

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

ЖОВТОК Володимир Васильович

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЮ
ЛІНІЄЮ. // AUTOMATED CONTROL SYSTEM
FOR ELECTROTHERMAL LINE

спеціальність: 174 – Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТм–21
Жовток В. В.

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" _____ " _____ 2025 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2025

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:
зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сегін
"04" грудня 2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ЖОВТКУ Володимирі Васильовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Автоматизована система керування електротермічною лінією. // Automated control system for electrothermal line.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від « 28 » листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

1 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Цілі створення автоматизованої системи управління електротермічною лінією.

2. Характеристика електротермічної лінії.

3. Вимоги до структури та функціонування системи автоматизованого управління ЕЛТА.

4. Основні питання, які потрібно розробити.

1. Вдосконалення процесів управління електротермічними лініями типу ЕЛТА.

2. Синтез структури системи керування електротермічною лінією.

3. Створення алгоритмів функціонування виконавчих механізмів автоматизованої системи керування електротермічною лінією ЕЛТА 8/45.

4. Здійснити вибір апаратного та розроблення програмного забезпечення, а також створення системи візуалізації технологічних параметрів засобами SCADA.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структура програмного забезпечення АСУ ЕЛТА.

2. Структурна схема передавальної функції зони нагріву.

3. Структурна схема САР температури.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Цілі та завдання автоматизованої системи управління електротермічною лінією	01.01. 2025. – 31.03. 2025р.	виконано
2	Моделювання асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором у програмі ANSYS	01.03. 2025р.– 20.05.2025 р.	виконано
3	Моделювання режимів асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором в середовищі ANSYS SIMPLORER MAXWELL та аналіз системи його діагностики	21.05.2025р. – 30.09. 2025 р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.10.2025р. – 30.11.2025р.	виконано

Студент

(підпис)

Жовток В. В.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

АНОТАЦІЯ

Жовтюк В. В. Автоматизована система керування електротермічною лінією. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2025.

У кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему управління електротермічної лінії ЕЛТА 8/45, призначену для контролю процесу загартовування металевих виробів у автомобільній промисловості.

ANNOTATION

Zhovtok V. V. Automated control system for electrothermal line. – Manuscript.

Research for the degree of “Master” in specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2025.

In the qualification work, an automated control system of the electrothermal line ELTA 8/45 was developed, designed to control the process of hardening metal products in the automotive industry.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	
УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЮ ЛІНІЄЮ.....	10
1.1 Призначення та цілі створення автоматизованої системи управління електротермічною лінією.....	10
1.2 Характеристика електротермічної лінії, як об'єкта автоматизації.....	11
1.3 Вимоги до структури та функціонування системи автоматизована система управління ЕЛТА.....	12
1.4 Вимоги до математичного, інформаційного, програмного, технічного та лінгвістичного забезпечення системи автоматизованого управління.....	19
2 МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З	
КОРОТКОЗАМКНУТИМ РОТОРОМ У ПРОГРАМІ ANSYS.....	20
2.1 Вибір методів керування електротермічною лінією.....	20
2.2 Вибір технічного забезпечення системи автоматизованого управління електротермічною лінією.....	46
2.3 Вибір програмного забезпечення та загальної структури програмного комплексу.....	48
2.5 Візуалізація технологічного процесу засобами SCADA	50
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ ТА ПРОГРАМНА	
РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
ЗАКАЛЮВАЛЬНОЮ ПІЧЧЮ.....	52
3.1. Дослідження теплових процесів у гартувальній печі.....	52
3.2. Побудова системи автоматичного регулювання (САР) температури зони нагріву.....	62

3.3	Визначення коефіцієнтів передавальних функцій моделі нагріву та нагрівача.....	62
3.4.	Програмна реалізація алгоритмів роботи пристроїв ЕЛТА 8/45.....	67
	ВИСНОВКИ	74
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
	ДОДАТКИ.....	77

ВСТУП

Актуальність теми. У зв'язку з підвищенням технічних вимог до якості металевих деталей, що виготовляються для автомобільної та інших галузей промисловості, зростають вимоги до технологій та обладнання їх виробництва, які мають забезпечувати неухильне дотримання визначених параметрів технологічного процесу, високу точність та якість виробництва. Ці аспекти також є важливими при термічній обробці металів, де стабільність параметрів є визначальною для забезпечення високої якості готової продукції. Електротермічні лінії, які застосовуються для загартування, відпуску та інших видів термообробки, являють собою складні об'єкти автоматизації з великою кількістю взаємопов'язаних зон та контрольованих параметрів. У таких умовах створення ефективної автоматизованої системи керування стає необхідною передумовою підвищення технологічної надійності, зниження енергоспоживання та покращення експлуатаційних характеристик обладнання.

Актуальність теми дослідження також визначається потребою у вдосконаленні процесів управління електротермічними лініями типу ЕЛТА, що широко використовуються в автомобільній промисловості. Технологічний процес загартування металевих виробів потребує суворого дотримання температурних режимів, стабільності теплових потоків та синхронізації роботи виконавчих механізмів. Порушення цих умов призводить до зниження міцності деталей, збільшення відсотка браку та зменшення ресурсу обладнання. Тому впровадження сучасної автоматизованої системи керування, здатної забезпечити високоточний контроль температури, ефективного регулювання швидкості конвеєрів і раціонального керування вузлами печей, є важливим технічним завданням, від вирішення якого залежить рівень технологічної культури підприємства.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення автоматизованої системи керування електротермічною лінією ЕЛТА 8/45, яка забезпечує стабільне функціонування технологічного обладнання, підвищення якості термообробки та оптимізацію виробничого процесу.

Досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань.

1. Аналіз технологічного процесу як об'єкта автоматизації, моделювання теплових процесів.
2. Синтез структури системи керування електротермічною лінією.
3. Створення алгоритмів функціонування виконавчих механізмів.
4. Вибір апаратного та розроблення програмного забезпечення, а також створення системи візуалізації технологічних параметрів засобами SCADA.

Об'єктом дослідження є електротермічна лінія ЕЛТА 8/45, призначена для загартовування металевих виробів.

Предметом дослідження є система автоматизованого управління, що включає контроль і регулювання температурних режимів, управління нагрівачами та вентиляторними установками, а також синхронізацію транспортного обладнання.

Методи дослідження. У процесі роботи застосовувалися методи системного аналізу, математичного моделювання теплових процесів, структурно-функціонального синтезу систем керування, методи логічного програмування на базі контролерів Siemens та засоби SCADA-візуалізації. Використання цих методів дало можливість комплексно дослідити особливості роботи електротермічної лінії та створити ефективну структуру управління, адаптовану до реальних умов експлуатації.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає у формуванні узагальненої моделі теплових процесів у печах електротермічної лінії, що враховує втрати тепла при шлюзуванні, теплову інерційність стінок печі та динаміку зміни температури в робочому просторі. На основі цих моделей

запропоновано підходи до побудови системи регулювання температури, що забезпечують мінімізацію коливань параметрів у зоні нагріву. Крім того, розроблено алгоритми функціонування ключових елементів обладнання, спрямовані на оптимізацію їх роботи і підвищення технологічної узгодженості.

Практичне значення кваліфікаційної роботи полягає у створенні повнофункціональної автоматизованої системи керування, яка може бути впроваджена на реальній електротермічній лінії. Розроблене програмне забезпечення базується на логічному контролері Siemens і містить повний комплекс алгоритмів управління обладнанням. Додатково створено SCADA-систему WinCC 6.0, що дозволяє оператору контролювати стан обладнання, отримувати інформацію про параметри термічної обробки та оперативно реагувати на будь-які відхилення технологічного процесу. Розробка відповідає технічному завданню та може бути використана як основа для подальшої модернізації електротермічних ліній аналогічного типу.

Апробація.

1. Мукомела Р. В. Автоматизована система керування компресорним агрегатом. / Р. В. Мукомела, В. В. Жовток, Д. П. Біловус // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.78 –86.

2. Біловус Д. П. Модель системи обліку електричної енергії на електровозах змінного струму./ Д.П. Біловус, В.В. Жовток, А.С. Рибін // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (ТІР: СМ –2025). Тернопіль, 2025. С.102 –107.

1. ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЮ ЛІНІЄЮ

1.1 Призначення та цілі створення автоматизованої системи управління електротермічною лінією

Автоматизована система управління електротермічною лінією ЕЛТА 8/45 (далі – АСУ ЕЛТА) в основному повинна виконувати наступні завдання:

- забезпечення контролю стану обладнання;
- автоматичне управління та захист технологічного обладнання під час роботи;
- автоматичне підтримання стабільності заданих параметрів:
 - час перебування деталей у загартовувальній печі (ЗП);
 - час перебування деталей у відпускній печі (ОП);
 - температура в зонах нагріву ЗП та ОП;
 - температура масла у загартовувальному баку;
 - температура мийних та знежирювальних розчинів;
 - температура повітря у зоні сушки мийної машини;
 - рівні масла та розчинів;
 - маса порцій деталей;
- контролю параметрів технологічного процесу (ТП);
- візуалізації ТП на автоматизованому робочому місці (АРМ) оператора;
- світлової та звукової сигналізації та інформування про аварійні ситуації оператора за допомогою АРМ.

Відповідно цілі створення системи полягають у:

- автоматизації керування технологічними процесами термообробки;
- підвищенні надійності роботи обладнання;

- покращенні якості продукції;
- автоматизації збору та збереження інформації про роботу лінії;
- зменшенні впливу помилок персоналу на якість продукції та роботу лінії.

1.2 Характеристика електротермічної лінії, як об'єкта автоматизації

Об'єктом автоматизації виступає електротермічна лінія ЕЛТА 8/45, призначена для термічної обробки металевих кріпильних виробів.

До складу лінії входять [1]:

- пристрій для дозованої подачі деталей (завантажувальний механізм);
- електрична опірна піч для загартування;
- масляний бак для загартування;
- конвеєрна мийна машина;
- електропіч опору для відпуску;
- бак охолодження.

Завантажувальний пристрій подає деталі певними порціями з металевого контейнера на конвеєр загартовувальної печі через завантажувальний шлюз. У зоні загартовувальної печі необхідно забезпечити підтримання температури, визначеної технологічною програмою, окремо для кожної з трьох зон нагрівання, а також стабільну швидкість руху конвеєра.

Під час переміщення конвеєром деталі проходять крізь загартовувальну піч, де нагріваються до температури аустенізації та витримуються протягом заданого часу. Далі вони надходять через масляну завісу до загартовувального бака, у якому відбувається безпосереднє загартування та охолодження. Масляна завіса запобігає потраплянню газів, що утворюються під час загартування, у внутрішній об'єм печі.

Після загартування конвеєр бака спрямовує деталі до мийної машини, де вони проходять знежирення, промивання та сушіння. У мийній машині автоматично контролюється і підтримується температура розчинів для знежирення та промивання, а також температура повітря, що подається калорифером для сушіння.

Після миття вироби за допомогою завантажувального механізму подаються на конвеєр відпускнуї печі. У цій печі температура також підтримується у трьох зонах відповідно до вибраної програми термообробки. Завершальним етапом є охолодження виробів у спеціальному баку, після чого готові деталі транспортуються до тари для відвантаження.

Обладнання, встановлене в приміщеннях цеху та операторської площадки, повинно відповідати таким нормам експлуатації: температура повітря: +15...+45 °С; відносна вологість: до 90%; атмосферний тиск: 0,84...1,07 кгс/см²; запиленість повітря: до 1 мг/м³; режим роботи: цілодобовий.

1.3 Вимоги до структури та функціонування системи автоматизована система управління ЕЛТА

Згідно з функціональним призначенням, автоматизована система управління ЕЛТА повинна включати такі підсистеми:

- I. Підсистема управління лінією термообробки.
- II. Підсистема управління завантаженням.
- III. Підсистема управління гартувальною піччю.
- IV. Підсистема управління гартувальним баком.
- V. Підсистема управління мийною машиною.
- VI. Підсистема управління піччю відпуску.
- VII. Підсистема управління баком охолодження.
- VIII. Підсистема візуалізації технологічних процесів (АРМ оператора).

Підсистеми II–VII забезпечують перетворення команд, що надходять від підсистеми керування термообробною лінією, у безпосередній вплив на виконавчі механізми. Вони також передають інформацію про стан обладнання назад у головну підсистему.

Підсистема керування лінією повинна містити:

- програмований логічний контролер (ПЛК) з модулями вводу-виводу та комунікаційними модулями;
- засоби гальванічної розв'язки силових і керуючих кіл;
- джерело безперебійного живлення;
- автоматичні вимикачі;
- проміжні реле;
- джерела живлення 24 VDC тощо.

Підсистеми керування гартувальною та відпускнуою печами мають включати:

- вторинні перетворювачі сигналів технологічних датчиків;
- частотні перетворювачі для управління конвеєрними двигунами;
- модулі управління силовими ключами нагрівачів;
- апаратуру комутації та захисту виконавчих механізмів.

Підсистеми керування завантаженням, гартувальним баком, мийною машиною та охолоджувальним баком повинні містити:

- вторинні перетворювачі сигналів датчиків технологічних параметрів;
- частотні перетворювачі для приводів конвеєрів;
- модулі керування силовими ключами нагрівачів та віброживильників;
- обладнання для комутації та захисту відповідних механізмів.

Підсистема візуалізації повинна містити автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора на базі панельного комп'ютера з програмним забезпеченням НМІ (людино-машинний інтерфейс).

Структурна схема АСУ ЕЛТА зображена на рисунку 1.1

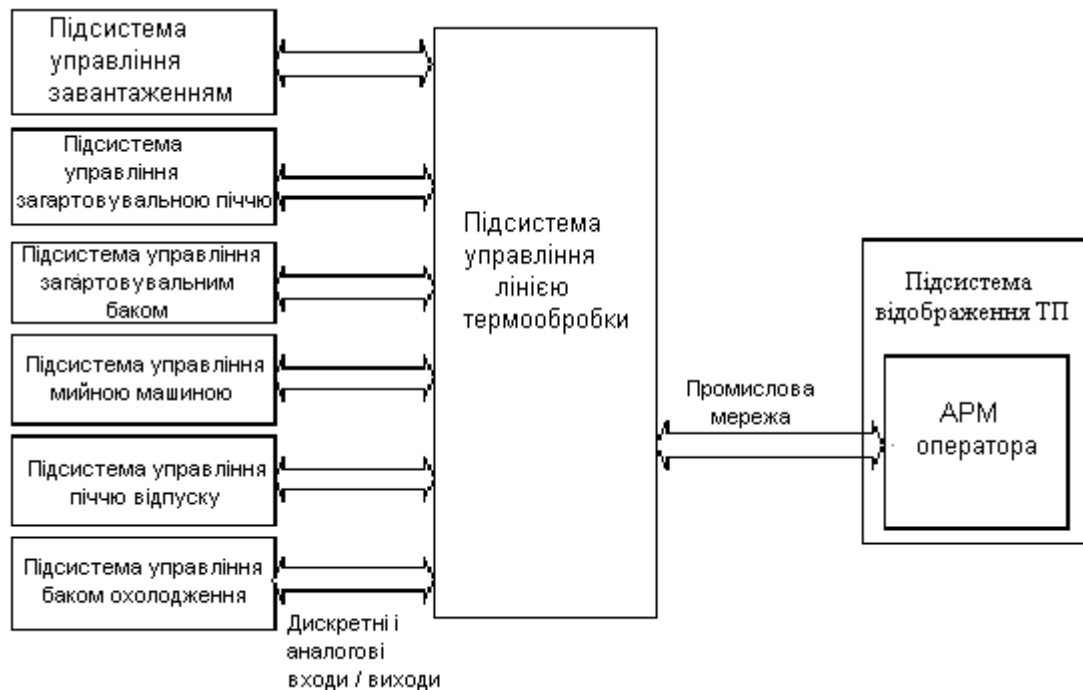


Рисунок 1.1 – Структура системи автоматизованого управління ЕЛТА

Обмін технологічними даними між частотними перетворювачами (ЧП) та ПЛК повинен здійснюватися через індустріальну шину ProfiBus [2].

