Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
# Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський),
Розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів із термопласту на базі верстату Demag

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2
Ярослав КОБИЛЬЧЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна.
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.
( повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ірина СЕЗОНОВА.
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАРБ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Я, Кобильченко Ярослав Володимирович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на віповідне джерело.

" 13 " липня 2026 р.  Ярослав КОБИЛЬЧЕНКО

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« ___»_____2025 р.

**ЗАВДАННЯ**
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Кобильченко Ярослав Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів із термопласту на базі верстату Demag
Затверджена наказом по університету від 04.06.2026 № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи ___
3.1Технічні характеристики термопластавтомата Demag Ergotech viva 25/35(обсяг вприскування, кількість зон керування, тип системи ЧПК).
3.2Технологічні параметри процесу лиття термопластів під тиском (температура розплаву, тиск вприскування, час витримки, температура форми тощо).
3.3Алгоритм автоматизованого проєктування виробів із термопластика.
3.4Нормативні документи та стандарти (ДСТУ, ISO) щодо проєктування виробів із пластмас та автоматизації технологічних процесів.
3.5Довідкова та науково-технічна література за темою кваліфікаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ
4.2 Аналіз предметної області та існуючих рішень
4.3 Проєктування автоматизованої системи та бази даних
4.4 Розроблення алгоритму автоматичного проєктування для виробів з термопластику на верстаті Demag
4.5 Програмна реалізація алгоритму на мові Python
4.6 Тестування системи та економічний аналіз результатів
4.7 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Графічний демонстраційний матеріал у форматі powerpoint(*.ppt), 12 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|---|---|---|---|
| | | підпис | дата |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Аналіз предметної області та теоретичної основи автоматизованого керування процесом лиття під тиском | 30.04.2026 - 03.05.2026 | Виконано |
| 2 | Дослідження обладнання DEMAG та розроблення алгоритму автоматизованого керування процесом лиття | 04.05.2026 - 16.05.2026 | Виконано |
| 3 | Розроблення алгоритму розрахунку параметрів наладки | 17.05.2026 - 29.05.2026 | Виконано |
| 4 | Програмна реалізація алгоритму розрахунку параметрів наладки та техніко-економічна оцінка рішення | 30.05.2026 - 16.06.2026 | Виконано |
| 5 | Тестування розробленої системи | 17.06.2026 - 21.06.2026 | Виконано |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | 22.06.2026 - 10.07.2026 | Виконано |
| 7 | Подання кваліфікаційної роботи в ЕК | 15.07.2026 | |

Дата видачі завдання 30.04.2026 р.

Здобувач _____ Ярослав КОБИЛЬЧЕНКО
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ проф. Ірина СЕЗОНОВА
(підпис) ( посада, власне ім'я, прізвище)

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 89 с., 4 рис., 7 табл., 2 дод., 43 джерела.

ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТ, ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, DEMAG ERGOTECH VIVA, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕЦЕПТ, ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ, PYTHON, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Тема роботи: «Розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів із термопласту на базі верстата Demag».

Об'єкт розробки – технологічний процес формування виробів із термопластів методом лиття під тиском на базі верстата Demag.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби автоматизованого керування параметрами термопластавтомата Demag (тиск, швидкість, температура, час циклу) з метою забезпечення стабільності якісних показників виробів.

Мета роботи – підвищення ефективності та стабільності процесу лиття виробів із термопласту шляхом розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів на базі станка Demag та відповідного програмного забезпечення.

Отримані результати відповідають Цілям сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» та 12 «Відповідальне споживання та виробництво», оскільки система сприяє модернізації виробництва та скороченню втрат.

# ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 89 p., 4 figures, 7 tables, 2 appendices, 43 sources.

INJECTION MOLDING MACHINE, INJECTION MOLDING, AUTOMATED CONTROL SYSTEM, DEMAG ERGOTECH VIVA, PROCESS RECIPE, POLYMER MATERIALS, PYTHON, ENERGY EFFICIENCY.

Topic of the thesis: "Development of an automated design system for the thermoplastic forming process based on a Demag injection molding machine".

The object of the study is the technological process of forming thermoplastic products by injection molding.

The subject of the study is the methods, algorithms and software-hardware tools for automated control of a Demag injection molding machine's parameters (pressure, speed, temperature, cycle time) aimed at ensuring the stability of product quality indicators.

The purpose of the thesis is to improve the efficiency and stability of the thermoplastic injection molding process by developing an automated design system for the forming process based on a Demag machine and dedicated software.

The obtained results correspond to Sustainable Development Goals 9 "Industry, Innovation and Infrastructure" and 12 "Responsible Consumption and Production", as the system promotes production modernization and waste reduction.

# ЗМІСТ

Перелік скорочень 6
Вступ 8
1 Аналіз предметної області та теоретичної основи автоматизованого керування процесом лиття під тиском 12
1.1 Теорія автоматичного керування 12
1.2 Аналіз технологічного процесу формування виробів із термопласту 14
1.3 Полімерні матеріали для лиття під тиском 15
2 Дослідження обладнання DEMAG та розроблення алгоритму автоматизованого керування процесом лиття 18
2.1 Конструкція термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 та принцип його роботи 18
2.2 Функціональні можливості системи керування NC4 20
2.3 Розроблення алгоритму автоматизованого керування процесом лиття 23
2.4 Полімерні матеріали для лиття під тиском 27
3 Програмна реалізація алгоритму розрахунку параметрів наладки та техніко-економічна оцінка рішення 32
3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та архітектури програмного модуля 32
3.2 Методика техніко-економічної оцінки та вихідні дані 43
3.3 Охорона праці 50
Висновки 59
Перелік джерел посилання 62
Додаток А Код програми 67
Додаток В Демонстраційний матеріал 73

# ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДСТУ – державний стандарт України;

КІТАРБІ – кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії;

ПА6 – поліамід 6;

ПЕ – поліетилен низької густини;

ПЕТ – поліетилентерефталат;

ПІД(-регулятор) – пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор);

ПНТ/ПНД – поліетилен низького тиску (високої густини);

ПП – поліпропілен;

ПС – полістирол;

САПР – система автоматизованого проєктування;

СКБ – студентське конструкторське бюро;

ТАК – теорія автоматичного керування;

ТПА – термопластавтомат;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки;

ABS – акрилонітрилбутадієнстирол (Acrylonitrile Butadiene Styrene);

JSON – JavaScript Object Notation (формат обміну структурованими даними);

MES – Manufacturing Execution System (система управління виробничими процесами);

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport (протокол обміну повідомленнями);

NC4 – система числового керування термопластавтоматів Demag;

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture (протокол промислової комунікації);

PLC – Programmable Logic Controller (програмований логічний

контролер);

REST API – Representational State Transfer Application Programming Interface (програмний інтерфейс на основі REST-архітектури);

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (система диспетчерського контролю та збору даних).

# ВСТУП

У сучасних умовах глобальної конкуренції на ринку виробництва виробів із полімерних матеріалів особливої актуальності набуває підвищення ефективності та стабільності технологічних процесів. Значна частка витрат у собівартості продукції припадає на енергоспоживання та втрати від виробничого браку, що часто зумовлено нестабільністю параметрів лиття та недостатньою гнучкістю традиційних систем керування. Традиційні підходи до налаштування термопластавтоматів не завжди дозволяють оперативно реагувати на зміну властивостей сировини, знос обладнання або коливання зовнішніх чинників.

Неефективне керування параметрами впорскування, температури та тиску призводить не лише до перевитрат електроенергії, але й до виникнення дефектів виробів (недоливи, облой, внутрішні напруження), що знижує загальну рентабельність виробництва. У зв'язку з цим актуальним є розроблення та впровадження спеціалізованих автоматизованих систем керування на базі сучасного обладнання, зокрема термопластавтоматів компанії Demag, які здатні забезпечити прецизійну точність та адаптивність технологічного циклу.

Крім того, стрімкий розвиток концепції Індустрії 4.0, впровадження кіберфізичних систем та засобів інтелектуального аналізу даних створюють передумови для переходу від статичного до динамічного керування процесом лиття. Використання програмного забезпечення для моніторингу та корекції параметрів у реальному часі дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та підвищити стабільність якості готової продукції, що додатково підсилює актуальність обраної теми кваліфікаційної роботи.

Окремої уваги заслуговує економічний аспект проблеми: ручний підбір початкових технологічних параметрів наладки термопластавтомата методом проб і помилок вимагає значного часу висококваліфікованого персоналу та супроводжується підвищеними витратами матеріалу й електроенергії на

пробні пуски. Формалізація та автоматизація цієї процедури засобами програмного забезпечення є одним із напрямів підвищення ефективності технологічної підготовки дрібносерійного та середньосерійного виробництва виробів із термопластів, що й визначає практичну спрямованість даної роботи.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та стабільності процесу лиття виробів із термопласту шляхом розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів на базі термопластавтомата Demag і відповідного програмного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлено такі задачі:

– провести аналіз технологічного процесу формування виробів із термопластів та виявити ключові фактори, що впливають на його стабільність;

– розглянути теоретичні основи автоматичного керування та принципи роботи систем із зворотним зв'язком;

– дослідити конструктивні особливості та функціональні можливості термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 і його системи керування NC4;

– обґрунтувати вибір полімерних матеріалів для лиття під тиском з урахуванням їхніх фізико-технологічних характеристик;

– розробити трирівневий алгоритм функціонування автоматизованої системи керування процесом лиття з урахуванням зворотного зв'язку за критичними параметрами процесу;

– обґрунтувати вибір програмного забезпечення та розробити програмний модуль для автоматизованого розрахунку початкових параметрів технологічної наладки обладнання;

– провести техніко-економічну оцінку очікуваної продуктивності, якості продукції та енергоефективності запропонованого рішення;

– розробити рекомендації щодо практичного впровадження та подальшого налаштування автоматизованої системи на виробництві;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно з ДСТУ 3008:2015 [4, 5] та відповідними методичними вказівками з підготовки й оформлення

кваліфікаційних робіт здобувачами вищої освіти спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [6].

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблений програмний модуль автоматизованого розрахунку початкових параметрів наладки термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 дає змогу скоротити тривалість переналагодження обладнання приблизно у 3,4 раза, підвищити частку придатних виробів з першого пробного вистрілу до 70% – 80 % та зменшити відхилення маси виробу від номіналу в усталеному режимі до ±1,5% – 1,8 %. Орієнтовний річний економічний ефект від впровадження розробки становить близько 187 000 грн за терміну окупності менше двох місяців. Результати роботи можуть бути використані на підприємствах, що здійснюють переробку термопластів методом лиття під тиском, а також інтегровані до автоматизованих систем керування виробництвом (SCADA/MES).

Зв'язок роботи з Цілями сталого розвитку. Тема кваліфікаційної роботи відповідає Цілям сталого розвитку України, зокрема Цілі 8 «Гідна праця та економічне зростання». Розв'язання поставлених завдань сприяє підвищенню ефективності виробництва на засадах сталого розвитку та розбудові високотехнологічних конкурентних виробництв, що відповідає завданню 8.2 щодо досягнення вищого рівня економічної продуктивності на основі диверсифікації, технологічної модернізації та інновацій.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та переліку джерел посилання. У першому розділі виконано аналіз матеріальної бази, технічного та методичного забезпечення бази практики, теоретичних основ автоматичного керування, технологічного процесу формування виробів із термопластів та вимог охорони праці. У другому розділі досліджено конструкцію та принцип роботи термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35, функціональні можливості системи керування NC4 та розроблено трирівневий алгоритм автоматизованого керування процесом лиття. У третьому розділі виконано

програмну реалізацію алгоритму розрахунку початкових параметрів наладки обладнання мовою Python та проведено техніко-економічну оцінку запропонованого рішення. Робота містить 22 сторінки, 4 рисунки, 7 таблиць та 67 джерел посилання [6, 7]

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ

## 1.1 Теорія автоматичного керування

Теорія автоматичного керування (ТАК) є розділом технічної науки, що вивчає принципи побудови й функціонування систем, здатних підтримувати задані параметри об'єкта без постійного втручання людини-оператора. Основною метою таких систем є забезпечення стабільності, точності та повторюваності технологічних процесів за умов змінного зовнішнього середовища або навантаження, що є ключовою вимогою і для процесу лиття термопластів під тиском, розглянутого в даній роботі [8].

У загальному випадку система автоматичного керування складається з об'єкта керування та керуючого пристрою. Об'єктом може бути будь-який технічний процес чи установка – наприклад, термопластавтомат, електродвигун або гідравлічна система. Керуючий пристрій отримує інформацію про поточний стан об'єкта, порівнює її із заданим (еталонним) значенням і формує відповідні керуючі впливи, спрямовані на мінімізацію розбіжності між ними.

