

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ

Група СІ-22-1

Роман КИЦМАНЮК

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем
Кицманюк Роман Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи для виготовлення пластикових
пляшок методом видувного формування

(назва роботи)

Системна інженерія - Інтернет речей

(назва освітньої програми)

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Кицманюк Р. М.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Белей О.І.
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

доц. Заміховська О.Л.
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІТТС

Заміховська О.Л.

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Кицманюку Роману Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи для виготовлення
пластикових пляшок методом видувного формування

керівник роботи Белей О.І., доц. каф. ІТТС,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "07" квітня 2026 року №
164/7

2. Строк подання студентом роботи «7» червня 2026 р.

3. Вихідні дані: технологічні параметри процесу видувного формування,
термодинамічні характеристики об'єкта керування, технічні обмеження і вимоги до
системи автоматизації, програмні засоби розроблення та моделювання, промислові
мережі обміну даними.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити):

Загальні теоретичні відомості про розроблення автоматизованої системи для
виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування

Структурний аналіз автоматизованої системи для виготовлення пластикових
пляшок методом видувного формування

Розроблена автоматизована система для виготовлення пластикових пляшок
методом видувного формування

Висновки. Додатки.

Графічна частина: апаратна конфігурація системи, програмна реалізація циклограми
видуву, блок терморегулювання PID Compact, головний екран панелі оператора

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Белей О.І., доцент		
2	Белей О.І., доцент		
3	Белей О.І., доцент		

6. Дата видачі завдання « 01 » грудня 2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів за темою роботи	до 07.04	викон.
2	Загальні теоретичні відомості про процес видувного формування пластикових пляшок	до 07.04	викон.
3	Дослідження актуальності та практичної доцільності автоматизації процесу	до 07.04	викон.
4	Порівняльний аналіз існуючих аналогів систем керування	до 07.04	викон.
5	Структурний аналіз та обґрунтування апаратних засобів системи автоматизації	до 05.06	викон.
6	Опис програмного забезпечення, визначення вимог та конфігурація проекту контролера	до 05.06	викон.
7	Проектування та опис людино-машинного інтерфейсу (НМІ) оператора	до 05.06	викон.
8	Формування рекомендацій щодо впровадження розробленої системи	до 05.06	викон.
9	Оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів	до 05.06	викон.

Студент _____ Кицманюк Р.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Белей О. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота: 50 сторінок, 9 рисунків, 3 таблиці, 15 посилань на джерела, 1 додаток.

У бакалаврській роботі запропоновано розроблення автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення пластикових пляшок методом двостадійного видувного формування.

Впровадження такої автоматизованої системи дозволяє стабілізувати температурні режими нагріву преформ та точно синхронізувати роботу пневматичних механізмів, що суттєво знижує відсоток браку та енергоспоживання. Вона мінімізує вплив людського фактору, забезпечує високу точність ПД-регулювання та гарантує гнучкість при переналагодженні обладнання під різні формати тари.

Ключові слова: АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ВИДУВНЕ ФОРМУВАННЯ, ПЕТ-ТАРА, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ТІА PORTAL, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ЛЮДИНО-МАШИННИЙ ІНТЕРФЕЙС.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 50 pages, 9 figures, 3 tables, 15 references, 1 appendix.

This bachelor's thesis proposes the development of an automated control system for the technological process of manufacturing plastic bottles using the two-stage stretch blow molding method.

The implementation of such an automated system allows for the stabilization of preform heating temperatures and precise synchronization of pneumatic mechanisms, significantly reducing the defect rate and energy consumption. It minimizes human error, ensures high accuracy of PID control, and provides flexibility when reconfiguring equipment for different packaging formats.

Keywords: AUTOMATED SYSTEM, BLOW MOLDING, PET PACKAGING, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER, TIA PORTAL, PID CONTROLLER, HUMAN-MACHINE INTERFACE.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	с. 7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ.....	9
1.1 Актуальність автоматизації процесу видувного формування у сучасній промисловості.....	9
1.2 Порівняльний аналіз автоматизованих систем для виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування.....	13
2 СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ.....	19
2.1 Вибір та обґрунтування програмного забезпечення.....	19
2.2 Структурна схема системи автоматизації та вибір апаратних засобів.....	23
2.3 Вимоги до автоматизованої системи.....	26
3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ.....	30
3.1 Вихідні дані для проектування автоматизованої системи для виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування.....	30
3.2 Конфігурація проекту. Створення тегів, функцій, організаційних блоків.....	32
3.3 Проектування інтерфейсу автоматизованої системи.....	38
3.4 Рекомендації щодо впровадження розробленої системи.....	40
ВИСНОВКИ.....	42
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44
ДОДАТОК А. Сертифікат.....	46

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк..	№ документа	Підпис	Дата				
Розроб.		Кицманюк Р.М.			Розроблення автоматизованої системи для виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Белей О.І						
Н. Контр.		Возний А.В.				ІФНТУНГ СІ-22-І		
Затверд..		Заміховська О.Л.						

ВСТУП

Швидкий розвиток технологій пакування та підвищення вимог до якості полімерної тари вимагає постійного вдосконалення підходів до проектування промислового обладнання. Тому проектування автоматизованої системи з урахуванням термодинамічних і пневматичних атрибутів процесу є одним з найважливіших питань для забезпечення ефективного випуску продукції та для надання фахівцям з автоматизації даних для прийняття обґрунтованих рішень щодо параметрів машин видувного формування.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи для обчислення та стабілізації технологічних параметрів установок двостадійного видувного формування на основі сучасних інформаційних технологій та промислових контролерів.

Основними завданнями для виконання бакалаврської роботи є:

- дослідження літературних джерел щодо практичного застосування засобів автоматизації для визначення температурних і пневматичних характеристик машин видувного формування;
- порівняння сучасних систем керування і запропонованої системи;
- виклад теоретичних передумов для розробки автоматизованої системи;
- створення та презентація розробленої системи для керування технологічними параметрами процесу видувного формування ПЕТ-тари.

Об'єктом дослідження є створення автоматизованої системи для обчислення та регулювання технологічних параметрів проектування машин видувного формування, що значно зменшить час переналагодження та ймовірність помилок у порівнянні з ручним керуванням [1].

Галузь дослідження: процеси створення автоматизованої системи керування за допомогою сучасних апаратно-програмних технологій.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Методи дослідження: при проведенні дослідження використовувалося програмування в середовищі TIA Portal (мови LAD/SCL). Були застосовані обробка та аналіз даних, математичне моделювання у MATLAB/Simulink та візуалізація результатів. Все це сприяло безперебійному отриманню та представленню результатів дослідження.

Практична цінність роботи полягає в тому, що використаний теоретичний матеріал та створена автоматизована система для розрахунків і стабілізації параметрів видувного формування можуть бути впроваджені в навчальні курси кафедри.

Це система з відкритою архітектурою, тому вона призначена не тільки для впровадження у конкретних навчальних предметах, але й може використовуватися фахівцями, які працюють у сферах промислової автоматизації, машинобудування та пакувальних технологій.

Унікальність отриманої автоматизованої системи:

- застосування нових інформаційних технологій та промислових мереж;
- з урахуванням справжніх термодинамічних властивостей об'єкта у її структурі;
- надання рекомендацій щодо модернізації обладнання на основі висновків, зроблених з отриманих результатів;
- прикладний бік;
- сектори зайнятості;
- інтуїтивно зрозуміла та проста у використанні панель оператора;
- вільний доступ до програмного коду ПЛК.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ

1.1 Актуальність автоматизації процесу видувного формування у сучасній промисловості

Стрімкий розвиток харчової та хімічної промисловості в останні десятиліття призвів до значного зростання попиту на полімерну тару. Серед усіх видів пакування особливе місце посідають пляшки з поліетилентерефталату (ПЕТ), які завдяки своїм фізико-механічним властивостям - прозорості, легкості, ударостійкості та хімічній інертності - фактично стали стандартом для розливу води, напоїв, рослинних олій, а також побутової хімії.

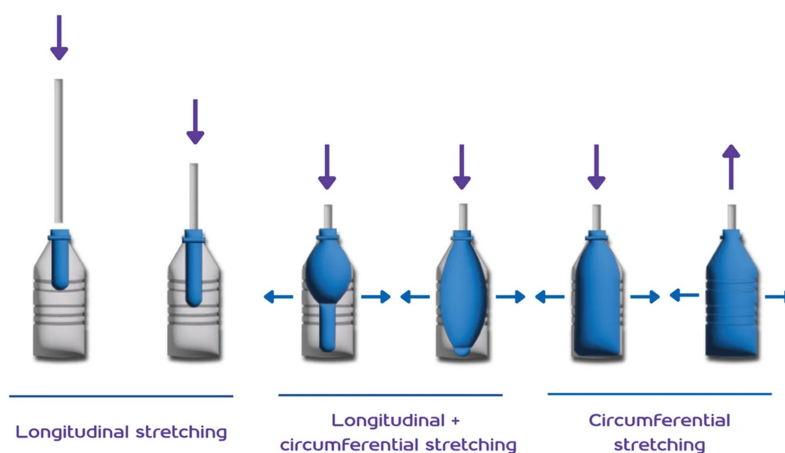


Рисунок 1.1 – Схема процесу розтягування та видування преформи (SBM) [3]

Основним промисловим методом виготовлення такої тари є двостадійне видувне формування з розтягуванням (Stretch Blow Molding – SBM).

Цей процес передбачає попереднє виготовлення преформ (заготовок) методом лиття під тиском та їх подальше перетворення на готову пляшку шляхом розігріву і роздування стисненим повітрям [1]. Детальний теоретичний опис автоматизованого процесу виготовлення пластикових пляшок та аналіз ключових етапів формування тари наведено у публікації автора [2].

Незважаючи на широку розповсюдженість технології, процес видувного формування залишається складним об'єктом керування з точки зору термодинаміки та пневматики. Якість кінцевого виробу критично залежить від стабільності десятків технологічних параметрів, які повинні підтримуватися у вузьких межах допуску. На багатьох вітчизняних підприємствах досі експлуатується обладнання з низьким рівнем автоматизації, де контроль параметрів здійснюється оператором вручну або за допомогою найпростіших релейних схем. Такий підхід у сучасних умовах стає економічно не вигідним та технічно небезпечним через низку факторів.