Для передавання аварійних сигналів зупинки приводів і отримання інформації про їхній стан необхідно застосовувати дискретні цифрові входи та виходи частотних перетворювачів.

Зв'язок між ПЛК та автоматизованим робочим місцем оператора має бути організований через промислову мережу з використанням протоколів сімейства Simatic S7 Protocol Suite [3].

Автоматизована система керування електротермічною лінією повинна працювати цілодобово та безперервно. Управління лінією та окремими агрегатами має бути доступне в таких чотирьох режимах: автоматичний; налагоджувальний; черговий; режим сушіння.

В автоматичному режимі лінія функціонує за наперед визначеною програмою: підтримуються встановлені температурні режими, швидкості конвеєрів та виконується автоматичне завантаження деталей.

Налагоджувальний режим призначений для перевірки працездатності, регулювання та налаштування виконавчих механізмів. У цьому режимі оператор повинен мати можливість вручну запускати та вимикати окремі вузли: двигуни, нагрівачі, вентилятори, насоси тощо.

В черговому режимі підтримує мінімально допустимі значення температури в печах, що дозволяє економити енергію під час тривалих пауз у роботі. Режим активується оператором. Технолог має право коригувати параметри.

Режим сушіння застосовується для підготовки печей до роботи після ремонту або тривалого простою. У цьому режимі вимикаються основні нагрівачі. Параметри режиму встановлюються або змінюються технологом.

Система повинна працювати надійно та безперебійно. У разі збою час відновлення має бути мінімальним. Для цього система повинна забезпечувати: оперативну діагностику технічних засобів за допомогою стандартних інструментів контролю АСУ ТП; використання вбудованих апаратних засобів самодіагностики.

АСУ ЕЛТА повинна гарантувати такі технічні характеристики:

- отримання даних від датчиків і обладнання — не рідше ніж раз на 1 секунду;
- автономна робота ПЛК від ДБЖ — не менше 15 хвилин після зникнення живлення;
- відхилення маси порції деталей, що завантажуються в печі, — в межах від $-0,5$ до $+2$ кг;
- допустиме відхилення температур — не більше ± 5 °С;
- точність швидкостей конвеєрів (ЧП) — не більше $\pm 0,5\%$ від заданого значення;
- оновлення даних на екрані АРМ — не довше 3 секунд;
- автоматичне виведення аварійних і попереджувальних повідомлень із текстовим описом ситуації;

- глибина архіву системи — не менше 3 місяців.

Для системи повинні бути визначені такі параметри надійності: середній час напрацювання на відмову — не менше 10 000 годин; термін служби за умови регламентної заміни комплектуючих — не менше 10 років.

Для запобігання несанкціонованим змінам у системі необхідно реалізувати механізм ідентифікації користувачів через парольний доступ.

Передбачається три рівні доступу: оператор; технолог; адміністратор системи (інженер-програміст).

Система має відповідати принципам стандартизації та уніфікації, а саме:

- відкритої архітектури та масштабованості;
- модульного підходу в апаратурі та ПЗ;
- використання стандартних протоколів обміну;
- можливості розширення апаратних модулів та ПЗ;
- застосування стандартних систем розробки.

Інформація повинна відображатися з використанням уніфікованих символів, зрозумілих для персоналу замовника. У процесі розроблення слід аналізувати та застосовувати сучасні технічні рішення аналогічних систем.

Функції підсистеми управління лінією термообробки полягають у тому щоб:

- збирати дані температур в печах, масляному баку та мийній машині;
- отримувати дані тиску й витрат газів;
- приймати сигнали від завантажувального пристрою;
- керувати нагрівачами, вентиляторами, газовими клапанами;
- керувати приводами конвеєрів;
- активувати аварійну сигналізацію.

Усі сигнали та дані від датчиків повинні надходити до ПЛК, де виконується їх обробка та формування керуючих дій, а в разі необхідності (аварії) – захисне відключення обладнання і закриття клапанів регулювання

згідно регламенту. Порогові значення параметрів аварійних ситуацій і відключень, попереджувальної сигналізації, а також діапазони вимірювання датчиків надає Замовник у вигляді карти технологічних уставок. Для зв'язку ПЛК та АРМ використовуються протоколи Simatic S7 Protocol Suite [3].

Підсистема управління завантаженням деталей у піч здійснює виконання команд від головної підсистеми; передавання даних про стан обладнання; забезпечення дозованої подачі деталей у піч.

Вимогами до підсистеми керування гартувальною піччю є виконувати команди ПЛК; передавати інформацію про стан вузлів; підтримувати температурні режими по зонах; забезпечувати необхідну швидкість конвеєра; контролювати рівномірність нагрівання між зонами.

До функцій підсистеми керування гартувальним баком належать: виконання команд від ПЛК; передавання даних про стан обладнання; підтримання температури та рівня масла; підтримання швидкості конвеєра.

Підсистема керування мийною машиною повинна виконувати функції: виконання команд системи; інформування про стан обладнання; підтримання температури розчинів та повітря; контроль рівня робочих рідин; підтримання швидкості конвеєра.

Підсистема керування відпускнуою піччю повинна виконувати функції аналогічні гартувальній печі: підтримання однакової температури по зонах, швидкості конвеєра та рівномірності нагрівання.

Підсистема керування охолоджувальним баком повинна забезпечити виконання команд управління від підсистеми управління лінією термообробки; передавання даних про стан обладнання; підтримувати задану температури й рівень розчину; забезпечити задану швидкість конвеєра.

До функцій підсистеми відображення технологічних процесів (АРМ оператора) належать забезпечення зручного віконного інтерфейсу; вибору режимів роботи; введення технологічних параметрів; вибору технологічних процесів із бібліотеки; підтвердження оператором аварійних повідомлень.

1.4 Вимоги до математичного, інформаційного, програмного, технічного та лінгвістичного забезпечення системи автоматизованого управління

Математичне забезпечення системи має гарантувати повну реалізацію її функцій і включати алгоритми, сформовані на основі опису технологічного процесу. У межах цього забезпечення повинні бути опрацьовані рішення, що визначають логіку роботи обладнання на всіх етапах виробничого циклу: починаючи з завантажувальних механізмів і закінчуючи елементами нагрівальних установок, приводами конвеєрних систем, а також обладнанням, яке відповідає за циркуляцію масла, охолодження та подачу різних робочих середовищ. Алгоритми мають враховувати особливості функціонування насосних систем, вузлів подачі води та роботу клапанів, що забезпечують підтримання необхідних параметрів у всіх агрегатах. Таким чином, математичне забезпечення повинно забезпечити узгоджену роботу всіх складових, які беруть участь у технологічному процесі обробки.

Інформаційне забезпечення системи формують відповідно до єдиних правил класифікації та кодування, що дає змогу досягати сумісності з існуючою нормативно-довідковою базою підприємства та іншими автоматизованими системами. У межах цього забезпечення описуються основні масиви даних, включаючи технологічні параметри, стани обладнання, можливі керуючі впливи, а також вміст текстових і графічних інтерфейсів, що використовуються у прикладних модулях. Крім того, інформаційне забезпечення повинно охоплювати структуру повідомлень і звітної документації, необхідної для повноцінної експлуатації та контролю системи.

Програмне забезпечення системи передбачає використання середовища Simatic Step7 для створення програм керування ПЛК, а також застосування SCADA-пакета WinCC v6.0 для розробки інтерфейсів та функціональних

можливостей робочого місця оператора. Для коректної роботи цих компонентів на АРМ оператора має бути встановлена операційна система MS Windows XP, яка забезпечує стабільність та підтримку необхідної інфраструктури.

Технічне забезпечення системи АСУ ЕЛТА включає комплекс обладнання, до складу якого входять програмовані логічні контролери, елементи нормалізації аналогових сигналів, релейні модулі, джерела безперебійного живлення, комутаційні компоненти та монтажні елементи. До складу також входять модулі керування силовими ключами нагрівальних пристроїв, частотні перетворювачі, різноманітні системи приводу, засоби аварійної сигналізації та промислові комп'ютери з екраном відповідного розміру й необхідними засобами введення. Для забезпечення надійної комунікації між операторським робочим місцем і контролерами використовуються спеціалізовані модулі обміну даними по промисловій шині. Усе технічне обладнання монтується в електротехнічні шафи, у яких передбачено систему вентиляції та температурний контроль. Прокладання кабельних ліній здійснюється в окремих каналах із дотриманням вимог щодо розділення силових та керуючих ліній. Частотні перетворювачі оснащуються базовими панелями оператора і модулями ProfiBus, які встановлюються безпосередньо на обладнанні. Для запобігання взаємному впливу силових та керуючих сигналів передбачається гальванічне розділення відповідних електричних кіл.

Лінгвістичне забезпечення системи АСУ ЕЛТА має відповідати вимогам чинних стандартів і передбачати використання уніфікованих позначень змінних, що забезпечує однозначність взаємодії користувача з програмними засобами. Особливу увагу приділяють застосуванню стандартизованих мов програмування. Для створення програм для контролерів мають використовуватися мови, що відповідають вимогам ІЕС 6113-03 і входять до складу програмного середовища Simatic Step7, а для

програмування операторських АРМ — мови, реалізовані в пакеті WinCC 6.0.
Це забезпечує єдність підходів і сумісність програмних компонентів.

2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ ТА ПІДБІР ТЕХНІЧНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Вибір методів керування електротермічною лінією

Процес термічної обробки визначається цілим комплексом параметрів, що мають різну фізичну природу, але водночас суттєво впливають на якість готових виробів.

Електротермічна лінія як об'єкт керування складається з низки взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує власні технологічні функції. Цю лінію неможливо віднести виключно до дискретних або лише до безперервних систем. У ній одночасно реалізуються безперервні процеси такі як зміна температури, регулювання швидкості руху конвеєрів, робота нагрівачів та дискретні процеси — відкривання/закривання заслінок, керування клапанами, вмикання та вимикання обладнання.

Оскільки більшість операцій у електротермічній лінії мають дискретний характер, для керування технологічним обладнанням доцільно застосувати дискретно-логічний принцип управління. Це пов'язано з тим, що будь-який пристрій лінії перебуває у певному наборі дискретних станів, а переходи між ними визначаються умовами, що задаються дискретними сигналами.

Для синтезу логічної частини системи можуть використовуватися метод побудови дискретно-логічних систем на основі циклограм роботи механізмів і метод орієнтованих графів.

У даній роботі основним обрано метод орієнтованих графів у поєднанні з теорією кінцевих автоматів, оскільки циклограми не дозволяють повною мірою врахувати аварійні стани та сформуванню повний алгоритм для всіх можливих ситуацій.

Система логічного управління розглядається як сукупність двох взаємопов'язаних моделей: моделі об'єкта управління — обладнання електротермічної лінії і моделі системи управління — АСУ ЕЛТА. Алгоритм логічного керування синтезують на основі моделі поведінки об'єкта. Для цього використовують таку послідовність:

- моделювання поведінки об'єкта;
- опис взаємозв'язків між змінними моделі;
- побудова алгоритму керування.

Для моделювання поведінки ОУ вибираємо математичний апарат кінцевих автоматів, де кінцевий автомат визначається кортежем множин:

$$\langle X, S, Y, f_{\text{перех}}, f_{\text{вих}} \rangle$$

де: X — вхідні змінні;

S — внутрішні стани;

Y — вихідні сигнали;

$f_{\text{перех}}$ — функція переходів;

$f_{\text{вих}}$ — функція виходів.

В такому випадку, моделювання поведінки об'єкта управління зводиться до перерахунку множин X , Y , S і визначенню функцій переходів і виходів.

Оскільки стани обладнання залежать від поточних вхідних сигналів та внутрішніх станів, електротермічну лінію описують кінцевими автоматами четвертого роду – автоматами Мілі.

Структура автомата Мілі наведена на рисунку 2.1.

Під час створення алгоритмів у системі автоматизації застосовуються поняття «стан», «підстан» та «спостережуваність», оскільки вони дають змогу наочно відобразити логіку функціонування керуючих автоматів та їхніх композицій.

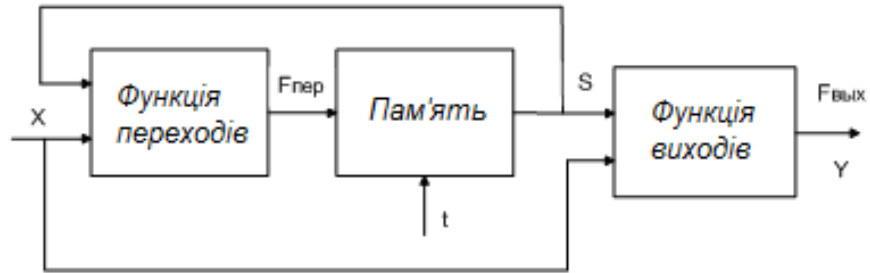


Рисунок 2.1 – Структура автомата Міллі

У межах дослідження передбачається аналіз двох основних груп станів: перша охоплює режими, що відповідають нормальному функціонуванню обладнання, а друга пов'язана з аварійними ситуаціями, які виникають у разі порушення правильного перебігу технологічних процесів електротермічної лінії. Центральним завданням під час проектування системи керування такою лінією є точне регулювання температурних параметрів, адже якість термічної обробки продукції повністю залежить від здатності підтримувати стабільну температуру в зонах нагрівання загартовувальної та відпускнуї печей. Для розуміння механізмів теплообміну, що відбуваються всередині печей, і для оцінювання ефективності цих процесів необхідно створити математичну модель режимів нагрівання.

Побудова моделі починається з аналізу загартовувальної печі як об'єкта керування. Вона поділяється на три нагрівальні зони, у кожній з яких повинні стабільно підтримуватися задані температурні значення. Кожна зона оснащена окремим нагрівальним елементом, спіралі якого закріплені на внутрішніх стінках печі, а крізь усі температурні секції проходить конвеєр, що переміщує оброблювані вироби. Кожну з нагрівальних зон доцільно розглядати як окрему теплову підсистему, яка включає нагрівач, повітряне середовище зони та конструкційні стінки. Через майже повну ідентичність зон достатньо розробити модель лише однієї з них, оскільки вона буде репрезентативною для всієї печі.