Фундаментальним принципом побудови таких систем є принцип зворотного зв'язку: поточний стан об'єкта безперервно вимірюється давачами і повертається на вхід системи керування. На основі різниці між заданим і фактичним значеннями формується сигнал похибки, який використовується для корекції керуючого впливу. Завдяки цьому система здатна самостійно компенсувати зовнішні збурення та відхилення технологічних параметрів, що є визначальним при розробленні адаптивно-коригувального етапу алгоритму керування термопластавтоматом, описаного в пункті 2.3.3 [9].

Важливою характеристикою систем керування є стійкість – здатність системи повертатися до рівноважного стану після будь-якого зовнішнього

впливу. Якщо система нестійка, її параметри з часом зростають або починають коливатися з наростаючою амплітудою, що призводить до порушення нормальної роботи обладнання, аж до аварійних ситуацій. Для аналізу стійкості та динамічних властивостей систем керування застосовуються математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь або передавальних функцій, а також частотні й алгебраїчні критерії стійкості (зокрема критерій Рауса–Гурвіца), що дозволяють оцінити поведінку системи без проведення натурного експерименту [10].

Окреме важливе місце в теорії автоматичного керування посідає поняття регулювання – процесу підтримання заданого значення фізичної величини (температури, тиску, швидкості, положення). У промислових системах найбільш поширеними є пропорційні (П), пропорційно-інтегральні (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори. Пропорційна складова забезпечує реакцію на поточне відхилення, інтегральна – усуває накопичену статичну похибку, а диференціальна – прогнозує тенденцію зміни процесу, підвищуючи швидкодію системи. Поєднання цих складових у ПІД-регуляторі дає змогу досягти точного й стабільного регулювання переважної більшості технологічних процесів, включно з підтриманням температурних режимів циліндра термопластавтомата, розглянутих у підрозділі 2.2. [11].

У промисловості системи автоматичного керування широко застосовуються в металообробці, хімічній промисловості, енергетиці та машинобудуванні. Зокрема, в термопластавтоматах вони забезпечують контроль температури циліндра, тиску впорскування, швидкості руху механізмів та тривалості циклу роботи обладнання. Таким чином, теорія автоматичного керування є фундаментальною основою сучасної автоматизації виробництва, оскільки дає змогу створювати системи, здатні самостійно підтримувати задані параметри з високою точністю та мінімальним впливом людського фактора, що й визначає теоретичне підґрунтя даної кваліфікаційної роботи [12].

## 1.2 Аналіз технологічного процесу формування виробів із термопласту

Формування виробів із термопластів є складним фізико-хімічним процесом, суть якого полягає в переведенні полімеру з твердого стану у в'язкотекучий, наданні йому форми та подальшій фіксації цієї форми шляхом охолодження. Найпоширенішим промисловим методом реалізації цього процесу є лиття під тиском, оскільки саме воно забезпечує поєднання високої точності, продуктивності та можливості автоматизації всіх стадій циклу [13, 14].

Термопластавтомат (ТПА) – це автоматична машина для виробництва пластикових виробів методом лиття під тиском, що є однією з найпоширеніших технологій масового виготовлення деталей із пластмас у світі. Сучасні підприємства застосовують різні типи термопластавтоматів залежно від вимог до продукції, обсягів виробництва та специфіки технологічного процесу, і правильний вибір обладнання безпосередньо впливає на якість виробів та рентабельність виробництва.

Сфера застосування термопластавтоматів охоплює виробництво тари й упаковки, автомобільну промисловість, електротехнічну галузь, медичне виробництво, а також побутові й господарські вироби. Кожна з машин, незалежно від типу (звичайні або видувні термопластавтомати), реалізує однакову базову послідовність операцій: гранули полімеру розплавляються, заливаються у форму під тиском і охолоджуються, унаслідок чого утворюється готовий виріб заданої геометрії.

Критично важливим елементом технологічного процесу є організація ефективного охолодження, оскільки саме воно визначає тривалість найбільш затратної за часом фази циклу та безпосередньо впливає на якість готових виробів. Тепло виділяється як у зоні впорскування та циліндра, де відбувається плавлення полімеру, так і в прес-формі, яка потребує контрольованого відведення надлишкового тепла. Для цього застосовується чилер – система охолодження теплоносія (води або гліколевого розчину), що циркулює через

трубопровід до термопластавтомата й відводить тепло від прес-форм, масла та робочих вузлів машини, продовжуючи термін служби обладнання до 15 років і більше.

Об'єктом дослідження в даній роботі обрано термопластавтомат DEMAG Ergotech Viva 25/35 – гідравлічну машину німецького виробництва, що належить до серії Ergotech Viva, яка випускалася компанією DEMAG Ergotech GmbH переважно наприкінці 1990-х – на початку 2000-х років (у 2008 році компанія увійшла до складу японської корпорації Sumitomo (SHI) Demag). Більшість машин цієї серії, що експлуатуються сьогодні на підприємствах України, було виготовлено у період 1997–2003 років [15].

Незважаючи на вік, DEMAG Ergotech Viva 25/35 залишається затребуваним завдяки високій надійності, точності роботи та автоматизованому керуванню. Порівняно невисока вартість обладнання на вторинному ринку (близько 7000 доларів США проти 12 000–25 000 доларів за сучасніші машини 2008–2012 років випуску без урахування доставки) робить використання цієї серії економічно доцільним для малих та середніх українських підприємств, що переробляють термопласти, і саме тому обране обладнання є репрезентативним об'єктом для розроблення автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів, запропонованої в даній роботі.

## 1.3 Полімерні матеріали для лиття під тиском

У сучасному машинобудуванні та переробній промисловості термопластавтомати використовуються для виготовлення широкого спектра виробів із полімерних матеріалів. Основою технології є здатність термопластів переходити у в'язкотекучий стан при нагріванні та повертатися до твердого стану після охолодження без суттєвої втрати властивостей, що уможливлює багаторазове формування під тиском у прес-формах [16].

Полімерні матеріали, застосовувані в литті під тиском, повинні

забезпечувати стабільність процесу плавлення, рівномірне заповнення форми та передбачувану усадку після охолодження, а також витримувати термічні навантаження в циліндрі без деградації структури. Від правильного вибору полімеру залежить не лише якість готового виробу, а й енергоефективність процесу, зношування обладнання та собівартість продукції – саме тому характеристики матеріалів було закладено в довідкову базу даних розробленого програмного модуля (підрозділ 3.2) [17].

Найпоширенішими матеріалами в промисловому виробництві є поліпропілен (ПП), поліетилен (ПЕ), полістирол (ПС), ABS-пластик, поліамід (ПА6) та поліетилентерефталат (ПЕТ). Поліпропілен вирізняється поєднанням низької вартості, легкої переробки та достатньої механічної міцності, демонструючи стабільну в'язкість під час нагрівання, що дозволяє рівномірно заповнювати складні форми; тому він широко застосовується у виробництві упаковки, побутових виробів і деталей автомобільної промисловості. Поліетилен характеризується ще більшою технологічною простотою переробки, високою хімічною стійкістю та морозостійкістю, тому часто використовується для тари, трубної продукції та пакувальних матеріалів; поліетилен низького тиску (ПНД), синтезований при 10–80 атм з використанням каталізаторів Циглера – Натта, має підвищену жорсткість і застосовується для твердої тари – відер, каністр, ящиків, кришок-заглушок і труб [17].

Полістирол вирізняється високою жорсткістю та простотою формування, що робить його економічно вигідним для масового виробництва одноразових виробів, проте його суттєвим недоліком є крихкість. ABS-пластик належить до інженерних матеріалів середнього рівня і застосовується там, де потрібне поєднання ударостійкості й стабільності форми – у корпусних деталях технічних пристроїв та автомобільних елементах. Поліамід є більш високотехнологічним матеріалом з підвищеною зносостійкістю, придатним для виготовлення шестерень і втулок, однак чутливим до вологи. Поліетилентерефталат широко використовується у харчовій промисловості

для виготовлення пляшок і прозорої тари, проте потребує ретельного попереднього сушіння [18].

Основні відмінності між розглянутими матеріалами полягають у поведінці під час нагрівання, швидкості охолодження, ступені усадки та механічних властивостях готового виробу. Матеріали з відносно низькою температурою плавлення (поліетилен, поліпропілен) є більш економічно вигідними для масового виробництва завдяки нижчому енергоспоживанню, тоді як інженерні пластики (ABS, поліамід) вимагають вищих температур обробки, але компенсують це підвищеною міцністю й довговічністю. Дешевші полімери зазвичай більш толерантні до відхилень режимів роботи, тоді як інженерні матеріали потребують точнішого контролю температури, тиску та часу витримки, що безпосередньо підвищує вимоги до системи керування термопластавтомата.

В умовах України вибір полімерних матеріалів значною мірою визначається вартістю сировини, доступністю імпортних поставок та енергетичними витратами на виробництво. Найбільший попит мають полімери масового сегмента – поліпропілен і поліетилен, які забезпечують найнижчу собівартість готової продукції за прийнятного рівня якості й легко переробляються повторно. Зростає також роль вторинної переробки: використання вторинної сировини дозволяє знизити собівартість продукції на десятки відсотків, хоча вторинні матеріали мають менш стабільні характеристики, що потребує точнішого налаштування обладнання – саме ця обставина стала одним з аргументів на користь автоматизації розрахунку параметрів наладки, реалізованої в третьому розділі роботи. [19, 20].

# 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ DEMAG ТА РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЛИТТЯ

## 2.1 Конструкція термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 та принцип його роботи

Термопластавтомат DEMAG Ergotech Viva 25/35 використовується для виготовлення полімерних виробів у серійному виробництві, де важливими є точність геометрії, повторюваність параметрів і стабільність технологічного процесу. Робота машини побудована так, щоб усі етапи формування виробу виконувалися автоматично в межах одного циклу без участі оператора, а функція людини зводилася до контролю та періодичного коригування технологічного рецепта [13].

Технологічний процес включає підготовку полімеру, його плавлення, впорскування у прес-форму під тиском, подальшу витримку для стабілізації форми, охолодження та вилучення готового виробу. Кожна з цих стадій виконується послідовно та регулюється системою керування, що забезпечує точне дотримання заданих параметрів. Конструкція обладнання складається з кількох основних функціональних частин: вузла пластикації, вузла змикання форми, гідравлічної системи та електронного блока керування, узгоджена робота яких забезпечує безперервний виробничий цикл і високу якість продукції.

Найважливішим елементом є вузол пластикації та впорскування, оскільки саме тут відбувається формування розплаву. До його складу входять завантажувальний бункер, у який подається гранульований полімер, нагрівальний циліндр, усередині якого матеріал розм'якшується, обертовий шнек, що транспортує та перемішує полімер, нагрівальні елементи, які забезпечують необхідний температурний режим, а також сопло, через яке підготовлений розплав надходить у форму. Гранули полімеру поступають із

бункера до зони нагріву, де під дією температури та механічного зсуву поступово переходять у в'язкотекучий стан; обертання шнека сприяє рівномірному прогріву матеріалу та його гомогенізації, що є критично важливим для стабільності майбутнього виробу [21, 14].

Після накопичення необхідної кількості розплаву в передній частині циліндра шнек змінює режим роботи й переміщується вперед, створюючи тиск, за рахунок якого матеріал упорскується у порожнину прес-форми. Саме на цьому етапі відбувається ключова фаза формування виробу, де важливу роль відіграє високий тиск упорскування, який у даній серії обладнання може досягати значень до 2300 бар. Далі починається етап витримки під тиском, під час якого компенсується природна усадка полімеру; після цього форма охолоджується, і матеріал переходить у твердий стан, набуваючи остаточних геометричних розмірів. Завершальним етапом є розкриття прес-форми та автоматичне виймання готового виробу.

Нагрівний елемент термопластавтомата є багатозонним для рівномірного та постійного нагрівання до заданої температури, причому температура поступово спадає від бункера до сопла, щоб уникнути передчасного розм'якшення гранул у зоні завантаження й водночас забезпечити достатній прогрів матеріалу перед упорскуванням. Термопара безперервно вимірює температуру циліндра: якщо вона нижча за задану, контролер вмикає нагрівач, а після досягнення уставки живлення вимикається або зменшується, і такий цикл повторюється багато разів за хвилину.