Першим і найважливішим фактором, що обумовлює актуальність автоматизації, є температурна чутливість матеріалу. Поліетилентерефталат має специфічний температурний діапазон переробки (орієнтовно 90-115 °C).

Якщо температура преформи перед видуванням буде нижчою за технологічну норму навіть на 2-3 °C, виникає ефект «холодного розтягування» (pearlscence), що призводить до мікротріщин та втрати прозорості. У випадку перегріву відбувається кристалізація матеріалу (помутніння) або неконтрольоване стоншення стінок, що робить пляшку непридатною для використання на лініях розливу під тиском [4].

Ручне регулювання потужності інфрачервоних нагрівачів (ТЕНів або ламп) не дозволяє компенсувати збурення, такі як коливання напруги в електромережі, зміна температури у виробничому цеху або нерівномірність товщини стінки преформи з різних партій. Впровадження автоматизованої системи керування (АСК) на базі ПЛК дозволяє реалізувати ПІД-закони

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання, що забезпечує підтримку температури з високою точністю та динамічну реакцію на зовнішні збурення [5].

Другим фактором є енергоефективність. Процес розігріву преформ є найбільш енергоємною складовою виробництва, споживаючи до 70-80% загальної електричної потужності установки. Відсутність інтелектуального керування нагрівальними елементами призводить до надлишкового споживання енергії під час простоїв, запусків або зупинок лінії. Сучасні засоби автоматизації дозволяють реалізувати алгоритми оптимізації енергоспоживання, наприклад, автоматичне зниження напруги на лампах при відсутності преформи в зоні нагріву або плавне регулювання потужності вентиляторів охолодження. Третім аспектом є швидкість та точність виконання механічних операцій. Цикл виготовлення однієї пляшки на сучасному обладнанні може складати менше 2 секунд. За цей час система повинна виконати точне позиціонування штока розтягування, подати повітря попереднього видуву (низький тиск) для формування «бульбашки», а потім - повітря основного видуву (високий тиск, до 40 бар) для остаточного формування стінок. Синхронізація роботи пневмоклапанів та сервоприводів на таких швидкостях неможлива без використання швидкодіючих контролерів. Будь-яка розсинхронізація призводить до випуску бракованої партії продукції. Наочно вплив відхилень основних технологічних параметрів на якість готової продукції наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив відхилень технологічних параметрів процесу видовного формування на якість готової продукції [1]

№	Технологічний параметр	Можливе відхилення	Наслідок / Дефект готового виробу
1	2	3	4

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1	2	3	4
1	Температура розігріву преформи	Нижче норми (<90°C)	«Холодне побіління» (Pearlescence). Мікротріщини в структурі пластику, втрата прозорості (перламутровий блиск), нерівномірний розподіл матеріалу.
		Вище норми (>115-120°C)	Термічна кристалізація (Haze). Помутніння пляшки (молочний колір). Стікання матеріалу вниз, стоншення стінок у верхній частині
2	Тиск попереднього видуву (Pre-blow)	Занадто низький або пізній старт	Потовщення дна. Матеріал не встигає роздутися і скупчується на штоку, стінки пляшки стають занадто тонкими.
		Занадто високий або ранній старт	Розрив преформи. Пляшка роздувається швидше, ніж шток встигає її розтягнути, що призводить до застрягання в горловині або розриву бічних стінок.
3	Тиск основного видуву (High Pressure)	Нижче норми (<35-38 бар)	Недолив форми. Нечіткий рельєф (не пропечатуються ніжки, логотип, ребра жорсткості), зменшений об'єм пляшки, м'якість тари.
4	Швидкість руху штока розтягування	Незбіг швидкості видуву	Ексцентриситет (Off-center). Зміщення центру ваги пляшки, криве горло, нерівномірна товщина стінок по колу (один бік товстіший за інший).
5	Час охолодження у прес-формі	Менше технологічної норми	Термічна усадка. Деформація пляшки після виймання з форми, зміна геометричних розмірів (пляшку "веде"), втрата стійкості.
6	Температура прес-форми	Перегрів форми (>60°C)	Прилипання. Поверхня пляшки стає матовою, збільшується цикл виробництва, складність виймання виробу.

Четвертим фактором є необхідність гнучкості виробництва. Сучасний ринок напоїв характеризується широким асортиментом та частою зміною дизайну тари. Перехід з одного формату пляшки (наприклад, 0.5 л) на інший (1.5 л) на обладнанні з ручним керуванням вимагає тривалого механічного налаштування та підбору параметрів нагріву «на око», що супроводжується значними втратами часу та сировини на приладку. АСК дозволяє зберігати

технологічні карти (рецепти) у пам'яті контролера, що зводить час переналагодження до мінімуму.

Таким чином, розроблення сучасної автоматизованої системи керування установкою для видувного формування є актуальним завданням, вирішення якого дозволяє підвищити стабільність технологічного процесу, знизити собівартість продукції за рахунок зменшення браку та енергоспоживання, а також забезпечити інтеграцію виробничого обладнання в інформаційну систему підприємства [6].

1.2 Порівняльний аналіз автоматизованих систем для виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування

Сучасний ринок промислового обладнання для виробництва полімерної тари характеризується надзвичайною різноманітністю технічних рішень. Діапазон пропозицій варіюється від найпростіших напівавтоматичних верстатів з ручним завантаженням преформ до повністю роботизованих ліній, здатних випускати до 80 000 пляшок на годину без участі людини. У такій ситуації вибір оптимальної системи керування стає критично важливим завданням, оскільки саме вона визначає надійність роботи, якість продукції та, що не менш важливо, вартість експлуатації обладнання.

Для обґрунтування доцільності розробки власної автоматизованої системи керування (АСК) в рамках даної бакалаврської роботи необхідно провести детальний аналіз існуючих аналогів, класифікувати їх за рівнем технологічної досконалості та виявити їхні переваги і недоліки [1].

На основі аналізу технічної документації та досвіду експлуатації подібного обладнання, всі існуючі системи керування процесом видувного формування можна розділити на три основні групи:

1. системи на базі жорсткої (релейно-контакторної) логіки;
2. спеціалізовані високопродуктивні комплекси закритого типу (ОЕМ-рішення);

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. системи на базі універсальних програмованих логічних контролерів (ПЛК) з відкритою архітектурою.

Системи на базі жорсткої логіки (Релейно-контакторні схеми): цей тип систем керування є історично найстарішим, але досі широко представлений на ринку, особливо в сегменті вживаного обладнання (випуску 90-х - початку 2000-х років) або бюджетних напіваавтоматів азіатського виробництва.

Технічна реалізація таких систем базується на апаратному з'єднанні дискретних електричних компонентів: електромагнітних реле, таймерів (реле часу), контакторів та кінцевих вимикачів. Алгоритм роботи машини («циклограма») задається фізичною схемою підключення дротів [5].

Переваги: основними перевагами таких систем є низька початкова вартість компонентів та простота обслуговування силової частини. Для ремонту такої системи не потрібен висококваліфікований програміст - достатньо електрика, який вміє читати принципові схеми.

Недоліки:

– відсутність гнучкості: будь-яка зміна технологічного процесу (наприклад, зміна часу витримки під тиском для нової, більш складної форми пляшки) вимагає механічного налаштування таймерів або навіть фізичної перекомутації схеми;

– низька надійність: велика кількість механічних контактів в умовах постійної вібрації (робота компресорів, змикання прес-форми) призводить до їх окислення, іскріння та вигорання, що спричиняє часті простої;

– відсутність точного терморегулювання: це найслабше місце. Нагрів преформ зазвичай регулюється автотрансформаторами або найпростішими термостатами, які працюють за принципом "вкл/викл". Це призводить до значних коливань температури (гістерезису) і, як наслідок, до високого відсотка браку;

– інформаційна "сліпота": оператор не бачить реальних значень тиску чи температури на екрані, оскільки екрану (НМІ) просто немає.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 – Шафа керування застарілого зразка на базі релейної логіки [7]

Високопродуктивні комплекси закритого типу (ОЕМ-рішення): до цієї групи відносяться системи керування від світових лідерів галузі пакування, таких як Krones, Sidel, SIPA, Tetra Pak. Це складні програмно-апаратні комплекси, що базуються на потужних промислових комп'ютерах (IPC) або спеціалізованих контролерах (наприклад, B&R Automation, PacDrive).

Переваги: такі системи забезпечують найвищу продуктивність та якість. Вони оснащені розвиненими засобами самодіагностики, здатні автоматично відбраковувати дефектні преформи до моменту видування, контролюють товщину стінок у реальному часі та інтегруються в загальну інформаційну мережу підприємства (ERP/MES).

Недоліки:

– закрита архітектура: виробник не надає доступу до вихідного коду програми. Це означає повну залежність від сервісу виробника (Vendor Lock-in);

– висока вартість обслуговування: якщо виходить з ладу специфічний контролер або панель оператора, їх неможливо замінити на аналог - потрібно купувати оригінальну запчастину, яка може коштувати тисячі євро і мати тривалий термін доставки;

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

– складність модернізації: додавання нових функцій (наприклад, встановлення додаткового датчика контролю етикетки) можливе лише за участі офіційних представників розробника, що є дорого і довго.

Проектована система з відкритою архітектурою: саме цей підхід пропонується в даній роботі як оптимальний варіант модернізації або створення нової установки. Він передбачає використання серійних промислових контролерів (у цьому випадку - Siemens SIMATIC S7-1200), які є світовим стандартом автоматизації [8].

Переваги:

– відкритість: програмний код, розроблений у середовищі TIA Portal, є власністю підприємства. Інженери можуть самостійно вносити зміни, налаштовувати ПІД-регулятори, змінювати рецепти;

– масштабованість: модульна структура S7-1200 дозволяє легко нарощувати систему: додавати модулі вводу-виводу, комунікаційні CPU;

– доступність компонентів: у разі виходу з ладу будь-якого модуля, його можна придбати у локальних дистриб'юторів, що мінімізує час простою лінії;

– сучасні комунікації: підтримка промислових протоколів дозволяє легко підключити панель оператора, частотні перетворювачі та передавати дані на верхній рівень.