Відомо з основ фізики та математичного моделювання [13], що технічні об'єкти, незалежно від їхньої фізичної природи, характеризуються інерційними, пружними та дисипативними властивостями, які в математичних моделях відображаються відповідними типовими елементами. Проте теплова система, яка розглядається, не має інерційних характеристик через те, що зміна температури вздовж окремих ділянок не залежить від швидкості зміни теплового потоку, а визначається лише його величиною. Унаслідок цього модель нагрівальної зони електричної печі зручно представити сукупністю взаємодіючих простих елементів пружного та дисипативного типів. Кожний елемент описується двома змінними — однією, що відповідає за потік, та іншою, пов'язаною з потенціалом. Для теплових процесів змінною потоку виступає тепловий потік Φ , а змінною потенціалу є температура T . Співвідношення між цими величинами визначається компонентним рівнянням, яке для пружного елемента теплової системи має загальний вигляд, що задає основи математичного опису таких процесів.

$$\Phi_I dt = C_T \cdot dT \quad (2.1)$$

C_T – питома теплоємність речовини в якій поширюється тепловий потік, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$

Φ_I – тепловий потік витрачається на нагрівання речовини, Дж/с.

Компонентне рівняння дисипативного елемента для теплової системи в загальному вигляді запишеться:

$$\Phi_\delta = \mu_T \cdot T_\delta \quad (2.2)$$

де T_δ – різниця між температурою тіла, що нагрівається, і температурою середовища, в яку розсіюється тепла енергія, $^\circ\text{C}$;

μ_T – коефіцієнт конвективного теплообміну, $\frac{Дж}{с \cdot ^\circ C}$

Φ_∂ – тепловий потік, що розсіюється нагрітим тілом, Дж/с.

$$\mu_T = \alpha A, \quad (2.3)$$

где α – коефіцієнт конвективного теплообміну, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$;

A – площа контакту твердого тіла з газом або рідиною, $м^2$.

Для побудови повної математичної моделі будь-якої технічної системи необхідно об'єднати окремі компонентні рівняння, що описують поведінку її елементарних частин, у єдину узгоджену систему. Таке об'єднання базується на фундаментальних фізичних законах, які визначають умови рівноваги та безперервності для відповідних фізичних величин. Рівняння, що формулюють ці закономірності, прийнято називати топологічними, оскільки вони відображають структуру взаємозв'язків між елементами системи та визначають спосіб передачі фізичних змінних між ними. Топологічні залежності задають характер взаємодії між сукупністю простих елементів, встановлюючи відповідні співвідношення для змінних одного типу та забезпечуючи коректність моделювання процесів у цілому.

Умови рівноваги формулюються для фазової змінної, що відіграє роль потенціалу. У контексті розглядуваної теплової системи такою змінною є температура, і саме для неї записується співвідношення, яке встановлює баланс станів у вузлах математичної моделі системи.

$$\sum_k T_k = 0. \quad (2.4)$$

Для мінної, що виражає потік, повинна виконуватися умова

неперервності:

$$\sum_i \Phi_i = 0. \quad (2.5)$$

Для побудови математичної моделі доцільно застосувати метод електроаналогій, описаний у працях [13,16]. Такий підхід належить до методів імітаційного моделювання й ґрунтується на єдності фундаментальних фізичних законів для систем різної природи. Оскільки електричні кола добре вивчені та мають високу наочність, їх математичний апарат зручний для опису поведінки інших технічних об'єктів. Завдяки однакової формі рівнянь, що описують різні фізичні процеси, аналіз теплових явищ можна замінити дослідженням аналогічних процесів у схемах електричних кіл. Порівняння топологічних та компонентних рівнянь демонструє пряму відповідність між динамікою теплової системи та електричною моделлю. Закони Кірхгофа відіграють роль топологічних залежностей для теплової моделі, тоді як компонентні співвідношення відповідають закону Ома та рівнянню, що описує поведінку конденсатора, яке має вигляд:

$$U_y = \frac{1}{C} \cdot \int i_y dt, \quad (2.6)$$

де U_y — електрична напруга, В;

I — сила струму, А;

C — електрична ємність, мкФ.

У результаті проведеного моделювання були отримані графічні залежності, що відображають характер перехідного процесу в замкнутому контурі регулювання температури в одній із зон нагріву загартовувальної печі під час підвищення температури від умов цеху до мінімальної робочої

величини, що становить $810\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відповідний графік поведінки системи під час нагріву наведено на рисунку 2.2.

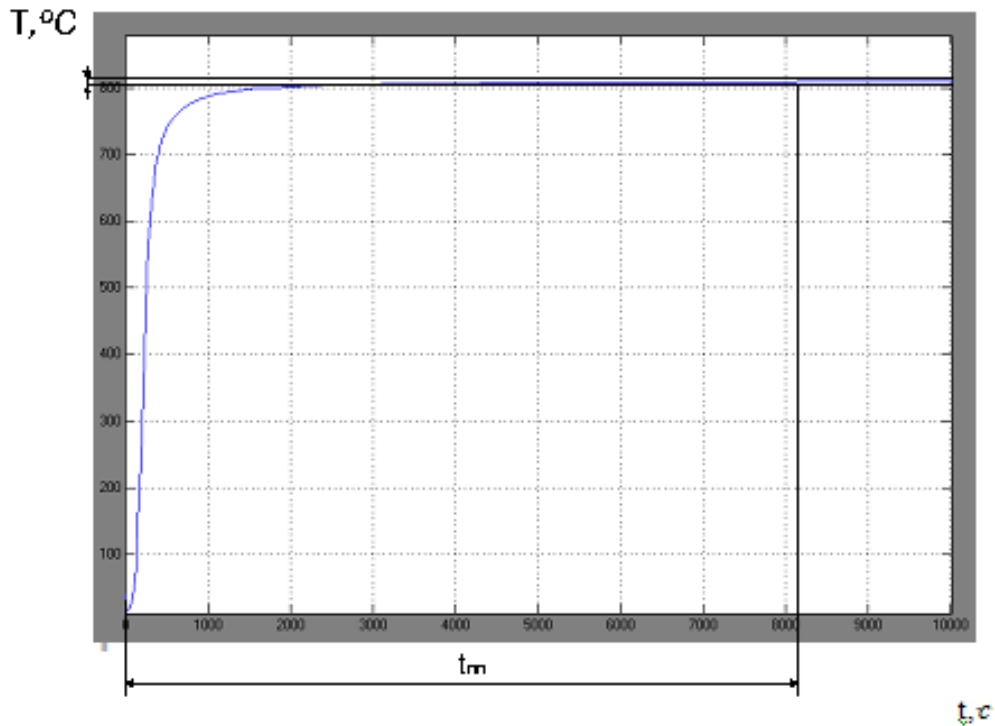


Рисунок 2.2 –Графік характеру перехідного процесу в зоні нагріву гартувальної печі.

Аналізуючи наведений графік, можна встановити, що проміжок часу, необхідний для підвищення температури від початкового значення, яке відповідає умовам цехового середовища, до мінімального робочого рівня, становить приблизно дві з половиною години. У процесі нагрівання не спостерігається перерегулювання, що свідчить про стабільність та коректність роботи системи керування.

Для повноти дослідження доцільно розглянути також поведінку системи в разі появи зовнішніх збурень. Одним із основних факторів, що викликає такі зміни, є короткочасне зниження температури всередині печі через відкривання шлюзових заслінок, яке необхідне для завантаження нових деталей. Хоч разова теплова втрата є незначною, багаторазове повторення

цього процесу може вплинути на стабільність температурного режиму, тому важливо переконатися, що температура не виходитиме за межі допустимого відхилення у ± 5 °C від встановленого робочого значення. Поведінка системи під дією таких збурюючих факторів представлена на рисунку 2.3, де показані відповідні перехідні процеси.

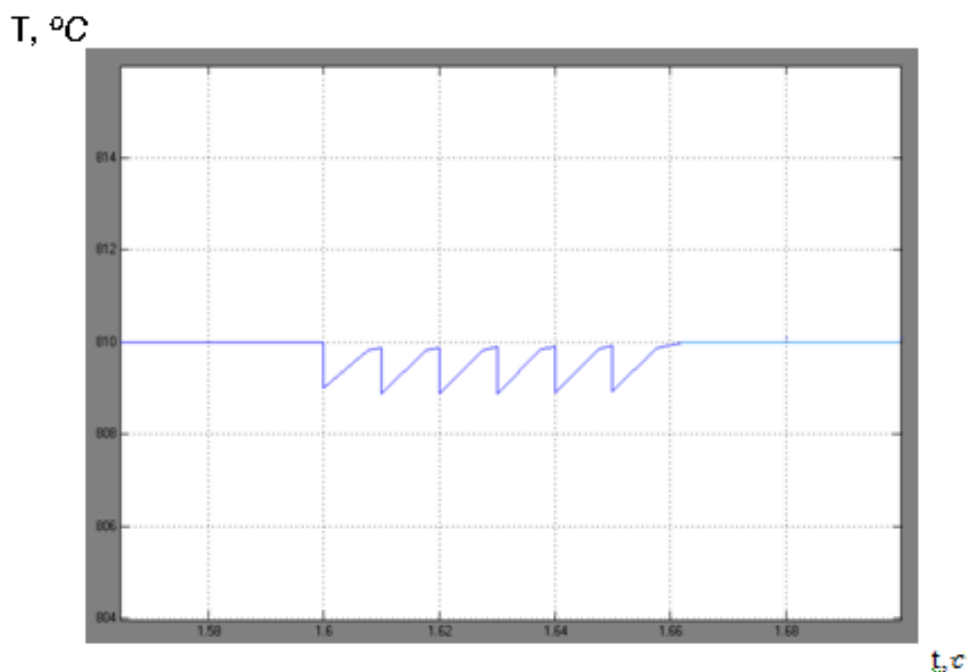


Рисунок 2.3 – Перехідний процес, що виникає в системі за наявності збурюючих впливів.

Слід підкреслити, що навіть при появі серії різких стрибкоподібних збурень температура всередині печі залишалася в межах допустимого діапазону, тобто не виходила за межі ± 5 °C від установленого значення. Аналіз отриманих характеристик дозволяє стверджувати, що система демонструє стабільну роботу і не потребує додаткового регулятора, оскільки її динамічні показники повністю відповідають вимогам, наведеним у технічному завданні [14].

Для забезпечення ефективного контролю температури доцільно використовувати широтно-імпульсне регулювання, оскільки саме цей метод

забезпечує високу плавність керування процесом [1]. Його принцип ґрунтується на зміні кількості теплової енергії, що надходить до об'єкта керування, яким у даному випадку є нагрівач. Подача енергії здійснюється у вигляді послідовності імпульсів сталої напруги U , а робота нагрівального елемента чергується між інтервалами нагрівання та охолодження протягом періоду T . Необхідна інтенсивність нагріву визначається середнім значенням енергії за весь період, яке залежить від відносної тривалості імпульсу, тобто скважності γ :

$$\gamma = \frac{t_I}{t_I + t_{II}}, \quad (2.7)$$

де t_I – позначає тривалість імпульсу, а t_{II} — часову паузу між імпульсами.

Таке регулювання може реалізовуватися за допомогою різних перетворювачів, серед яких виділяють широтно-імпульсні, частотно-імпульсні та широтно-частотно-імпульсні.

Під час імпульсного керування тепловий потік змінюється в певних межах, а величина цих коливань залежить від співвідношення теплоємності об'єкта та частоти надходження імпульсів. Із підвищенням частоти керуючих імпульсів амплітуда коливань теплового потоку зменшується. При цьому його середнє значення залишається сталим, що має ключове значення для підтримання стабільної температури в печі. Змінити середній тепловий вплив можна лише шляхом коригування скважності γ , змінюючи тривалість імпульсів згідно з формулою (2.7). Зі збільшенням скважності середня температура всередині печі також зростає.

У технічному завданні також визначено необхідність регулювання швидкостей електродвигунів конвеєрів, що входять до складу електротермічної лінії. У подібних системах традиційно застосовують асинхронні двигуни, оскільки вони вирізняються високою надійністю,

невеликою вартістю, простотою конструкції та зручністю обслуговування [1]. З теорії електропривода відомо [10], що швидкість обертання вала асинхронного двигуна визначається сукупністю конструктивних характеристик, величиною навантаження та частотою живильної напруги. Ці залежності впливають з рівнянь механічної характеристики асинхронного двигуна (2.8) і формули (2.9):

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2] \cdot s}, \quad (2.8)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость (скорость холостого хода), рад/с;

U_{ϕ} – первинна фазова напруга, В;

X_1 – первинний приведений реактивний опір, Ом;

X_2' – вторинний приведений реактивний опір, Ом;

R_1 – первинний приведений активний опір, Ом;

R_2' – вторинний приведений активний опір, Ом;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (2.9)$$

де f – коефіцієнт ковзання;

p – кількість пар полюсів асинхронного двигуна;

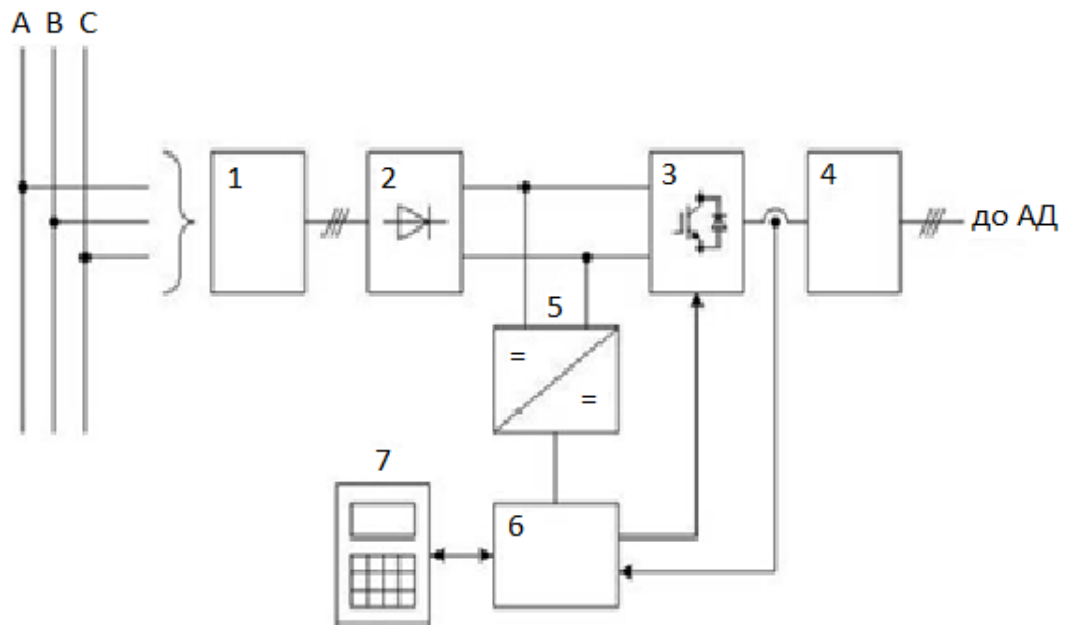
s – частота мережі, Гц.

