параметри процесу(температура в зонах відпалу і час знаходження скловиробу в кожній зоні). Застосування механічної системи регулювання швидкості протягання стрічки сітчастого конвеєра за допомогою багатоступінчастої коробки передач має ряд недоліків, тому доцільно застосувати принцип керування, який ґрунтується на зміні режиму роботи електричної частини приводу, що досягається за рахунок використання принципу зворотного зв'язку для стабілізації заданої швидкості протягання у формі уставки. При цьому може застосовуватися в якості приводу як двигун постійного струму, так і асинхронний двигун. У останньому випадку відбувається керування частотою обертання двигуна шляхом регулювання частоти напруги живлення. Для такого керування за допомогою модуля дискретного виведення I7043 необхідно використати 6 виходів цього модуля. На рис.4.12 (а, б) представлені схеми керування асинхронним трифазним приводом печі на базі дискретного модуля виведення I7043, причому показана можливість передачі сигналів керування з виведень цього модуля на кристал АТ89С51 (рис.4.12, а).

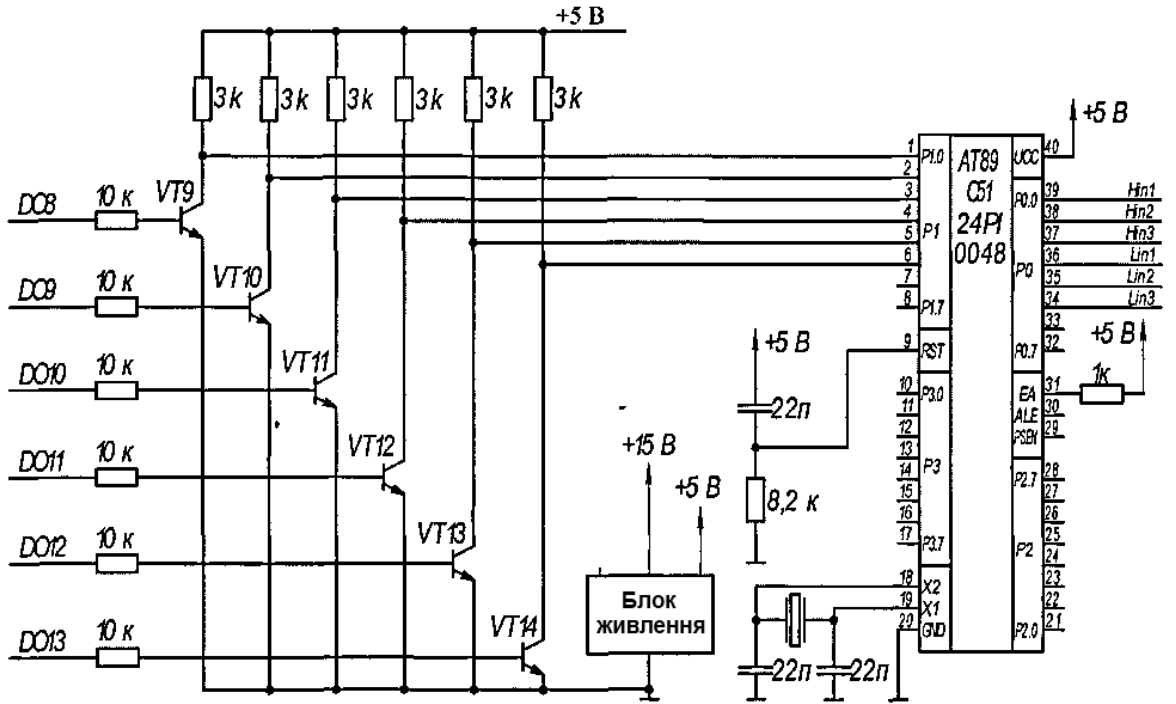


Рисунок 4.12, а - Схема керування асинхронним трифазним двигуном приводу печі (початок)

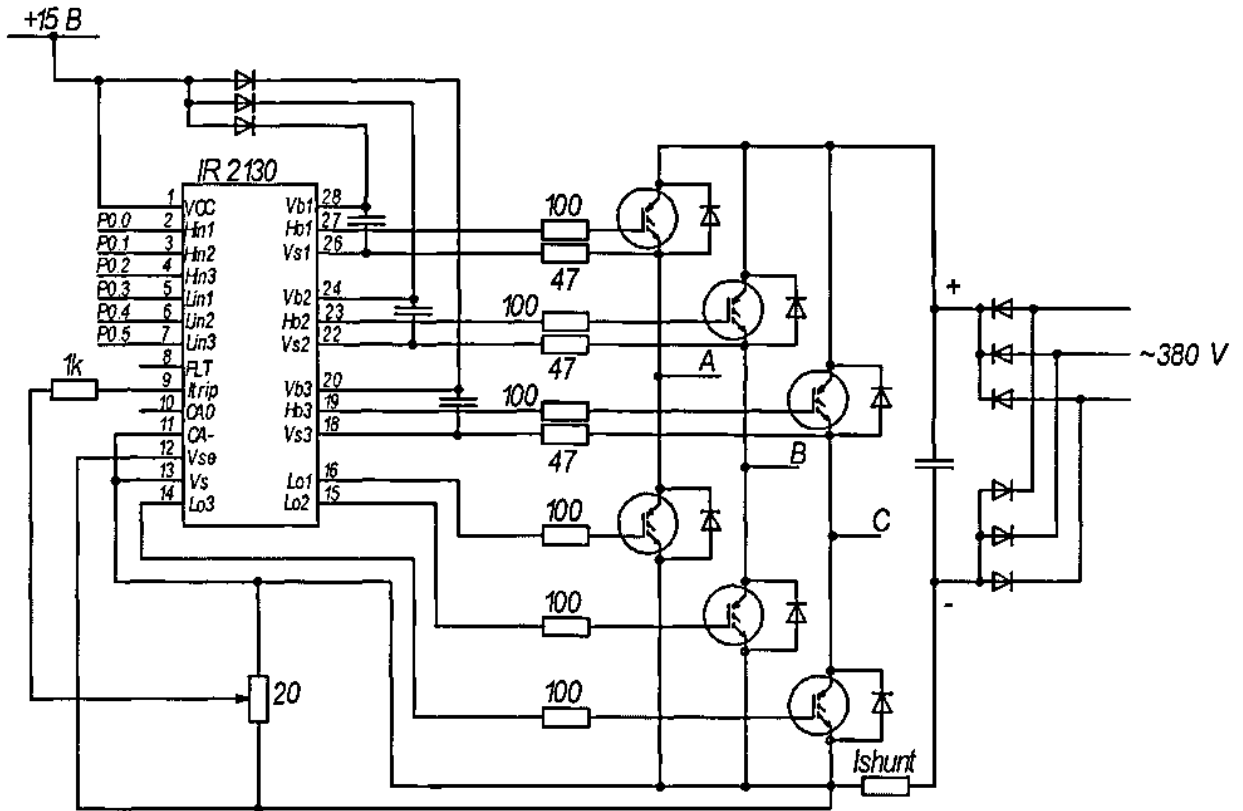


Рисунок 4.12, б - Схема керування асинхронним трифазним двигуном приводу печі(закінчення)

Шість бітів порту P1(6 ніжок порту) задіяні під прийом сигналу з модуля дискретного виведення I7043. Схемно зчитування реалізоване таким чином: за допомогою виходів модуля I7043 здійснюється керування транзисторами VT9 ... VT14, які у відкритому стані комутують напругу живлення +5 В через струмознімальні резистори на входи кристала AT89C51, тим самим утримуючи на ніжці мікросхеми рівень логічної одиниці. Така розв'язка потрібна внаслідок того, що характеристики модуля дискретного виведення не дозволяють йому витримувати рівень логічної одиниці на вході мікросхеми AT89C51.

