

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи магістра
на тему: «Автоматизація переробки пластикових відхотів у філамент для пристроїв 3-Д друку»

Виконав студент 2 курсу, групи АТ-29м
спеціальності 174 “ Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

28

Ільїнський Артем Юрійович

(прізвище та ініціали студента)

Керівник: к.т.н., доц. Янчук В.М.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

Рецензент: д., філос., Кравчук А.Р.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизована система опалення з використанням надлишкового тепла”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.
« 17 » грудня 2025р.

ЗАВДАННЯ

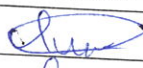
на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Льїнський Артем Юрійович

1. Тема роботи: Автоматизація переробки пластикових відхотів у філамент для пристроїв 3-Д друку
2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «2» грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали звіту про переддипломну практику, технологічна схема переробки пластикових відходів у філамент для 3D-друку, характеристики полімерної сировини, одношнекового екструдера, протягувача та намотувача, заданий діаметр філаменту й допустимі відхилення, температурні режими екструзії, вимоги до регулювання швидкості подачі, протягування та намотування, засоби вимірювання й керування, вимоги до інтерфейсу оператора та безпеки роботи системи.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці):
технічне завдання, аналіз технології екструзії полімерів та характеристик екструзійної лінії, визначення основних параметрів процесу й властивостей сировини, розробка структурної схеми керування, вибір датчиків, виконавчих пристроїв і засобів керування, розробка електричної принципової та функціональної схем автоматизації, конфігурація апаратних засобів, розробка алгоритму й програмного забезпечення системи, створення інтерфейсу оператора

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень): технологічна схема екструзійної лінії, структурна схема системи керування, функціональна схема автоматизації, електрична принципова схема, блок-схема алгоритму керування екструдером, протягувачем і намотувачем, конфігурація апаратних засобів, фрагменти керуючої програми, екранні форми інтерфейсу оператора.

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2	Янчук В.М.		
3,4,5,6	Янчук В.М.		

7. Дата видачі завдання 22.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику	1 тиждень	виконано
2.	Збір та аналіз джерел за темою роботи, огляд існуючих систем	1 тиждень	виконано
3.	Вибір і обґрунтування технічних та програмних засобів	2 тиждів	виконано
4.	Розробка структурної, функціональної та блок-схеми	3 тиждів	виконано
5.	Аналіз отриманих результатів	4 тиждів	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	4 тиждів	виконано

Студент



(підпис, дата)

А.Ю. Ільїнський

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис, дата)

В.М.Янчук

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

1.ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ	8
1.1 Екструзійна лінія як технологічний об'єкт	8
1.1.2 Одношековий екструдер	9
1.1.3 Протягувач.....	11
1.1.4 Намотувач	11
1.2 Особливості технологічного процесу екструзії	12
1.2.1 Процеси в момент екструзії	13
1.2.2 Основні параметри екструзійного процесу	19
1.2.3 Матеріалт що використовуються для екструзії	19
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	25
2.1 Розробка структурної схеми керування.....	25
2.2 Вибір апаратного забезпечення системи автоматизації.....	26
2.2.1 Вибір датчиків	26
2.2.2 Вибір виконавчих пристроїв.....	30
2.2.3 Вибір пристроїв керування	33
2.3 Розробка принципової схеми	38
2.4 Розробка функціональної схеми автоматизації	42
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ	45
4.1 Конфігурація апаратних засобів	45
4.2 Опис логіки керування	49
4.3 Розробка інтерфейсу оператора.....	53

5. ВИСНОВКИ.....	55
6. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

1.ВСТУП

На сьогоднішній день питання поводження з полімерними відходами набуває глобального значення. За даними міжнародних досліджень, щорічний обсяг світового виробництва пластмас перевищує 300 мільйонів тонн, значна частка яких згодом перетворюється на сміття, що забруднює навколишнє середовище. Накопичення пластикових відходів здійснює деструктивний вплив на біосферу, здоров'я живих організмів та призводить до суттєвих економічних збитків.

Враховуючи зазначені виклики, пріоритетним завданням стає пошук та впровадження раціональних методів рециклінгу полімерів. Одним із найбільш перспективних векторів розвитку є переробка вторинної сировини у витратні матеріали (філамент) для адитивних технологій. 3D-друк стрімко інтегрується у виробничі процеси промисловості, медицини, освітньої сфери та побуту. Виготовлення філаменту з переробленого пластику дозволяє не лише мінімізувати обсяги відходів, а й отримувати нові матеріальні ресурси з високою доданою вартістю.