Для порівняння характеристик та функціональних можливостей розглянутих типів систем було складено порівняльну таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз технічних характеристик та функціональних можливостей систем керування установками видувного формування [5, 8]

№	Характеристики та функціональні можливості	Релейно-контакторні системи (Аналог 1 - Минуле покоління)	Промислові комплекси OEM (Krones, Sidel - Аналог 2)	Розроблена система (На базі Siemens S7-1200)
1	2	3	4	5

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1	2	3	4	5
1	Гнучкість зміни алгоритмів (Можливість переналагодження без зміни монтажу)	- (Неможливо, потребує перемонтажу)	+/- (Обмежено виробником, закритий код)	+ (Повна гнучкість, відкритий код)
2	Точність регулювання температури (Реалізація ПІД-закону)	- (Позиційне регулювання, гістерезис $>5^{\circ}\text{C}$)	+ (Висока точність, $<1^{\circ}\text{C}$)	+ (Висока точність, $<1^{\circ}\text{C}$)
3	Вартість впровадження	+ (Низька)	- (Дуже висока)	+ (Середня, оптимальна)
4	Наявність людино-машинного інтерфейсу (HMI)	- (Тільки світлові індикатори)	+ (Повноцінна SCADA)	+ (Сенсорна панель КТР)
5	Архівація технологічних даних (Тренди, звіти)	-	+	+
6	Діагностика аварійних ситуацій (Повідомлення про причину зупинки)	-	+	+
7	Рем. придатність та доступність запчастин	+ (Стандартні реле)	- (Специфічні компоненти під замовлення)	+ (Стандартні промислові компоненти)
8	Підтримка промислових мереж (PROFINET, IoT)	-	+	+

Як видно з таблиці 1.2, розроблена система поєднує в собі найкращі риси обох підходів: вона забезпечує технологічну функціональність рівня провідних світових брендів (точність, візуалізація, комунікації), але при цьому залишається доступною за ціною та відкритою для обслуговування, як прості релейні системи.

Важливим аспектом є також програмне забезпечення. Більшість OEM-виробників використовують власні пропрієтарні середовища розробки, навчання роботі з якими коштує дорого. Натомість, використання універсального середовища TIA Portal (Totally Integrated Automation) від Siemens дозволяє уніфікувати процес розробки. TIA Portal дає можливість в одному проекті налаштувати логіку контролера, інтерфейс панелі оператора та параметри приводів, що значно скорочує час на налагодження.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що для задачі модернізації установки видувного формування або створення нової машини середньої продуктивності, найбільш доцільним є використання архітектури на базі сучасного ПЛК з модульною структурою. Це рішення дозволить відмовитися від ненадійної релейної логіки, забезпечити необхідну точність термостабілізації преформ та надати оператору зручний інтерфейс для керування процесом, уникаючи при цьому надмірних капітальних витрат, характерних для рішень преміум-сегменту.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування програмного забезпечення

Перехід від концептуальної ідеї автоматизації до її практичної реалізації неможливий без вибору відповідного інструментарію. Сучасні системи керування технологічними процесами (АСК ТП) відрізняються тим, що основна частина їхнього функціоналу, логіки роботи та захисних блокувань реалізується не на апаратному рівні (як це було в релейних схемах), а на програмному [5]. Відповідно, вибір середовища розроблення безпосередньо впливає на швидкість проектування, надійність кінцевого коду, зручність подальшого обслуговування системи та можливість її модернізації.

Для об'єкта дослідження – установки видувного формування ПЕТ-тари – до програмного забезпечення висувається низка специфічних вимог. По-перше, середовище має підтримувати розробку алгоритмів жорсткого реального часу (Hard Real-Time). Процес видування однієї пляшки триває лічені секунди, і затримка сигналу на відкриття пневматичного клапана навіть на 10-20 мс. може призвести до дефекту (наприклад, розриву преформи або нерівномірного розподілу товщини стінки). По-друге, програмний пакет повинен мати надійні бібліотеки для реалізації замкнених контурів регулювання, оскільки прецизійна підтримка температури в зонах нагріву є критичною умовою [6]. По-третє, необхідно забезпечити зручний інтерфейс для оператора (НМІ), що вимагає інтеграції логіки контролера з графічними панелями.

З огляду на ці вимоги та технічне завдання, основними інструментами для реалізації проекту було обрано два програмні комплекси: MATLAB/Simulink (для етапу математичного моделювання та аналізу) та TIA Portal (як основне середовище для розроблення прикладного програмного

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення контролера та панелі оператора). Розглянемо роль кожного з них детальніше.

Використання MATLAB/Simulink на етапі попереднього аналізу: програмний комплекс MATLAB від компанії MathWorks є визнаним світовим стандартом у галузі математичного моделювання та синтезу систем автоматичного керування. У контексті даної задачі, процес нагріву ПЕТ-преформи інфрачервоними лампами є складним термодинамічним об'єктом. Він характеризується значною інерційністю, наявністю чистого запізнення та нелінійністю (оскільки теплообмін відбувається як за рахунок конвекції, так і за рахунок випромінювання).

Спроба налаштувати ПД-регулятор температури безпосередньо на реальному обладнанні методом «спроб і помилок» (наприклад, методом параметричної оптимізації Зіглера-Нікольса на працюючій печі) є ресурсозатратною та може призвести до псування великої кількості сировини. Саме тут доцільно використовувати MATLAB.

За допомогою пакету Simulink можна побудувати структурну схему теплового об'єкта (у вигляді передавальних функцій), подати на неї віртуальний одиничний ступінчастий вплив і отримати криву розгону. Далі, використовуючи вбудовані інструменти налаштування (наприклад, PID Tuner), можна теоретично розрахувати оптимальні значення пропорційного, інтегрального та диференціального коефіцієнтів. Ці розраховані значення згодом будуть використані як базові (стартові) уставки для реального промислового контролера.

Проте, варто зазначити, що використання MATLAB для безпосереднього керування видувною машиною в промислових умовах є недоцільним. Незважаючи на наявність модулів кодогенерації (Simulink Coder), архітектура персональних комп'ютерів на базі універсальних операційних систем (Windows) не гарантує виконання задач у жорсткому реальному часі. Тому MATLAB залишається потужним, але виключно допоміжним інструментом.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Totally Integrated Automation (TIA Portal) як основне середовище розроблення: враховуючи те, що апаратною базою проекрованої системи був обраний програмований логічний контролер сімейства Siemens SIMATIC S7-1200 (детальне обґрунтування якого наведено в наступному підрозділі), безальтернативним та найбільш ефективним рішенням для розробки програмного забезпечення є використання платформи TIA Portal (Totally Integrated Automation).

TIA Portal – це не просто компілятор коду, а комплексна інженерна екосистема, розроблена компанією Siemens [8]. Її головна концепція полягає у створенні єдиного робочого простору для всіх етапів автоматизації. До складу пакету входять декілька ключових підсистем:

STEP 7 Basic / Professional – середовище для конфігурування апаратної частини (Hardware Configuration) та безпосереднього написання логіки контролера стандартними мовами програмування стандарту IEC 61131-3 (LAD, FBD, SCL).

WinCC – інструмент для створення людино-машинного інтерфейсу (HMI), екранів панелей оператора та систем SCADA.

Вибір TIA Portal для розроблення системи керування видувним формуванням обґрунтовується низкою вагомих технічних переваг:

- єдина база даних тегів (Unified Tag Database): у класичних системах автоматизації розробнику доводиться двічі створювати список змінних: спочатку в програмі контролера, а потім – у програмі для панелі оператора, постійно слідкуючи за відповідністю мережевих адрес. У TIA Portal змінна (наприклад, Temperature_Zone_1), створена в логіці ПЛК, миттєво стає доступною для використання в графічному інтерфейсі WinCC. Це не лише кардинально прискорює процес розроблення, але й виключає людський фактор при адресації;

- наявність вбудованих технологічних об'єктів (Technology Objects): для системи критично важливим є точне регулювання температури

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інфрачервоних ламп. TIA Portal містить інтегрований програмний блок PID_Compact[8]. Цей блок не просто реалізує ПІД-закон регулювання, але й має вбудовану функцію автоналаштування (Pre-tuning та Fine-tuning). Під час першого запуску печі контролер самостійно подає тестові сигнали, аналізує реакцію об'єкта і підбирає коефіцієнти для досягнення мінімального перерегулювання. Для процесу SBM, де перегрів преформи веде до кристалізації ПЕТ, ця функція є незамінною;

– потужні засоби діагностики та трасування (Trace): враховуючи високу швидкість роботи пневматичної системи при розтягуванні та видуванні (близько 1.5–2 секунд на весь цикл), звичайного візуального спостереження за станом датчиків недостатньо. Інструмент Trace у TIA Portal працює як програмний багатоканальний осцилограф. Він дозволяє записувати зміну стану пневматичних клапанів, датчиків тиску та положення штока безпосередньо в циклі ПЛК (з точністю до мілісекунд), що дає змогу точно відкалібрувати циклограму роботи машини;

– симуляція без наявності "заліза" (PLCSIM): важливим аспектом проектування є можливість перевірки коду до його завантаження в реальну машину. TIA Portal включає симулятор S7-PLCSIM, який дозволяє повністю зімітувати роботу контролера та панелі оператора на екрані комп'ютера. Це дає змогу виявити логічні помилки в алгоритмах блокувань (наприклад, спробу подати високий тиск видуву до того, як закриється прес-форма) ще на етапі написання диплому, гарантуючи безпеку майбутньої установки.

Підсумовуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що архітектура проектованої системи вимагає гібридного підходу до використання програмного забезпечення. MATLAB/Simulink розглядається як інструмент для теоретичного розрахунку параметрів системи, тоді як TIA Portal від Siemens обирається як основне інтегроване середовище для повноцінної розробки, налагодження та візуалізації автоматизованої системи керування.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Структурна схема системи автоматизації та вибір апаратних засобів

Розроблення будь-якої автоматизованої системи керування технологічним процесом базується на побудові її структурної схеми. Цей етап є фундаментальним, оскільки він визначає загальну архітектуру системи, взаємодію між її основними вузлами (рівень датчиків, рівень управління, рівень людино-машинного інтерфейсу) та протоколи передачі даних. У випадку установки для видувного формування ПЕТ-пляшок, структурна схема повинна відображати жорстку інтеграцію теплових, пневматичних та механічних підсистем під єдиним централізованим керуванням.