Очевидно, що для досягнення якісного процесу регулювання необхідно змінювати саме частоту живлення, яка є головним параметром впливу на роботу електродвигуна. Саме для цього застосовують частотні перетворювачі — пристрої, що забезпечують перетворення електричної енергії з

початковими параметрами U_1 та f_1 (у даному випадку 380 В і 50 Гц) у енергію з іншими характеристиками U_2 і f_2 . Частотні перетворювачі поділяються на обладнання зі скалярною методикою керування та системи з векторним керуванням. Такий поділ пояснюється необхідністю одночасного впливу не лише на вихідну частоту, а й на напругу, значення якої визначається алгоритмом керування. У перетворювачах зі скалярним принципом зміна напруги здійснюється відповідно до залежності $U(f)$, яку зазвичай отримують за допомогою лінійної інтерполяції на основі кількох базових точок, і користувач може коригувати їхні значення.

У випадку використання векторного керування потрібна інша логіка розрахунку вихідної напруги, яка ґрунтується на моделюванні електромагнітних процесів, що відбуваються в асинхронному двигуні. Це означає, що оператор повинен точно ввести усі технічні параметри електродвигуна. Хоча такий метод забезпечує значно більш точне керування, налаштування подібного обладнання потребує істотних знань у сфері електропривода та електричних машин. На практиці скалярний підхід демонструє достатньо високу стабільність роботи навіть у разі використання стандартних заводських параметрів перетворювача. Оскільки застосування векторного керування у приводах конвеєрів не забезпечить відчутного покращення якості порівняно зі скалярним методом, використання більш складного алгоритму у нашій системі є недоцільним. Тому регулювання швидкості конвеєрів доцільно реалізувати саме на основі скалярного принципу.

Щоб детальніше розглянути процес роботи частотного перетворювача зі проміжною ланкою постійного струму, варто проаналізувати його структурну побудову, подану на рисунку 2.2.



1 - вхідний фільтр; 2 - випрямляч; 3 - інвертор (АІН); 4 - вихідний фільтр;
5 - джерело живлення; 6 - мікроконтролер (МК); 7 - пульт управління

Рисунок 2.3 – Структурна схема перетворювача частоти

Основою такого перетворювача є трифазний інвертор напруги, у якому застосовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Керування інвертором здійснюється за допомогою програмованого мікропроцесорного контролера. У цьому інверторі перетворення постійної напруги у трифазну змінну реалізується завдяки мостовій схемі, сформованій на базі трьох транзисторно-діодних модулів. Кожен модуль містить пару IGBT-транзисторів, що працюють разом з діодами зворотної провідності. Транзистори здійснюють багаторазові перемикання протягом одного періоду вихідної частоти відповідно до алгоритму ШІМ, реалізованого мікропроцесорним контролером.

Завдяки використанню такого алгоритму вдається підтримувати потрібну частоту та необхідне діюче значення основної гармоніки напруги, а також забезпечувати стабільну синусоїдальну форму струму навантаження, що має важливе значення для надійної та ефективної роботи електропривода.

Сучасні частотні перетворювачі являють собою високотехнологічні інтелектуальні пристрої, у яких використовуються мікроконтролери з високою обчислювальною продуктивністю. Завдяки цьому в них реалізовано широкий спектр додаткових функцій і розширень, що дозволяють створювати відносно прості системи автоматичного керування навіть без використання зовнішніх контролерів. У більшості моделей таких пристроїв наявний набір універсальних можливостей, які значно розширюють їх застосування в автоматизованих системах.

Однією з таких можливостей є використання аналогових виходів, що дозволяють у візуальній формі отримувати інформацію про певний параметр роботи обладнання. Проте практичне застосування таких виходів у складних автоматизованих системах є малоефективним через обмежену потужність і недостатню точність сигналів. Значно більшою користю відзначаються аналогові входи, які забезпечують можливість безпосереднього підключення датчиків до частотного перетворювача без проміжних перетворювальних пристроїв. Оскільки зазвичай використовуються стандартні сигнали на кшталт 0–5 В, 0–10 В чи 4–20 мА, необхідності у додаткових узгоджувальних модулях не виникає. Крім того, у багатьох моделях передбачене внутрішнє живлення для підключення потенціометра, який може застосовуватися для завдання частоти обертання електродвигуна.

Управління роботою частотного перетворювача може здійснюватися і за допомогою дискретних входів, через які він реагує на команди з кнопочних постів або панелей керування. Дискретні входи, у свою чергу, застосовуються для індикації станів роботи перетворювача та видачі сигналів на інше обладнання. Додатково в таких пристроях передбачена можливість підключення до промислових мереж, де найчастіше використовується протокол RS-485. Об'єднання кількох перетворювачів у спільний інформаційний простір дозволяє створювати комплексні системи

автоматизації, що функціонують під керуванням промислових контролерів або спеціалізованих комп'ютерів.

Серед суттєвих переваг сучасних частотних перетворювачів варто відзначити здатність забезпечувати плавне регулювання частоти обертання двигуна, що дає можливість у багатьох випадках відмовитися від редукторів, варіаторів, дроселів та іншої регулюючої механічної апаратури. Це значно спрощує конструкцію технологічного обладнання, зменшує навантаження на механічні елементи і скорочує витрати на обслуговування. Плавний запуск двигуна, який забезпечується частотним перетворювачем, усуває високі пускові струми та механічні ривки, що позитивно впливає на довговічність приводу та всіх пов'язаних з ним механізмів. Такий спосіб пуску іноді дає можливість використовувати двигуни меншої потужності завдяки полегшеним умовам розгону.

Вбудований мікропроцесорний ПД-регулятор дозволяє реалізувати системи автоматичного регулювання швидкості або інших технологічних параметрів, що забезпечує високу якість підтримання їхніх значень у разі зміни навантаження або впливу зовнішніх збурень. Частотний перетворювач у комплекті з асинхронним двигуном може успішно замінювати приводи постійного струму, а в комбінації з програмованим мікроконтролером здатний формувати багатофункціональні системи керування, включно з можливістю резервування. Це забезпечує високу точність регулювання швидкості, використовуючи лише внутрішні можливості частотного перетворювача.

Обладнання електротермічної лінії працює відповідно до визначених алгоритмів. Один із них стосується керування клапаном. Функціональне призначення відповідного блока полягає у забезпеченні роботи виконавчого механізму клапана та формуванні інформації про його поточний стан. На рисунку 2.4 наведена схема цього блока, поданого у вигляді «чорний ящик».

У якості вхідних даних для цього блока виступають змінні, перелічені в таблиці 2.1.

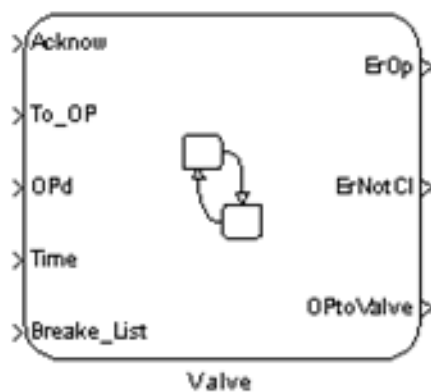


Рисунок 2.4 – Модель блока керування клапаном типу «чорний ящик».

Таблиця 2.1 – Змінні та відповідні їм входні данні блока управління клапаном

Змінна	Тип	Опис
Acknow	boolean	Підтвердження стану
To_OP	boolean	Команда від верхнього рівня «Відкрити»
OPd	boolean	Сигнал кінцевика «Клапан відкритий»
Time	real	Час на відкриття або закриття
Breake_List	boolean	Сигнал аварії

На виході блоку формуються значення змінних представлених у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні змінні та їх типи

Змінна	Тип	Опис
ErOp	boolean	Клапан відкритий помилково
ErNotCl	boolean	Клапан не закритися
OPtoValve	boolean	Команда «Відкрити клапан»

Стан клапана визначається за графом представленим на рисунку 2.5.

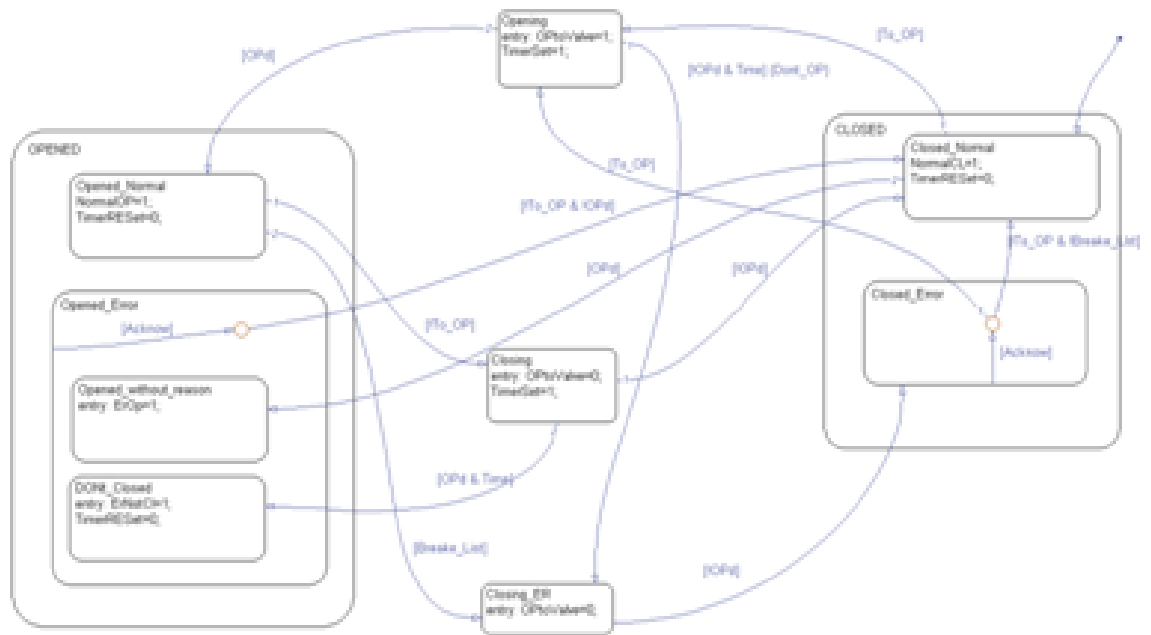


Рисунок 2.5 – Граф алгоритму роботи блоку управління клапаном

Граф показує можливі стани клапану та можливі переходи між станами клапана. Опис цих станів подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Стани клапана

Стан	Опис	Примітка
Closed_Normal	Клапан закритий	0 – стан активно 1 стан неактивно
Opened_Normal	Клапан відкритий	0 – стан активно 1 стан неактивно
Closed_Error	Аварійне закриття	0 – стан активно 1 стан неактивно
Opened_without_reason	Несподіване відкриття	0 – стан активно 1 стан неактивно
Don't_Closed	Клапан не закрится	0 – стан активно 1 стан неактивно

Продовження таблиці 2.3

Стан	Опис	Примітка
Closing	Триває процес закривання	0 – стан активно 1 стан неактивно
Opening	Триває відкривання	0 – стан активно 1 стан неактивно
Closing_Error	Закриття з аварійної причини	0 – стан активно 1 – стан неактивно

Алгоритм роботи блоку керування конвеєром здійснює керування запуском і зупинкою конвеєра і формування повідомлень про стан механізму.

Модель його функціонування показана на рисунку 2.6.

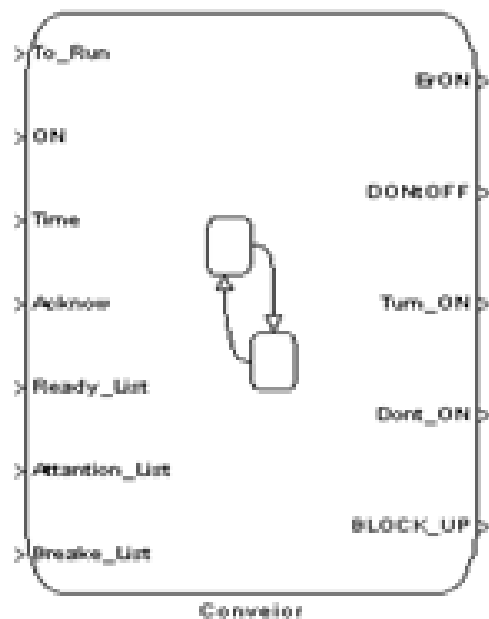


Рисунок. 2.6 – Модель блока управління конвейером у вигляді «чорного ящика»

Вхідні сигнали задаються змінними переліченими у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вхідні сигнали блоку управління конвейером

Змінна	Тип	Опис
Acknow	boolean	Підтвердження
To_Run	boolean	Команда «Увімкнути»
ON	boolean	Сигнал «Конвеєр увімкнено»
Time	real	Час на запуск/зупинку
Ready_List	boolean	Готовність
Attantion_List	boolean	Попередження
Breake_List	boolean	Аварія

Вихідні сигнали формуються за допомогою змінних поданих у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Вихідні сигнали блоку управління конвейером

Змінна	Тип	Опис
ErON	boolean	Увімкнення без команди
DontOFF	boolean	Не вдалося вимкнути
Turn_ON	boolean	Команда «Увімкнути конвеєр»
BLOCK_UP	boolean	Блокування
Don't_ON	boolean	Конвеєр не запустився

Стан визначається графом (рисунок 2.7).

У графі відображені можливі стани конвеєра, що подані та описані в таблиці 2.6.