Система охолодження є важливою складовою термопластавтомата, оскільки забезпечує стабільність процесу лиття, якість виробів і скорочення часу виробничого циклу. У машині DEMAG Ergotech Viva 25/35 охолодження реалізовано у трьох напрямках: охолодження прес-форми (через внутрішні канали, якими циркулює вода або водно-гліколева суміш), охолодження пластикаційного циліндра (за допомогою повітряних вентиляторів на нагрівальних зонах, що вмикаються автоматично при перевищенні заданої температури) та охолодження гідросистеми (через теплообмінник, що

відводить тепло гідравлічного масла). Таким чином, термопластавтомат DEMAG Ergotech Viva 25/35 функціонує як замкнена автоматизована система, у якій усі стадії виробництва взаємопов'язані й контролюються електронною системою керування, що дозволяє досягти високої продуктивності, точності та стабільності процесу лиття [15].

## 2.2 Функціональні можливості системи керування NC4

Система керування NC4, застосовувана в термопластавтоматах серії DEMAG Ergotech Viva 25/35, виконує роль центрального обчислювального та керуючого вузла. Через неї здійснюється координація роботи всіх механічних, гідравлічних і термічних підсистем машини, а її робота спрямована на забезпечення повторюваності циклу лиття та стабільності технологічних параметрів у процесі серійного виробництва [22, 23].

На практиці NC4 реалізує принцип повністю автоматизованого керування, за якого оператор задає лише основні технологічні параметри (температурні режими, швидкість упорскування, тиск, час витримки, положення механізмів), а подальше виконання циклу контролюється системою без безперервного втручання людини. Однією з базових функцій NC4 є контроль температури у різних зонах пластикаційного циліндра: система отримує сигнали від термопар, розміщених уздовж нагрівальних зон, і в реальному часі порівнює фактичні значення із заданими, формуючи керування нагрівальними елементами для підтримання стабільного температурного профілю [24]. Зовнішній вигляд терміналу керування наведено на рисунку 2.1.




Рисунок 2.1 – Фото терміналу NC4

Крім температури, система керує параметрами упорскування, включно зі швидкістю руху шнека, профілем тиску та тривалістю окремих фаз циклу, що дає змогу адаптувати процес під різні типи полімерів і складність геометрії виробу. NC4 також контролює роботу вузла змикання прес-форми,

забезпечуючи необхідне зусилля притискання для того, щоб форма залишалася герметично закритою під час упорскування розплаву під високим тиском, запобігаючи утворенню облою та дефектів виробу. Приклад екрана керування параметрами упорскування на терміналі наведено на рисунку 2.2.

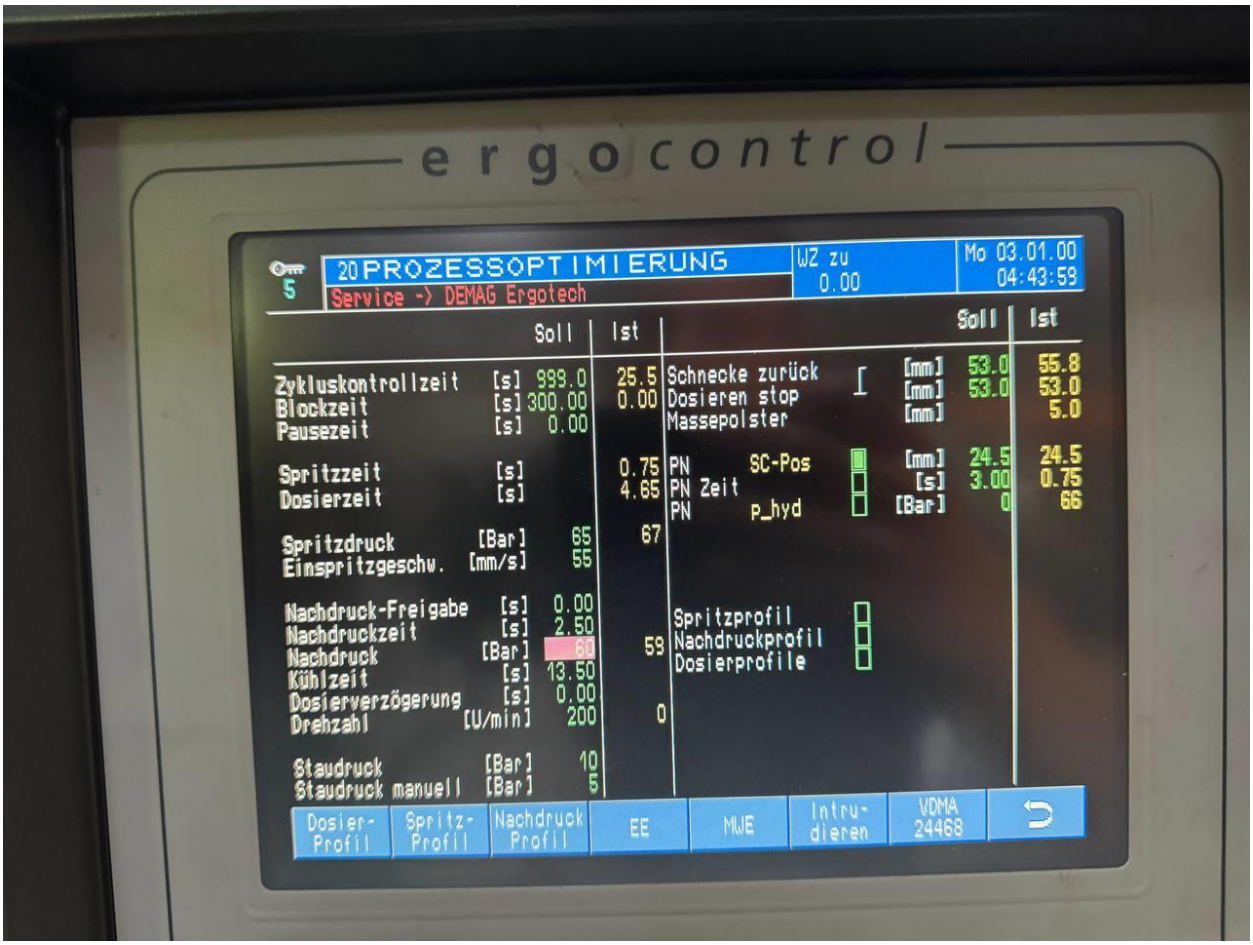



Рисунок 2.2 – Керування параметрами на термінялі за допомогою NC4

Інтерфейс керування NC4 побудований у вигляді операторської панелі з екраном і функціональними клавішами, що забезпечує зручний доступ до всіх основних параметрів машини; на дисплеї відображаються поточні значення температур, тиску, положення шнека та стан виконуваного циклу. Структура меню побудована ієрархічно – від загального огляду стану машини до детального налаштування окремих технологічних параметрів, що дозволяє оператору швидко переходити між режимами моніторингу та налаштування без втрати контролю над процесом.

Окремий блок інтерфейсу відповідає за введення та збереження

технологічних налаштувань під конкретні вироби (так званих рецептів), у яких зберігаються всі параметри, включно з температурними уставками, тиском упорскування й витримки та часом циклу; при повторному запуску виробництва достатньо вибрати потрібну конфігурацію, що суттєво скорочує час переналагодження обладнання. Інтерфейс також містить систему діагностики, яка відображає аварійні повідомлення та попередження: у разі виходу параметрів за допустимі межі система автоматично фіксує відхилення й може блокувати подальшу роботу до усунення несправності, що підвищує рівень безпеки експлуатації.

Окрім основних режимів керування, NC4 виконує функцію архівування даних, що дозволяє аналізувати параметри роботи машини за певний період часу для оптимізації технологічного процесу та виявлення відхилень у роботі обладнання, а також підтримує функції сервісного доступу для налаштування параметрів технічного обслуговування й калібрування давачів. Саме ці функції архівування та сервісного доступу було враховано при проєктуванні формату обміну даними розробленого програмного модуля (підрозділ 3.5), який формує технологічний рецепт у машинозчитуваному вигляді, придатному для подальшого завантаження в контролер NC4

## 2.3 Розроблення алгоритму автоматизованого керування процесом лиття

Для розроблення алгоритму автоматизованого керування термопластавтоматом DEMAG Ergotech Viva 25/35 необхідно враховувати циклічний характер процесу лиття під тиском, а також потребу в постійному контролі та корекції технологічних параметрів у реальному часі. Процес характеризується поєднанням теплових, механічних і гідравлічних впливів, що вимагає застосування багаторівневої структури керування, узгодженої із загальними принципами теорії автоматичного керування, розглянутими в підрозділі 1.3.

Запропонований алгоритм умовно поділяється на три основні етапи:

підготовчий (ініціалізація системи), виконавчий (технологічний цикл) та адаптивно-коригувальний (аналіз результатів і оптимізація параметрів). Така трирівнева структура забезпечує стабільність роботи обладнання та можливість автоматичного підстроювання режимів під конкретні умови процесу, а також безпосередньо визначає архітектуру програмного модуля, розробленого в третьому розділі роботи.

### 2.3.1 Підготовчий етап (ініціалізація та перевірка стану системи)

На першому етапі виконується запуск системи керування та завантаження технологічного рецепта, який містить усі необхідні параметри процесу: температурні уставки, профіль упорскування, значення тиску, а також часові характеристики циклу. Формування такого рецепта є завданням, яке в традиційному підході виконується технологом-наладчиком вручну, тоді як у запропонованому рішенні (підрозділ 3.1–3.6) ця процедура автоматизована програмним модулем.

Далі здійснюється перевірка готовності основних вузлів термопластавтомата: контролюється досягнення заданих температур у всіх зонах пластикаційного циліндра, наявність матеріалу в бункері, а також стан елементів безпеки, зокрема блокування захисних дверей і активність систем безпеки, розглянутих у підрозділі 1.6. Ця перевірка є програмною реалізацією вимог охорони праці, оскільки унеможливлює запуск циклу за відсутності належних умов безпеки.

У разі невідповідності хоча б одного з контрольних параметрів запуск циклу блокується, а на панель оператора передається відповідний код помилки. Якщо всі умови виконані, система переходить до виконання основного технологічного циклу. Такий підхід відповідає принципу «безпечного відмовлення» (fail-safe), широко застосовуваному в промисловій автоматизації, і дозволяє мінімізувати ризик пошкодження обладнання чи травмування персоналу через некоректні вихідні параметри [25].

Важливою особливістю підготовчого етапу є те, що якість його виконання безпосередньо залежить від точності вхідного технологічного рецепта: чим точніше розраховані початкові параметри, тим менше коригувальних дій знадобиться на наступних етапах. Саме тому в межах даної роботи основну увагу приділено формалізації розрахунку початкових параметрів наладки (розділ 3), що дозволяє суттєво підвищити ефективність підготовчого етапу порівняно з традиційним емпіричним підбором.

### 2.3.2 Виконавчий етап (цикл лиття під тиском)

Виконавчий етап включає послідовність операцій формування виробу у прес-формі. Першою операцією є замикання форми, під час якого контролюється зусилля змикання; перевищення допустимого навантаження призводить до автоматичної зупинки процесу з метою запобігання пошкодженню обладнання. Ця операція безпосередньо реалізує функцію системи керування NC4 з контролю зусилля притискання, описану в підрозділі 2.2.

Після завершення замикання форми виконується фаза впорскування розплаву, на якій здійснюється керування рухом шнека, що забезпечує подачу матеріалу в порожнину прес-форми. У реальному часі контролюються параметри швидкості впорскування та тиску в циліндрі, а отримані значення порівнюються з еталонною кривою заповнення форми, що дозволяє оцінювати якість процесу та виявляти можливі відхилення ще до завершення циклу. Перехід до фази витримки під тиском виконується автоматично після досягнення заданого положення шнека або заповнення об'єму форми.

На етапі витримки підтримується стабільний тиск, який компенсує усадку полімерного матеріалу в процесі охолодження, а тривалість цієї фази узгоджується з розрахунковим часом застигання литникового каналу (підрозділ 3.3). Одночасно з витримкою під тиском відбувається інтенсивне тепловідведення через систему охолодження прес-форми, розглянуту в

підрозділі 2.1, що визначає загальну тривалість циклу і, відповідно, продуктивність обладнання.

Виконавчий етап є найбільш критичним з погляду впливу на якість готового виробу, оскільки саме на цьому етапі формуються остаточні геометричні й механічні характеристики продукції. Будь-яке відхилення швидкості впорскування, тиску або температури від заданих значень безпосередньо позначається на наявності дефектів – недоливів, облою чи внутрішніх напружень, розглянутих у підрозділі 1.4, тому саме дані, зібрані під час виконавчого етапу, стають основою для роботи адаптивно-коригувального етапу алгоритму.