Основою сучасної структурної схеми є рівень контролера. Як було зазначено в попередніх розділах, використання застарілих релейно-контакторних схем або мікроконтролерних збірок аматорського рівня є неприпустимим для промислового обладнання через низьку надійність в умовах вібрацій (які неминучі при роботі пневматики високого тиску до 40 бар) та електромагнітних завад від нагрівальних елементів. Тому безальтернативним рішенням є використання промислового програмованого логічного контролера (ПЛК) [6].

Обґрунтування вибору контролера сімейства Siemens SIMATIC S7-1200: на сучасному ринку засобів промислової автоматизації представлено широкий спектр ПЛК від провідних світових виробників (Siemens, Allen-Bradley, Schneider Electric, Mitsubishi). Проте, враховуючи вимоги до інтеграції програмного забезпечення в середовищі TIA Portal (обґрунтовані в п. 2.1), логічним кроком є вибір апаратної бази від компанії Siemens.

Для вирішення задачі автоматизації процесу SBM (Stretch Blow Molding) розглядалися три потенційні лінійки контролерів Siemens:

1. логічні модулі LOGO! 8: це найпростіші та найдешевші реле. Проте вони мають суттєві обмеження: низька швидкодія циклу програми, обмежена кількість таймерів, відсутність повноцінної підтримки складних

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

ПІД-алгоритмів із ШІМ-регулюванням для великої кількості зон нагріву, а також обмежені можливості розширення модулями вводу-виводу. Для швидкоплинного процесу видування LOGO! не підходить;

2. контролери серії SIMATIC S7-1500: це флагманська лінійка для складних, високопродуктивних машин (наприклад, роторних автоматів продуктивністю понад 20 000 пляшок на годину). Вони володіють надвисокою швидкодією (цикл обробки інструкцій вимірюється наносекундами) та розширеними функціями Motion Control. Однак для лінійної видувної машини середньої або малої продуктивності використання S7-1500 є економічно недоцільним через високу вартість процесорного модуля та периферії. Це призвело б до невиправданого подорожчання всього проекту модернізації;

3. контролери серії SIMATIC S7-1200: це так званий "базовий" рівень контролерів (Basic Controllers), який є "золотою серединою". Вони поєднують у собі компактність, достатню обчислювальну потужність, наявність вбудованих швидкісних входів/виходів та прийнятну ціну [8].

Остаточний вибір зроблено на користь центрального процесора CPU 1214C DC/DC/DC (або його аналогів у лінійці S7-1200).

Вибір саме цієї модифікації (DC/DC/DC – живлення 24В постійного струму, транзисторні входи, транзисторні виходи) зумовлений технологічною необхідністю. Транзисторні виходи (на відміну від релейних) не мають механічного зносу і здатні працювати на високих частотах перемикання. Це критично важливо для керування твердотільними реле (SSR), які комутують інфрачервоні лампи печі нагріву преформ за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Релейний вихід ПЛК при такій частоті роботи вийшов би з ладу за кілька днів [5].

Крім того, CPU 1214C має "на борту" інтерфейс PROFINET, що дозволяє без додаткових комунікаційних модулів підключити сенсорну панель оператора (HMI) та з'єднати контролер з інженерною станцією для завантаження програми.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір та обґрунтування периферійних модулів (вводу-виводу): незважаючи на те, що обраний контролер має вбудовані канали (14 дискретних входів та 10 дискретних виходів), для повноцінного керування видувною машиною цього недостатньо. Структурна схема передбачає розширення системи за рахунок підключення додаткових сигнальних модулів (SM - Signal Modules).

Загальна кількість точок вводу-виводу (I/O) визначається аналізом технологічного циклу:

– дискретні входи (DI): призначені для збору сигналів про стан механізмів. До них підключаються: індуктивні та оптичні кінцеві вимикачі (контроль закритого/відкритого положення прес-форми), герконові датчики на пневмоциліндрах (контроль крайніх положень штока розтягування), оптичні бар'єри (контроль наявності преформи на вході та готової пляшки на виході), кнопки пульта керування (Аварійна зупинка, Пуск, Пауза);

– дискретні виходи (DQ): відповідають за виконавчі механізми. До них підключаються котушки електропневматичних клапанів (подача повітря низького тиску для попереднього видуву, повітря високого тиску для формування рельєфу дна та стінок, клапани скидання тиску (Exhaust)), а також контактори двигунів конвеєра та вентиляторів охолодження шийок преформ;

– аналогові входи (AI): це найважливіша частина для забезпечення стабільності якості тари. До аналогових модулів (наприклад, SM 1231 TC) підключаються термопари або термоопори (PT100), які контролюють фактичну температуру в кожній зоні інфрачервоної печі. Також необхідні аналогові сигнали (стандартні 4-20 мА або 0-10 В) від датчиків тиску магістралі видуву, оскільки падіння тиску нижче 35 бар є аварійною ситуацією, що призводить до недоливу форми (відсутності чіткого рельєфу на пляшці).

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

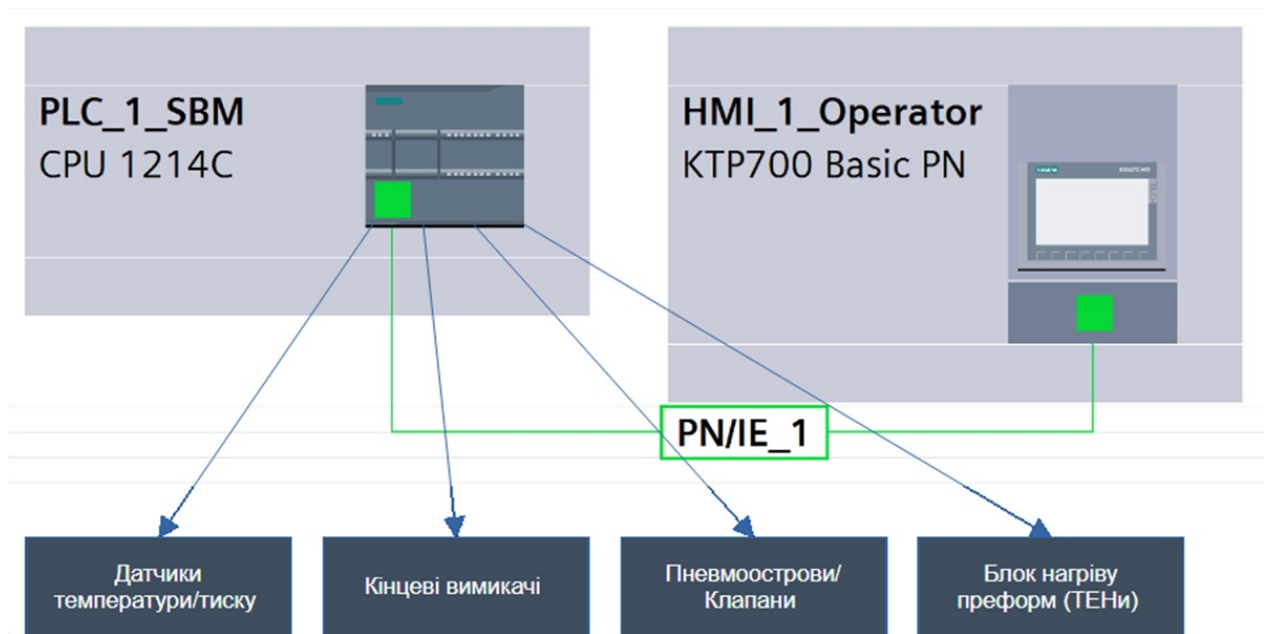


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизованої системи керування установкою видувного формування (на базі ПЛК Siemens S7-1200) (розроблено автором)

Формування структурної схеми на базі модульної архітектури S7-1200 забезпечує високий рівень надійності та гнучкості. У разі необхідності модернізації установки (наприклад, збільшення кількості зон нагріву печі для видування довших преформ під пляшки 2.0 л), система не потребуватиме заміни процесора – достатньо буде лише встановити на DIN-рейку додатковий модуль аналогового вводу-виводу та змінити апаратну конфігурацію в середовищі TIA Portal.

Таким чином, розроблена структурна схема повністю задовольняє вимоги до швидкодії та точності процесу двостадійного видувного формування ПЕТ-тари.

2.3 Вимоги до автоматизованої системи

На основі проведеного аналізу технологічного процесу двостадійного видувного формування (SBM) та обґрунтування структурної схеми, логічним

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

завершенням етапу проектування є формування чіткого переліку технічних вимог до створюваної автоматизованої системи керування (АСК). Ці вимоги фактично виконують роль внутрішнього технічного завдання (ТЗ) і є відправною точкою для безпосередньої конфігурації апаратних засобів та написання програмного коду в середовищі TIA Portal [5].

Вимоги до розроблюваної системи доцільно розділити на кілька ключових категорій: загальносистемні, апаратні, програмні та експлуатаційні.

Загальносистемні вимоги:

– модульність та масштабованість: архітектура системи повинна дозволяти легке розширення кількості каналів керування (наприклад, у разі додавання нових зон нагріву печі або встановлення додаткових датчиків контролю якості) без повної заміни центрального процесора;

– жорсткий реальний час (Hard Real-Time): система повинна гарантувати детермінований час реакції на зміну станів датчиків. Враховуючи, що цикл видування однієї пляшки становить 1.5-2 секунди, затримка в обробці сигналів керування пневматичними клапанами не повинна перевищувати 10-20 мс, щоб уникнути дефектів (ексцентриситет, розрив преформи);

– надійність та відмовостійкість: АСК повинна коректно обробляти аварійні ситуації (наприклад, падіння тиску в магістралі, перегрів печі, заклинювання прес-форми) шляхом миттєвого переведення установки в безпечний стан (блокування подачі високого тиску та зупинка конвеєра).