Резистори в ланцюзі бази кожного транзистора мають номінал 10 кОм, а в колекторному ланцюзі транзисторів використовуються резистори номіналом 3 кОм. В якості транзисторів VT9 ... VT14 використовуються транзистори ГТ404А.

Шість бітів порту P0 кристала AT89C51 відведені під виведення сигналів керування на драйвер IR 2130. Схема керування комутацією фаз напруги живлення і обмоток асинхронного двигуна за допомогою мікросхеми-драйвера IR 2130 приведена на рис.4.12, б.

В завдання кристала AT89C51 в цій схемі входить регулярне зчитування порту P1, зчитування з нього двійкового числа, що є константою для реалізації відліку тимчасового інтервалу таймера у відповідний інтервал часу і утримання впродовж отриманого інтервалу рівня логічної одиниці на ніжках порту P0, що відповідають запрограмованому закону керування комутації фаз АД. Після певного циклу керування виходами порту P0 здійснюється повторне зчитування інформації з порту P1, і цикл керування повторюється.

Дев'ята ніжка мікросхеми використовується для скидання при поданні на схему скидання напруги живлення, рівної +5 В. Ніжка 20 мікросхеми - заземлення. До ніжок 18 і 19 приєднані виведення кварцевого резонатора. Частота кварцевого резонатора має дорівнювати 11,05 кГц, тоді мінімальний інтервал часу, відлічуваний таймером, дорівнюватиме одній мікросекунді. На ніжку 40 мікросхеми подається живлення +5 В. На 31-у - живлення для внутрішньої пам'яті програм мікросхеми.

Сигнали А, В і С(див.рис. 4.12,б) подаються на відповідні обмотки двигуна. Керування ключами здійснюється за допомогою спеціальної мікросхеми-драйвера IR 2130. При поданні на ніжки 2 - 7 мікросхеми керуючих сигналів постійного струму, які відповідають логічній одиниці, по ланцюгу керований затвор - емітер транзистор, що використовується як ключ, відкривається.

Переваги такої схеми керування полягають в однокристальному виконанні і простій топології, широкому діапазоні комутованої напруги - до 600 В, виключенні пробую між каналом керування та силовою частиною.

4.4. Розроблення програмного забезпечення функціонування мікропроцесорної системи автоматизації процесу відпалу скловиробів

Створення програмного забезпечення процедури функціонування ієрархічної системи керування технологічним процесом відпалу скловиробів повинно базуватися на алгоритмі роботи системи, який визначає послідовність дій керуючої програми та враховувати характер розподілу завдань і їх віднесення до відповідного рівня ієрархії (п.4.1). Крім того, необхідно передбачити такі режими роботи системи як "режим підготовки і пуску", "режим налаштування", "режим стандартного функціонування", "режим зупинки", "режим виходу з нестандартної ситуації". Для кожного з режимів будується алгоритмічна процедура, що визначає логіку роботи керуючої підпрограми цього режиму, а на підставі сукупності керуючих підпрограм, з урахуванням взаємодії режимів та ієрархії завдань розробляється керуюча програма для системи в цілому.

Керуюча програма дозволяє здійснювати запуск підпрограм керування режимами, запуск завдань, що вирішуються на верхньому рівні ієрархії, переривання завдань усіх рівнів ієрархії, крім того, на неї покладені функції ранжирування виконуваних завдань.

У відповідності зі змістом кожного завдання розроблені підпрограми рішення всіх завдань на кожному рівні ієрархії. Так, наприклад, підпрограма "Моделювання", приведена в п.3, дозволяє на основі задання типорозмірів і конфігурації скловиробу оператором сформувати температурно-тимчасові параметри технологічного режиму відпалу скловиробу в печі, які передаються в якості установок на нижній рівень ієрархії та визначають режим функціонування локальних систем керування, тобто режиму. При цьому кожна локальна система керування має підпрограми виконання функцій для кожного функціонально-необхідного елементу системи. Стосовно запропонованої структури мікропроцесорної системи керування, виконаної на базі мікроконтролерів серії I7000, розробку програм зручно робити в середовищі TraceModeLagoon. Розглянемо особливості, що враховуються при програмуванні в цьому середовищі, таких основних процедур, що виконуються мікроконтролерами в процесі керування, як збір і обробка інформації з термопар, керування електронагрівачами, керування електроприводом сітчастого конвеєра та роботою вентиляторів.

Обробка сигналу з термопар. Процедура обробки фізичного сигналу з термопари, що отримується у вигляді електричного сигналу в мілівольтному діапазоні(0 ... 15 мВ), полягає у встановленні відповідності між значенням напруги та температурою в градусах Цельсія, а також в обліку компенсації температури холодного спаю термопари.

На рис.4.13 представлена FBD - програма, що здійснює обробку сигналу з термопари, переклад його в технологічні одиниці виміру($^{\circ}\text{C}$) і що враховує поправку на температуру холодних спаїв термопар. Значення поправки віднімається з перетвореного значення напруги з модуля. Таким чином, відпадає необхідність у використанні схемної компенсації температури холодних спаїв кожної термопари, що сильно спрощує апаратну реалізацію мікропроцесорної системи.

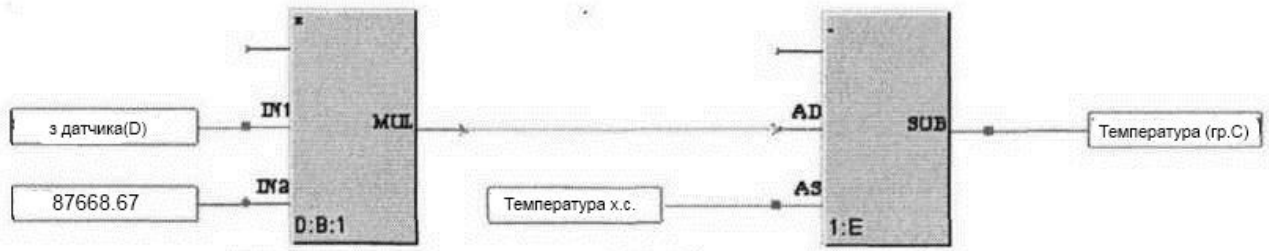


Рисунок 4.13 - Програма обробки сигналу з термопары

Програма обробки сигналу з термопары реалізує наступний алгоритм перетворення :

- сигнал, що поступає з модуля аналогового введення I7018, який являє собою сигнал напруги в діапазоні 0...+15 мВ, подається на вхід IN1 блоку перемножування MLP. На другий вхід блоку подається константа, рівна 87668,67. Значення константи вибирається, виходячи з метрологічних характеристик термопары типу R;

- сигнал з виходу блоку перемножування, що відповідає температурі в °С, подається на вхід AD блоку віднімання SUB. Поправка на температуру холодних спаїв контактів термопары вводиться за допомогою подання відповідного значення температуры із спеціального каналу модуля I7018 на вхід AS блоку віднімання.