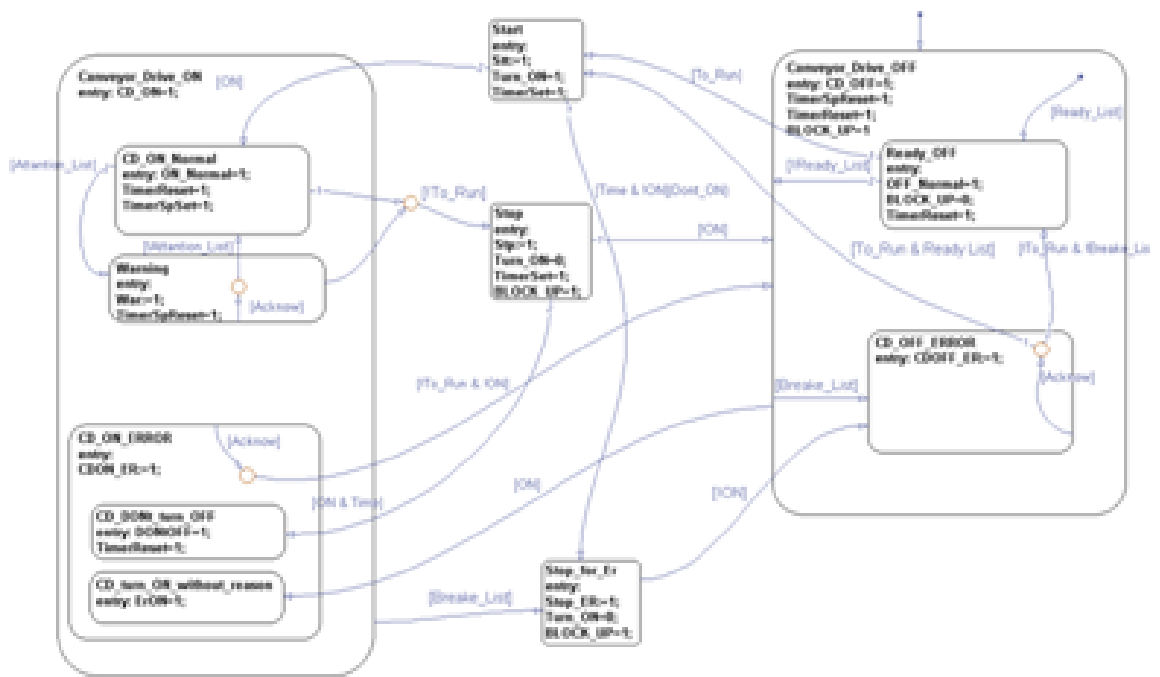


Рисунок 2.7 – Граф алгоритму роботи блоку управління конвейером

Таблиця 2.6 – Стани конвеєра

Стан	Опис	Примітки
Conveyor_DriveOFF	Конвеєр вимкнений	0 – стан активно 1 стан неактивно
Ready_OFF	ГОТОВИЙ до запуску	0 – стан активно 1 стан неактивно
CD_OFF_Error	Аварійне вимкнення	0 – стан активно 1 стан неактивно
CD_ON_Normal	Нормальна робота	0 – стан активно 1 стан неактивно
Warning	Робота з попередженням	0 – стан активно 1 стан неактивно
Stop	Вимкнення	0 – стан активно

Продовження таблиці 2.6

Стан	Опис	Примітки
Start	Увімкнення	0 – стан активно 1 стан неактивно
Stop_for_Er	Вимкнення через аварію	0 – стан активно 1 – стан неактивно
CD_ON_ERROR	Робота в аварійному режимі	0 – стан активно 1 стан неактивно
CD_Dont_turn_OFF	Не вимкнувся	0 – стан активно 1 – стан неактивно
CD_turn_ON_Without_reason	Увімкнувся самовільно	0 – стан активно 1 стан неактивно

Алгоритм роботи блоку керування вентилятором забезпечує: пуск і зупинку вентилятора та формування діагностичних станів.

Модель блоку управління вентилятором типу «чорного ящика» показано на рисунку 2.8.

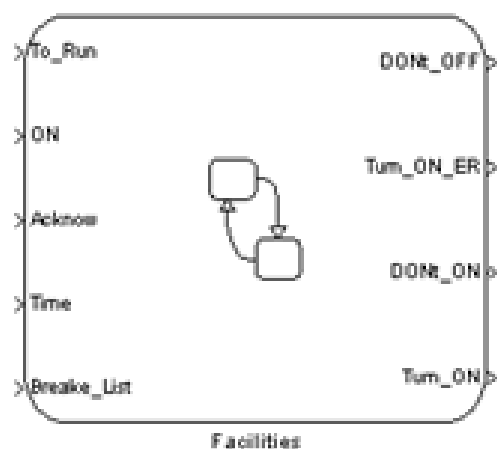


Рисунок. 2.8 – Модель блоку управління вентилятором типу «чорний ящик»

Вхідна та вихідна інформація для цього блоку формується змінними поданими в таблицях 2.7 та 2.8 відповідно.

Таблиця 2.7 – Вхідні сигнали

Змінна	Тип	Опис
Acknow	boolean	Квитування
To_Run	boolean	Команда «Увімкнути»
OPd	boolean	Сигнал «Вентилятор увімкнений»
Time	real	Час запуску/зупинки
Breake_List	boolean	Аварія

Таблиця 2.8 – Вихідні сигнали

Змінна	Тип	Опис
EtON	boolean	Самовільне увімкнення
DontOFF	boolean	Не вимкнувся
Turn_ON	boolean	Команда «Увімкнути»
Don't_ON	boolean	Не запустився

Формування слова стану та керування роботою вентилятора здійснюються відповідно до графа його станів, наведеного на рисунку 2.9. Цей граф відображає усі можливі режими роботи вентилятора, а також умови переходів між ними, що дозволяє забезпечити логічну та узгоджену роботу системи.

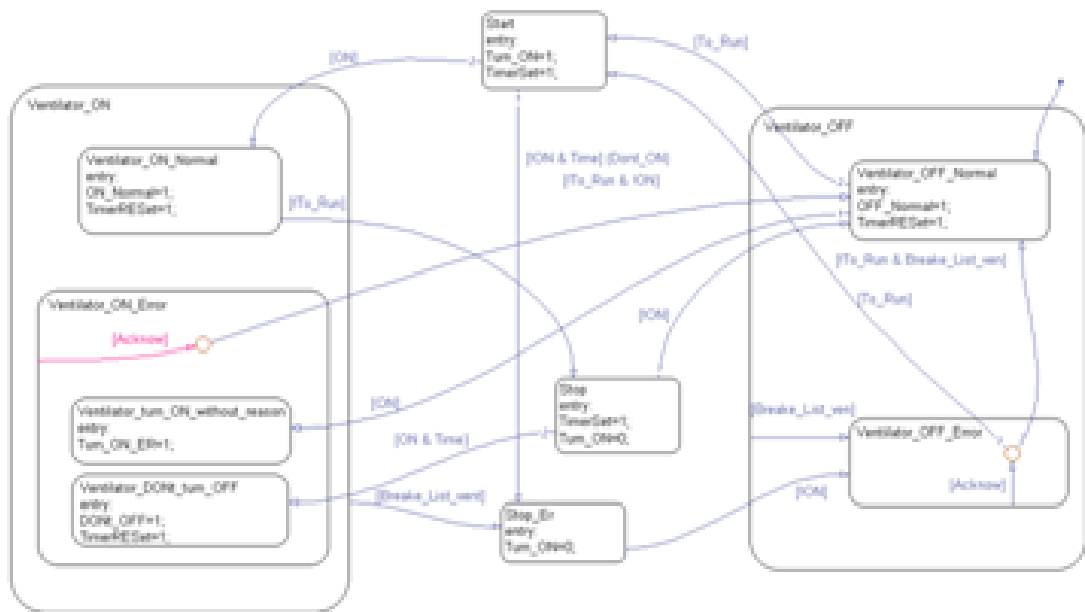


Рисунок 2.9 – Граф алгоритм роботи блока управління вентилятором

На графі відображено всі можливі стани вентилятора, що перераховані у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Стани вентилятора

Стан	Опис	Примітки
Ventilator_OFFNormal	Вимкнений, норма	0 – стан активно 1 – стан неактивно
Ventilator_ONNormal	Увімкнений, норма	0 – стан активно 1 стан неактивно
Ventilator_OFFError	Вимкнений в аварії	0 – стан активно 1 – стан неактивно
Ventilator_turn_ONWithout_reason	Самовільне увімкнення	0 – стан активно 1 стан неактивно
Ventilator_Don'tTurn_OFF	Не вимкнувся	0 – стан активно 1 – стан неактивно

Продовження таблиці 2.9

Стан	Опис	Примітки
Start	Запуск	0 – стан активно 1 стан неактивно
Stop	Зупинка	0 – стан активно 1 – стан неактивно
Stop_Er	Аварійне вимкнення	0 – стан активно 1 стан неактивно

Блок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) використовується для формування послідовності імпульсів заданої тривалості відповідно до встановлених параметрів керування.

На рисунку 2.10 наведена узагальнена модель блока ШІМ у вигляді «чорної скриньки».

Таблиця 2.10 – Вхідні дані блока ШІМ

Змінна	Тип	Опис
To_Turn	boolean	Команда «Увімкнути», сформована в алгоритмі роботи нагрівача
TR_swithing_ON	boolean	Сигнал від трансформатора струму про його активний стан
Ttek	real	Поточний час, зчитаний з таймера
Timp	real	Тривалість імпульсу
Tper	real	Період повторення імпульсів

Таблиця 2.11 – Вихідні дані блока ШІМ

Змінна	Тип	Опис
imp	boolean	Згенерований імпульс

Робота блока ШІМ описується графом станів, що поданий на рисунку 2.11.

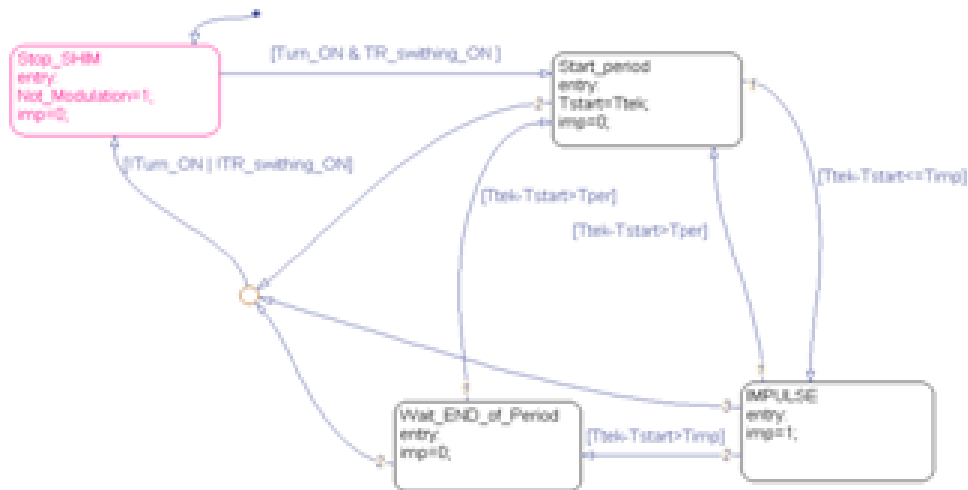


Рисунок 2.11 – Граф алгоритм роботи блока управління широтно-імпульсною модуляцією.

Цей граф визначає можливі стани та їхню зміну під час формування імпульсів, що подані у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Стани режимів роботи блока ШІМ

Стан	Характеристика	Примітка
Stop_SHIM	Формування імпульсів призупинено	1 – активний стан, 0 – неактивний стан
Start_period	Початок нового періоду модуляції	1 – активний стан, 0 – неактивний стан
IMPULSE	Безпосередня генерація імпульсу	1 – активний стан, 0 – неактивний стан

2.2 Вибір технічного забезпечення системи автоматизованого управління електротермічною лінією

Сьогодні автоматизація більшості виробничих процесів ґрунтується на застосуванні універсальних мікропроцесорних контролерів. Такий підхід пояснюється тим, що використання вже готових технічних рішень дозволяє уникнути необхідності власної розробки обладнання, значно підвищує надійність систем і скорочує загальний час проектування.

Для створення системи автоматизованого управління на основі мікропроцесорної техніки можливе використання різних варіантів апаратної реалізації. Серед них розглядаються рішення, побудовані на персональних комп'ютерах, автономних PLC-контролерах, мережевих комплексах на базі кількох контролерів, а також повномасштабні розподілені системи керування. У контексті електротермічної лінії найбільш раціональним є застосування саме локального PLC-контролера, оскільки комп'ютерні системи не забезпечують необхідного рівня промислової надійності, тоді як мережеві комплекси та розподілені системи є значно дорожчими і використовуються здебільшого для керування значно складнішими об'єктами.

Оскільки передбачається розташування обладнання в умовах термічного цеху, контролери повинні стабільно працювати при температурі до 45 °С. Крім того, у системі використовується широтно-імпульсне регулювання температури, що вимагає наявності у контролері можливості реалізації керованого ШІМ-модулятора. На сучасному українському ринку представлено широкий спектр таких пристроїв, серед яких особливо виділяються контролери Siemens, Advantech та Mitsubishi.

Оптимальним вибором для даної системи є промислові контролери Siemens [18], які поєднують високу надійність, зручність програмування, прийнятну вартість та значну поширеність. Для нашого випадку підходять контролери сімейств S7-300 та S7-400. З огляду на те, що електротермічна

установка ЕЛТА-8/45 належить до об'єктів середньої складності, доцільно обрати контролер серії S7-300, адже моделі S7-400 орієнтовані на значно складні системи з великою кількістю сигналів і їхнє застосування тут не є виправданим. Пристрої серії S7-300 мають модульну структуру, що дозволяє формувати конфігурацію системи з необхідних компонентів: монтажних стояків, блоків живлення, центральних процесорних модулів, сигнальних модулів для роботи з аналоговими та цифровими сигналами, функціональних модулів для виконання спеціальних задач у реальному часі та комунікаційних модулів для забезпечення взаємодії з промисловими мережами.

Контролер Siemens S7-317-2DP повністю відповідає вимогам до роботи в умовах підвищеної температури та дозволяє реалізувати програмні алгоритми широтно-імпульсного керування.

Для регулювання швидкості конвеєрів у проєкті передбачено використання частотних перетворювачів серії MicroMaster від Siemens. Ці приводи легко інтегруються у сучасні автоматизовані комплекси, підтримують роботу через промислові мережі, зокрема PROFIBUS, і мають усі параметри, необхідні для виконання вимог технічного завдання. Найбільш придатними для системи є моделі MicroMaster 440, оскільки вони відрізняються розширеним функціоналом, зокрема можливістю роботи з аналоговим сигналом 4...20 мА та налаштуванням оператором вольт-частотної характеристики, що значно полегшує адаптацію обладнання до конкретних умов експлуатації.



Рисунок 2.12 – Перетворювачі серії MicroMaster (зліва направо MicroMaster 410, MicroMaster 420, MicroMaster 440).

Підсистема візуалізації, тобто автоматизоване робоче місце оператора, може бути реалізована на основі різних апаратних засобів, однак серед можливих варіантів доцільно зупинитися на промисловому панельному комп'ютері. Вбудовані операторські панелі не здатні забезпечити повний набір функцій, передбачених технічним завданням, а звичайний настільний комп'ютер займає надто багато місця і не може бути розміщений у виробничому приміщенні. Тому саме промисловий панельний комп'ютер оптимально відповідає вимогам до відображення технологічної інформації та взаємодії оператора з установкою.

2.3 Вибір програмного забезпечення та загальної структури програмного комплексу

Для коректної роботи системи управління необхідно, щоб програмне забезпечення вирішувало два ключових завдання: забезпечувало формування керуючих впливів відповідно до алгоритмів роботи електротермічної лінії та представляло оператору всю необхідну інформацію про стан обладнання у зручній формі, одночасно забезпечуючи можливість втручання у процес та зміну параметрів у реальному часі. Програмна частина, що забезпечує виконання цих функцій, включає компоненти інтерфейсу взаємодії оператора з обладнанням (НМІ), програму контролера, а також засоби комунікації між операторським місцем, контролером і керованою установкою.

Оскільки система базується на контролері Siemens, найбільш логічним є використання програмних засобів того ж виробника, оскільки вони забезпечують максимальну сумісність і дають можливість ефективно реалізувати необхідні функції. Для побудови людино-машинного інтерфейсу застосовується SCADA-середовище WinCC 6.0, яке забезпечує двосторонній

інформаційний обмін між оператором та PLC і дає змогу організувати повний цикл візуалізації та контролю стану технологічного обладнання.