Ключовим фактором підвищення рентабельності та ефективності цього виробництва є автоматизація технологічних процесів. Впровадження автоматизованих систем керування дозволяє оптимізувати етапи підготовки сировини, її подрібнення та безпосередньої екструзії, гарантуючи стабільність характеристик готової продукції. Окрім того, автоматизація забезпечує зниження енергоємності виробництва та мінімізує вплив людського фактору, що позитивно позначається на безпеці праці.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка та практична реалізація автоматизованої системи для переробки вторинних полімерів у філамент для 3D-принтерів. У рамках дослідження передбачено аналіз існуючих технологій рециклінгу, формування технічного завдання на систему керування, створення

прототипу виробничої лінії та проведення комплексу експериментальних випробувань.

Об'єктом дослідження є технологічний процес екструзії полімерних матеріалів при виробництві філаменту для 3D-друку

Успішне виконання поставлених завдань зробить значний внесок у вирішення екологічних проблем утилізації пластику, сприятиме поширенню «зелених» технологій та оптимізації собівартості адитивного виробництва. Результати роботи матимуть практичну цінність для наукової спільноти, інженерів-розробників та підприємств, що спеціалізуються на переробці полімерів.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

1.1 Екструзійна лінія як технологічний об'єкт

Екструзійна лінія являє собою комплекс послідовно інтегрованих технологічних агрегатів, синхронізована робота яких спрямована на забезпечення нормованих фізико-хімічних характеристик готової продукції, філаменту.

На рисунку 1.2 наведено структурну схему екструзійної лінії, що включає такі основні вузли, як екструдер, система охолодження та намотувальний пристрій.

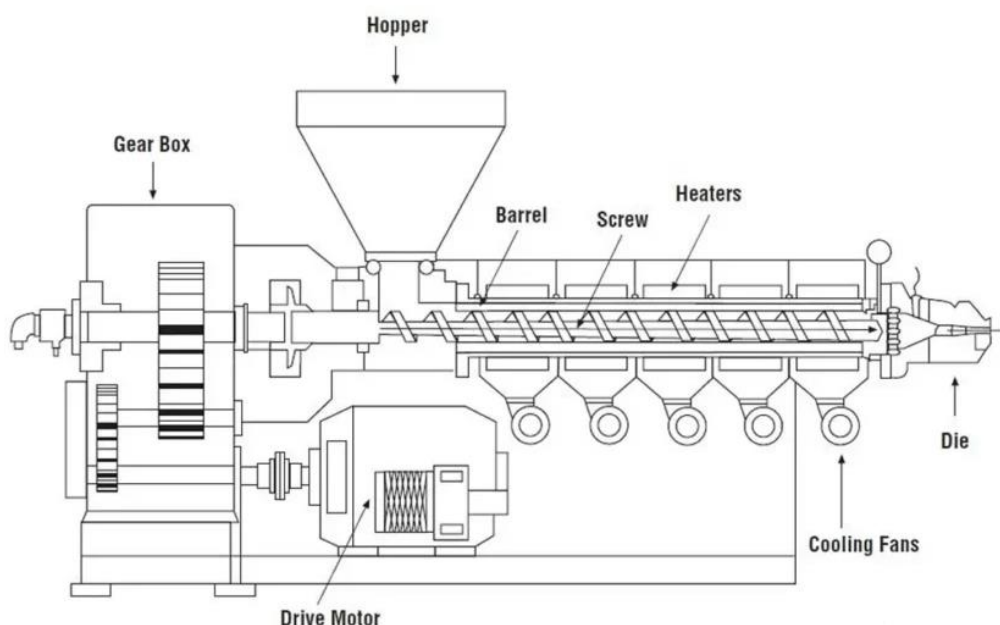


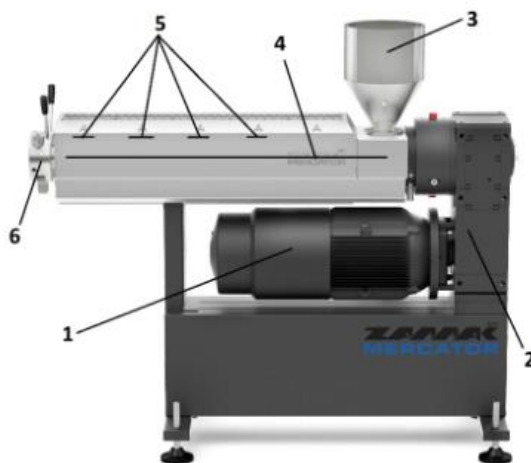
Рис. 1.1 – Лінія екструзії

У робочій зоні екструдера полімерний гранулят піддається процесу пластикації за температурних режимів, що визначаються реологічними властивостями сировини, після чого розплав екструдується крізь формувальну фільтру у вигляді безперервної нитки. Охолодження сформованого виробу здійснюється шляхом проходження через водяну ванну або систему повітряного обдуву.