Вихідний сигнал блоку віднімання відповідає температурі, що знімається термопарою з урахуванням холодного спаю. Його значення привласнюється в середовищі TraceModeLagoon відповідному значенню каналу введення температуры і використовується надалі для керування нагрівальними елементами печі.

Керування електронагрівачами. Підпрограма керування електронагрівачами являється дуже важливою, оскільки визначає напрям технологічного процесу відпалу відповідно до установок, які сформовані на основі реалізації підпрограми "Моделювання".

Підпрограма керує роботою одного нагрівача однієї зони печі, але завдяки особливості мови FBD- програмування, вона може бути використана неодноразово з будь-якими вхідними і вихідними сигналами, що визначаються

прив'язками. Тому, один раз реалізована для одного випадку логіка керування може бути застосована для керування роботою аналогічних пристроїв в аналогічних ситуаціях з іншими параметрами, але тільки у рамках однієї керуючої програми тільки з її каналами введення/виведення.

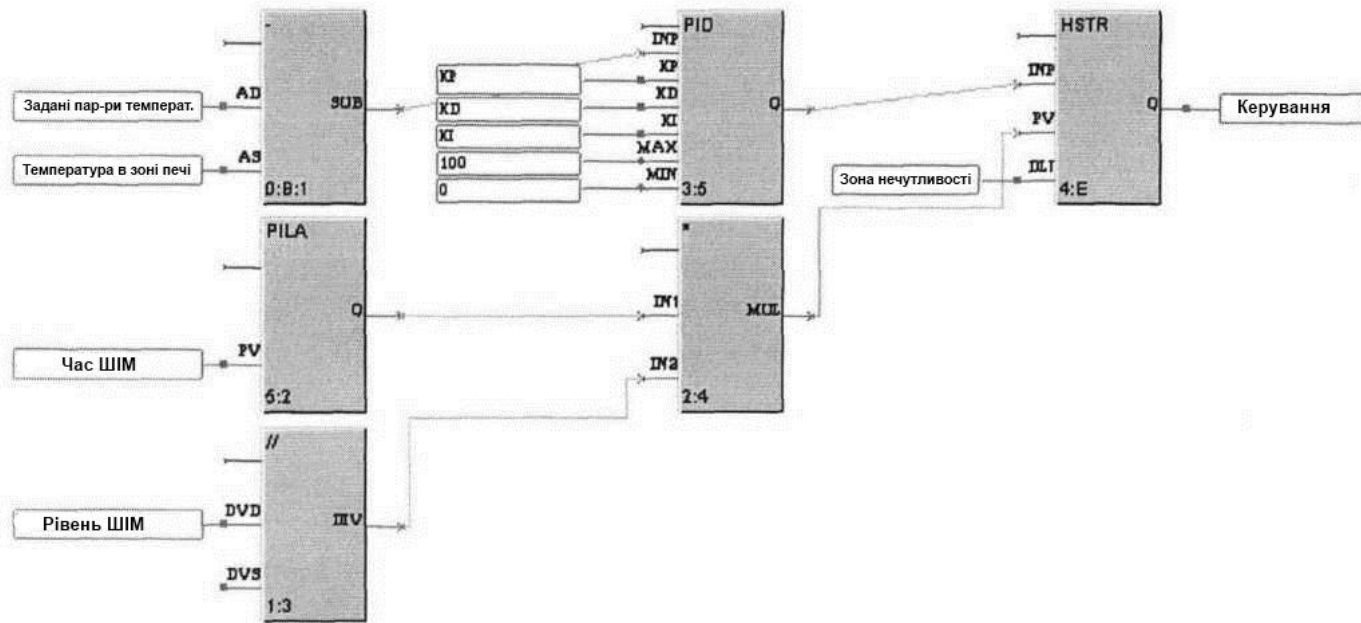


Рисунок 4.14 - Реалізація закону управління одним нагрівачем

Варіант реалізації закону керування нагрівачем однієї зони печі на мові FBD- програм представлений на рис.4.14. Блок SUB в програмі виконує функції суматора з негативним зв'язком за значенням температури, що отримується з термопари в зоні печі, і формує на основі порівняння з величиною установки сигнал розузгодження по температурі. Вихід блоку зв'язаний з входом блоку PID, що реалізовує ПІД-закон керування. Мінімум виходу ПІД-закону дорівнює 0, а максимум - 100. Значення змінних KP, KI, KD доступні зміні з боку верхнього рівня і визначають, відповідно, пропорційну, інтегральну і диференціальну складові закону керування. Блок ПІД-керування забезпечує стабільне керування при зміні значення уставки температури в зоні, а також при деяких нестандартних ситуаціях в роботі системи, наприклад, при сильному перегріванні зони печі.

ПІД-керування ефективно у разі, коли величина розузгодження між значенням температури в зоні і установленими значеннями велика. Коли ж

різниця між ними мала, краще використати ШІМ-керування електронагрівачами. Для здійснення ШІМ-керування в програмі використовується генератор пилкоподібних коливань, що реалізовується блоком PILA. Вихід цього блоку з кожним циклом керуючої програми зростає на одиницю до тих пір, поки не стане рівним значенню, що подається на вхід PV блоку і відмінному від нуля. Щоб окрім часу наростання пилкоподібних коливань можна було контролювати рівень генерованого сигналу, застосовується блок ділення DIV, що формує значення константи, на яку домножується вихід блоку PILA. Тривалість і максимальне значення пилкоподібної напруги задаються оператором системи.

Для поєднання роботи двох різних схем керування, а саме: схеми ПІД-керування електронагрівачами в області великої похибки розузгодження і ШІМ-керування в області малої похибки, використовується блок гістерезису HSTR. Якщо значення сигналу, що надходить на блок HSTR зі сторони схеми ПІД-керування більше значення, що надходить з боку ШІМ-керування плюс величина зони нечутливості закону, то на виході блоку формується одиниця(домінування ПІД-складової при великому сигналі розузгодження по температурі), що відповідає включенню електронагрівача. Навпаки, при значенні сигналу розузгодження в межах рівня ШІМ, значення на виході блоку формується на підставі домінування ШІМ-закону керування.

Епюри сигналів при керуванні роботою електронагрівачів однієї зони печі приведені на рис.4.15. На ньому показані тимчасові діаграми роботи ПІД-та ШІМ-законів, моменти включення керування нагрівачами, а також приведений зовнішній вигляд температурної кривої нагріву зони.

Представлена програма застосовується тільки у тому випадку, коли виконується керування нагрівачем за даними про температуру, що надходять від однієї термопар. Якщо в реперній точці зони відпалу печі встановлені дві термопар, то для реалізації закону керування по запропонованому алгоритму необхідно усереднити два значення температури, що надходять від термопар, і потім підставити середнє в запропоновану програму.