Вимоги до апаратного забезпечення: згідно з результатами структурного аналізу (п. 2.2), апаратна база повинна будуватися на основі сучасних промислових контролерів[6]. До неї висуваються такі специфікації:

– центральний контролер: Siemens SIMATIC S7-1200 (переважно модифікація CPU 1214C DC/DC/DC). Використання транзисторних виходів (DC) є обов'язковою вимогою для реалізації високочастотного широтно-імпульсного керування (ШІМ) твердотільними реле інфрачервоних ламп;

– модулі аналогового вводу (Analog Inputs – AI): необхідна наявність модулів (наприклад, SM 1231 TC або SM 1231 RTD) для підключення

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

термопар або термоопорів (PT100) з метою зчитування фактичної температури з кожної зони нагріву. Також потрібні канали із вхідним сигналом 4–20 мА для підключення промислових датчиків тиску (для контролю ліній попереднього та основного видуву);

– модулі дискретного вводу-виводу (DI/DQ): система повинна мати достатню кількість транзисторних виходів для керування електромагнітними котушками пневморозподільників (рух штока, закриття/відкриття форми). Дискретні входи повинні приймати сигнали 24В DC від оптичних бар'єрів, індуктивних та магнітних кінцевих вимикачів циліндрів;

– людино-машинний інтерфейс (HMI): панель оператора (наприклад, Siemens SIMATIC Basic Panel KTP700) із сенсорним екраном діагоналлю не менше 7 дюймів та підтримкою інтерфейсу PROFINET для зв'язку з ПЛК.

Вимоги до програмного забезпечення:

– середовище розроблення: проект має бути повністю реалізований в інтегрованому середовищі Siemens TIA Portal (STEP 7 для логіки та WinCC для візуалізації) [8];

– алгоритми терморегулювання: для кожної зони печі нагріву повинен бути реалізований незалежний замкнений контур регулювання на базі алгоритму ПІД-регулятора (із використанням технологічного об'єкта PID_Compact). Програмне забезпечення повинно підтримувати функцію автоналаштування коефіцієнтів;

– рецептурне керування: програма панелі оператора повинна містити базу даних "рецептів" (наборів уставок). Це вимагається для того, щоб при переході з виробництва пляшки об'ємом 0.5 л на 1.5 л оператор міг одним натисканням кнопки завантажити нові значення температур для всіх зон та нові часові затримки для таймерів видуву;

– діагностика та архівування: НМІ повинна виводити графічні тренди (графіки) зміни температури в реальному часі та вести журнал аварійних повідомлень (Alarms) із фіксацією точного часу виникнення несправності.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Метрологічні та технологічні вимоги:

- точність підтримки температури нагріву преформ у стаціонарному режимі повинна становити не гірше ± 1 °С від заданої уставки;
- діапазон вимірювання тиску в системі основного виду ву має охоплювати значення від 0 до 40 бар із похибкою не більше 0.5 бар.

Виконання перелічених вище вимог гарантуватиме створення сучасної, гнучкої та енергоефективної системи керування. Сформований перелік є базисом для наступного етапу – безпосереднього проектування системи в програмному середовищі, визначення конфігурації мережі та розробки алгоритмів роботи організаційних блоків контролера.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАСТИКОВИХ ПЛЯШОК МЕТОДОМ ВИДУВНОГО ФОРМУВАННЯ

3.1 Вихідні дані для проектування автоматизованої системи для виготворення пластикових пляшок методом видувного формування

Будь-яке проектування починається з базових цифр. Щоб програмований логічний контролер міг адекватно керувати видувною машиною, йому потрібні чіткі технологічні рамки. Логіку роботи програми формується на основі аналізу виробничого процесу стандартної ПЕТ-тари об'ємом 1.0 л.

Процес двостадійного видувного формування жорстко прив'язаний до таймінгів та температурних режимів. Навіть мінімальні відхилення призводять до деформації матеріалу. Зведені технологічні параметри, які слугуватимуть уставками для програмних блоків ПЛК, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Базові технологічні параметри
процесу видувного формування (формат 1.0 л)

№	Найменування параметра	Робоче значення	Допустиме відхилення
1	Температура нагріву преформи (зона тіла)	105 °C	±1 °C
2	Температура нагріву преформи (зона горловини)	95 °C	±1 °C
3	Тиск повітря попереднього видуву (Pre-blow)	8 бар	±0.5 бар
4	Тиск повітря основного видуву (High pressure)	38 бар	±1.0 бар
5	Затримка подачі попереднього видуву після опускання штока	50 мс	Не допускається
6	Час витримки під високим тиском (стадія охолодження)	1.2 с	±0.1 с

Окремої уваги заслуговує підсистема нагріву. Це найскладніший контур регулювання у всій установці. Не можна керувати інфрачервоними лампами просто вмикаючи та вимикаючи їх за допомогою релейного закону. Інфрачервона піч має значну теплову інерцію та просторове запізнення (час від моменту подачі напруги на лампи до моменту фіксації зміни температури пірометром).

Для математичного підтвердження цієї тези було проведено симуляцію зони нагріву в середовищі MATLAB/Simulink [9]. Тепловий об'єкт моделювався як аперіодична ланка першого порядку з транспортним запізненням. Передавальна функція об'єкта має вигляд:

$$W(s) = \frac{1.2}{45s + 1} e^{-2s} \quad (3.1)$$

де 1.2 – коефіцієнт підсилення об'єкта; 45 – стала часу, що характеризує інерційність нагріву маси преформи (в секундах); 2 – транспортне запізнення реакції датчика (у секундах).

Реакція змодельованого об'єкта на одиничний ступінчастий вплив (імітація подачі 100% потужності на ТЕНи) наведена на рис. 3.1.

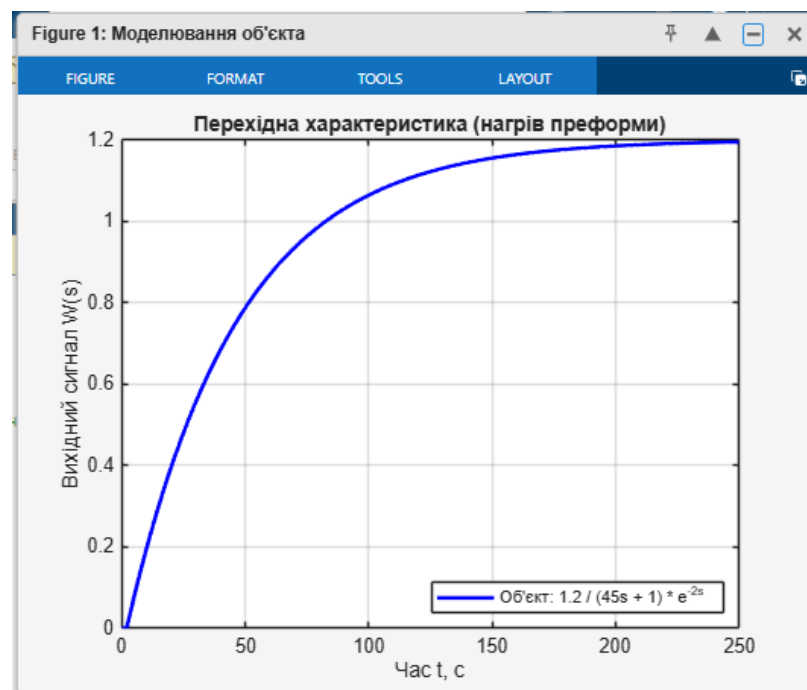


Рисунок 3.1 – Крива розгону теплового об'єкта (зони нагріву преформ) у середовищі MATLAB

Отримана крива розгону (рис. 3.1) наочно демонструє класичну експоненційну залежність із наявною "мертвою зоною" на початку графіка. Наявність такого запізнення робить використання простих компараторів неефективним: система буде постійно перегрівати або недогрівати пластик (виникнуть автоколивання).

Отже, результати математичного моделювання доводять необхідність використання ПІД-закону керування із застосуванням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) на транзисторних виходах контролера. Сформований масив вихідних даних та визначений закон регулювання стануть базою для конфігурування проекту в TIA Portal.

3.2 Конфігурація проекту. Створення тегів, функцій, організаційних блоків

Наступним етапом після математичного обґрунтування технологічних параметрів є безпосередня реалізація системи в середовищі розроблення. Як базову програмну платформу було обрано TIA Portal (Totally Integrated Automation). Цей програмний комплекс дозволяє об'єднати конфігурацію апаратної частини, логіку керування контролера та візуалізацію панелі оператора в єдиному інформаційному просторі [10].

Перший крок програмування контролера SIMATIC S7-1200 полягає у створенні єдиної бази даних змінних (PLC Tags). Промисловий контролер не здатний оперувати абстрактними поняттями. Для коректної роботи йому необхідна жорстка та однозначна прив'язка символічних імен (тегів) до фізичних адрес пам'яті та портів вводу-виводу. Завдяки цій базі розробник може писати код, використовуючи зрозумілі назви змінних замість складних шістнадцяткових адрес.

Для проектованої установки видувного формування було розділено всі змінні на чотири основні логічні чотири групи:

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

1. дискретні входи (адресний простір %I): сюди підключені апаратні елементи керування (кнопки пульта), оптичні датчики наявності преформи та магнітні кінцеві вимикачі пневмоциліндрів. Для цих змінних використовується тип даних Bool;

2. дискретні виходи (адресний простір %Q): ці адреси безпосередньо керують виконавчими механізмами, а саме електропневматичними клапанами низького (8 бар) та високого (38 бар) тиску, контактором конвеєра, а також транзисторними ключами нагрівачів;

3. аналогові входи (адресний простір %IW): вони відповідають за отримання "сирих" (необроблених) даних від вимірювальних перетворювачів. Зокрема, сюди надходять сигнали стандарту 4–20 мА від термопар зон печі та датчиків тиску магістралі. Для цих сигналів застосовано тип даних Int;

4. внутрішня пам'ять (маркери простору %M): використовуються для зберігання проміжних результатів обчислень та, що найважливіше, для організації зв'язку із сенсорною панеллю оператора (наприклад, віртуальна кнопка старту або уставка температури у форматі Real).

Фрагмент розробленої таблиці тегів (Default tag table) із вказівкою типів даних та детальними коментарями наведено на рисунку 3.2.