Розробка проектної частини в WinCC 6.0 здійснюватиметься за допомогою стандартних інструментів цього середовища. У ньому передбачені засоби для створення графічних кадрів, налаштування системи повідомлень, організації архівів даних, формування звітної документації, застосування бібліотек скриптів і керування всіма елементами проекту через інструменти адміністрування. Така структура дозволяє сформувати повноцінну інтерактивну систему візуалізації, яка повністю відповідає вимогам технічного завдання.

Програмна частина контролера розробляється в середовищі SIMATIC STEP 7, яке одночасно слугує засобом конфігурування апаратних модулів. Це середовище дозволяє об'єднати всі елементи системи — від обладнання нижнього рівня до рівня автоматичного керування — у єдину структуру. STEP 7 підтримує використання мов програмування згідно зі стандартом IEC 1131-3, що забезпечує зручність реалізації алгоритмів та можливість адаптації програми до складності об'єкта. Структура програмного забезпечення контролера включає конфігураційні параметри обладнання, організаційні блоки, функціональні блоки, процедури та блоки даних, що формують загальну логіку роботи системи.

Комунікаційний обмін між PLC та операторським місцем організовується за допомогою стандартного протоколу Simatic S7 Protocol Suite, що гарантує надійність та сумісність усіх компонентів системи. В якості операційної системи на АРМ оператора використовується Windows XP, оскільки вона повністю підтримує застосовані програмні засоби та відповідає вимогам стабільності для промислових систем.

Загальна структура створеного програмного комплексу подана на рисунку 2.13, де відображено основні компоненти та принципи взаємодії між

ними, а схема побудови програмного забезпечення АСУ електротермічної лінії представлена на рисунку 2.14.

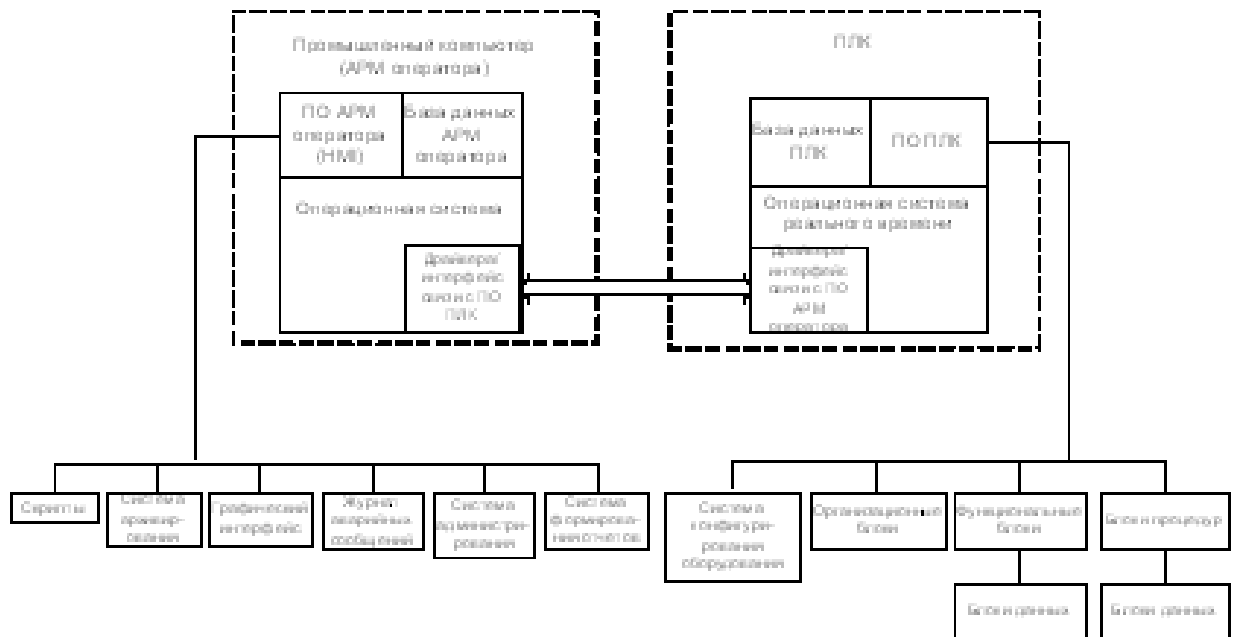


Рисунок 2.14 – Структура програмного забезпечення АСУ ЕЛТА

2.4 Візуалізація технологічного процесу засобами SCADA

Організація візуалізації дає можливість представити інформацію про роботу обладнання у зрозумілій та наочній для оператора формі. Для цього застосовуються мнемосхеми, на яких відтворено основні вузли електротермічної лінії ЕЛТА 8/45 і показано їхній поточний стан. На екрані операторської панелі доцільно відображати ключові параметри, що характеризують роботу системи, серед яких значення швидкостей транспортерів у зонах печей, температурні показники, рівні робочих рідин у гартувальному та охолоджувальному резервуарах, а також час, що залишився до завершення обробки поточної партії. Окремо подається інформація про оператора та дата роботи системи, що полегшує ведення журналів та контроль доступу.

На рисунку 2.14 наведено приклад реалізації такої мнемосхеми електротермічної лінії, створеної у SCADA-середовищі WinCC 6.0, де інтегровано всі основні елементи технологічної установки та забезпечено зручну взаємодію оператора з системою керування.

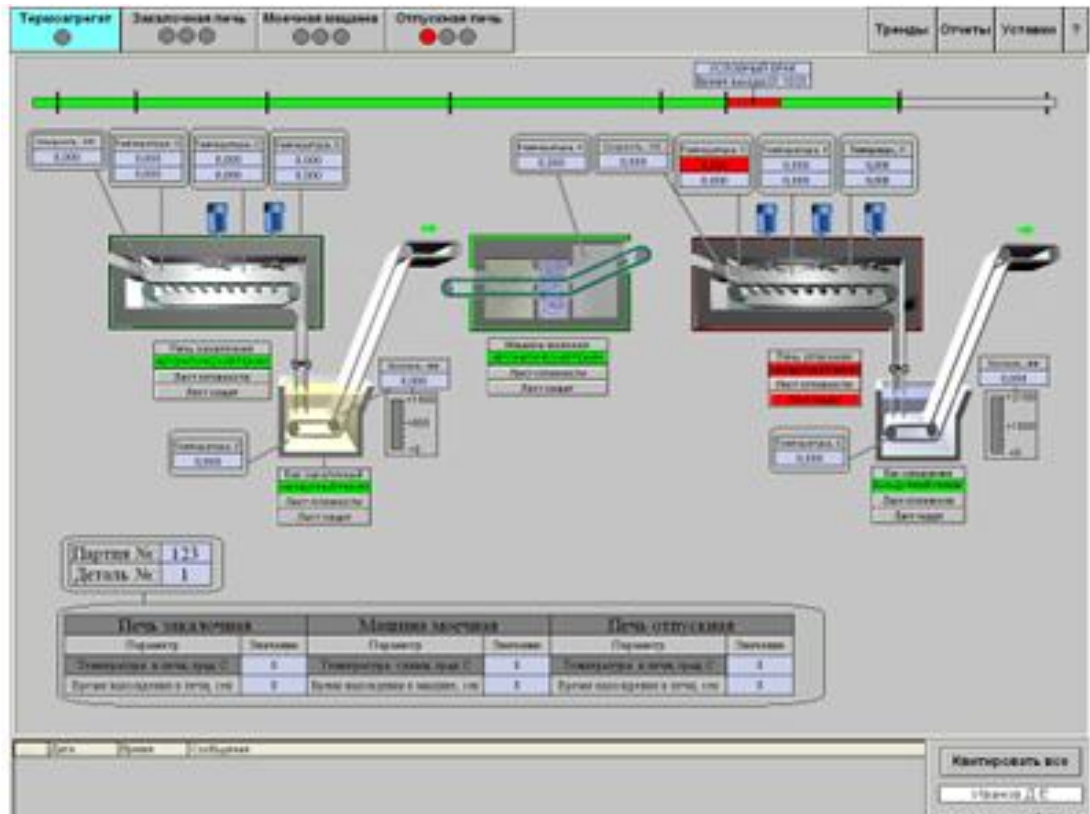


Рисунок 2.14 – Мнемосхема електротермічної лінії створеної у SCADA-середовищі WinCC 6.0

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАКАЛЮВАЛЬНОЮ ПІЧЧЮ

3.1. Дослідження теплових процесів у гартувальній печі

Як уже зазначалося раніше, конструкція зон нагрівання у печах є однотипною, тому немає потреби детально аналізувати кожну з них окремо — достатньо розглянути роботу однієї з таких зон. Для цього модель нагрівальної зони доцільно подати у вигляді «чорної скриньки», як показано на рисунку 3.1. На вхід цієї умовної системи подається тепловий потік Φ_1 , а на виході отримується температура всередині гартувальної печі. Додатковим впливом, що порушує рівновагу, виступають невеликі втрати теплоти ΔQ , які виникають у моменти відкривання шлюзових заслінок. Слід підкреслити, що такі заслінки входять до складу шлюзової камери печі, функція якої полягає у зменшенні температурних втрат під час завантаження. Це забезпечується тим, що в будь-який момент часу одна із заслінок обов'язково залишається зачиненою, що унеможлиблює прямий контакт атмосфери печі з повітрям цеху.

Температурний режим усередині зони нагрівання визначається низкою факторів, серед яких основним є інтенсивність теплового потоку, що надходить від нагрівачів. Значний вплив мають також тепловтрати через стінки печі, які обумовлені теплообміном між зовнішніми поверхнями корпусу та повітрям приміщення. Окрім цього, певна частина енергії витрачається на прогрів внутрішніх стінок і газового середовища печі, а також на компенсацію теплоємності матеріалу конструкції. Загальна схема розподілу тепла від нагрівальних елементів наведена на рисунку 3.2.

У цій схемі тепловий потік Φ_1 відповідає енергії, що надходить від нагрівачів, Φ_{12} характеризує перехід частини тепла від робочого об'єму печі

до її корпусу, а потік Φ_2 відображає передачу енергії від зовнішніх стінок у повітря цеху. Крім того, складові Φ_{1C} та Φ_{2C} позначають кількість тепла, що витрачається відповідно на нагрівання атмосфери всередині печі та на прогрів її стінок.

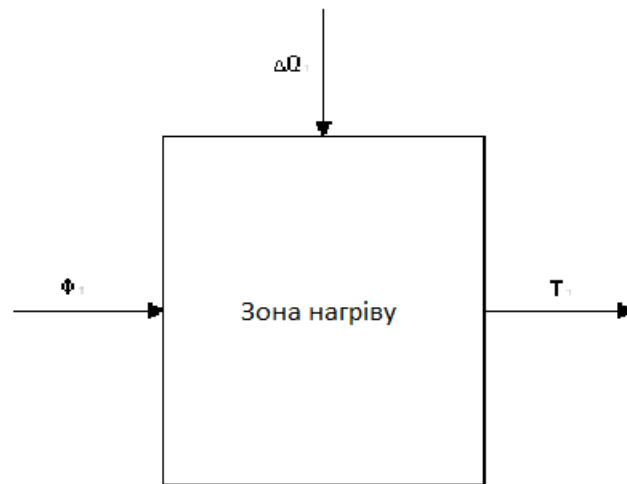


Рисунок 3.1 - Модель зони нагріву типу "чорний ящик"

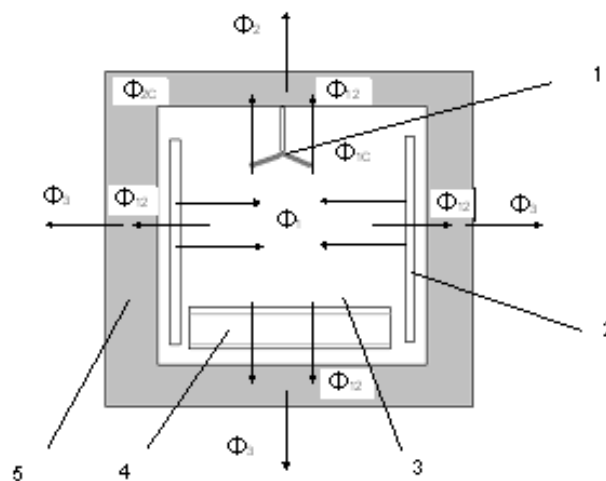


Рисунок 3.2 – Схема розподілу тепла в зоні нагріву гартувальної печі:

1 – вентилятор зони нагріву печі; 2 – секції нагрівача; 3 – внутрішній простір печі; 4 – конвеєр печі; 5 – стінки печі.

Під час побудови моделі було прийнято кілька умов, що спрощують її математичний опис. Зокрема, вважається, що втрати тепла через шлюзові

заслінки відсутні, а рівномірність температури в зоні забезпечується роботою вентилятора. Приймається, що всі зони печі мають однаковий температурний режим, теплообмін між сусідніми зонами є мінімальним, а процеси, що відбуваються в сімисторних елементах, настільки швидкі порівняно з нагріванням, що перетворення сигналу на струм нагрівачів можна описати лінійною залежністю.

Початкові величини, необхідні для формування математичної моделі зони нагрівання гартувальної печі, подані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкові дані для побудови математичної моделі зони нагріву печі

Параметр	Позначення	Одиниця	Значення
Довжина зони нагріву	l_1	м	1.5
Висота зони нагріву	h_1	м	0.8
Ширина зони нагріву	l_2	м	1.2
Висота печі	h_2	м	1.2
Ширина печі	l_3	м	1.8
Питома теплоємність ендोगазу	C_1	$\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	$1.051 \cdot 10^3$
Щільність ендोगазу	ρ_e	$\frac{кг}{м^3}$	1.4
Коефіцієнт теплопередачі між матеріалом печі (шамот/піношамот) та атмосферою	α_2	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$	10÷12,5
Питома теплоємність піношамоту	C_2	$\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	$0.58 \cdot 10^3$
Щільність піношамоту	$\rho_{ш}$	$\frac{кг}{м^3}$	$0.83 \cdot 10^3$

Застосовуючи метод електроаналогій [16], розподіл тепла в зоні нагріву можна представити у вигляді еквівалентної електричної схеми (рисунок 3.3).