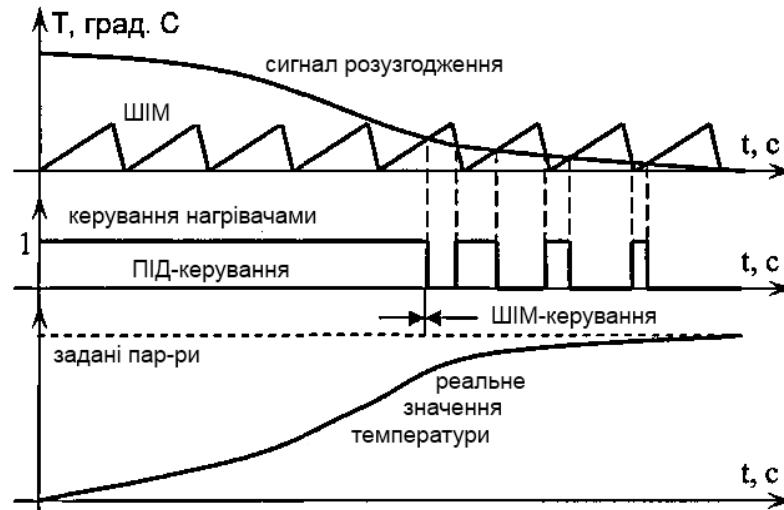


Рисунок 4.15 - Діаграма керування електронагрівачем

Для того, щоб застосувати програму кілька разів для всіх електронагрівачів печі, треба створити відповідну кількість каналів керування, працюючих за цією програмою, прив'язати до них інформаційні канали, канали-установки і канали виведення дискретної інформації.

Підпрограма керування електродвигуном приводу сітчастого конвеєра.
 Як вже відзначалося раніше, програма керування електродвигуном приводу стрічки конвеєра печі реалізується двома пристроями: мікропроцесором I7188 і мікросхемою AT89C51. Та частина програми, яка здійснює функцію безпосереднього керування драйвером приводу через вимоги до швидкодії керування реалізується засобами мікросхеми AT89C51 і складена на мові асемблера. Вхідними даними для цієї частини підпрограми є значення часу витримки такту керування в мілісекундах, яке виробляється за допомогою мікропроцесора I7188 на підставі значення повного часу відпалу штучного скловиробу в печі.

Підпрограма, що забезпечує вироблення інформаційного сигналу для мікросхеми AT89C51 в двійковій формі, побудована шляхом класичного перетворення десяткового числа в двійкове. Метод полягає в діленні початкового числа на 2, визначенні залишків ділення і запису отриманих залишків в зворотному порядку(запис числа по степенях двійки).

ВTraceModeLagoon описаний спосіб реалізований за допомогою наступних FBD-блоків:

- блок ділення реалізує функцію ділення числа на вході блоку на два;
- блок отримання цілого числа потрібний для здійснення цілочисельного ділення;
- блок множення, реалізує множення на 2 залишки від ділення;
- блок віднімання, служить для отримання залишку від ділення у вигляді різниці двох величин : перетвореною і заданою.

На рис.4.16 показаний фрагмент програми, що реалізовує приведений алгоритм.

Вихід кожного блоку віднімання є бітом вихідного двійкового 6-розрядного слова програми. Кожен біт при прив'язці каналів програми зв'язується з одним каналом(однією клемою) модуля дискретного виведення I7043.

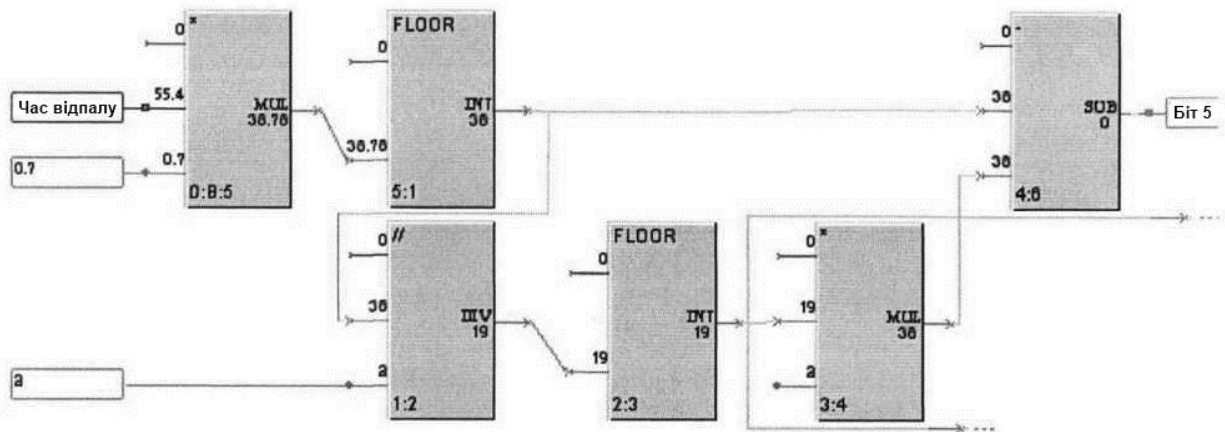


Рисунок 4.16 - Фрагмент програми переведення часу відпалу в двійкову форму

Програма, записана в пам'яті мікросхеми AT89C51, реалізує векторне керування драйвером приводу двигуна, який відповідно до поданого на його вхід алгоритму відкриває або закриває відповідні ключі.

```

        clr P0.4      ;
        clr P0.5      ;
        jmp TAKT2     ;
LABEL2: mov R0, period ;
        clr C         ;
        mov P0, #11111111b ;
TAKT3:  jb C, LABEL3  ;
        clr P0.2      ;
        clr P0.3      ;
        clr P0.4      ;
        jmp TAKT3     ;
LABEL3: mov R0, period ;
        clr C         ;
        mov P0, #11111111b ;
TAKT4:  jb C, LABEL4  ;
        clr P0.1      ;
        clr P0.2      ;
        clr P0.3      ;
        jmp TAKT4     ;
LABEL4: mov R0, period ;
        clr C         ;
        mov P0, #11111111b ;
TAKT5:  jb C, LABEL5  ;
        clr P0.0      ;
        clr P0.1      ;
        clr P0.3      ;
        jmp TAKT5     ;
LABEL5: mov R0, period ;
        clr C         ;
        mov P0, #11111111b ;

TAKT6:  jb C, LABEL6  ;
        clr P0.0      ;
        clr P0.1      ;
        clr P0.5      ;
        jmp TAKT6     ;
LABEL6: ljmp GO       ;
                                ; підпрограма обробки переривання від T/C1
TIMER:  djnz R0, QUIT  ; R0-1, порівняння R0 із 0, перехід по мітці
        setb C         ; встановлення біта C
QUIT:   RETI          ;
END     ;

```

Ця програма після налаштування регістрів IE, IP та TMOD здійснює запит порту P1, куди з мікропроцесора подається двійкове число часу такту керування асинхронним двигуном. Після оцифрування отриманого числа і в повній відповідності з ним мікросхема AT89C51 здійснює векторне керування приводом, зводячи і скидаючи на величину отриманого часу біти порту P0, що відповідають за сполучення з мікросхемою драйвера IR2130.

Висновки

У магістерській роботі вирішено актуальне завдання вдосконалення способів автоматизованого керування технологічним процесом відпалу скловиробів складної конфігурації в печі з комплексними джерелами енергії, що призводить до підвищення ефективності виробництва скловиробів за рахунок зниження питомих витрат енергії.