SBM_Control_System_2026 > PLC_1_SBM [CPU 1214C DC/DC/DC] > PLC tags > Default tag table [44]

Tags

Default tag table

	Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Comment
1	Btn_Start	Bool	%I0.0	☐	☒	☒	☒	Кнопка запуску циклу на пульті
2	Btn_Stop	Bool	%I0.1	☐	☒	☒	☒	Кнопка аварійної зупинки
3	Sensor_Preform_In	Bool	%I0.2	☐	☒	☒	☒	Оптичний датчик наявності преформи...
4	Limit_Mold_Closed	Bool	%I0.3	☐	☒	☒	☒	Кінцевий вимикач: прес-форма повні...
5	Limit_Rod_Bottom	Bool	%I0.4	☐	☒	☒	☒	Магнітний датчик: шток розтягування ...
6	Valve_Pre_Blow	Bool	%Q0.0	☐	☒	☒	☒	Електромагнітний клапан попередньо...
7	Valve_High_Pressure	Bool	%Q0.1	☐	☒	☒	☒	Клапан основного видуву, 38 бар
8	Valve_Exhaust	Bool	%Q0.2	☐	☒	☒	☒	Клапан скидання тиску з готової пляшки
9	Heater_Zone1_PWM	Bool	%Q0.3	☐	☒	☒	☒	Транзисторний вихід (ШИМ) на твердот...
10	Motor_Conveyor	Bool	%Q0.4	☐	☒	☒	☒	Контактор двигуна крокового конвеєр...
11	Temp_Zone1_Raw	Int	%IW64	☐	☒	☒	☒	Аналоговий сигнал 4-20 мА від піроме...
12	Pressure_Actual_Raw	Int	%IW66	☐	☒	☒	☒	Сигнал від датчика тиску магістралі ви...
13	HMI_Start_Process	Bool	%M0.0	☐	☒	☒	☒	Віртуальна кнопка "Старт" на сенсорні...
14	HMI_Setpoint_Temp	Real	%MD10	☐	☒	☒	☒	Уставка температури, яку оператор вв...
15	<Add new>			☐	☒	☒	☒	

Рисунок 3.2 – Фрагмент таблиці тегів ПЛК у середовищі TIA Portal

Маючи сформовану адресну базу, переходимо до написання прикладного програмного забезпечення. Базова логіка машини реалізована мовою релейно-контакторних схем (LAD – Ladder Diagram). Відповідно до стандарту MEK 61131-3 [11], ця мова є найбільш наочною та зручною для подальшої експлуатації обслуговуючим персоналом підприємства.

Основний цикл програми контролера виконується в організаційному блоці Main [OB1]. Цей блок працює в режимі вільного циклу (Free cycle), постійно опитуючи входи та оновлюючи стан виходів. Саме тут реалізовано базові алгоритми блокувань та захисту установки. Наприклад, пневматичний клапан основного видуву (тег Valve_High_Pressure) не отримає керуючий сигнал на відкриття, якщо кінцевий вимикач не підтвердить повне механічне закриття прес-форми. Це критична умова безпеки, що запобігає розриву преформи під тиском 38 бар. Також в OB1 прописано класичну логіку самопідхоплення для безперервного запуску двигуна конвеєра печі від імпульсного натискання кнопки "Старт" (рис. 3.3).

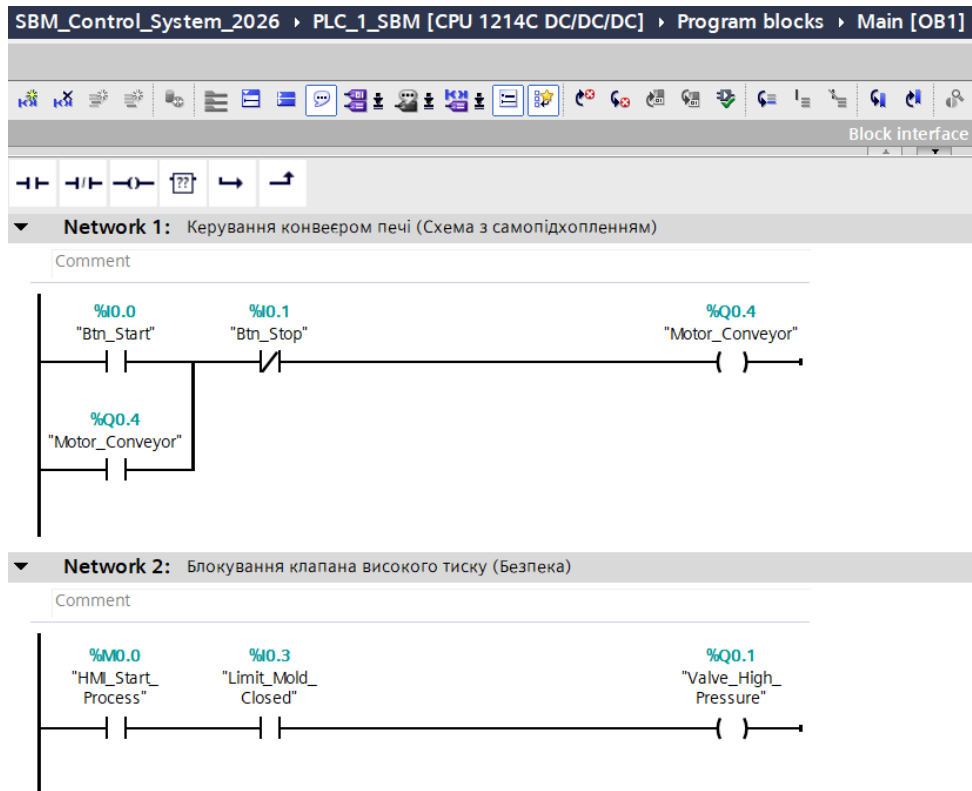


Рисунок 3.3 – Реалізація базової логіки блокувань та керування приводами в блоці OB1

Крім базових захисних блокувань, в організаційному блоці Main[OB1] реалізовано повну циклограму роботи пневматичної підсистеми машини. Алгоритм жорстко спирається на технологічні таймінги, визначені у вихідних даних (таблиця 3.1). Послідовність видування формується за принципом автомата станів. Після підтвердження закриття прес-форми (тег Limit_Mold_Closed) та досягнення штоком розтягування крайнього нижнього положення (Limit_Rod_Bottom), контролер активує електромагнітний клапан попереднього видуву (Valve_Pre_Blow). Одночасно запускається апаратний таймер TON із затримкою 50 мс. Після відпрацювання таймера логіка автоматично перемикається на стадію основного видуву: подається керуючий сигнал на клапан високого тиску 38 бар (Valve_High_Pressure). Для захисту пневмомагістралі від розриву застосовано метод взаємного блокування: перед котушкою попереднього видуву встановлено нормально закритий контакт Valve_High_Pressure, який миттєво відсікає лінію низького тиску. Формування та охолодження тари у прес-формі триває 1.2 с, що забезпечується другим таймером. Завершальним етапом циклу є активація клапана скидання тиску (Valve_Exhaust), після чого система дозволяє безпечно розмикання прес-форми (рис. 3.4).

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

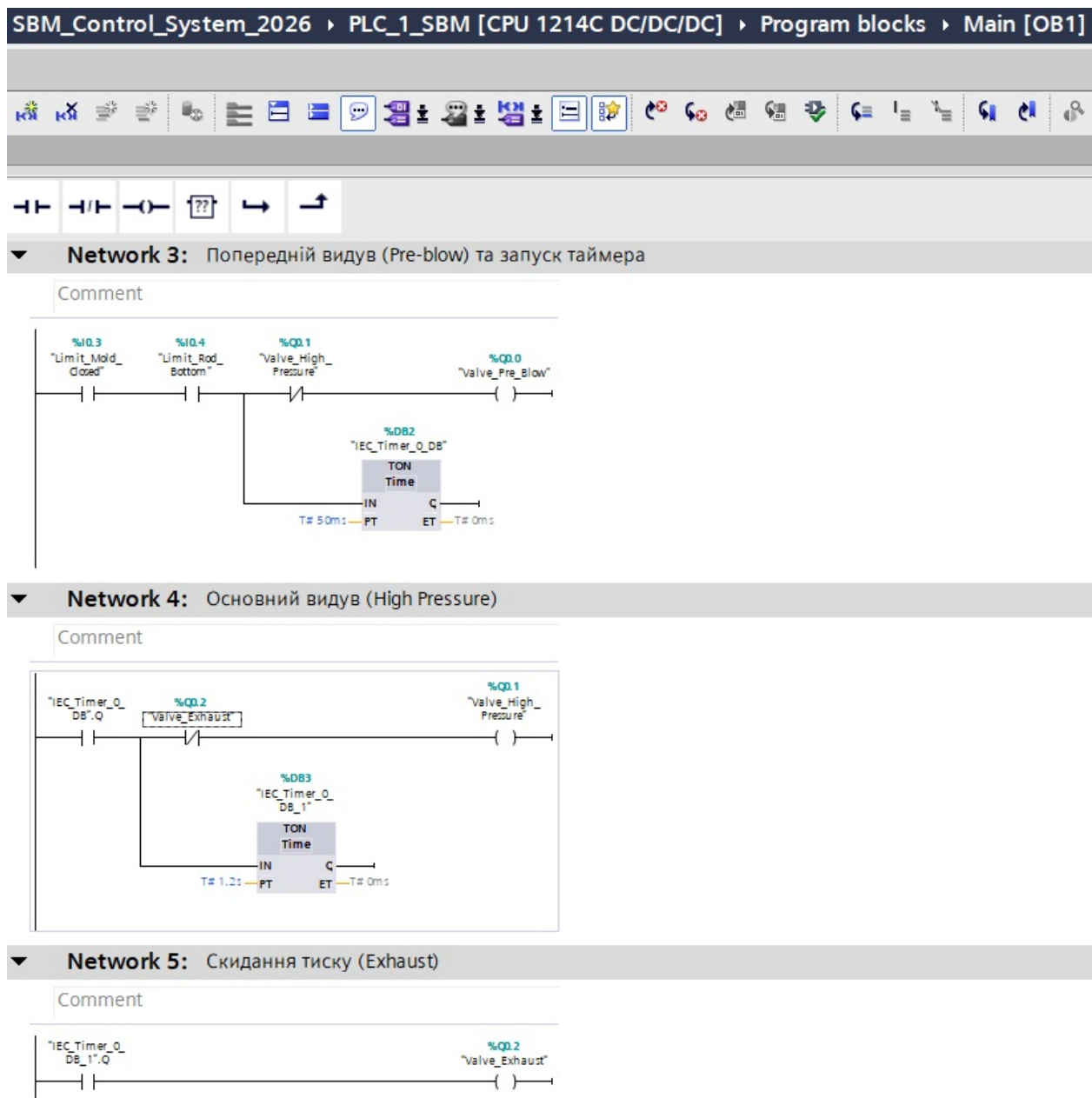


Рисунок 3.4 – Фрагмент реалізації циклограми пневматичної системи
видування з використанням таймерів TON

Проте керування процесом нагріву преформ вимагає принципово іншого підходу до програмування. Як було доведено шляхом моделювання у підрозділі 3.1, інфрачервона піч є інерційним об'єктом. Для стабілізації її температури необхідний ПІД-регулятор. Математичний апарат ПІД-закону вимагає для розрахунку інтегральної та диференціальної складових абсолютно точного інтервалу часу (Δt). Оскільки час виконання основного

блоку Main [OB1] постійно коливається залежно від навантаження на процесор (так званий джитер), розміщувати регулятор у ньому технічно некоректно, адже це призведе до нестабільності розрахунків.