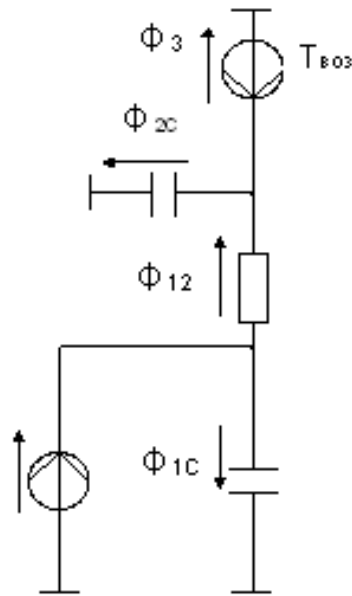


Рисунок 3.3 – Еквівалентна електрична схема зони нагріву печі

Для цієї схеми можна записати систему топологічних рівнянь:

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_{12} = \Phi_{1C}; \\ \Phi_{12} - \Phi_2 = \Phi_{2C}; \\ T_{\text{наг}} - T_1 = T_{\partial 1}; \\ T_1 - T_2 = T_{\partial 2}; \\ T_2 - T_{\text{нов}} = T_{\partial 3}. \end{cases} \quad (3.1)]$$

де: $T_{\text{наг}}$ – температура нагрівача, °С;

T_1 – температура зони нагріву печі, °С;

T_2 – температура матеріалу печі, °С;

$T_{\text{нов}}$ – температура повітря цеху, °С;

$T_{\partial 1}$ – різниця між температурою нагрівача та атмосфери печі;

$T_{\partial 2}$ – різниця між температурою атмосфери печі та матеріалу корпусу;

$T_{\partial 3}$ – різниця між температурою матеріалу корпусу та повітря цеху.

На основі цих рівнянь побудовано алгебраїзований граф взаємозв'язків представлений на рисунку 3.4.

Компонентні рівняння та відповідні їм передавальні функції, представлені в таблиці 3.2, визначають кількісні взаємозв'язки фізичних величин.

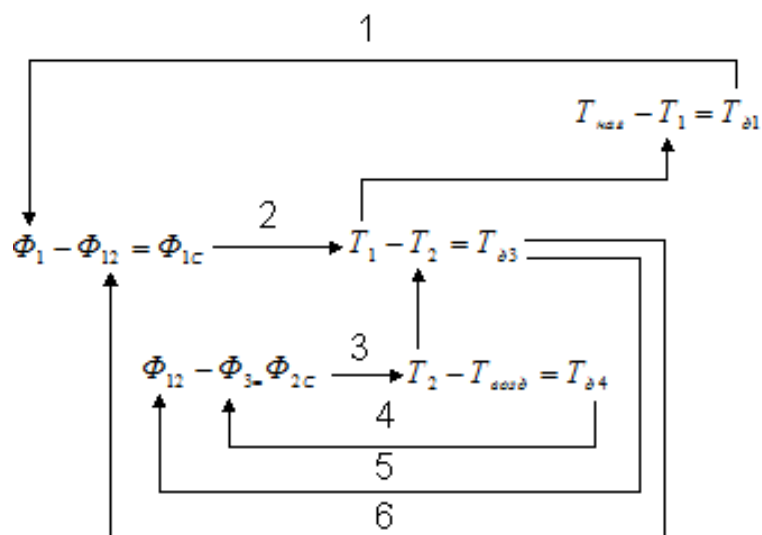


Рисунок 3.4 – Алгебраїзований граф взаємозв'язків топологічних рівнянь

Таблиця 3.2 – Фізичні залежності та передавальні функції теплової системи

Фізичні залежності	Передавальні функції
$\Phi_1 = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot T_{\partial 1}$	$W_1 = \alpha_1 \cdot A_1$
$\Phi_1 = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot T_{\partial 1}$	$W_3 = \frac{1}{C_1 \cdot p}$
$\Phi_{2c} = C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt}$	$W_4 = \frac{1}{C_2 \cdot p}$
$\Phi_2 = \alpha_2 \cdot A_4 \cdot T_{\partial 4}$	$W_5 = \alpha_2 \cdot A_4$
$\Phi_{21} = \alpha_2 \cdot A_3 \cdot T_{\partial 3}$	$W_6 = \alpha_2 \cdot A_3$
$\Phi_{21} = \alpha_2 \cdot A_3 \cdot T_{\partial 3}$	$W_6 = \alpha_2 \cdot A_3$

де A_1 – площа нагрівача зони, m^2 ;

A_2 – площа внутрішньої поверхні печі, m^2 ;

A_3 – площа зовнішньої поверхні печі, m^2 ;

a_1 – коефіцієнт теплопередачі між повітрям та матеріалом печі, $\frac{Вт}{m^2 \cdot ^\circ C}$;

a_2 – коефіцієнт теплопередачі між матеріалом нагрівача та атмосферою печі,

$\frac{Вт}{m^2 \cdot ^\circ C}$;

C_1 – теплоємність атмосфери зони, $Дж/^\circ C$;

C_2 – теплоємність матеріалу печі зони нагріву, $Дж/^\circ C$.

На основі даних таблиці можна побудувати структурну схему зони нагріву представлену на рисунку 3.5.

Початкові дані для математичної моделі нагрівача наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Початкові дані для моделі нагрівача

Параметр	Позначення	Одиниця	Значення
Довжина нагрівального провідника	l3	м	9
Діаметр нагрівального провідника	D	м	0.04
Маса нагрівача	m	кг	64
Питома теплоємність матеріалу (ніхром)	c	Дж/кг·К	$0.4 \cdot 10^3$
Питомий опір ніхрому	ρ	Ом·м	110
Номінальний струм нагрівача	Iн	А	35
Температурний коефіцієнт опору ніхрому	α_e	1/°C	$0.1 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт теплопередачі нагрівача	α_{\square}	Вт/($m^2 \cdot K$)	7.5–11

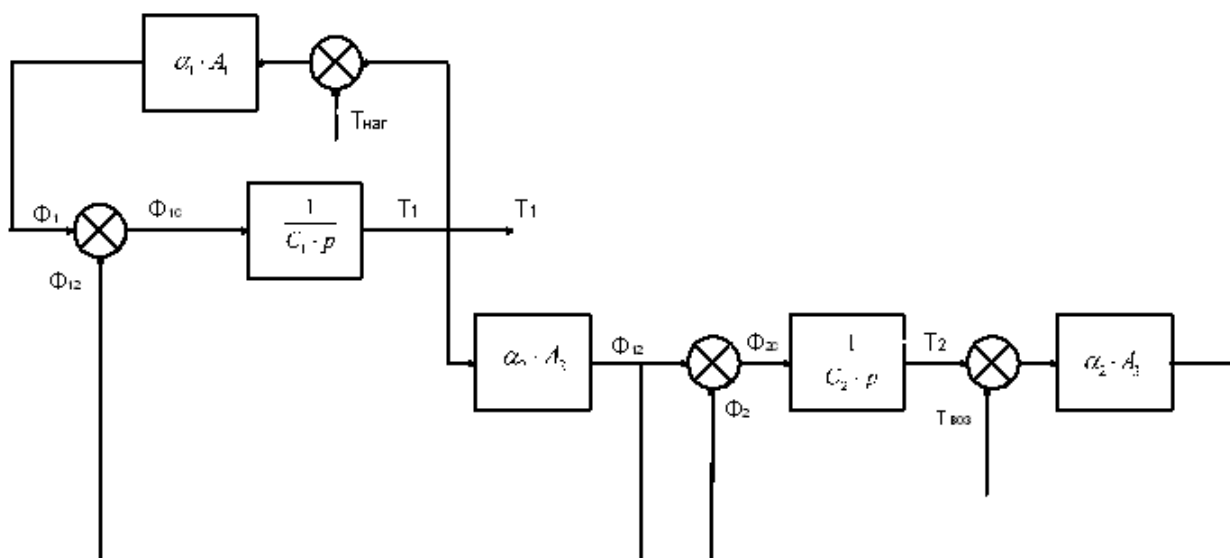


Рисунок 3.5 – Структурна схема передавальної функції зони нагріву

Нагрівач є пристроєм, який перетворює електричну енергію на теплову [11]. Для окремої секції нагрівача можна записати рівняння електричної потужності:

$$P = I^2 \cdot R_{наг} \cdot \eta, \quad (3.2)$$

де: I – струм нагрівача, А;

$R_{наг}$ – опір секції нагрівача, Ом;

η – коефіцієнт корисної дії.

Потужність, що виділяється секцією, змінюється у часі, оскільки опір нагрівача залежить від його температури. Зміна опору описується формулою:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha_e \cdot \Delta T_{наг}), \quad (3.2)$$

де: R_0 – опір при температурі 20 °С, Ом;

α_e – температурний коефіцієнт опору матеріалу нагрівача, °С⁻¹;

$\Delta T_{наг}$ – зміна температури нагрівача, °С.

Опір провідника нагрівача можна визначити через його геометричні параметри та властивості матеріалу:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l_3}{S}, \quad (3.4)$$

де: ρ – питомий опір матеріалу, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l_3 – довжина нагрівача, м;

S – площа поперечного перерізу нагрівача, м^2 .

Потужність нагрівача можна трактувати як тепловий потік, що надходить у нагрівач. Інтегруючи цей потік за часом, отримуємо кількість теплової енергії, виділеної нагрівачем:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \eta \cdot dt, \quad (3.5)$$

Енергія, виділена нагрівачем, витрачається на нагрів самого нагрівача та на нагрів атмосфери печі.

Для енергії, що витрачається на нагрів матеріалу нагрівача:

$$Q_{\text{наг}} = c \cdot m \cdot \Delta T_{\text{наг}}, \quad (3.6)$$

де: $Q_{\text{наг}}$ – енергія, витрачена на нагрів самого нагрівача, Дж;

c – питома теплоємність матеріалу нагрівача, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

$\Delta T_{\text{наг}}$ – зміна температури нагрівача при передачі йому енергії $Q_{\text{наг}}$;

m – маса секції нагрівача, кг.

Енергія, що передається від нагрівача в атмосферу печі, визначається формулою:

$$Q_1 = \Phi_1 \cdot dt, \quad (3.7)$$

де Q_1 – енергія, що виділяється в атмосферу печі.

На основі цих даних можна скласти структурну схему нагрівача (рис. 3.6).

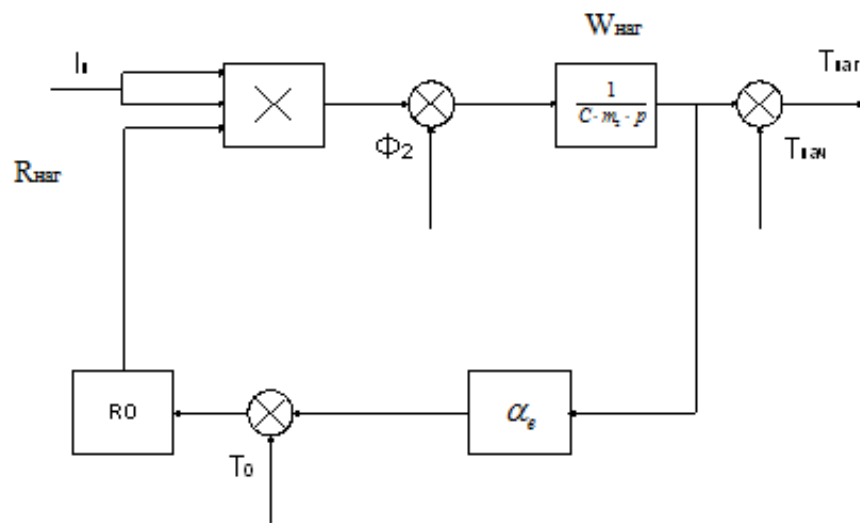


Рисунок 3.6 – Структурна схема нагрівача

Використовуючи формули для енергії нагрівача та передачі тепла в атмосферу, можна записати передавальні функції нагрівача:

$$W_{наг} = \frac{1}{s \cdot m \cdot p}, \quad (3.8)$$

де: c – питома теплоємність матеріалу нагрівача, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$;

m – маса нагрівача, $кг$.

3.2. Побудова системи автоматичного регулювання (САР) температури зони нагріву

Структурна схема САР температури для зони нагріву наведена на рисунку 3.7.

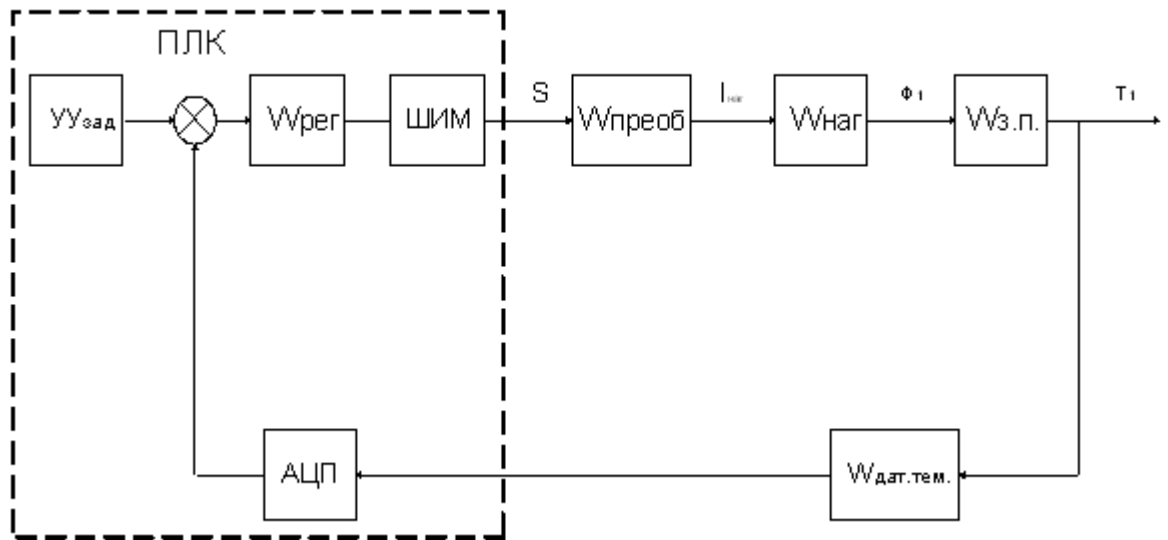


Рисунок 3.7 – Структурна схема САР температури

Компоненти схеми:

- Wз.п. – передавальна функція зони нагріву;
- Wнаг. – передавальна функція нагрівача;
- Wшим – передавальна функція широтно-імпульсного модулятора;
- Wрег. – передавальна функція регулятора температури;
- ПУзад. – пристрій управління, що формує сигнал задання;
- Wдат.тем. – передавальна функція датчика температури.

Управління, ШИМ та регулятор температури реалізовані через програмований логічний контролер (PLC).

3.3 Визначення коефіцієнтів передавальних функцій моделі нагріву та нагрівача

Площа поверхні нагрівача визначається так:

$$A_1 = l_3 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2, \quad (3.9)$$

де: D – діаметр провідника, м;

D – довжина нагрівача, м.

A_1 – площа нагрівача, м².

Підставляючи значення з таблиці 3.3, отримуємо:

$$A_1 = 9 \cdot \left(\frac{0.04}{2}\right)^2 = 0,0036, \text{ м}^2.$$

Площа внутрішньої та зовнішньої поверхонь зони нагріву печі визначається відповідно за (3.10) та (3.11):

$$A_2 = 2 \cdot l_1 \cdot h_1 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2, \quad (3.10)$$

$$A_3 = 2 \cdot l_1 \cdot h_2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_3, \quad (3.11)$$

l_1 – довжина зони нагрівання, м

l_2 – ширина зони нагрівання, м

l_3 – довжина нагрівача в зоні нагрівання

h_1 – висота зони нагрівання, м;

h_2 – висота печі, м;

A_2 – площа внутрішньої поверхні зони нагрівання, м².