Результатами роботи, що послужили розвитком теоретичних основ створення автоматизованих систем керування технологічним процесом відпалу скловиробів складної конфігурації, являються:

- досліджені та розроблені математичні моделі, що описують динаміку температурного поля і поля механічної напруги при відпалі скловиробів циліндрично-конічної і призматично-циліндричної конфігурацій, що дозволили виявити найбільш критичні області скловиробів з точки зору їх стану міцності методом цифрового моделювання;
- запропонована методика автоматизованого формування параметрів відпалу скловиробів складної конфігурації по їх заданому типорозміру, що базується на основі цифрових моделей динаміки полів температури і механічної напруги;
- розроблена та досліджена методика проектування багаторівневої мікроконтролерної системи автоматизації із застосуванням SCADA- технологій з урахуванням особливостей об'єкту керування, пов'язаних з використанням комплексних джерел енергії;
- синтезована структура мікропроцесорної системи автоматизації, що забезпечує раціональні режими відпалу скловиробів з урахуванням складності їх конфігурації.

Крім того, в магістерській роботі виконані програмно-апаратні розробки, що мають оригінальність в побудові.

Запропоновані схемні рішення і програмне забезпечення мікропроцесорної підсистеми керування газовими пальниками печі відпалу з урахуванням особливостей, що виникають при використанні комплексних джерел енергії-електроенергії і газу, які пов'язані із забезпеченням безпеки. Створені підсистеми контролю стану і діагностики комплексних джерел енергії. Розроблені підсистеми керування приводом вентиляторів і приводом сітчастого конвеєра печі, побудованого на базі асинхронного трифазного двигуна. Схемні рішення і програмно-апаратні засоби, запропоновані в роботі, мають практичну цінність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Племянніков М.М., Яценко А.П., Корнілович Б.Ю. Хімія і технологія скла. Високотемпературні процеси / Навчальний посібник. – К.: «Освіта України», 2015. – 183 с.
2. Gardon R.//Glass: Sci. And Technol. New York. 1980. Vol. 5.P.145-216.
3. Sereda B., Belokon Y., Belokon K., Kruglyak I., Sereda D. (2019) Modeling of the processes of obtaining porous materials under SHS conditions. Materials Science and Technology 2019, Portland, Ore., USA, 2019. pp. 1331–1335.
4. Khina B.B. Combustion Synthesis of Advanced Materials. New York, NY: Nova Science Publ., Inc., 2010. 110 pp.
5. Blodgett, O.W. Design of Welded Structures [Текст] / Omer W. Blodgett, Sc.D., P.E. - Cleveland, Ohio: The James f. Lincoln Arc Welding Foundation, 1996. – P: 832.
6. Schaeffer H.A., Stengel M., Mecha J.//J. Non-Cryst. Solid. 1986. Vol.80, №1-3. P.400-404.

ДОДАТКИ

1. ANALYTICAL PART

1.1. Characteristics of technological equipment and the process of heat treatment of glass products as objects of control

During the production of glass products, an important operation of the technological process is annealing, which ensures, as a result of a certain product cooling regime, the distribution of mechanical stress in the glass, which guarantees the absence of spontaneous destruction or destruction due to external mechanical and thermal influences during operation. The annealing process acquires special value for products with a complex configuration, since the appearance of transitions of a complex shape (corner, rib, ellipse, narrowing, thickening of the wall, etc.) leads to a change in the temperature field, and with it to a significant increase in residual mechanical stress.

Today, continuous conveyor furnaces with convective heat exchange method are used for annealing glass products in industry, since scientific developments aimed at intensifying the annealing process due to the combination of convective and radiative heat exchange have not found a real embodiment in the form of industrial heat technological equipment. Although it should be noted that there are both domestic - PKE-324, and foreign KNUD (Belgium), Pennekamp (Germany) thermal technology annealing units built on the specified principle of combining different types of heat exchange. In addition, new generation annealing furnaces (1991-1997) were developed, created mainly on the radiation method of energy transfer in the IR spectrum (thermal radiation annealing installations of the "Ranok-N" series, N - the number of thousands of hollow products per hour) in the heat exchange system. the source of radiation is glass - the wall of the furnace". The following advantages of new generation annealing furnaces are noted:

- accelerated annealing (560-420°C) 3-4 times;
- reduced area in terms of dimensions by 3-5 times;
- the mass of metal structures is reduced by 4-5 times;

- energy consumption is reduced by 2 times;
- the thickness of thermal insulation is reduced by 6-8 times, reduced to 10-50 mm;
- the oven is ecologically clean, does not blow dust particles of harmful substances, is silent;
- The efficiency of the water cooling device of the annealing furnace is increased to 80% by the use of selective reflective coatings;
- the low inertia of the furnaces makes it possible to computer-synchronize the operation of the "Ranok-N" installation with the glass-forming machine at a productivity of 90-150 pieces of products per minute.

Such advantages make it possible to free up 75% of the workshop area and increase its productivity when replacing existing convective furnaces.

Heat-technological annealing units of the new generation, although they allow to significantly intensify the process of heat treatment, still have only a single application in industry, and the economic state of enterprises does not create conditions for the rapid introduction of new technology. In this regard, it is necessary to go the way of intensifying the heat technological equipment for annealing, which is currently in use, by developing rational modes of heat treatment of glass products based on energy-saving technologies.

The PEU-323 annealing furnace is a widespread technological unit for annealing glass products. Gaseous and liquid fuel, as well as electric energy, are used as fuel for annealing furnaces. The use of solid fuel is impractical, as it involves additional costs for its grinding, in addition, it is necessary to deal with soot in the furnace and chimney of the furnace.

If liquid or gaseous fuel is chosen as the energy source, then the process of temperature regulation will be reduced to controlling the flame of the burner torch. In the case when the heater is a heating element, the control task is simplified, as it is much easier to capture information about the parameters of such a device and control it, which allows you to achieve better control quality.

Annealing furnaces of continuous action, which include the PEU-323 furnace, are used for annealing mass-produced glass products that have rather small dimensions and a simple shape. In these ovens, products move continuously through successive temperature zones corresponding to the stages of the annealing regime.

Due to its production characteristics, the use of continuous furnaces is the most justified, since the continuity of the production process and high productivity are observed.

The most convenient from the point of view of implementation of control is the horizontal design of continuously acting annealing furnaces with a mesh conveyor and electric heating (electric furnace PEU-323). Heating elements (supports) are installed inside the tunnel in places corresponding to the temperature curve of the annealing of glass products.

To ensure the specified temperature regime along the length of the tunnel, together with the heaters, cooling devices are also provided - fans that supply outside air to the channels that are adjacent to the upper and lateral sides of the part of the tunnel that is heated. These fans are automatically turned on when the temperature in the corresponding section exceeds the set point.

Moving with the help of a mesh conveyor belt, glass products successively pass through four zones of the furnace - heating (cooling), exposure, slow cooling, fast cooling. There is also a temperature equalization section in the furnace, structurally located after the rapid cooling zone immediately in front of the unloading tray. In this area, the temperature of the glass products equals the temperature of the workshop room, dropping to 30-50 °C, heaters are not installed here.