Саме тому температурний контур реалізовано у спеціальному організаційному блоці циклічних переривань (Cyclic Interrupt – OB30). Цей блок гарантує виклик регулятора через суворо визначені інтервали часу (у цьому випадку – кожні 100 мс), тимчасово призупиняючи виконання основної програми.

Для реалізації алгоритму було використано інтегрований технологічний об'єкт PID_Compact (рис. 3.5).

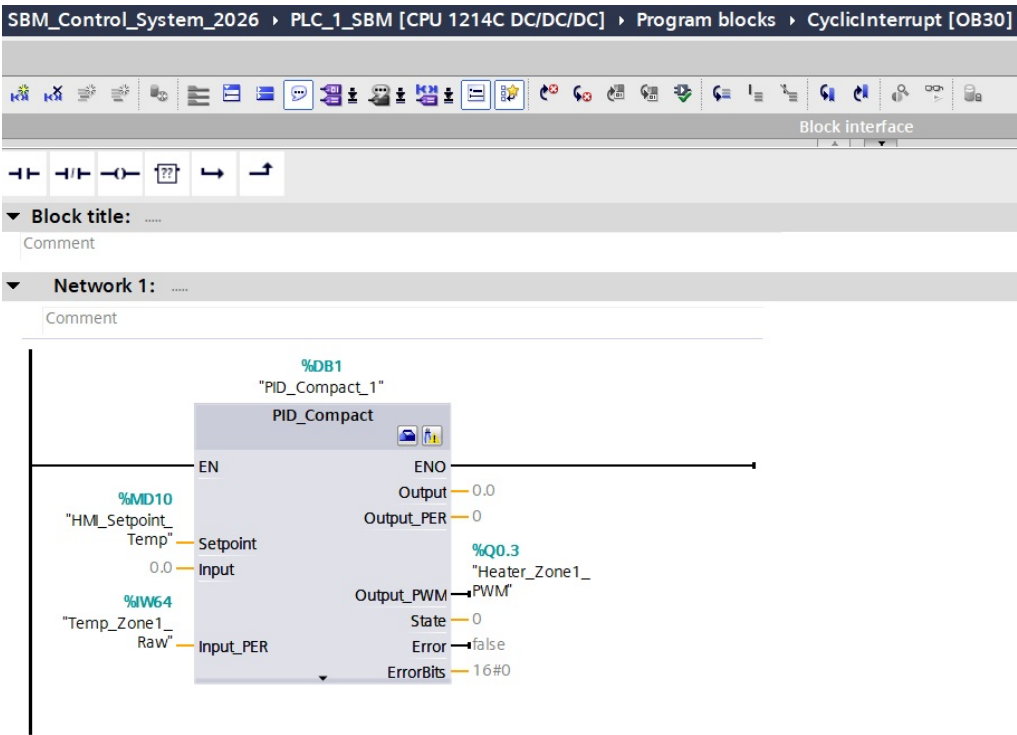


Рисунок 3.5 – Конфігурація ПІД-регулятора температури в організаційному блоці переривань OB30

Цей регулятор автоматично отримує задане значення (уставку) від оператора через змінну HMI_Setpoint_Temp та порівнює його з фактичним виміряним сигналом датчика Temp_Zone1_Raw. Оскільки інфрачервоними нагрівачами керують твердотільні реле (SSR), вихідний керуючий вплив

формується у вигляді широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) на виході Output_PWM [12]. Така апаратно-програмна конфігурація забезпечує максимально точне дозування теплової енергії та унеможливорює виникнення автоколивань температури в зоні нагріву ПЕТ-преформ [13].

3.3 Проектування інтерфейсу автоматизованої системи

Ефективна експлуатація сучасного промислового обладнання неможлива без зручного та інформативного людино-машинного інтерфейсу (НМІ – Human-Machine Interface). Інтерфейс виконує функцію зв'язуючої ланки між оператором та математичною логікою програмованого логічного контролера. Від якості візуалізації залежить швидкість реакції персоналу на позаштатні ситуації та загальна ефективність (OEE) виробничої лінії.

Для розроблення графічного інтерфейсу проектованої системи використано програмний пакет SIMATIC WinCC, який є невід'ємною частиною інтегрованого середовища TIA Portal. Апаратною базою обрано сенсорну панель Siemens KTP700 Basic PN [14]. Вибір гібридної панелі (з підтримкою як сенсорного введення, так і фізичних мембранних клавіш) зумовлений специфікою цехових умов: у випадку роботи в захисних рукавицях оператор має змогу дублювати критичні команди за допомогою апаратних кнопок (F1–F8).

При проектуванні головного робочого екрана (Root screen) застосовано принципи промислової ергономіки: відсутність зайвих декоративних елементів, контрастне виділення активних зон та логічне групування інформації. Загальний вигляд розробленого екрана в режимі симуляції (RT Simulator) наведено на рисунку 3.6.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

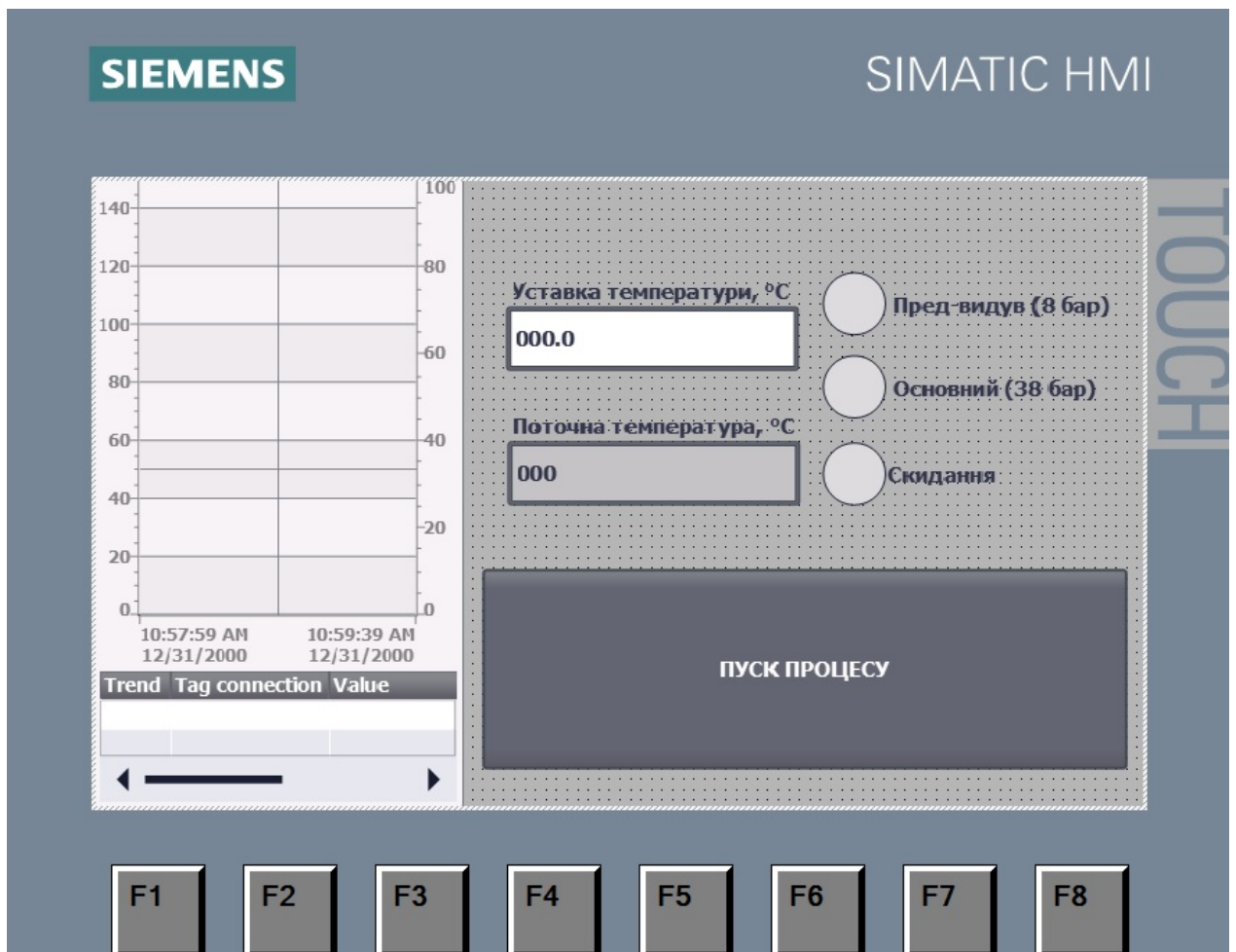


Рисунок 3.6 – Головний екран керування процесом видувного формування на панелі КТР700

Робочий простір екрана логічно поділено на дві основні функціональні частини:

1. ліва частина (зона аналітики та трендів): найважливішим інструментом контролю якості SBM-процесу є оцінка роботи ПІД-регулятора. Для цього на екран виведено об'єкт Trend view. Вісь ординат масштабована до 150 °C з урахуванням робочої уставки 105 °C. Графік у режимі реального часу відображає криві заданої та фактичної температур, що дозволяє технологу візуально оцінити наявність перерегулювання або автоколивань;

2. права частина (об'єднана зона керування та індикації): цей блок концентрує в собі всі органи взаємодії оператора з машиною. У ньому розташовано масивну кнопку «ПУСК ПРОЦЕСУ» (прив'язану до змінної HMI_Start_Process), поля задання уставки (HMI_Setpoint_Temp) та

					КРБ.CI-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

виводу поточної температури (Temp_Zone1_Raw). Поле виводу фактичної температури має сірий фон (режим Output), що інтуїтивно підказує оператору про неможливість ручної зміни цього параметра. Поруч розроблено мнемосхему технологічного циклу – систему динамічних індикаторів (Valve_Pre_Blow, Valve_High_Pressure, Valve_Exhaust), які дозволяють у режимі реального часу відстежувати стадії видування тари.