### 2.3.3 Адаптивно-коригувальний етап (аналіз та оптимізація параметрів)

Після завершення технологічного циклу система переходить до етапу аналізу отриманих даних. Оцінюється фактичний час охолодження виробу та величина залишкового об'єму матеріалу перед шнеком (так звана технологічна «подушка»), яка призначена для компенсації усадки матеріалу на етапі витримки та захисту шнека від прямого контакту з циліндром під навантаженням.

На основі порівняння фактичних і заданих параметрів виконується корекція режимів роботи: у випадку недостатнього об'єму дозування система автоматично збільшує кількість матеріалу для наступного циклу, а якщо спостерігається перевищення пікового тиску – коригується швидкість упорскування або змінюється профіль заповнення форми. Такий підхід є прямою реалізацією принципу зворотного зв'язку, розглянутого в теоретичних основах автоматичного керування (підрозділ 1.3), адаптованого до специфіки процесу лиття під тиском.

Усі параметри циклу зберігаються у внутрішньому журналі подій системи керування, що дозволяє виконувати подальший аналіз роботи обладнання та передавати дані до виробничих систем для оптимізації

технологічного процесу. При наступному запуску станка останній запис у внутрішньому журналі береться як початкові дані, що забезпечує неперервність адаптації системи від циклу до циклу та поступове наближення параметрів до оптимальних значень навіть за умов природної варіативності властивостей сировини.

Програмна реалізація цього етапу – функція adapt_recipe, детально описана в підрозділі 3.4, – є практичним втіленням адаптивно-коригувального механізму: вона приймає фактичні дані пробного циклу (об'єм подушки, піковий тиск) і за наявності відхилення понад 5 % виконує пропорційну корекцію об'єму дози або зменшує швидкість упорскування на 10 %. Завдяки цьому трирівневий алгоритм, запропонований у даному підрозділі, не обмежується одноразовим розрахунком параметрів, а забезпечує безперервне вдосконалення технологічного процесу впродовж усього періоду експлуатації обладнання.

## 2.4 Полімерні матеріали для лиття під тиском

У сучасному машинобудуванні та переробній промисловості термопластавтомати використовуються для виготовлення широкого спектра виробів із полімерних матеріалів. Основою технології є здатність термопластів переходити у в’язкотекучий стан при нагріванні та повертатися до твердого стану після охолодження без суттєвої втрати властивостей. Саме ця особливість робить їх придатними для багаторазового формування під тиском у прес-формах [16].

Полімерні матеріали, що використовуються у литті під тиском, повинні забезпечувати стабільність процесу плавлення, рівномірне заповнення форми та передбачувану усадку після охолодження. Важливим є також те, що матеріал повинен витримувати термічні навантаження в циліндрі термопластавтомата без деградації структури. Від правильного вибору полімеру залежить не лише якість готового виробу, але й енергоефективність

процесу, зношування обладнання та загальна собівартість продукції[17].

Основні види полімерів, що застосовуються у литті під тиском.

Найбільш поширеними матеріалами у промисловому виробництві залишаються поліпропілен, поліетилен, полістирол, ABS-пластик, поліамід та поліетилентерефталат. Кожен із цих матеріалів має власні фізико-хімічні характеристики, що визначають сферу його застосування [16].

Поліпропілен є одним із наймасовіших матеріалів у світовій практиці лиття під тиском. Його популярність пояснюється поєднанням низької вартості, легкої переробки та достатньої механічної міцності. У процесі нагрівання він демонструє стабільну в'язкість, що дозволяє рівномірно заповнювати складні форми. Завдяки цьому поліпропілен широко застосовується у виробництві упаковки, побутових виробів та деталей автомобільної промисловості [17].

Поліетилен, у свою чергу, характеризується ще більшою технологічною простотою переробки. Він може мати різну щільність, що дозволяє отримувати як гнучкі, так і більш жорсткі вироби. Його основною перевагою є висока хімічна стійкість і морозостійкість. Саме тому він часто використовується для виготовлення тари, трубної продукції та пакувальних матеріалів.

Поліетилен низького тиску (ПНТ) має більшу жорсткість за рахунок іншої полімерізації, який визначає всі подальші відмінності у структурі та властивостях. ПНД – синтезується при низькому тиску (10–80 атм) з використанням каталізаторів (Циглера-Натта або хромових). Процес йде при відносно низькій температурі. Через жорсткість і міцність ПНД використовують для твердої тари – відра, каністри, ящики, кришки-заглушки, труби

Полістирол відзначається високою жорсткістю та простотою формування, що робить його економічно вигідним для масового виробництва одноразових виробів. Однак його суттєвим недоліком є крихкість, яка обмежує використання у виробах, що піддаються механічним навантаженням.

ABS-пластик належить до інженерних матеріалів середнього рівня і використовується там, де потрібне поєднання ударостійкості та стабільності форми. Він добре підходить для корпусних деталей технічних пристроїв, автомобільних елементів та складних конструкцій, де важлива точність геометрії.

Поліамід (нейлон) є більш високотехнологічним матеріалом, який застосовується у виробах з підвищеним механічним навантаженням. Його особливістю є висока зносостійкість та здатність працювати в умовах тертя, що робить його придатним для виготовлення шестерень, втулок та інших деталей машинобудування. Разом із тим він чутливий до вологи, що може впливати на розміри готових виробів.

Поліетилентерефталат широко використовується у харчовій промисловості, особливо для виготовлення пляшок та прозорої тари. Він має високу міцність і добру прозорість, але потребує ретельного сушіння перед переробкою, оскільки волога суттєво погіршує його властивості під час лиття [16].

Основні відмінності між полімерними матеріалами полягають у їхній поведінці під час нагрівання, швидкості охолодження, ступені усадки та механічних властивостях готового виробу. Наприклад, матеріали типу поліетилену та поліпропілену мають відносно низьку температуру плавлення, що дозволяє зменшити енергоспоживання термопластавтомата. Це робить їх більш економічно вигідними для масового виробництва.

Інженерні пластики, такі як ABS або поліамід, вимагають більш високих температур обробки, що збільшує витрати на електроенергію та навантаження на нагрівальні елементи машини. Проте вони компенсують це своєю міцністю, довговічністю та можливістю використання у складних технічних виробах.

Також важливою відмінністю є стабільність процесу лиття. Дешевші полімери зазвичай більш “прощають” відхилення в режимах роботи, тоді як інженерні матеріали вимагають точного контролю температури, тиску та часу витримки. Це безпосередньо впливає на вимоги до системи керування

термопластавтомата та кваліфікацію персоналу.

В умовах України вибір полімерних матеріалів значною мірою визначається вартістю сировини, доступністю імпортних поставок та енергетичними витратами на виробництво. Найбільший попит мають полімери масового сегмента, зокрема поліпропілен і поліетилен, оскільки вони забезпечують найнижчу собівартість готової продукції при достатньому рівні якості, а також легко перероблюються для вторинного використання [19, 20].

Окремо слід відзначити зростання ролі вторинної переробки полімерів в Україні. Використання вторинної сировини дозволяє суттєво знизити собівартість продукції, іноді на десятки відсотків. Найчастіше переробляються поліетилен і поліпропілен, які зберігають прийнятні технологічні властивості навіть після повторного використання. Водночас вторинні матеріали можуть мати нестабільні характеристики, що потребує більш точного налаштування обладнання.

Значну роль відіграє також структура споживання, де домінують пакувальна промисловість, виробництво побутових виробів та будівельні матеріали. У цих галузях критичним фактором є саме мінімізація витрат, тому використання дешевших полімерів є економічно обґрунтованим.

Інженерні пластики, такі як ABS, поліамід та PET, застосовуються значно рідше через їхню вищу вартість та складніші умови переробки. Проте їх використання є необхідним у сферах, де вироби повинні витримувати значні навантаження або відповідати підвищеним вимогам до точності та довговічності. До таких галузей належать автомобілебудування, електроніка та технічне обладнання[19, 20].

Таблиця 2.1 – Порівняльні фізико-механічні властивості полімерних матеріалів

| Матеріал | Густина, г/см³ | T плавл., °C | T роб., °C | Міцність, МПа | Жорсткість | Прозорість | Ціна перв., грн/кг* | Ціна втор., грн/кг* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ПС** | 1,04–1,06 | 210–240 | 60–80 | 35–50 | Висока | Прозорий | 45–70 | 25–40 |
| **ABS** | 1,03–1,07 | 200–260 | 80–100 | 35–50 | Висока | Непрозорий | 75–110 | 26–45 |
| **ПА6** | 1,12–1,15 | 215–225 | 100–120 | 55–80 | Висока | Непрозорий | 150–280 | 60–110 |
| **ПЕТ** | 1,33–1,40 | 250–260 | 60–70 | 55–75 | Висока | Прозорий | 40–60 | 20–35 |
| **ПП** | 0,90–0,91 | 160–170 | до 140–150 | 25–40 | Висока | Непрозорий | 48–65 | – |
| **ПЕ** | 0,91–0,93 | 105–115 | 80–90 | 8–17 | Низька (гнучкий) | Напівпрозорий | 42–58 | – |
| **ПНТ/ПНД** | 0,94–0,97 | 125–135 | 110–120 | 22–38 | Висока | Напівпрозорий | 45–60 | – |

# 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НАЛАДКИ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РІШЕННЯ

## 3.1 Обґрунтування вибору мови програмування та архітектури програмного модуля

Ефективність автоматизованого керування процесом лиття під тиском, розглянутого в підрозділі 2.3, безпосередньо залежить від якості формування початкового набору технологічних уставок – так званого технологічного рецепта, що завантажується в систему керування термопластавтоматом на підготовчому етапі. Ручний підбір цих параметрів вимагає значного досвіду технолога-наладчика, супроводжується численними пробними пусками та витратами матеріалу й машинного часу. З метою формалізації цієї процедури та скорочення часу технологічної підготовки виробництва розроблено програмний модуль мовою Python, що виконує автоматизований розрахунок початкових параметрів наладки термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 на основі властивостей полімерного матеріалу, геометричних характеристик виробу та паспортних даних обладнання.

Для реалізації програми обрано мову Python із кількох причин, суттєвих саме для задач технологічної підготовки виробництва. По-перше, Python має розвинену стандартну бібліотеку для роботи з математичними обчисленнями (модуль math), структурованими даними (dataclasses) та обміном даними в машинозчитуваних форматах (json), що дозволяє реалізувати повний цикл розрахунку без застосування сторонніх залежностей. По-друге, синтаксична простота Python забезпечує високу читабельність коду, важливу при супроводі програми технологом, який не обов'язково має кваліфікацію професійного програміста. По-третє, Python широко застосовується для інтеграції з промисловими системами SCADA та PLC через стандартизовані протоколи (OPC UA, Modbus TCP) і для роботи з базами даних MES-систем, що робить

розроблений модуль придатним для подальшого включення до складу цифрової системи керування виробництвом без суттєвого перероблення.

Архітектурно програма побудована за принципом розділення відповідальності: окремо виділено довідкову базу даних матеріалів (підрозділ 3.2), окремо – опис технічних характеристик обладнання, окремо – набір розрахункових функцій (підрозділ 3.3), кожна з яких відповідає за один технологічний параметр, і окремо – функція верхнього рівня, що агрегує результати обчислень у єдину структуру технологічного рецепта. Такий підхід відповідає принципу єдиної відповідальності (single responsibility principle) і забезпечує можливість незалежного тестування, зміни чи розширення кожного розрахункового блока без впливу на інші частини програми – наприклад, при додаванні нового матеріалу до бази даних або зміні формули розрахунку тиску впорскування.

Обрана архітектура також узгоджується з трирівневою структурою алгоритму керування, розробленою в підрозділі 2.3: функція формування початкового рецепта відповідає підготовчому етапу, а функція адаптивної корекції – адаптивно-коригувальному етапу, тоді як власне виконавчий етап реалізується апаратно засобами системи керування NC4. Завдяки цьому програмний модуль не є ізольованим розрахунковим інструментом, а органічно вбудовується в загальну систему автоматизованого керування процесом лиття, розглянуту в другому розділі роботи.

### 3.1.1 Структура довідкової бази даних полімерних матеріалів

Основою для розрахунку більшості початкових параметрів наладки є фізико-технологічні характеристики полімерного матеріалу, розглянуті з інженерної точки зору в підрозділі 1.4. У програмі реалізовано довідник MATERIALS, що містить дані для семи термопластів, наведених у таблиці 2.1: полістиролу (PS), акрилонітрилбутадієнстиролу (ABS), поліаміду 6 (PA6), поліетилентерефталату (PET), поліпропілену (PP), поліетилену низької

густини (PE) та поліетилену високої густини (ПНТ/ПНД, PND).