Підставляючи значення з таблиці 3.1, отримаємо:

$$A_2 = 2 \cdot 1.5 \cdot 0.8 + 2 \cdot 1.5 \cdot 1.2 = 6, \text{ м}^2$$

$$A_3 = 2 \cdot 1.5 \cdot 1.2 + 2 \cdot 1.5 \cdot 1.8 = 9, \text{ м}^2.$$

Теплоємність атмосфери зони печі визначається виразом:

$$C_1 = c_1 \cdot \rho_g \cdot V_1, \quad (3.12)$$

де: V_1 – об'єм зони нагрівання печі;

c_1 – питома теплоємність ендоегазу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

ρ_g – густина газу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

C_1 – теплоємність атмосфери, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$

Об'єм зони нагрівання печі можна визначити з геометричних розмірів вказаних в таблиці 3.1:

$$V_1 = l_1 \cdot h_1 \cdot l_2, \quad (3.13)$$

где l_1 – довжина зони нагрівання, м;

l_2 – ширина зони нагрівання, м;

h_2 – висота зони нагрівання, м

Підставивши числові значення розрахуємо об'єм:

$$V_1 = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 1.2 = 1.44, \text{ м}^3;$$

Тоді теплоємність атмосфери зони печі:

$$C_1 = 1051 \cdot 1,4 \cdot 1,44 = 2118,82, \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}.$$

Аналогічним чином визначимо теплоємність корпусу печі навколо зони нагріву:

$$C_2 = c_2 \cdot \rho_{ш} \cdot V_2, \quad (3.14)$$

де: V_2 – об'єм матеріалу корпусу печі, м^3 ;

c_2 – питома теплоємність матеріалу печі, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$;

$\rho_{ш}$ – густина матеріалу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Об'єм також визначаємо за геометричними розмірами, заданими в таблиці 3.1 згідно виразу:

$$V_2 = l_1 \cdot h_2 \cdot l_3 - V_1, \quad (3.15)$$

де V_1 – об'єм зони нагрівання печі, м^3 ;

l_1 – довжина зони нагрівання печі, м;

h_2 – висота печі, м;

l_3 – довжина нагрівача в зоні нагрівання, м.

Підставивши числові значення у формули, отримаємо:

$$V_2 = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,8 - 1,44 = 1,8, \text{ м}^3;$$

тоді теплоємність корпусу згідно (3.14):

$$C_2 = 580 \cdot 1290 \cdot 1,8 = 1336320, \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}.$$

Використавши числові значення з таблиці 3.1 і підставивши їх у отримані вирази передавальних функцій з таблиці 3.2 окремих елементів, знайдемо:

$$W_1 = 0.0018 \cdot 14 = 0.0504;$$

$$W_3 = \frac{1}{2118.82 \cdot p};$$

$$W_4 = \frac{1}{1336320 \cdot p};$$

$$W_5 = 12.5 \cdot 9 = 112,5;$$

$$W_6 = 12.5 \cdot 6 = 75;$$

$$W_7 = 12.5 \cdot 6 = 75.$$

Передавальна функція нагрівача згідно виразу (3.8) буде:

$$W_{наг1} = \frac{1}{400 \cdot 64 \cdot p} = \frac{1}{25600 \cdot p}.$$

Визначення передавальної функції датчика температури, який представляє собою пристрій, що здійснює вимірювання температури всередині печі, реалізовано у вигляді термопар. На його виході формується сигнал у стандартизованому діапазоні 4–20 мА. Робочий інтервал вимірювань цього датчика охоплює температуру від 0 до 1000 °С. Отриманий від термопарі струмовий сигнал надходить до програмованого логічного контролера, де перед подальшою обробкою проходить через аналого-цифровий перетворювач. Перетворювач трансформує аналогове значення у цифровий код, що відповідає температурі T_k у межах того ж діапазону — від нуля до тисячі градусів Цельсія. Тому, якщо розглядати термопару та аналого-цифровий перетворювач як єдиний вимірювальний модуль, можна отримати загальну передавальну функцію цього комбінованого датчика.

$$W_{дат.тем.} = \frac{T_{к}}{T_{изм.макс}}$$

де $T_{к}$ – максимальна температура, що визначається контролером, °С;
 $T_{вим.макс}$ – максимальне значення температури, вимірюване датчиком, °С.

Підставляючи числові значення в (3.16), отримуємо конкретну передавальну функцію.

$$W_{дат.тем.} = \frac{1000}{1000} = 1.$$

Блок ШІМ реалізованого у складі контролера разом із симісторним перетворювачем як єдиний функціональний пристрій, який в подальшому позначатиметься як «Перетворювач». Широтно-імпульсна модуляція формує послідовність імпульсів, тривалість яких визначається величиною похибки, що надходить на вхід «Перетворювача». Сила струму, що підводиться до нагрівального елемента, змінюється пропорційно до скважності цих імпульсів. У такому випадку можна записати математичний вираз, який описує скважність імпульсу.

$$S = \frac{t_{имп}}{T}, \quad (3.17)$$

де $t_{имп}$ – тривалість імпульсу, с;

T – період імпульсу, с.

Сімісторний перетворювач перетворює тривалість імпульсу у струм нагрівача. Відповідно передавальна функція перетворювача буде мати вигляд:

$$W_{перет} = \frac{I_{н}}{T_{зад.макс}}, \quad (3.18)$$

де I_n – номінальний струм нагрівача, А;

$T_{зад.макс}$ – максимальне значення завдання температури.

Підставляючи значення номінального струму (див. таблицю 3.3) та діапазон завдання температури, отримуємо:

$$W_{перет} = \frac{35}{1000} = 0.035, \text{ A/}^\circ\text{C}.$$

Конкретне числове значення залежить від параметрів нагрівача.]

3.4. Програмна реалізація алгоритмів роботи пристроїв ЕЛТА 8/45

Програмну реалізацію алгоритмів функціонування обладнання електротермічної лінії доцільно показати на прикладі роботи клапана та широтно-імпульсного модулятора, логіка дії яких описана в розділі технічного пропозиції. Розроблення програми здійснюється мовою SCL, що є складовою програмного комплексу Simatic Step 7.

Приклад програмного блоку для управління клапаном (FB1)

```
// Block Parameters
```

```
VAR_INPUT
```

```
OPd:BOOL;// клапан відкрився (з пускача)
```

```
Acknow: BOOL; // квітування
```

```
To_OP:BOOL; // команда «відкрити» з верхнього алгоритму
```

```
Breake_List:BOOL; // сигнал виникнення аварії
```

```
END_VAR
```

```
VAR_IN_OUT
```

```
// I/O Parameters
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```

OPtoValve:BOOL; // відкрити клапан (команда на пускач)
Dont_OP:BOOL; // клапан не відкрився
END_VAR
VAR_TEMP
// Temporary Variables
cur_time:DATE_AND_TIME;
re_val:INT;
END_VAR
VAR
// Static Variables
ErNotCl:BOOL; // клапан не закритися
ErOp:BOOL // клапан відкрився по невідомій причині
Closed_Error:BOOL; // клапан закритий і аварійна ситуація
OPd_Er:BOOL; // клапан відкритий, але помилка
NormalOP:BOOL; // клапан відкритий і в нормі
NormalCL:BOOL; // клапан закритий в нормі
Cl_ing:BOOL; // клапан відкривається
Op_ing:BOOL; // клапан закривається
Cl_ing_ER:BOOL; // сигнал задання знімається через помилку
timer1: BOOL;//TIMER
timer1_start:DATE_AND_TIME;
interval:TIME;//INTERVAL
END_VAR
BEGIN
interval:=T#0s;
re_val:=READ_CLK(CDT :=cur_time);
interval:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
dt2:=timer1_start);
IF interval>T#5s THEN

```

```

timer1:=true;
END_IF;
IF NOT To_OP AND NOT OPd AND NOT Closed_Error AND NOT
OPd_ER THEN
  OPtoValve:=0;
  NormalCL:=1;
END_IF;
IF To_OP AND (NormalCL OR Closed_Error) THEN
  Op_ing:=1;
  NormalCL:=0;
  Closed_Error:=0;
  OPtoValve:=1;
END_IF;
IF OPtoValve AND OP_ing THEN
  timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
END_IF;
IF Op_ing AND OPd THEN
  NormalOP:=1;
  Op_ing:=0;
END_IF;
IF Op_ing AND NOT OPd AND timer1 THEN
  Cl_ing_ER:=1;
  Op_ing:=0;
  OPtoValve:=0;
  Dont_OP:=1;
END_IF;
IF NormalOP AND NOT To_OP THEN
  Cl_ing:=1;
  NormalOP:=0;

```

```

OPto_Valve:=0;
END_IF;
IF NOT OPtoValve AND Cl_ing THEN
timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
END_IF;
IF (Cl_ing AND OPd AND timer1) THEN
ErNotCl:=1;
Cl_ing:=0;
END_IF;
IF NormaCl AND OPd THEN
NormalCL:=0;
ErOp:=1;
END_IF;
IF ErOp OR ErNotCl THEN
OPd_Er:=1;
ErOP:=0;
ErNotCL:=0;
END_IF;
IF OPd_Er AND NOT OPd AND Acknow THEN
OPd_Er:=0;
END_IF;
IF (Cl_ing_ErR AND NOT OPd THEN
Closed_Error:=1;
Cl_ing:=0;
END_IF;
IF Closed_Error AND NOT Breake_List AND Acknow THEN
Closed_Error:=0;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

```

FUNCTION_BLOCK FB2
VAR_INPUT
TR_swithing_ON:BOOL;//трансформатор включений
Turn_ON:BOOL; // команда включити від алгоритму нагрівача
time1:S5TIME; // час імпульсу
END_VAR
VAR_IN_OUT
// I/O Parameters
END_VAR
VAR_OUTPUT
timer1:BOOL; // видати імпульс
timer2:BOOL //очікувати дозвіл на наступний імпульс
timer1_start:BOOL;// змінна запуску таймера 1
timer2_start:BOOL;// змінна запуску таймера 2
END_VAR
VAR_TEMP
// Temporary Variables
cur_time:DATE_AND_TIME;
re_val:INT;
END_VAR
VAR
// Static Variables
timer1_start:DATE_AND_TIME;
timer2_start:DATE_AND_TIME;// змінні дозволу роботи таймера
interval:TIME;
interval1:TIME; //стандартні змінні функцій таймера
END_VAR
BEGIN
END_IF;

```

```

interval:=T#0s;
re_val:=READ_CLK(CDT :=cur_time);
interval:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
dt2:=timer1_start);
IF interval<time1 THEN
timer1:=true;
intervall:=T#0s;
re_val:=READ_CLK(CDT :=cur_time);
intervall:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
dt2:=timer2_start);
IF interval<time1 THEN
timer2:=true;
END_IF;
IF TR_swithing_ON AND Turn_ON AND NOT timer2 THEN
timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
timer2_start:=cur_time; timer2:=false;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK
ORGANIZATION_BLOCK OB1
VAR_TEMP
// Reserved
Info: ARRAY[0..19] OF BYTE;
// Temporary Variables
END_VAR
// Instructions
FB1.DB1;
FB2.DB2;
END_ORGANIZATION_BLOCK

```

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі розроблено автоматизовану систему управління (АСУ) електротермічної лінії ЕЛТА 8/45, призначену для контролю процесу загартування металевих виробів у автомобільній промисловості.

У роботі проведено аналіз проблемної ситуації та технологічного процесу як об'єкта автоматизації, розроблено структуру АСУ та складено технічне завдання. Було досліджено теплові процеси, що відбуваються у печах електротермічної лінії.

У роботі також обрано принципи управління пристроями електротермічної лінії, контролю температури у печах та регулювання швидкостей конвеєрів. Визначено технічне та програмне забезпечення для реалізації цих задач. Здійснено синтез алгоритмів логічного управління пристроями лінії та реалізовано систему візуалізації технологічного процесу у SCADA WinCC 6.0. Результати розробки повністю відповідають вимогам технічного завдання.

Для виконання проєкту були використані такі програмні пакети: Microsoft Word, Microsoft Excel, AutoCAD 2004, MATLAB 7.03, Simatic STEP 7, SCADA WinCC 6.0. Для технічної реалізації застосовано обладнання компанії Siemens.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖРЕЛ

1. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.

2. SIMATIC STEP 7 V5.6 та інструментальні засоби проектування для SIMATIC S7-300/S7-400/WinAC Режим доступу:

<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:5e36fba3-0e3c-4305-ad87-5939fbfb170e/04-STEP7-V56.pdf>

3. Hans Berger. Automating with STEP 7 in STL and SCL. Programmable Controllers SIMATIC S7-300/400. 6th revised edition, Publicis Corporate Publishing. 2014 – 553 с.

4. . Невлюдов І.Ш. Технологія програмування промислових контролерів в інтегрованому середовищі CODESYS: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2019 . – 264 с.

5. ПУПЕНА О.М., ЕЛЬПЕРІН І.В. Контролери та їх програмне забезпечення. Курс лекцій для студ. напр. 6.50202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної та заочної форм навчання. Частина 3. – К.: НУХТ, 2011. – 48 с.

6. В.Ю.Кучерук, В.О.Поджаренко, П.І.Кулаков Програмування логічних контролерів Schneider Electric. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2001. - 134 с.

7. Бенько Т.Г.Мікроконтролери :Навчально – методичний посібник. – ІваноФранківськ, Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, 2023. – 151 с

8. Загальні методичні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого

«бакалаврського» і другого «магістерського» рівнів. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. – 89 с.

9. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «Магістр». Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / А.І. Сегін, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух / Під ред. Я.М. Николайчука – Тернопіль: ТНЕУ, 2020.– 40 с.

10. Електротехнічні пристрої систем автоматичного управління технологічними процесами: навч. посіб. посібник для студентів галузі знань 15 – «Автоматизація та приладобудування» спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»/В.П.Грудська, В.І.Чибеліс/КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 107 с.

11. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

12. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

13. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: Навчальний посібник для студентів. - Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2009. - 224 с.

14. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. –

Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

15. Оформлення конструкторської документації [Текст] : навч. посіб. / В. В. Ванін, А. В. Бліок, Г. О. Гнітецька. - 2-ге вид., випр. - К. : Каравела, 2003. - 160 с.

16. Задачин В. М. Моделювання систем : конспект лекцій / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Харків : Вид. ХНЕУ, 2010. – 268 с.

17. Дискретні системи автоматичного керування : конспект лекцій / укладачі : Г. В. Кулінченко, А. В. Павлов, П. В. Леонтъєв. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 64 с.

18. SIMENS. Промислові системи автоматизації SIMATIC Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic.html>

19. . SIMENS. SIMATIC WinCC Unified – The most cutting-edge system. Режим доступу: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/simatic-hmi/wincc-unified.html>

20. Harel D. Statechart: A VISUAL FORMALISM FOR COMPLEX SYSTEMS 1986. – 273 с.