Забезпечення точності геометричних параметрів філаменту (номінальних діаметрів 1,75 мм або 3,00 мм) досягається завдяки синхронізації роботи намотувального пристрою та системи моніторингу, яка реалізує зворотний зв'язок із датчиком контролю діаметра.

1.1.2 Одношнековий екструдер

Одношнековий екструдер є базовим технологічним вузлом екструзійної установки, призначеним для забезпечення безперервного циклу переробки вихідного полімерного матеріалу (грануляту або подрібненої вторинної сировини). Основна функція агрегату полягає у пластикації сировини до стану гомогенного розплаву з подальшим формуванням геометрії кінцевого виробу шляхом екструдювання маси крізь формувальну головку (фільтеру).



1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – завантажувальний бункер;
4 – циліндр з шнеком; 5 – кільцевий нагрівач під термо-бар'єром; 6 – фільтера

Рис. 1.2 Типовий одношнековий екструдер та його складові

Основні технологічні характеристики одношнекового екструдера:

- L та D – довжина та діаметр черв'якового шнека відповідно;
- відношення L/D ;
- максимальна швидкість обертання шнека, n – об/хв;
- геометричний профіль шнека (загальний діаметр, кут нарізки, глибина нарізки і т.д.):

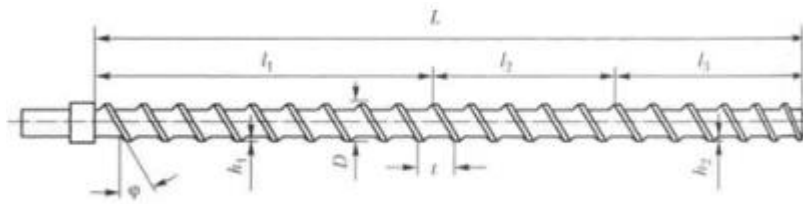


Рис. 1.3 Конструкція шнека

- ступінь стиснення (компресії) – відношення обсягу одного витка черв'яка в зоні завантаження до обсягу одного витка в зоні дозування.

В залежності від відношення L/D екструдери поділяються на:

- короткошнекові – $L/D = 12 \dots 18$;
- довгошнекові – $L/D > 30$.

Найбільш поширеними є екструдери з відношенням $L/D = 20-25$.

Показником роботи екструдера є його ефективність, що виражається формулою 1.5:

$$E = \frac{F}{P'} \quad (1.1)$$

де F – продуктивність екструдера, кг/год;

P – спожита потужність, кВт/год.

Підсистема автоматичного керування екструзійною установкою забезпечує безперервний моніторинг та регулювання таких технологічних параметрів:

- кутової швидкості обертання шнека (реалізація зворотного зв'язку через тахогенератор або датчик Холла);
- температурного режиму нагрівальних елементів (із використанням термопар у контурі зворотного зв'язку);
- температури полімерного розплаву в зоні дозування;
- рівня заповнення завантажувального бункера сировиною (контроль здійснюється ультразвуковим перетворювачем рівня);
- тиску розплаву в робочій зоні (за показами датчика тиску);
- робочої температури електродвигуна приводу;

- геометричних параметрів (діаметра) екструдованого прутка (вимірювання цифровим мікрометром);
- кінематичних параметрів намотувального вузла (швидкості обертання приймальної котушки та переміщення каретки укладача).

1.1.3 Протягувач

Тяговий пристрій, що монтується на вихідній ділянці екструзійної лінії, призначений для транспортування сформованого прутка філаменту із заданою лінійною швидкістю. Функціональне призначення цього вузла полягає у забезпеченні стабільного натягу виробу та запобіганні його гравітаційному провисанню.

Конструктивне виконання протягувача базується на використанні крокового електродвигуна та системи притискних роликів (рис. 1.4).



Рис. 1.4 Конструкція протягувача

1.1.4 Намотувач

Намотувальний пристрій призначений для безперервного прийому, акумуляції та впорядкованого укладання філаменту, що надходить із виходу екструдера, на приймальну тару.