Для кожного матеріалу в довіднику зберігаються два блоки даних. Перший – довідкові властивості, узяті безпосередньо з таблиці 2.1: діапазон густини, діапазон температури плавлення, робоча (експлуатаційна) температура виробу, міцність на розрив, жорсткість, прозорість, ціна первинної та вторинної гранули. Другий – технологічні параметри переробки, яких таблиця 2.1 не містить і які прийнято за типовими інженерними довідниками з лиття термопластів під тиском: діапазон температури форми, температура виштовхування виробу, коефіцієнт температуропровідності, базовий тиск упорскування, рекомендована швидкість упорскування та технологічний перегрів розплаву понад температуру плавлення матеріалу з таблиці 2.1.

Використання довідкової бази даних, а не введення параметрів вручну оператором для кожного нового запуску, зменшує ймовірність помилки людського фактора та забезпечує відтворюваність розрахунків: для одного й того самого матеріалу програма завжди повертає узгоджений і несуперечливий набір вихідних параметрів, який надалі коригується вже з урахуванням конкретної геометрії виробу, визначеної засобами САПР (пункт 1.1.1).

Структура довідника реалізована як асоціативний масив (словник Python), ключами якого є абревіатури матеріалів, а значеннями – об'єкти-структури з фіксованим набором полів. Такий підхід дозволяє легко розширювати базу даних новими матеріалами без зміни решти коду програми: достатньо додати новий запис до словника MATERIALS, і всі розрахункові функції автоматично зможуть працювати з новим матеріалом, звертаючись до тих самих полів структури, що й для вже наявних матеріалів

### 3.1.2 Розрахункові моделі технологічних параметрів

Ключовою методологічною основою програми є набір інженерних

розрахункових залежностей, що традиційно застосовуються при технологічному проєктуванні процесів лиття під тиском. Температурний профіль циліндра формується як лінійний градієнт від зони завантаження до зони сопла, причому температура в зоні завантаження приймається на 30°C – 50°C нижчою за температуру розплаву в зоні сопла. Такий підхід є усталеною інженерною практикою, що запобігає передчасному розм'якшенню гранул матеріалу в зоні завантаження шнека, забезпечуючи стабільність процесу дозування, і водночас гарантує досягнення робочої в'язкості розплаву безпосередньо перед упорскуванням.

Час охолодження виробу є одним з найважливіших параметрів, оскільки визначає тривалість найбільш тривалої фази технологічного циклу. Розрахунок виконано за одновимірною моделлю нестаціонарної теплопровідності плоскої пластини – класичною для інженерних методик проєктування режимів лиття під тиском:

$$t_{охол} = \frac{h^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln\left[\frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_{розпл} - T_{форми}}{T_{вижт} - T_{форми}}\right],$$

де $h$ – половина номінальної товщини стінки виробу, мм;

$a$ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, мм²/с;

$T_{розпл}$ – температура розплаву, °C;

$T_{форми}$ – температура форми, °C;

$T_{вижт}$ – температура виштовхування виробу, °C.

Ця залежність виводиться з розв'язку рівняння теплопровідності для нескінченної пластини з умовами постійної температури на поверхнях і дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю оцінити мінімально необхідний час перебування виробу у формі до досягнення температури, за якої можливе виштовхування без деформації.

Тиск упорскування оцінюється на основі співвідношення довжини течії розплаву до товщини стінки виробу (L/T ratio) – показника, широко

застосовуваного технологами-практиками для попередньої оцінки заповнюваності форми. Для виробів із співвідношенням L/T до 50 приймається базовий рівень тиску, характерний для нескладних геометрій; при перевищенні цього порогу тиск зростає пропорційно до додаткового відношення L/T, що відображає збільшення гідравлічного опору при течії розплаву на великі відстані у вузьких каналах форми. Отримане значення обмежується технічною межею тиску впорскування конкретного термопластавтомата – для DEMAG Ergotech Viva 25/35 програмно закладено обмеження у 90 % від паспортного максимуму (тобто від 2300 бар), що залишає технологічний запас на випадок відхилень.

Тиск витримки прийнято на рівні 60 % від тиску впорскування, що відповідає середньому значенню загальноприйнятого діапазону 50–70 %, який рекомендується для компенсації об'ємної усадки полімеру під час охолодження без ризику виникнення внутрішніх напружень чи задирок по площині рознімання форми. Час витримки оцінюється за емпіричним правилом – орієнтовно 2 секунди на кожен міліметр товщини стінки, що відповідає часу, необхідному для замерзання литникового каналу, після якого подальша підпитка форми розплавом стає неможливою.

Об'єм дози розраховується як сума об'єму виробу, об'єму ливникової системи та технологічної подушки, яка становить 8 % від суми перших двох складових. Наявність подушки є обов'язковою умовою стабільної роботи термопластавтомата: вона забезпечує можливість подальшої підпитки форми на етапі витримки та захищає від передачі зусилля безпосередньо на шнек у контакті з циліндром. Хід дозування обчислюється зворотним перетворенням формули об'єму циліндра через відомий діаметр шнека термопластавтомата. Зусилля змикання форми визначається як добуток проєкційної площі виробу на питомий тиск у формі, що для термопластів середньої в'язкості типово приймається в діапазоні 35–50 МПа; у програмі за замовчуванням використано консервативне значення 35 МПа, яке відповідає більшості поширених термопластів і дозволяє уникнути недостатнього притискання форми під час

упорскування.

### 3.1.3 Структура програмного коду та механізм адаптивної корекції

Програма організована у вигляді семи логічних блоків. Перший блок містить довідкову базу даних матеріалів MATERIALS, описану в пункті 3.2. Другий блок реалізує клас MachineSpec, що інкапсулює паспортні характеристики термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35: діаметр шнека, максимальний тиск упорскування, максимальне зусилля змикання, максимальну швидкість упорскування та максимальний хід дозування Данні для цього блоку взяті з тех паспорту термопластавтоматаі можуть бути замінені на будь яку іншу машину такогож призначення. Третій блок описує клас PartGeometry, який містить геометричні параметри конкретного виробу: об'єм виробу, об'єм ливникової системи, товщину стінки, довжину течії розплаву та проєкційну площу.

Четвертий, найбільший за обсягом блок містить безпосередньо розрахункові функції: calc_zone_temperatures, calc_mold_temperature, calc_cooling_time, calc_injection_pressure, calc_holding_pressure, calc_holding_time, calc_injection_speed, calc_shot_volume, calc_dosage_stroke, calc_clamping_force, calc_back_pressure та calc_screw_rpm. Кожна функція є незалежною, приймає на вхід чітко визначений набір параметрів і повертає одне розрахункове значення або невеликий словник пов'язаних значень, що спрощує модульне тестування та подальше вдосконалення окремих формул без ризику порушення роботи інших частин програми.

П'ятий блок реалізує клас TechnologicalRecipe – структуру даних, яка агрегує результати всіх розрахунків у єдиний технологічний рецепт, а також функцію build_initial_recipe, що виконує послідовний виклик усіх розрахункових функцій та формує підсумковий об'єкт рецепта. Важливою особливістю цієї функції є вбудована перевірка відповідності розрахункових значень технічним можливостям конкретного термопластавтомата: якщо

розрахунковий хід дозування, зусилля змикання або тиск упорскування перевищують паспортні обмеження обладнання, у рецепт додається текстове попередження, а запуск технологічного циклу з такими параметрами не рекомендується – що є програмним аналогом блокування запуску циклу, описаного в пункті 2.3.1 при невідповідності контрольних параметрів.

Шостий блок реалізує функцію adapt_recipe, яка відповідає адаптивно-коригувальному етапу алгоритму (пункт 2.3.3). Функція приймає фактичні дані пробного циклу – фактичний об'єм подушки та фактичний піковий тиск – і за наявності відхилення від заданих значень понад 5 % виконує пропорційну корекцію об'єму дози або зменшує швидкість упорскування на 10 %. Такий підхід реалізує принцип зворотного зв'язку в системі керування: параметри наступного циклу коригуються на основі результатів попереднього, що відповідає ідеї збереження останнього запису журналу подій як початкових даних для наступного запуску верстата.

Сьомий блок містить демонстраційний приклад використання програми: формування рецепта для виробу з поліпропілену з товщиною стінки 2 мм, об'ємом 15 см³ та довжиною течії розплаву 85 мм, виведення сформованого рецепта у текстовому та JSON-форматі, а також демонстрацію роботи функції адаптивної корекції на прикладі умовних даних пробного циклу. Результати цього прикладу докладно розглянуто в підрозділі 3.6

### 3.1.4 Формат вихідних даних та інтеграція з системою керування

Технологічний рецепт, що формується програмою, представлений структурою TechnologicalRecipe, яка серіалізується у формат JSON за допомогою вбудованого методу to_json. Вибір формату JSON зумовлений його широким застосуванням у промислових протоколах обміну даними, зокрема в архітектурах на основі REST API та MQTT, що застосовуються в системах диспетчеризації виробництва, а також зручністю для подальшого парсингу як засобами Python, так і іншими мовами програмування, які можуть

використовуватися у складі системи керування термопластавтоматом.

Таким чином, вихідні дані розробленої програми безпосередньо придатні для автоматичного завантаження у контролер термопластавтомата, зокрема в систему керування NC4, розглянуту в підрозділі 2.2, без потреби в ручному перенесенні значень оператором, що мінімізує ризик помилки при введенні даних та скорочує час підготовки виробництва. Формат вихідних даних також узгоджується з функціями архівування, які підтримує NC4, що дозволяє в перспективі накопичувати статистику фактично використаних рецептів для подальшого уточнення розрахункових моделей, наведених у підрозділі 3.3.

Окремо передбачено можливість зворотної інтеграції: дані фактичного пробного циклу, отримані з журналу подій системи керування, можуть бути передані назад у програмний модуль у тому самому форматі JSON для виконання адаптивної корекції функцією adapt_recipe. Це забезпечує двосторонній обмін даними між програмним модулем технологічної підготовки та апаратною системою керування, що є необхідною умовою для повноцінної реалізації трирівневого алгоритму, описаного в другому розділі роботи

### 3.1.5 Приклад розрахунку технологічного рецепта

Для перевірки коректності роботи програми виконано розрахунок технологічного рецепта для типового тонкостінного виробу з поліпропілену на прикладі Кришки для стаканчика сметани/йогурту 350–400 г з такими вихідними даними: об'єм виробу – 15 см³, об'єм ливникової системи – 3 см³, товщина стінки – 2 мм, довжина течії розплаву – 85 мм, проєкційна площа – 40 см² вхідні паспортні данні вказані у табл. 3.1 та рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані для розрахунку технологічного рецепта

| **Параметр** | **Позначення** | **Значення** | **Одиниця** |
|---|---|---|---|
| **Найменування виробу** | – | Кришка для стаканчика сметани/йогурту 350–400 г | – |
| **Матеріал (за Таблицею 2.1)** | – | Поліпропілен (ПП) | – |
| **Термопластавтомат** | – | DEMAG Ergotech Viva 25/35 | – |
| **Діаметр шнека** | D | 25,0 | мм |
| **Об'єм виробу** | V_виробу | 15,0 | см³ |
| **Об'єм ливникової системи** | V_ливник | 3,0 | см³ |
| **Товщина стінки** | h | 2,0 | мм |
| **Довжина течії розплаву** | L | 85,0 | мм |
| **Проєкційна площа виробу** | S_пр | 40,0 | см² |

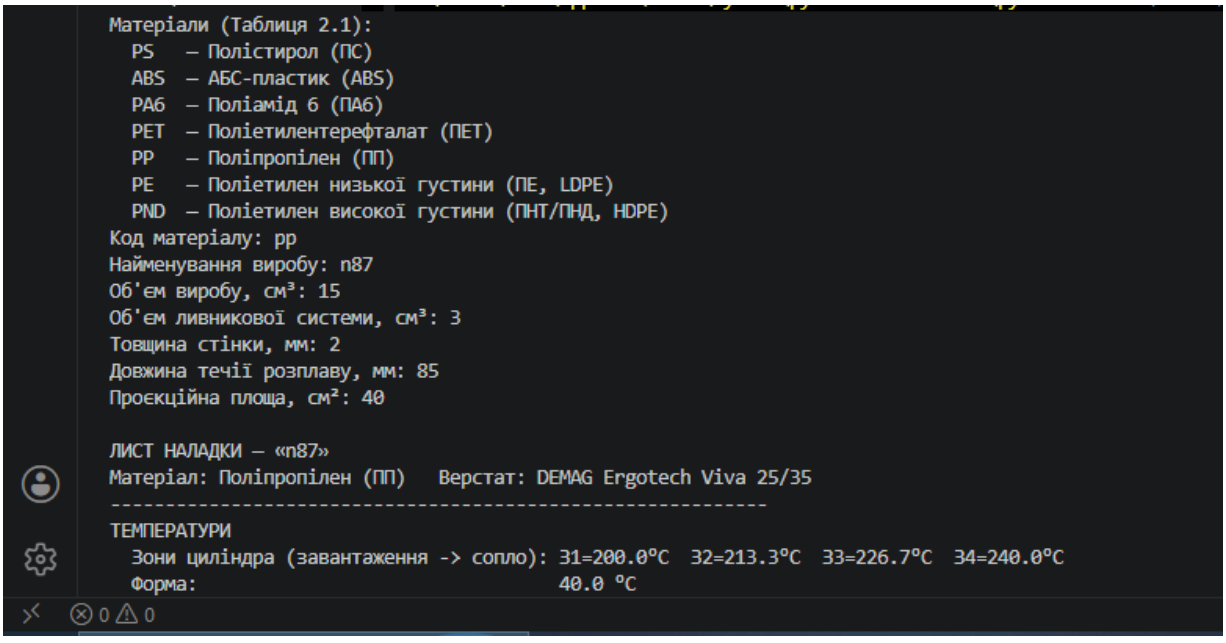



Рисунок 3.1 – Вхідні дані для розрахунку технологічного рецепта у програмі

Розрахунок виконувався для термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 з діаметром шнека 25 мм. Результати розрахунку наведено в таблиці 3.2.