Розроблений інтерфейс повністю відповідає вимогам технічного завдання (пункт 2.3), забезпечує інтуїтивно зрозуміле керування машиною та мінімізує ризик виникнення аварійних ситуацій через так званий «людський фактор».

3.4 Рекомендації щодо впровадження розробленої системи

Розроблене апаратне та програмне забезпечення автоматизованої системи керування (АСК) пройшло успішну перевірку на логічну цілісність у режимі симуляції. Проте впровадження проекту на реальному виробничому об'єкті вимагає дотримання низки технічних та організаційних заходів. Установка видувного формування є джерелом підвищеної небезпеки через використання стисненого повітря високого тиску (до 40 бар) та потужних інфрачервоних випромінювачів.

Для забезпечення надійної та тривалої роботи системи в цехових умовах пропонуються наступні рекомендації:

- забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС): оскільки в системі використовуються твердотільні реле (SSR) із високочастотним ШІМ-керуванням та частотні перетворювачі двигунів, виникає високий рівень електромагнітних завад. Усі кабелі аналогових датчиків (термопар та датчиків тиску 4–20 мА) повинні бути обов'язково екранованими, а їхні екрани заземлені виключно з одного боку (у шафі керування) для уникнення паразитних контурів заземлення;

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– апаратне дублювання безпеки: логічне блокування клапанів високого тиску в програмі ПЛК (Main [OB1]) є ефективним, але недостатнім заходом безпеки. Контур аварійної зупинки (E-Stop) та захисні кінцеві вимикачі захисних дверцят прес-форми повинні додатково розривати ланцюг живлення котушок пневмоклапанів на апаратному (електричному) рівні через сертифіковане реле безпеки [15];

– пусконаладжувальні роботи та налаштування ПД-регулятора: вбудована функція автоналаштування технологічного об'єкта PID_Compact повинна виконуватися на повністю зібраній машині за наявності тестової партії преформ у печі. Це дозволить контролеру врахувати реальну теплову інерцію полімерного матеріалу та розрахувати оптимальні коефіцієнти;

– організація пневматичного тестування: перед першим запуском циклограми та подачею тиску основного виду необхідно провести тестовий прогін системи ("сухий хід") без підключення магістралі високого тиску для перевірки правильності відпрацювання таймерів та відсутності логічних колізій пневмоостровів;

– навчання персоналу: оператори машини повинні пройти інструктаж щодо роботи з новим людино-машинним інтерфейсом (НМІ) на панелі КТР700, зокрема щодо правильного введення уставок температурних режимів та реагування на аварійні повідомлення.

Дотримання цих рекомендацій дозволить мінімізувати ризики під час монтажу, скоротити час виходу машини на робочі параметри та гарантувати безпеку обслуговуючого персоналу підприємства.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було спроектовано і розроблено автоматизовану систему керування для виготовлення пластикових пляшок методом двостадійного видувного формування. Метою роботи було створення інструменту, який за допомогою автоматизації технологічного процесу може допомогти операторам та фахівцям приймати логічні рішення під час контролю параметрів машини. Завдяки використанню сучасних промислових інформаційних технологій, а саме апаратно-програмного комплексу Siemens (ПЛК SIMATIC S7-1200 та середовища TIA Portal), вдалося створити систему, яка значно спрощує процес керування, економить енергетичні витрати та зменшує ймовірність виробничого браку.

Основні завдання роботи, такі як обробка літературних джерел, порівняльний аналіз систем керування, виявлення теоретичних основ термодинаміки нагріву та розробка самої системи, були успішно виконані. Розроблена автоматизована система використовує реальні технологічні характеристики (таймінги пневматики, температурні профілі) та добре підходить для їх стабілізації за допомогою ПД-регулятора. Крім того, система має простий у використанні людино-машинний інтерфейс (HMI) на базі панелі КТР700, тому її можна використовувати як навчальний інструмент, а також у реальному застосуванні фахівцями з промислової автоматизації, мехатроніки та пакувальних технологій. Розроблена система може слугувати основою для подальшого розвитку, тобто інтеграції з промисловими системами верхнього рівня, що дозволить розширити її функціональні можливості.

Підсумовуючи, робота демонструє, що застосування сучасних засобів автоматизації для керування установками при виготовленні ПЕТ-тари є важливим способом покращення виробничого процесу. Розроблена система має потенційне застосування, може бути вдосконалена та використана в реальних проектах модернізації обладнання, що підтверджує її цінність на сучасному ринку пакувальної індустрії.

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Частина матеріалу бакалаврської роботи використана для написання наукової публікації (тези). Дані, щодо наукової публікації та отриманого сертифікату (ДОДАТОК А): Кицманюк Р. М., Белей О. І., Штаєр Л. О. Теоретичний опис автоматизованого процесу виготовлення пластикових пляшок. Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень : матеріали V Міжнар. наук. конф. (м. Умань, 27 берез. 2026 р.). Умань : МЦНД, 2026. С. 173–175. URL:

<https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/27.03.2026/87>, <https://doi.org/10.62731/mcnd-27.03.2026>

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brandau O. Stretch Blow Molding. 2nd ed. Oxford: William Andrew, 2012. 330 p.
2. Кицманюк Р. М., Белей О. І., Штаєр Л. О. Теоретичний опис автоматизованого процесу виготовлення пластикових пляшок. Наукові орієнтири: теорія та практика досліджень : матеріали VII Міжнар. наук. конф. (м. Умань, 27 берез. 2026 р.). Умань : МЦНД, 2026. С. 173–175. URL: <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/27.03.2026/87> (дата звернення: 07.04.2026).
3. Що таке видувне формування: основні типи та технології. PET Technologies: веб-сайт. URL: <https://pet-eu.com/uk/novyny/shho-take-viduvne-formuvannya-osnovni-tipi-ta-tehnologiyi/> (дата звернення: 07.04.2026).
4. Bordival M., et al. Optimization of the preform heating step in stretch blow molding. International Journal of Material Forming. 2009. Vol. 2, No. 1. P. 23-30.
5. Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації: навчальний посібник. Київ: Ліра-К, 2014. 344 с.
6. Куцик А. С., Місюренко В. О. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 200 с.
7. Anyone ever had to work on pre-PLC relay logic machines? Reddit: платформа. URL: https://www.reddit.com/r/PLC/comments/13f86lz/anyone_ever_had_to_work_on_preplc_relay_logic/ (дата звернення: 07.04.2026).
8. Berger H. Automating with SIMATIC Controllers, Software, Programming, Data Communication, Operator Control and Process Monitoring – 5th ed. Erlangen: Publicis Publishing, 2013. 284 p.
9. MathWorks. Control System Toolbox User's Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/control/> (дата звернення: 07.04.2026).

					КРБ.СІ-02.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

10. Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable controller. System Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2021. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/109797241> (дата звернення: 07.04.2026).
11. ДСТУ ІЕС 61131-3:2006. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування (ІЕС 61131-3:2003, IDТ). Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 183 с.
12. Siemens AG. SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control. Function Manual. Nuremberg: Siemens AG, 2025. 396 p. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/108210036> (дата звернення: 07.04.2026).
13. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 6th ed. Oxford: Newnes, 2015. 424 p.
14. Siemens AG. SIMATIC HMI devices Basic Panels 2nd Generation. Operating Instructions. Nuremberg: Siemens AG, 2024. 138 p. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/90114350> (дата звернення: 07.04.2026).
15. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2006; А1:2009; АС:2010, IDТ; ІЕС 60204-1:2005, MOD). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 135 с.

ДОДАТОК А. Сертифікат

СЕРТИФІКАТ

ПРО УЧАСТЬ У КОНФЕРЕНЦІЇ (З ПУБЛІКАЦІЄЮ)

ICSR № 26/2703-71

✓ 0,4 ECTS

Рекомендовано
Вченою Радою



Наукової установи
«Інститут науково-
технічної інтеграції
та співпраці»

Протокол № 11 від 26.03.2026

✓ Конференцію
zareestrovano

в Державній науковій
установі у сфері
управління Міністерства
освіти і науки «УкрІНТЕІ»

Посвідчення № 152 від 26.01.2026.

✓ Офіційний
видавець

Свідцтво суб'єкта
видавничої справи:
ДК № 7860 від 22.06.2023.

www.mcnd.org.ua

Кишманюк Роман Михайлович

взяв(ла) участь у VII Міжнародній науковій конференції

«НАУКОВІ ОРІЄНТИРИ: ТЕОРІЯ
ТА ПРАКТИКА ДОСЛІДЖЕНЬ»

27 березня 2026 року у м. Умань, Україна

та опублікував(ла) наукову роботу в збірці конференції

з ISBN 978-617-8582-30-2

DOI 10.62731/mcnd-27.03.2026



ВІЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ МЦНД
ГОЛОВА ОРГКОМІТЕТУ

СОТНИК СОЛОМІЯ



БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи – «Розроблення автоматизованої системи для виготовлення пластикових пляшок методом видувного формування»

Обсяг пояснювальної записки в аркушах – 50

Перелік креслень графічної частини:

КБР.02.151.001ПЗ ВЗ – Апаратна конфігурація системи. Вигляд загальний (1 аркуш)

КБР.02.151.002ПЗ ВЗ – Програмна реалізація циклограми видуву. Вигляд загальний (1 аркуш)

КБР.02.151.003ПЗ ВЗ – Блок терморегулювання PID_Contrast. Вигляд загальний (1 аркуш)

КБР.02.151.004ПЗ ВЗ – Головний екран панелі оператора. Вигляд загальний (1 аркуш)

Дата закінчення бакалаврської роботи «7» червня 2026 р.

Студент _____Кицманюк Р. М.