У конструктивному плані агрегат складається з двох ключових кінематичних вузлів: механізму обертання котушки та системи лінійного переміщення (каретки укладача) (рис. 1.5).



Рис. 1.5 Намотувач філаменту

Каретка укладача, здійснюючи зворотно-поступальний рух в межах робочої ширини бобіни, забезпечує рівномірний розподіл витків та стабілізацію натягу полімерної нитки.

З метою обліку обсягу виробленої продукції конструкцію намотувального вузла оснащено засобами вагового контролю або лічильником метражу.

До переліку параметрів, що підлягають моніторингу та регулюванню з боку системи автоматичного керування, належать кутова швидкість намотування (об/хв) та сумарна довжина екструдованого філаменту.

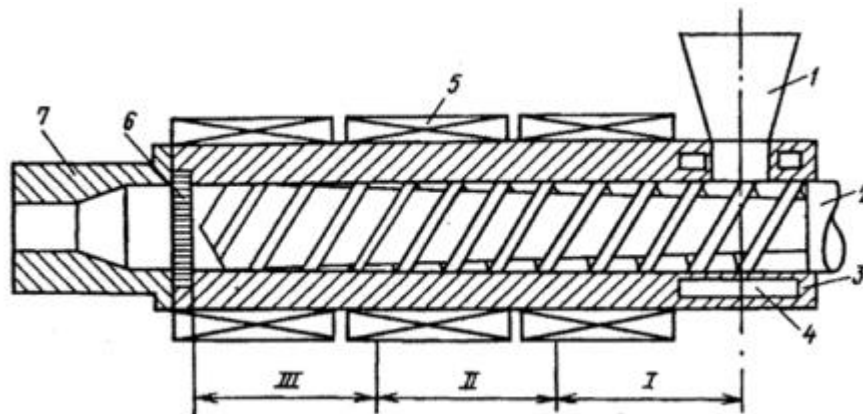
1.2 Особливості технологічного процесу екструзії

Екструзія визначається як технологічний процес переробки полімерних матеріалів, що реалізується методом безперервного витискання розплавленої маси крізь формувальний інструмент (фільєру або сопло), конфігурація вихідного отвору якого детермінує профіль поперечного перерізу готового виробу.

Базовим технологічним обладнанням для забезпечення екструзійного циклу виступає шнековий (черв'ячний) екструдер, оснащений екструзійною головкою. У процесі функціонування агрегату відбувається перехід вихідної полімерної сировини у в'язкотекучий стан, її пластикація та подальше нагнітання під тиском у канал формувальної фільєри.

1.2.1 Процеси в момент екструзії

Технологічний процес екструзії складається з послідовного переміщення матеріалу в міжгвинтовому просторі шнека, який умовно поділений на три ділянки (рис. 1.6).



1 – бункер; 2 – шнек; 3 – циліндр; 4 – порожнина для циркуляції води;

5 – нагрівач; 6 – решітка з сіткою; 7 – фільєра

I – зона живлення; II – зона пластифікації; III – зона дозування розплаву

Рис. 1.6 Схема одношнекового екструдера

Розподіл робочого об'єму на зони I–III здійснюється за функціонально-технологічним принципом і визначається домінуючою операцією, що виконується на відповідній ділянці шнека. Протяжність зазначених зон уздовж осі шнека є змінною величиною, що залежить від реологічних властивостей полімеру, температурно-швидкісних параметрів процесу та інших технологічних факторів.

Матеріальний циліндр екструдера характеризується наявністю дискретних зон термостатування, довжина яких визначається схемою розташування

нагрівальних елементів на корпусі та їхніми температурними уставками. Слід зазначити, що геометричні межі функціональних зон шнека (I–III) та зон зовнішнього обігріву можуть не співпадати.

Сировина, що подається у завантажувальний бункер, може мати різний агрегатний стан та дисперсність: порошок, гранулят або стрічкові фрагменти. Стабільність якісних показників готового виробу безпосередньо корелює з рівномірністю дозування матеріалу.

Оптимальним видом сировини для живлення екструдера є гранульований полімер. Це зумовлено зниженою схильністю гранул до ефекту склепіння у бункері порівняно з порошкоподібними матеріалами, що мінімізує ризик виникнення пульсацій потоку розплаву на виході з головки.

Заповнення міжвиткового об'єму шнека під завантажувальною воронкою відбувається на ділянці довжиною $(1,0 \div 1,5)D$, де D — діаметр шнека. У разі утворення заторів (склепін) на стінках бункера подача матеріалу до робочого органу припиняється. Для запобігання цьому явищу конструкцію бункера доцільно оснащувати механічними ворошителями (змішувачами).