The PEU-323 furnace (Fig. 1.1) consists of an annealing tunnel 2, chambers 1 for electric heaters, channels 3 for cooling air, a system of convective fans 5, three blowing fans and a cooling fan 6, a mesh conveyor 4, drive and tension stations. Overall external dimensions of the furnace, m: length 23.67, maximum width 3.26, maximum height 2.51. The annealing tunnel has a length of 18.4, a width of 1.9 and a height of 0.45, and the width of the conveyor grid is 1.8.

Electric heating elements (supports) are placed inside the furnace tunnel in places that correspond to the temperature curve of glassware annealing. A total of four sections of heaters, 6 in each, are installed. The total installed power of electric heaters is 250 kW.

The productivity of the PEU-323 furnace is up to 50 tons of products per day. The speed of the transport device can be set in the range from 0.04 to 0.8 meters per minute.

The continuous firing electric furnace has several thermal zones with independent temperature regulation, which makes it possible to implement different temperature regimes. The length of the furnace zone is usually equal to 1.5-2 meters, but to implement the calculated thermal regime of the annealing process, it can be increased to 2.5 - 3 meters, or, conversely, reduced to 0.8 - 1.2 meters.

Heaters in electric furnaces are installed on the riser, upper part and side walls. Basically, the design of a specific electric annealing furnace of continuous action is determined by the mechanism of movement of products through the furnace and the temperature regime that is implemented at the same time.

To move products inside the working space of the electric furnace, a conveyor is used, stretched between two shafts, one of which is the leading one, and the other is the driven one. In order not to support the weight of the conveyor belt when transporting products through the furnace, the belt moves along a roller conveyor.

An electric drive is used to rotate the drive shaft. A metal mesh made of heat-resistant chromium-nickel alloys is used as a conveyor belt. In the PEU-323 furnace, the conveyor shafts and its lower branch were moved out of the high-temperature zone, that is, the ends of the conveyor were moved beyond the lining. The advantage of this method is the longevity of the conveyor, and the disadvantage is the transfer of a certain amount of heat outside the annealing channel of the furnace, which increases heat loss.

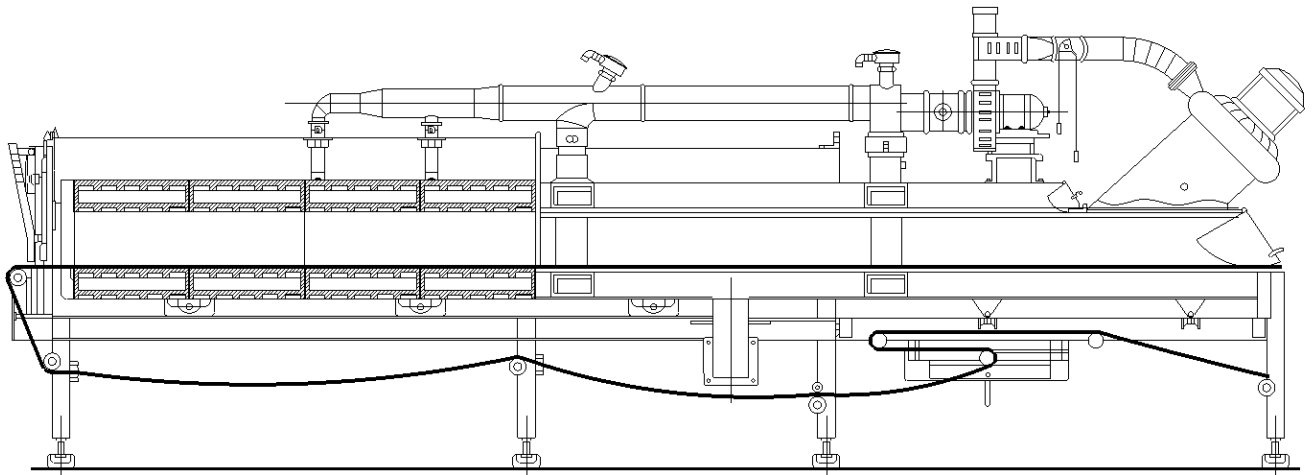


Figure 1.1 - Annealing electric furnace of continuous action with a mesh conveyor PEU-323

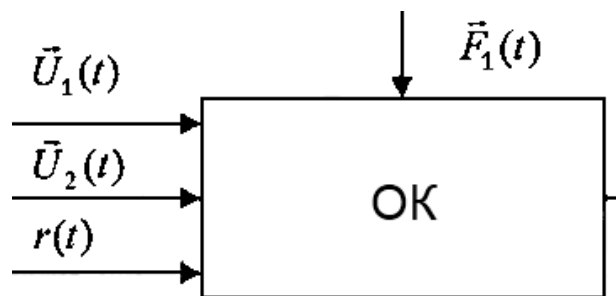


Figure 1.2 - Furnace for annealing glass products as a control object (OK)

By controlling the operation of electric heaters and fans, you can create the required temperature field depending on the volume of the furnace, and by controlling the conveyor belt drive, you can adjust the speed of the annealing process. Thus, the furnace as a control object can be represented in the form of a multi-link control object (Fig. 1.2) with several inputs and one output: the vector $\vec{U}_1(t)$ is a vector of control influences, the components of which are partial controls $\{u_i, (t)\}$, which determine the state of electric heaters when using heating elements, and in the case of using gas fuel - the state of the gas supply throttles to the nozzles; $\vec{U}_2(t)$ is a vector of control influences that determines fan operation modes and its intensity; $r(t)$ – control influences that determine the state of the grate conveyor drive, i.e. that stabilize the speed of drawing glass products; $\vec{F}_1(t)$ is a vector of disturbing influences, the components of which are determined on the one hand by the temperature state of

the external environment, and on the other hand characterize the conveyor loading fluctuations; $X(t)$ is the state vector of the control object, i.e. the thermal field created in the sections of the furnace.

The task of managing the annealing process of glass products is to ensure the calculated annealing mode, which leads to the relaxation of residual mechanical stress to the norm, which guarantees long-term and reliable operation of glass products.

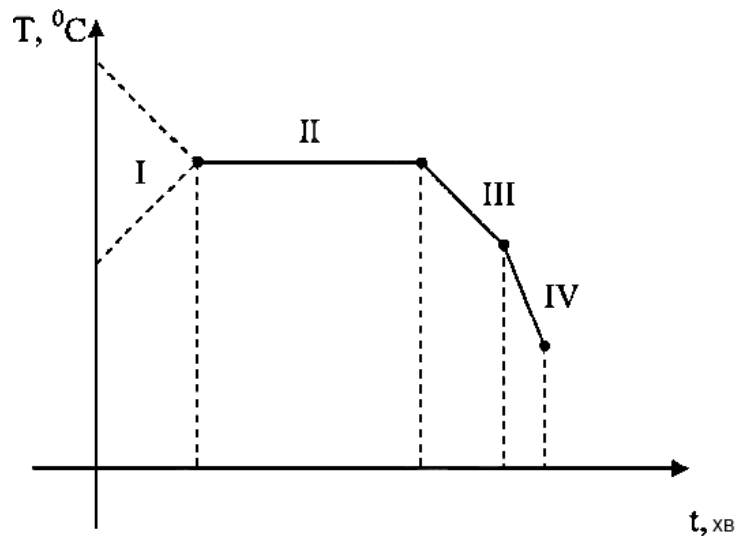


Figure 1.3 - Mode of annealing glass products

In industry, the annealing process of most glass products is carried out in four stages (Fig. 1.3). The main indicators of the annealing mode of glass products are the annealing temperature and the cooling mode of the products. The annealing temperature depends on the chemical composition of the glass, and the cooling mode, that is, in fact, the annealing process itself, depends on the requirements for reliability and operation of the annealed glass product, its thickness, configuration, annealing temperature and furnace design.