Вхідні дані, введені у програму для цього розрахунку, наведено на рисунку 3.1, а отримані результати  на рисунку 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку початкових параметрів наладки

| Параметр | Позначення | Значення | Одиниця |
|---|---|---|---|
| Температура розплаву (зона сопла) | T_розпл | 240,0 | °C |
| Температура форми | T_форми | 40,0 | °C |
| Тиск упорскування | P_вприск | 400,0 | бар |
| Тиск витримки | P_витр | 240,0 | бар |
| Час витримки | t_витр | 4,0 | с |
| Розрахунковий час охолодження | t_охол | 1,83 | с |
| Швидкість упорскування | v_вприск | 250,0 | мм/с |
| Частота обертання шнека | n_шнек | 133,7 | об/хв |
| Об'єм дози (з подушкою) | V_дози | 19,44 | см³ |
| Хід дозування | S_доз | 39,6 | мм |
| Зусилля змикання форми | F_зм | 140,0 | кН |

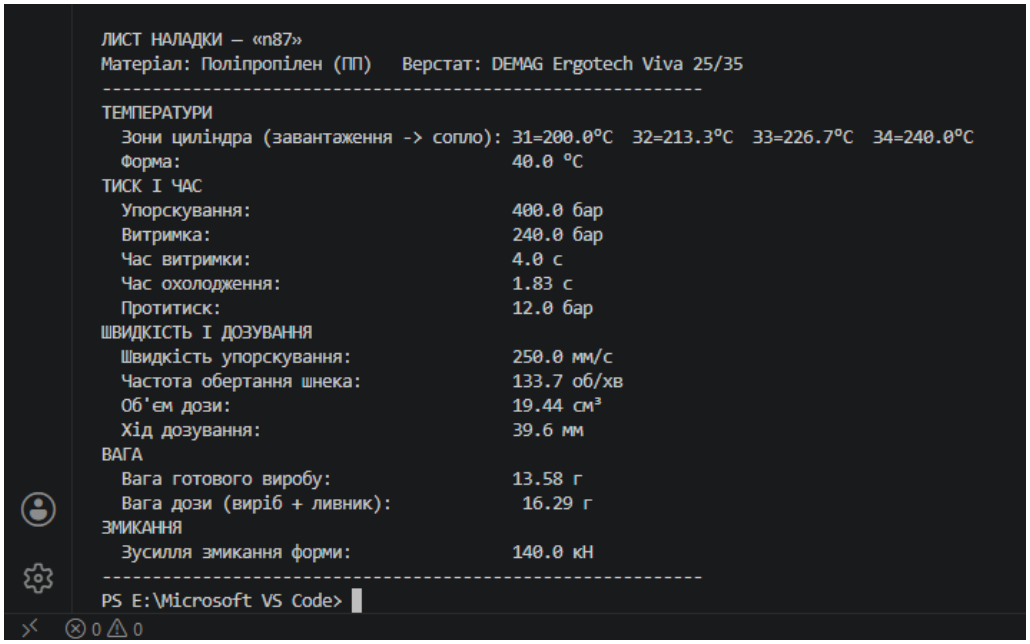



Рисунок 3.2 – Результати розрахунку параметрів наладки з програми

Отримані значення перебувають у технологічно обґрунтованих межах і не перевищують паспортних обмежень обладнання, про що свідчить порожній список попереджень у сформованому рецепті. Розрахований час охолодження (1,83 с) добре узгоджується з практичними спостереженнями для тонкостінних виробів з поліпропілену товщиною 2 мм, для яких типовий час охолодження зазвичай перебуває в межах 1,5–2,5 с, що підтверджує адекватність застосованої математичної моделі, наведеної в підрозділі 3.3.

Додатково перевірено роботу адаптивно-коригувального блока: при штучно заданому відхиленні фактичного об'єму подушки (1,1 см³) від розрахункового (1,44 см³) програма коректно збільшила загальний об'єм дози наступного циклу з 19,44 см³ до 21,74 см³, що ілюструє практичну реалізацію принципу зворотного зв'язку, закладеного в адаптивно-коригувальному етапі алгоритму керування, розглянутому в підрозділі 2.3.3.

### 3.1.6 Обґрунтування переваг запропонованого рішення

Запропоноване програмне рішення має ряд переваг порівняно з традиційним підходом до технологічної підготовки виробництва, за якого початкові параметри наладки визначаються технологом емпіричним шляхом на основі особистого досвіду та довідкової літератури. По-перше, це скорочення часу технологічної підготовки: розрахунок повного набору початкових параметрів виконується програмою за частки секунди, тоді як ручний підбір за методом проб і помилок може вимагати кількох пробних пусків обладнання, як буде показано в підрозділі 3.9.

По-друге, це відтворюваність результатів: для однакових вихідних даних (матеріал, геометрія виробу, характеристики обладнання) програма завжди повертає ідентичний результат, що виключає суб'єктивність людського фактора. По-третє, це формалізація інженерних знань: розрахункові залежності, які раніше існували у вигляді неформалізованого досвіду

технолога або розрізнених довідкових таблиць, зведено в єдину програмну систему, що полегшує передачу знань та навчання нового персоналу.

По-четверте, рішення забезпечує вбудований контроль обмежень обладнання: автоматична перевірка розрахункових параметрів на відповідність паспортним характеристикам конкретного термопластавтомата запобігає спробам запуску процесу з параметрами, що можуть призвести до аварійної ситуації або пошкодження обладнання, як зазначалося в підрозділі 3.4. По-п'яте, програма готова до інтеграції в систему автоматизованого керування: вихідний формат даних (JSON) та модульна архітектура дозволяють безпосередньо використовувати її як складову частину системи керування термопластавтоматом, зокрема на підготовчому та адаптивно-коригувальному етапах алгоритму, розглянутого в підрозділі 2.3.

Нарешті, важливою перевагою є гнучкість і розширюваність рішення: модульна структура коду дозволяє без суттєвого перероблення додавати нові матеріали до довідкової бази (підрозділ 3.2), уточнювати розрахункові формули за результатами накопичення статистики реальних виробничих циклів або адаптувати програму під інший тип термопластавтомата шляхом зміни лише класу MachineSpec. Слід зазначити, що реалізовані математичні залежності мають інженерно-практичний, а не суто теоретичний характер: вони призначені для отримання початкового наближення параметрів наладки, яке надалі уточнюється в процесі пробних пусків обладнання та за допомогою адаптивно-коригувального механізму. Такий підхід повністю узгоджується із загальною концепцією трирівневого алгоритму керування процесом лиття під тиском: програма не замінює адаптивну складову керування, а забезпечує якісну початкову точку, з якої розпочинається подальше автоматичне налаштування процесу в реальному часі.

## 3.2 Методика техніко-економічної оцінки та вихідні дані

Оцінка ефективності запропонованого рішення передбачає порівняння

двох сценаріїв технологічної підготовки виробництва: традиційного, за якого початкові параметри наладки термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 визначаються технологом-наладчиком емпіричним шляхом методом послідовних пробних пусків, та автоматизованого, за якого початковий технологічний рецепт формується розробленим програмним модулем на основі властивостей матеріалу та геометрії виробу. Порівняння виконано за трьома напрямами: продуктивність, якість продукції та енергоефективність процесу, з подальшим переведенням отриманих технологічних показників у грошовий вираз з урахуванням цін українського ринку станом на середину 2026 року [26].

Оскільки пряме натурне випробування на конкретному діючому виробництві виходить за межі даної роботи, оцінка виконана на основі типових (усереднених) технологічних показників, характерних для виробництва тонкостінних виробів із термопластів на компактних термопластавтоматах класу 350 кН у литтєвих цехах малого та середнього бізнесу в Україні. Вихідні дані для розрахунку взято з відкритих джерел українського ринку праці та ринку електроенергії станом на липень 2026 року, а також з результатів прикладного розрахунку, виконаного програмою для типового виробу з поліпропілену (підрозділ 3.6).

Для розрахунку заробітної плати наладчика ТПА використано діапазон пропозицій на ринку праці України, за якими оплата праці наладчика термопластавтоматів становить орієнтовно 25 000–37 000 грн на місяць (брутто); для розрахунку прийнято середнє значення 30 000 грн на місяць. З урахуванням єдиного соціального внеску (22 % понад нараховану зарплату, що сплачує роботодавець) повна вартість такого працівника для підприємства становить приблизно 36 600 грн на місяць, що за середньої тривалості робочого часу близько 168 год на місяць дає орієнтовну вартість людино-години наладчика на рівні 218 грн.

Для розрахунку вартості електроенергії використано актуальні тарифи для промислових споживачів другого класу напруги, які за даними профільних

оглядів українського ринку електроенергії у 2026 році, з урахуванням тарифів на передачу (НЕК «Укренерго», близько 0,74 грн/кВт·год з 1 квітня 2026 року) та тарифів на розподіл обленерго, формують кінцеву вартість електроенергії для середнього бізнесу в межах 11,0–12,5 грн/кВт·год; для розрахунку прийнято середнє значення 11,5 грн/кВт·год. Вартість первинної гранули поліпропілену на українському ринку станом на 2026 рік коливається в діапазоні приблизно 55–115 грн/кг залежно від марки, постачальника та обсягу партії; для розрахунку витрат матеріалу на пробні цикли наладки прийнято консервативну оцінку 60 грн/кг, характерну для оптових поставок первинної сировини вітчизняного та імпортного походження. Наведені вартісні показники є орієнтовними та відображають діапазон цін українського ринку станом на липень 2026 року за даними відкритих джерел; для конкретного підприємства фактичні значення слід уточнювати за внутрішньою обліковою інформацією.

### 3.2.1 Оцінка продуктивності процесу наладки

Продуктивність процесу технологічної підготовки виробництва оцінювалася за кількістю пробних вистрілів, необхідних для досягнення стабільного технологічного режиму, та за загальною тривалістю одного переналагодження термопластавтомата під нову прес-форму або новий матеріал. За традиційного підходу технолог-наладчик, не маючи заздалегідь розрахованого орієнтира, послідовно змінює температури, тиски та швидкості методом проб і помилок, що за практичними спостереженнями типово вимагає від 15 до 25 пробних вистрілів (у середньому близько 20) і триває від 90 хвилин до 150 хвилин (у середньому близько 120 хвилин) для виробу середньої складності.