Показник сипучості матеріалу знаходиться в оберненій залежності від його вологості: підвищення вмісту води погіршує сипучість. У зв'язку з цим технологічний процес передбачає обов'язкове попереднє сушіння сировини у сушильних бункерах за температури $80 \dots 90$ °C.

З метою підвищення продуктивності екструзійного обладнання застосовують попередній підігрів грануляту. Суттєвого зростання продуктивності (у 3–4 рази) можливо досягти шляхом використання вузлів примусової подачі матеріалу з бункера до зони завантаження шнека.

У процесі ущільнення матеріалу в міжвитковому просторі відбувається витіснення повітря через завантажувальний бункер (зворотна дегазація). Неповне видалення газової фази призводить до її оклюзії в розплаві, що спричиняє утворення мікропорожнин у структурі готового виробу та класифікується як брак продукції.

Варіативність рівня заповнення бункера сировиною безпосередньо впливає на коефіцієнт наповнення шнека. Для забезпечення стабільності процесу бункер оснащується автоматизованою системою контролю рівня (дискретними або аналоговими датчиками), яка ініціює дозавантаження матеріалу при досягненні встановлених граничних значень.

Подача сировини до завантажувального бункера екструдера, як правило, реалізується із застосуванням систем пневмотранспорту.

У процесі тривалої експлуатації обладнання існує ризик локального перегріву зони завантаження (ділянки циліндра під лійкою та корпусу бункера). Це явище може спричинити передчасну агломерацію (злипання) гранул та блокування їх надходження до робочого органу. Для запобігання перегріву конструкція корпусу в цій зоні передбачає наявність внутрішніх порожнин для примусової циркуляції холодоагента (води).

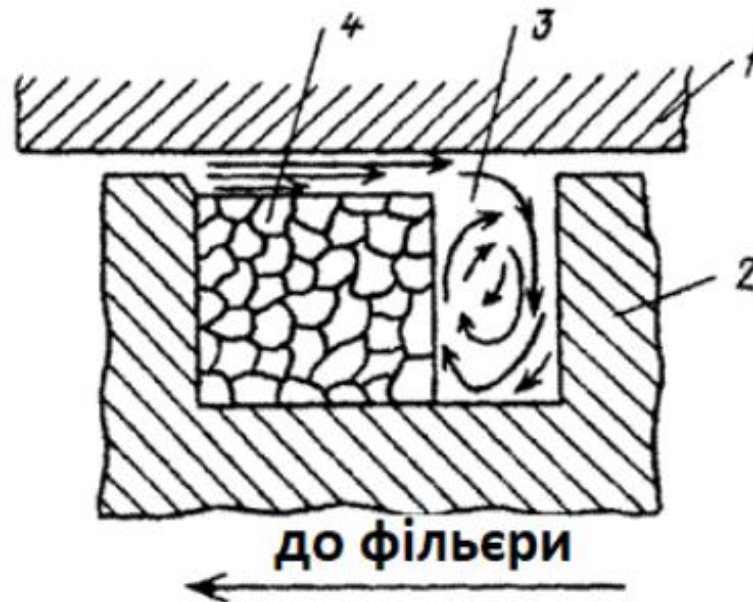
У зоні живлення (Зона І) полімерний гранулят заповнює міжвитковий простір шнека та піддається попередньому ущільненню. Компресія матеріалу на цій ділянці забезпечується, зазвичай, шляхом конструктивного зменшення глибини нарізки каналу шнека h .

Транспортування твердої фази полімеру вздовж осі екструдера відбувається внаслідок різниці сил тертя матеріалу об внутрішню поверхню матеріального циліндра та поверхню шнека. З огляду на те, що площа контакту полімеру зі шнеком перевищує площу контакту з циліндром, необхідною умовою ефективного транспортування є мінімізація коефіцієнта тертя в парі «полімер-шнек». Недотримання цієї умови призводить до обертання матеріалу разом зі шнеком та припинення його поступального руху. Зазначений градієнт сил тертя досягається шляхом підвищення температури стінки циліндра (зовнішній нагрів) та зниження температури тіла шнека (внутрішнє водяне охолодження).

Нагрів полімеру в зоні живлення здійснюється комбіновано: за рахунок дисипації механічної енергії тертя в теплову, а також завдяки тепловому потоку від зовнішніх нагрівачів, розміщених по периметру циліндра. У деяких випадках

кількість генерованого дисипативного тепла може бути достатньою для фазового переходу полімеру (автотермічний режим), що дозволяє відключити зовнішні нагрівачі, проте на практиці такий режим реалізується рідко.