To establish the annealing mode of glass products, the temperature interval is determined in which the residual stress can appear or disappear. This interval is characterized by two critical annealing temperatures: higher and lower.

The higher annealing temperature refers to the temperature at which the voltage in the glass decreases 10 times in a time equal to 5 minutes.

The lower annealing temperature refers to the temperature at which the voltage decreases 10 times in time, 100 times more than at the upper annealing temperature, i.e. in 500 min. It corresponds to a viscosity of 10^{16} pz. Annealing can go below this temperature, which corresponds to a viscosity of 10^{16} pz, but extremely slowly. With it, the voltage decreases 10 times over time, 1000 times more than at the upper temperature.

The higher annealing temperature theoretically corresponds to the limit of the brittle state of the glass, and, therefore, it can be determined by the thermal expansion curve, which determines the physicochemical parameters of the glass of this chemical composition. Due to the possible deformation of the product, the annealing temperature in the ovens is set 20-30°C lower.

Knowing the chemical composition of this glass and the annealing temperature, you can roughly determine the higher annealing temperature by calculation.

Since in reality in annealing furnaces the higher annealing temperature is underestimated in order to avoid the destruction of products, it can be taken as equal to 550°C.

According to theoretical data, the lower glass annealing temperature is 48-58° lower than the higher annealing temperature. Practically, this difference for ordinary glasses is taken as equal to 100°, and for optical glass - 150°. Means a lower annealing temperature equal to 450°C.

The calculated temperature range must be observed during the annealing process of glass bottle products. To obtain a durable and reliable product, it is not necessary to completely eliminate the residual voltage. It is enough to weaken it to certain norms, which are set by standards and technical conditions depending on the type, purpose of the products and the conditions of their further operation.

The Dauwalter method is considered to be the most accurate when calculating the annealing temperature regimes, based on the measurement of the characteristics of the relevant glass properties (density, Young's modulus, shear modulus, viscosity, thermal conductivity, etc.) and the calculation of all annealing parameters from them.

The method is quite time-consuming and requires the availability of information about the processes occurring during annealing.

The calculation of the annealing regimes consists in determining the coordinates of the break points of the temperature curve (Fig. 1.3), i.e. for each of the stages I - IV there are temperature values and intervals of annealing time at this stage. Stage of preliminary heating or cooling (segment I) - the products must be brought to a given higher annealing temperature at a speed that does not cause their destruction. The glass is heated (cooled) to the annealing temperature at a rate of $20/a^2$ – to $30/a^2$ degrees/min, where a is the semi-thickness of solid glass products (for example, sheets, tiles) and the thickness of hollow glass products in centimeters. This speed depends on the chemical composition of the glass, the shape of the product, and the like. So, a hollow bottle product with a thickness of 3.5 mm can be heated (cooled) at a rate (degrees/min.):

$$\tau = \frac{23}{(0,35)^2} = 187,75$$

Accordingly, the duration of cooling of the product, which has an average temperature of about 850°C upon exiting the molding machine, to a higher annealing temperature of 550°C, will be:

$$t = (850 \text{ }^\circ\text{C} - 550 \text{ }^\circ\text{C}) / 187.75 \text{ degrees /min} = 1.6 \text{ min.}$$

Stage of aging at a constant temperature (segment II) - the products are aged at a higher annealing temperature for a time sufficient for a given voltage reduction. The exposure time is calculated using the formula $\tau = 102a^2$, where a is the semi-thickness of hollow and solid products in cm. For this example with bottle glass, the exposure time will be:

$$\tau = 102 * (0.35)^2 = 12.5 \text{ min.}$$

Stage of slow cooling (section III) - the products are cooled at a fairly low speed, which prevents the emergence of a new residual voltage exceeding the specified for this stage. This stage is the most responsible of the entire annealing process. If you force the cooling of the glass in this interval, then destructive residual stress may occur in it, which cannot be eliminated during further cooling.

The speed of cooling of products in the dangerous interval depends mostly on the thickness of the product and its configuration, on the permissible value of the residual voltage.

The criterion for good annealing of responsible glass products is the presence of a residual voltage in them that does not exceed 5% of the allowable voltage.

With a dangerous interval between the upper and lower annealing temperatures equal to 100°C, the duration of cooling will be:

$$t = 100 \text{ }^\circ\text{C} / 2.7 \text{ degrees /min} = 37 \text{ min.}$$

Stage of rapid cooling (section IV) - the products are cooled at a speed that ensures the permissible temporary stress. At this stage of cooling, extreme care should be taken, as excessive temporary stress can also cause the destruction of the product. Adams and Williamson recommend determining the speed of rapid cooling.

The time spent at this stage, when cooling the product from the lower annealing temperature of 450°C to a temperature of 100°C, will be:

$$t = (450^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) / 81.6 \text{ degrees/min} = 4.3 \text{ min}$$

The temperature equalization zone precedes the direct exit of the products from the oven. Thus, the total time spent on annealing one product will be equal to 55.4 minutes.

Fig. 1.4 shows a graphic image of the calculation mode of annealing of glass products, made on a time scale (in minutes) and a temperature scale (in °C). According to this law, which shows the nature of the temperature change over time, the temperature of each glass product in the furnace should change.

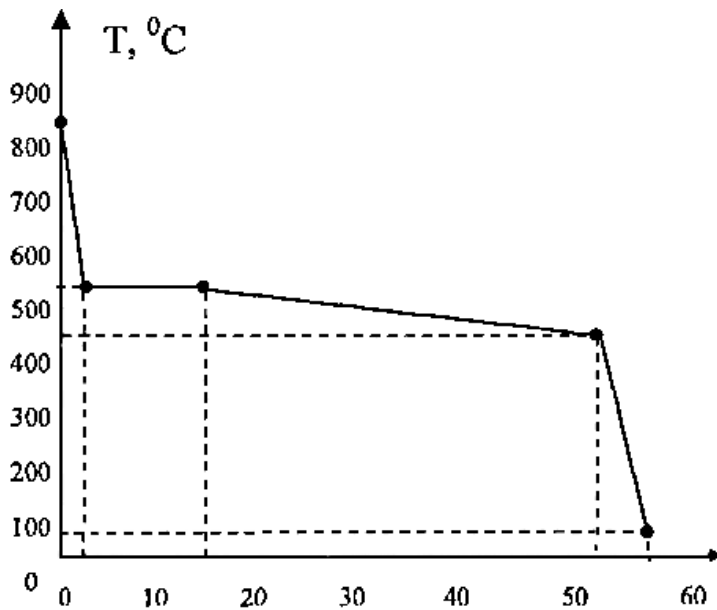


Figure 1.4 - Temperature mode of annealing artificial glass products

As can be seen, the given example of calculating the annealing regimes based on empirical dependencies weakly takes into account the configuration of glassware, in addition, due to the lack of a mathematical model of the process of changing the thermal field and the associated change in the field of mechanical stress in glassware, it is difficult to give recommendations for intensifying the annealing process, which could lead to a decrease in energy consumption. In this regard, it would be advisable to use for the calculation of annealing regimes not empirical dependencies, but more accurate mathematical models of the heat technological process of annealing.