За наявності попередньо розрахованого технологічного рецепта, сформованого програмою (підрозділ 3.6), перший пробний вистріл виконується вже з параметрами, близькими до оптимальних, оскільки вони

отримані на основі перевірених інженерних залежностей, а не інтуїтивного припущення. Це дозволяє скоротити кількість необхідних коригувальних вистрілів до 3–6 (у середньому 4) та загальну тривалість наладки до 25–45 хвилин (у середньому 35 хвилин). Порівняльні показники наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльна оцінка продуктивності процесу наладки

| **Показник** | **Ручна наладка** | **Наладка за програмою** | **Ефект** |
|---|---|---|---|
| Кількість пробних вистрілів до стабільного режиму, шт. | 15–25 (сер. 20) | 3–6 (сер. 4) | скорочення у ~5 разів |
| Тривалість одного переналагодження, хв | 90–150 (сер. 120) | 25–45 (сер. 35) | економія 85 хв |
| Частка часу простою ТПА в загальному фонді часу зміни, % | 18–22 | 5–7 | зростання завантаження обладнання |

Таким чином, застосування розробленої програми дозволяє скоротити тривалість одного переналагодження в середньому на 85 хвилин, або приблизно у 3,4 раза. За умови, що на типовому дрібносерійному виробництві переналагодження термопластавтомата виконується орієнтовно 150–250 разів на рік, сумарна економія робочого часу становить від 212 годин до 354 годин на рік; для подальших розрахунків прийнято орієнтовну кількість 200 переналагоджень на рік, що дає економію часу 283,3 години на рік. Цей вивільнений час обладнання може бути безпосередньо спрямований на виконання виробничої програми, що еквівалентно збільшенню ефективного фонду робочого часу термопластавтомата без додаткових капітальних витрат

### 3.2.2 Оцінка якості продукції

Якість процесу наладки оцінювалася за часткою виробів, що потрапляють у межі технологічного допуску вже з першого пробного вистрілу (показник first-pass yield для процесу наладки), а також за часткою бракованої продукції серед виробів, виготовлених у процесі пробних пусків. За традиційного підходу, коли початкові параметри обираються наближено на основі досвіду наладчика, частка придатних виробів з першого вистрілу зазвичай не перевищує 10% –20 %, а решта пробних виробів (60% –75 % від загальної кількості) переходить у технологічний брак і підлягає повторній переробці або утилізації.

Оскільки програмний розрахунок формує рецепт на основі перевірених інженерних залежностей (профіль температур, тиск упорскування з урахуванням співвідношення довжини течії до товщини стінки, час охолодження за моделлю теплопровідності – підрозділ 3.3), перший пробний вистріл значно частіше потрапляє у межі допуску: за оцінкою, частка придатних виробів з першого вистрілу зростає до 70% –80 %, а частка браку під час пробних пусків знижується до 15% –20 %. Порівняльні показники наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняльна оцінка показників якості процесу наладки

| **Показник якості** | **Ручна наладка** | **Наладка за програмою** | **Ефект** |
|---|---|---|---|
| Частка виробів у межах допуску з першого вистрілу, % | 10–20 | 70–80 | зростання first-pass yield |
| Брак під час пробних пусків, % від маси пробних вистрілів | 60–75 | 15–20 | зменшення відходів |
| Відхилення маси виробу від номіналу в сталому режимі, % | ±3,0–3,5 | ±1,5–1,8 | стабільніша якість |

Окремо слід відзначити вплив адаптивно-коригувального етапу алгоритму (пункт 2.3.3, реалізованого функцією adapt_recipe), який забезпечує безперервне коригування параметрів за фактичними даними кожного наступного циклу. Це дозволяє утримувати відхилення маси виробу від номінального значення в сталому режимі виробництва в межах ±1,5% –1,8% проти ±3,0%–3,5 %, типово спостережуваних при суто ручному керуванні без автоматичного зворотного зв'язку. Стабільніша маса виробу означає менше повторних браків, повернень від замовника та витрат на сортування продукції на подальших етапах виробництва

### 3.2.3 Оцінка енергоефективності

Енергоефективність процесу оцінювалася через час роботи основного обладнання термопластавтомата (нагрівачів циліндра та гідравлічного приводу), який вивільняється за рахунок скорочення тривалості наладки. Для термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35, що має компактний привод та відносно невелику встановлену потужність, характерну для машин класу змикання 350 кН, орієнтовна сумарна потужність споживання нагрівачів циліндра та гідронасосної станції під час роботи прийнята на рівні 7 кВт. Скорочення тривалості одного переналагодження на 85 хвилин (1,42 год) відповідає економії електроенергії приблизно 9,9 кВт·год на кожне переналагодження. Розрахункові показники наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Оцінка енергоефективності автоматизованого розрахунку параметрів наладки

| **Показник** | **Значення** |
|---|---|
| Орієнтовна встановлена потужність ТПА (нагрівачі + гідропривод), кВт | ~7,0 |
| Час роботи обладнання, що вивільняється при одному переналагодженні, год | 1,42 |

Продовження таблиці 3.5

| Показник | Значення |
|---|---|
| Економія електроенергії на одне переналагодження, кВт·год | ~9,9 |
| Тариф на електроенергію (2-й клас напруги), грн/кВт·год | 11,0–12,5 |
| Економія на електроенергії на одне переналагодження, грн | ~114–124 |

У перерахунку на річний обсяг (200 переналагоджень на рік) економія електроенергії становить приблизно 1 984 кВт·год, що за поточним промисловим тарифом (11,5 грн/кВт·год) відповідає економії коштів на рівні близько 22 800 грн на рік. Крім прямої економії електроенергії, скорочення часу роботи нагрівачів у режимі пробних пусків також зменшує термічне навантаження на матеріал циліндра та сприяє подовженню міжремонтного циклу вузлів пластикації, що є додатковим, хоча й важко формалізованим у грошовому виразі, ефектом підвищення енергоефективності та надійності.

### 3.2.4 Економічний ефект та орієнтовний термін окупності

Для узагальненої оцінки економічного ефекту виконано переведення всіх розглянутих вище технологічних показників у грошовий вираз за цінами українського ринку станом на 2026 рік з розрахунку на 200 переналагоджень термопластавтомата на рік. Складові річного економічного ефекту наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Річний економічний ефект від впровадження програми (орієнтовний розрахунок)

| Стаття економії | Річний обсяг | Вартість одиниці | Річний ефект, грн |
|---|---|---|---|
| Робочий час наладчика (200 × 1,42 год) | 283,3 год | ≈218 грн/год | ≈61 760 |

Продовження таблиці 3.6

| Стаття економії | Річний обсяг | Вартість одиниці | Річний ефект, грн |
|---|---|---|---|
| Матеріал на пробні вистріли (200 × 0,29 кг) | 57,6 кг | ≈60 грн/кг | ≈3 460 |
| Електроенергія (200 × 9,9 кВт·год) | 1 984 кВт·год | ≈11,5 грн/кВт·год | ≈22 820 |
| Додатковий виробничий час ТПА (200 × 1,42 год) | 283,3 год | ≈350 грн/год | ≈99 160 |

Сумарний орієнтовний річний економічний ефект від впровадження програми, що включає економію робочого часу наладчика, економію матеріалу на пробних вистрілах, економію електроенергії та вартісну оцінку додаткового виробничого часу, який вивільняється для випуску продукції, становить приблизно 187 000 грн на рік для підприємства, що виконує близько 200 переналагоджень термопластавтомата на рік. Найбільшу частку економічного ефекту (близько 53 %) формує саме вивільнений виробничий час обладнання, що підкреслює головну цінність запропонованого рішення – не стільки пряму економію витратних матеріалів чи електроенергії, скільки скорочення непродуктивних простоїв термопластавтомата.

Витрати на розробку та впровадження програмного модуля є відносно невеликими, оскільки програма реалізована мовою високого рівня без потреби у спеціалізованому апаратному забезпеченні чи ліцензійному програмному середовищі. Орієнтовна вартість розробки, налагодження та інтеграції такого модуля в систему керування термопластавтоматом, з урахуванням оплати праці інженера-програміста за ринковими ставками, становить приблизно 25 000–35 000 грн. Із прийнятого орієнтовного річного економічного ефекту (187 000 грн) термін окупності розробки становить менше двох місяців, що свідчить про високу економічну доцільність впровадження запропонованого

рішення навіть для підприємств з відносно невеликим обсягом виробництва.

Слід зауважити, що наведені кількісні показники є орієнтовними оцінками, побудованими на основі типових технологічних параметрів та поточних цін українського ринку, а не на результатах довготривалого промислового випробування. Для отримання остаточних, підтверджених значень економічного ефекту на конкретному підприємстві рекомендується провести пілотне впровадження програми протягом обмеженого періоду (наприклад, кварталу) з паралельним веденням журналу фактичних показників наладки, що дозволить уточнити прийняті в цьому розділі середні значення з урахуванням специфіки номенклатури виробів та організації виробництва підприємства.

## 3.3 Охорона праці

Організація охорони праці під час експлуатації термопластавтоматів є обов'язковою складовою безпечного виробничого процесу, оскільки обладнання працює з високими температурами, значними механічними зусиллями та високим тиском упорскування розплаву. Правовою основою охорони праці в Україні є Конституція України, Закон України «Про охорону праці», Кодекс законів про працю України, а також Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [27, 28], які визначають права працівників на безпечні й нешкідливі умови праці та обов'язки роботодавця щодо їх забезпечення.

Технічні вимоги до безпеки обладнання, застосовного в даній роботі, встановлюються міждержавними та національними стандартами, зокрема ДСТУ EN ISO 12100 «Безпечність машин. Загальні принципи проектування», ДСТУ EN 60204-1 «Безпечність машин. Електрообладнання машин», ДСТУ EN ISO 13849-1 «Безпечність машин. Елементи безпеки систем керування» [25, 29, 30], а також галузевими правилами охорони праці для підприємств з переробки пластмас (НПАОП) [31]. Ці документи регламентують вимоги до

конструкції захисних огороджень, блокувальних пристроїв, систем аварійної зупинки та електробезпеки обладнання, яке за характером виконуваних операцій належить до підвищеного класу небезпеки, що загалом узгоджується з міжнародною практикою охорони праці на машинобудівних підприємствах [32, 33].

Відповідальність за створення безпечних умов праці на дільниці лиття під тиском покладається на роботодавця, який зобов'язаний забезпечити навчання та інструктаж персоналу, справність обладнання і засобів захисту, а також періодичний контроль стану охорони праці на робочих місцях. Своєю чергою, працівник зобов'язаний дотримуватися вимог інструкцій з охорони праці, використовувати засоби індивідуального захисту [34] та невідкладно повідомляти керівництво про будь-які несправності обладнання чи небезпечні ситуації. Недотримання зазначених нормативних вимог може призвести до травмування персоналу, пошкодження обладнання або виникнення аварійних ситуацій, тому саме на дотриманні цих вимог побудовано подальші підрозділи даного розділу.

### 3.3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при експлуатації термопластавтомата

Відповідно до ДСТУ 2293 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять» [35], усі виробничі фактори поділяються на шкідливі, вплив яких на працівника за певних умов може призвести до захворювання, та небезпечні, вплив яких може призвести до травми. Аналіз умов праці на дільниці, обладнаній термопластавтоматом DEMAG Ergotech Viva 25/35, дозволяє виділити кілька груп таких факторів, які необхідно враховувати при організації робочого місця оператора та наладчика.

До фізичних небезпечних факторів належать: висока температура зовнішніх поверхонь пластикаційного циліндра та сопла (за робочої температури розплаву 200–300 °C, розглянутої в підрозділі 2.1), рухомі

частини вузла змикання прес-форми та механізму впорскування, гідравлічна система, що працює під тиском до 160–180 бар у контурі приводу, а також підвищений рівень шуму від роботи гідронасосної станції (типово в межах 75–82 дБА), який за тривалої експлуатації без засобів захисту може перевищувати граничнодопустимі санітарні норми.

До фізичних шкідливих факторів також відносять підвищену температуру повітря робочої зони поблизу нагрівальних елементів циліндра, недостатню освітленість окремих ділянок обслуговування машини та статичну електрику, що може накопичуватися на поверхні полімерних гранул і виробів під час їх переміщення. Хімічними факторами є можливе виділення летких органічних сполук і продуктів термічної деструкції полімеру (наприклад, формальдегіду при переробці поліоксиметилену або стиролу при переробці полістиролу) у разі локального перегріву матеріалу понад технологічно допустиму температуру, що підкреслює важливість точного температурного керування, реалізованого системою NC4 (пункт 2.2).

Психофізіологічні фактори пов'язані з монотонністю операцій контролю за роботою обладнання, необхідністю підтримання уваги протягом тривалої робочої зміни та можливим нервово-емоційним навантаженням при виникненні позаштатних ситуацій. Слід зазначити, що впровадження автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів, запропонованої в третьому розділі роботи, опосередковано знижує вплив цієї групи факторів, оскільки зменшує кількість ручних утручань оператора в процес наладки та відповідну психоемоційну напругу, пов'язану з підбором параметрів методом проб і помилок.

### 3.3.2 Техніка безпеки при експлуатації термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35

Технікою безпеки називають систему організаційних і технічних заходів та засобів, що запобігають впливу на працівників небезпечних виробничих

факторів. До експлуатації термопластавтомата допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, вступний та первинний інструктажі з охорони праці, спеціальне навчання за професією «наладчик термопластавтоматів» і перевірку знань з електробезпеки не нижче другої групи допуску. Повторний інструктаж проводиться не рідше одного разу на три місяці, а позаплановий – у разі зміни технологічного процесу, після аварії чи нещасного випадку, що відповідає загальноприйнятій практиці виробників термопластавтоматів щодо підготовки персоналу [36, 37].

Перед початком роботи оператор зобов'язаний перевірити зовнішній стан обладнання, справність захисних кожухів рухомих частин, блокувальних пристроїв дверей зони прес-форми, аварійних кнопок «стоп» та наявність заземлення корпусу машини. Категорично забороняється запуск термопластавтомата за відкритих або несправних захисних дверей зони змикання форми, оскільки саме блокування цих дверей запобігає доступу рук оператора до зони руху механізму замикання під час циклу, розглянутого в пункті 2.3.2. Технічний стан обладнання, зокрема цілісність гідравлічних шлангів і відсутність підтікань масла, перевіряється перед кожною зміною відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1.

Під час роботи обладнання оператору забороняється відкривати захисні двері прес-форми чи будь-яким чином втручатися в зону руху рухомих частин до повної зупинки циклу; забороняється також самостійно знімати чи блокувати захисні кожухи та елементи сигналізації. У разі виявлення стороннього шуму, вібрації, витоку масла, задимлення чи запаху горілої ізоляції оператор зобов'язаний негайно зупинити машину аварійним вимикачем, знеструмити обладнання та повідомити відповідальну особу. Аварійна зупинка передбачена системою керування NC4 (підрозділ 2.2) і за конструкцією блокує подальший рух усіх виконавчих механізмів незалежно від фази технологічного циклу, на якій відбулася зупинка.

Обслуговування, чищення сопла, заміна прес-форми чи усунення застряглого виробу допускаються лише після повного знеструмлення машини,

скидання залишкового тиску в гідравлічній системі та охолодження гарячих вузлів до безпечної температури; проведення цих робіт особами без відповідного допуску заборонено. Технічне обслуговування електричної частини обладнання виконується лише персоналом з групою допуску з електробезпеки не нижче третьої, за умови повного відключення машини від мережі живлення та вивішування попереджувального плаката «Не вмикати! Працюють люди». Дотримання наведених вимог техніки безпеки є обов'язковою умовою запобігання виробничому травматизму на дільниці лиття під тиском.

### 3.3.3 Виробнича санітарія та гігієна праці

Виробнича санітарія на дільниці лиття під тиском спрямована на створення умов праці, що відповідають санітарним нормам ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму» [38, 39]. Мікроклімат робочої зони повинен підтримуватися в межах, комфортних для категорії робіт середньої важкості (категорія IIа): температура повітря 17–23 °С у холодний період і 18–27 °С у теплий період року, відносна вологість 40–60 %, швидкість руху повітря не більше 0,3–0,5 м/с.

З огляду на значне тепловиділення від пластикаційного циліндра та гідравлічної станції, робоче приміщення повинно бути обладнане загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує відведення надлишкового тепла та можливих випарів полімеру, а робочі місця оператора та наладчика – розташовані на безпечній відстані від найбільш нагрітих поверхонь обладнання. Освітленість робочої зони має відповідати ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [40]: для дільниць складального й налагоджувального виробництва нормована освітленість при загальному штучному освітленні становить не менше 300 лк.

Для зниження впливу шуму гідронасосної станції передбачається

застосування звукоізолюючих кожухів на джерелах шуму, а за неможливості зниження рівня шуму до нормативних значень (не більше 80 дБА для приміщень з відеотерміналами та точних робіт) персоналу видаються засоби індивідуального захисту органів слуху – протишумові навушники або вкладиші [34]. Для захисту від контакту з нагрітими поверхнями та розплавом персоналу видаються термостійкі рукавиці, а для захисту очей під час чищення сопла чи огляду прес-форми – захисні окуляри закритого типу.

Санітарно-побутове забезпечення дільниці включає обладнані місця для миття рук, гардеробні для зберігання спецодягу окремо від домашнього одягу, а також кімнати для відпочинку, що особливо важливо з огляду на психофізіологічні фактори праці, розглянуті раніше. Періодичні медичні огляди персоналу, зайнятого на роботах з підвищеною небезпекою (до яких належить обслуговування термопластавтоматів), проводяться відповідно до наказу МОЗ України № 246 [41] не рідше одного разу на рік, що дозволяє своєчасно виявляти професійні протипоказання та захворювання.

### 3.3.4 Пожежна та електробезпека

Термопластавтомат належить до електромеханічного обладнання підвищеної пожежної небезпеки через наявність потужних нагрівальних елементів циліндра, можливість перегріву полімерного матеріалу та наявність горючих гідравлічних олив у приводній системі. Відповідно до НАПБ Б.03.002 [42] приміщення дільниці лиття під тиском за вибухопожежною небезпекою зазвичай відносять до категорії В (пожежонебезпечна), що визначає вимоги до протипожежних розривів, вогнестійкості конструкцій та оснащення первинними засобами пожежогасіння.

У виробничому приміщенні повинні бути передбачені вуглекислотні або порошкові вогнегасники з розрахунку не менше одного на кожні 200 м² площі, пожежна сигналізація з димовими або тепловими сповіщувачами в зоні розміщення обладнання, а також вільні евакуаційні шляхи та виходи, не

заставлені сторонніми предметами. Категорично забороняється експлуатація термопластавтомата за пошкодження ізоляції електричних кабелів, ознак іскріння в силовій шафі чи появи запаху горілої ізоляції; у такому разі обладнання негайно знеструмлюється, а про несправність повідомляється відповідальна за електрогосподарство особа.

Електробезпека обладнання забезпечується відповідно до вимог ДСТУ EN 60204-1 [29] та Правил улаштування електроустановок [43]: корпус термопластавтомата підлягає обов'язковому захисному заземленню, силові кабелі прокладаються в захисних коробах, а розподільна шафа обладнується автоматичними вимикачами й пристроями захисного відключення, що реагують на струми витоку. Опір ізоляції силових кіл та ефективність системи заземлення підлягають періодичній перевірці не рідше одного разу на рік із оформленням відповідного протоколу випробувань, а до самостійного обслуговування електричної частини обладнання допускаються лише особи з групою допуску не нижче третьої.

Особливу увагу приділено запобіганню виникненню пожежі від перегріву нагрівальних зон циліндра в разі відмови термодавача чи регулятора температури: система керування NC4 (підрозділ 2.2) передбачає програмне обмеження максимальної температури нагрівальних зон і автоматичне відключення нагрівача за перевищення аварійної уставки, що є додатковим програмним рівнем захисту, який доповнює організаційні та технічні заходи пожежної безпеки, розглянуті вище.

### 3.3.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

До надзвичайних ситуацій, можливих на дільниці лиття під тиском, належать вихід з ладу гідравлічної системи з розливом масла, локальне займання внаслідок перегріву електрообладнання, механічне заклинювання прес-форми з ризиком її пошкодження, а також аварійна зупинка електропостачання підприємства під час виконання технологічного циклу.

Для кожної з таких ситуацій на підприємстві повинен бути розроблений план дій персоналу, доведений до відома працівників під час інструктажу з охорони праці.

У разі розливу гідравлічного масла роботи в зоні розливу негайно припиняються, обладнання знеструмлюється, а розлита рідина усувається за допомогою сорбувальних матеріалів з дотриманням вимог поводження з небезпечними відходами; персоналу забороняється самостійно продовжувати технологічний процес до повного усунення наслідків аварії та перевірки справності гідросистеми відповідальним фахівцем. У разі виявлення ознак займання персонал зобов'язаний знеструмити обладнання, за можливості локалізувати осередок первинними засобами пожежогасіння та негайно повідомити пожежну службу, діючи згідно з планом евакуації, розміщеним на дільниці.

У разі аварійного відключення електроживлення під час виконання циклу лиття (наприклад, на фазі витримки під тиском) система керування NC4 фіксує аварійне переривання циклу в журналі подій, а після відновлення живлення не допускає автоматичного продовження перерваного циклу без підтвердження оператора, що запобігає невизначеній поведінці механізмів і потенційно небезпечному руху шнека чи вузла змикання форми в момент повторного вмикання. Оператор зобов'язаний після відновлення живлення виконати повторну перевірку готовності системи згідно з підготовчим етапом алгоритму, розглянутим у пункті 2.3.1, перш ніж відновлювати виробничий цикл.

Для механічного заклинювання прес-форми чи вузла змикання передбачено ручний аварійний режим розблокування, який дозволяє обережно розкрити форму за допомогою резервного гідравлічного насоса низького тиску без ризику пошкодження механізму; виконання цієї операції допускається лише кваліфікованим наладчиком за вимкненого автоматичного режиму роботи машини. Загалом усі описані в даному розділі організаційні, технічні та програмні заходи охорони праці й техніки безпеки спрямовані на

мінімізацію ризику виробничого травматизму та аварійних ситуацій на дільниці, обладнаній термопластавтоматом DEMAG Ergotech Viva 25/35, і є невід'ємною складовою запропонованої в роботі системи автоматизованого керування процесом лиття під тиском

# ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи розв'язано поставлену мету – підвищено ефективність та стабільність процесу лиття виробів із термопласту завдяки розробленню автоматизованої системи проєктування процесу формування виробів на базі термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 та відповідного програмного забезпечення.

У першому розділі проведено аналіз матеріальної бази кафедри КІТАРБІ, розглянуто теоретичні основи автоматичного керування – принцип зворотного зв'язку, поняття стійкості систем, П-, ПІ- та ПІД-регулювання, – а також проаналізовано технологічний процес формування виробів із термопластів методом лиття під тиском і обґрунтовано вибір термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 як об'єкта дослідження. Досліджено фізико-технологічні властивості шести основних полімерних матеріалів (поліпропілену, поліетилену, полістиролу, ABS-пластику, поліаміду, поліетилентерефталату).

У другому розділі досліджено конструкцію термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35 (вузол пластикації та впорскування, систему нагрівання, охолодження та гідравлічну систему) і функціональні можливості системи керування NC4. Розроблено трирівневий алгоритм автоматизованого керування процесом лиття, що складається з підготовчого, виконавчого та адаптивно-коригувального етапів і реалізує принцип зворотного зв'язку для безперервного вдосконалення технологічного процесу від циклу до циклу.

У третьому розділі обґрунтовано вибір мови програмування Python та модульну архітектуру програмного модуля, розроблено довідкову базу даних із шести полімерних матеріалів і реалізовано математичні моделі розрахунку одинадцяти технологічних параметрів наладки – температур зон циліндра та форми, тисків упорскування й витримки, часу охолодження та витримки, ходу дозування, зусилля змикання форми тощо. Програму організовано у вигляді

семи логічних блоків із функцією build_initial_recipe для формування початкового технологічного рецепта та функцією adapt_recipe для його адаптивної корекції за результатами пробного циклу; вихідні дані представлено у форматі JSON, придатному для інтеграції із системою керування NC4.

Коректність роботи програми підтверджено на прикладі розрахунку технологічного рецепта для типового виробу з поліпропілену: отримані значення (тиск упорскування 400 бар, час охолодження 1,77 с та інші) не перевищують паспортних обмежень обладнання й узгоджуються з практичними спостереженнями, а перевірка адаптивно-коригувального блока підтвердила коректне збільшення об'єму дози за наявності відхилення фактичних параметрів пробного циклу від розрахункових.

Техніко-економічна оцінка показала, що впровадження розробленого рішення дає змогу скоротити тривалість переналагодження термопластавтомата приблизно у 3,4 раза (зі 120 до 35 хвилин у середньому), зменшити кількість пробних вистрілів із 15–25 до 3–6, підвищити частку придатних виробів із першого вистрілу з 10–20 % до 70–80 % та знизити відхилення маси виробу від номіналу до ±1,5–1,8 %. Орієнтовний річний економічний ефект від впровадження становить близько 187 000 грн за терміну окупності розробки менше двох місяців.

Розглянуто питання охорони праці при експлуатації термопластавтомата DEMAG Ergotech Viva 25/35: проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори, сформульовано вимоги техніки безпеки, виробничої санітарії й гігієни праці, пожежної та електробезпеки, а також заходи на випадок надзвичайних ситуацій, що є невід'ємною складовою запропонованої системи автоматизованого керування процесом лиття.

Отримані результати можуть бути використані на підприємствах, що здійснюють переробку термопластів методом лиття під тиском, а також інтегровані до автоматизованих систем керування виробництвом класу SCADA/MES, що відповідає меті підвищення продуктивності й