1.2. Assessment of the state of automation of the process of heat treatment of glass products for the purpose of energy saving

The existing systems of automatic control of the furnace are divided into continuous systems of stabilization of the temperature and the speed of drawing the mesh conveyor and digital (microcontroller) control systems with a changeable stabilization program of the same variables of the technological process, which is a two-link control object (Fig. 1.2). In continuous control systems, the classical scheme of building a stabilization system on the temperature control channel is adopted,

where thermocouples or thermoresistors are used as temperature sensors, and the control device is built on the basis of an automatic potentiometer that performs the functions of setting and comparing devices. The mismatch signal is the basis for controlling the heaters. The specified temperature regime along the length of the tunnel of the PEU-323 electric furnace is provided together with heaters and cooling devices - fans that supply external air to the channels adjacent to the sides and the upper part of the heated tunnel. The fans are controlled by the software logic control subsystem. The mesh conveyor belt is controlled using a motor speed stabilization system built on the principle of feedback. The introduction of control computers during the creation of automation systems for the annealing technological process led to the creation of centralized ASK TP, while the control functions were tried to be concentrated to the maximum extent in the central control computer complex.

With this construction of the ASK TP, the survivability of the entire technological system largely depended on the reliability of the COC. The failure of the COC was associated with large losses, could lead to a stoppage of the equipment and even to an accident on the technological line.

The existing automated complex based on the industrial controller "Remikont R-130" effectively solves the task of continuous and logical regulation of technological quantities, has operative control, control and indication bodies. Its functionalities include:

- strict nomenclature of electrical input/output signals;
- implementation of a wide range of control algorithms;
- availability of ready-made algorithmic blocks;
- manual setting of parameters;
- impact-free change of work modes;
- unification of up to 15 controllers into a single computer network that solves the general task of control;
- recording of programmed information in the PPZP.

Fig. 1.5 shows an example of the construction of the central ASK TP, which was implemented on the "Remikont R-130" microcontroller. A microcontroller was

used as the COC, the SC-9600 controller performed the functions of the network manager, and the information from the control object came through a number of specialized converters working directly with the sensors.

The use of outdated microprocessor complexes, despite a number of advantages, has significant disadvantages, which arise from the condition of moral aging of such equipment, which carries an intellectual and informational load in the system, and circuit engineering solutions:

- in such systems, there is no possibility of flexible adjustment of annealing modes when switching to other standard sizes of glassware due to limited computing power, which does not allow implementing complex algorithms for calculating rational annealing modes;

- systems of this type are critical to the distances between functional elements, which must not allow the level of the information signal to drop during its passage along the communication lines, which limits the covered area of the technological process and forces the use of additional signal translators and repeaters;

- in case of failure of one of the local regulators of the system, it is necessary to stop the entire technological process, or to disconnect one local control loop to replace the damaged unit;

- in case of failure of the control computer complex or dispatcher the network needs to stop the entire technological process;

- maintenance of a centralized SAC of this type requires highly qualified personnel who are able to quickly and accurately determine the cause of a system malfunction without the availability of diagnostic equipment or software;

- there is a limitation in the use of such microprocessor equipment due to the complexity, and sometimes the impossibility of combining control and management functions, on the one hand, and diagnostics of the technical condition of gas equipment, which is used in the implementation of the principle of energy carrier integration, on the other hand, which is very important due to the high explosion hazard gas

The listed shortcomings require their mandatory elimination through the development of both more advanced methods for calculating annealing modes and their quick input as parametric settings, and the use of modern technical control tools that allow quick and flexible changes in control laws, for example, by creating control programs for microcontrollers automation systems written in the TraceModeLagoon environment.

1.3. Setting research objectives

As can be seen from the analysis of the technological equipment, the methods of obtaining the parameters of the annealing modes of glass products and the existing automation systems used for the implementation of the calculated annealing modes and the stabilization of their parameters, now due to the complication of the configuration of glass products there are certain difficulties in the production of products, the accuracy of which meets regulatory requirements. This is caused by the lack of mathematical models of the thermal field and the field of residual stress, which shows their nature when the temperature of the environment changes for glass products of a complex configuration, and the use of empirical calculation methods, which have proven themselves well for a flat glass plate, do not allow taking into account the stress concentration at sharp bends, the appearance edges, etc. Mathematical models of annealing of glass pipes and building glass blocks can serve as a basis for their adaptation in relation to products of complex geometric configuration in order to obtain dynamic models of the thermal field and the field of mechanical stress in the glass product during its cooling. Judging by the initial models for pipes and glass blocks, the calculation of the parameters of the annealing mode for products of complex configuration requires the use of personal computers, due to which, when solving the task of automating the technological process of annealing glass products, it is advisable to change the approach to the design of the control system as a whole, since the existing automation systems have significant limitations according to the performed functions. for example, continuous systems

are deprived of the ability to determine the parameters of the annealing mode based on the geometric configuration of the glassware and its mathematical model of annealing, and the digital systems built on the basis of the Remicont-130 industrial controller also do not have the necessary computing power to solve the problem of digital modeling of the glassware annealing process, as a result of which the annealing algorithm is synthesized, which is implemented by the lower level of the automation system. In addition, in the above systems, it is impossible to automatically diagnose the technical condition of the equipment, both from the point of view of its operability, and in order to obtain information about the presence or absence of a flame, blowing the furnace space in order to eliminate gas before the ignition of the burners, and the like, which is very important due to the explosion hazard of gas, especially in the case of the use of complex energy sources (gas and electricity) in the furnace.

The improvement of automation systems for the technological process of annealing glass products with a complex geometric configuration should be carried out in the direction of overcoming the noted shortcomings of existing automation systems and engineering methods for the synthesis of annealing algorithms. The latter should be based not on empirical calculations, but on mathematical models of annealing, built for glass products taking into account their geometric configuration and the presence of an internal air cavity.

So, there are objective prerequisites for solving the following scientific and technical task: to develop an engineering methodology for designing and the structure of an automated control system for annealing glass products in continuous conveyor furnaces with integrated energy sources, which implements synthesized algorithms for rational modes of annealing glass products with a complex geometric configuration.

The solution to the given task is carried out in stages by sequential consideration of the following tasks:

- obtaining mathematical models of the thermal field and the field of mechanical stress in a glass product of a complex configuration during its annealing in continuous conveyor furnaces;

- development of engineering methodology for the synthesis of rational modes of annealing of glass products of complex geometric configuration based on digital modeling of the annealing process of specific products;

- development of the engineering methodology for the design and structure of the automation system for the technological process of annealing glass products of complex configuration in continuous conveyor furnaces with integrated energy sources.

The goal is achieved by adapting mathematical models of the process of annealing glass pipes and building glass blocks, which can be used for glass products of cylindrical-conical and prismatic-cylindrical configuration with the subsequent use of finite difference equations to build a digital model of the dynamics of the thermal field and the field of mechanical stress in the glass product during its cooling during annealing. To solve the tasks, the methods of mathematical modeling, differential and integral calculus, the theory of automatic control and system analysis are used, as well as information about the software and hardware of modern electronics and computing equipment is used.