При оптимальній температурі процесу полімер спресований, ущільнений і утворює у міжвитковому просторі тверду пробку(рис.1.7).



1-стілки циліндру; 2-гребінь шнека; 3-потоки розплаву полімеру; 4-спресований твердий полімер (пробка) в екструдері

Рис. 1.7 Схема плавлення полімеру в зоні II в міжвитковому просторі шнека

Характеристики твердої пробки (ущільненого шару полімеру) є визначальними чинниками, що впливають на продуктивність екструзійного обладнання, стабільність транспортування полімерної маси, а також на величину пікового тиску в системі.

На початковій ділянці зони пластикації (Зона II) ініціюється процес плавлення полімеру в контактному шарі біля внутрішньої поверхні матеріального циліндра. Утворена рідка фаза поступово акумулюється, здійснюючи тиск на тверду пробку, ширина якої пропорційно зменшується в процесі плавлення. Внаслідок конструктивного зменшення глибини каналу шнека у напрямку від зони завантаження (I) до зони дозування (III) генерується

компресійний тиск. Це забезпечує щільний притиск твердої пробки до нагрітої стінки циліндра, що є необхідною умовою для ефективного теплообмінного процесу плавлення.

У зоні пластикації фазовий перехід полімеру відбувається також під впливом теплової енергії, що генерується внаслідок внутрішнього в'язкого тертя (дисипації) у тонкому шарі розплаву, де спостерігаються інтенсивні зсувні деформації. Зазначені гідродинамічні умови створюють ефект інтенсивного змішування, що забезпечує гомогенізацію розплаву та рівномірний розподіл компонентів композиційного матеріалу.

Завершальний етап процесу в зоні пластикації (Зона II) характеризується дезінтеграцією твердої пробки на окремі фрагменти. Надалі гетерогенна суміш, що складається з розплаву та залишків нерозплавленої твердої фази, транспортується до зони дозування.

Зростання тиску P розплаву ініціюється на межі розділу зон живлення (I) та пластикації (II). На даному інтервалі формується ущільнений шар (пробка) матеріалу, що здійснює ковзання вздовж каналу шнека: у зоні I матеріал перебуває у твердому стані, тоді як у зоні II відбувається його фазовий перехід. Наявність та рух цього ущільненого шару є основним чинником, що забезпечує підвищення тиску в системі.

Додатковим конструктивним фактором, що сприяє зростанню тиску, є зменшення глибини каналу шнека (збільшення ступеня стиснення).

Акумуляований на виході з матеріального циліндра тиск витрачається на компенсацію гідравлічного опору пакету фільтруючих сіток, проходження розплаву крізь канали формувальної головки та безпосереднє профілювання виробу.

Транспортування гетерогенної маси (суміші розплаву та твердих частинок) супроводжується безперервною генерацією теплової енергії внаслідок дисипації при інтенсивних зсувних деформаціях полімеру. Процес гомогенізації розплаву продовжується, що виражається в остаточному плавленні твердих включень, а також в усередненні полів в'язкості та температури в об'ємі матеріалу.

Гідродинаміка потоку в міжвитковому просторі шнека характеризується складною структурою, основними компонентами якої є поздовжній (спрямований вздовж осі) та циркуляційний (поперечний) потоки.

Величина поздовжнього потоку є визначальним параметром продуктивності екструдера Q , тоді як інтенсивність циркуляційної складової обумовлює ступінь гомогенності полімерної системи та ефективність диспергування компонентів.

Поздовжній потік полімерного розплаву формується як суперпозиція трьох елементарних складових течії: прямого потоку, зворотного потоку та потоку витоків:

- прямий потік (потік тертя) генерується внаслідок обертання шнека та спрямований у векторному напрямку до формувальної головки;
- зворотний потік (напірний потік) визначається як умовна складова течії, що виникає під дією градієнта тиску (протитиску) з боку формувального інструменту; у фізичному сенсі є математичною абстракцією, що характеризує гальмування основного потоку;
- потік витоків виникає внаслідок перетікання розплаву через радіальний зазор (технологічний люфт) між гребенем витка шнека та внутрішньою стінкою матеріального циліндра.

Аналітичний вираз для розрахунку продуктивності екструдера Q , що враховує розподіл швидкостей зазначених потоків, має вигляд:

$$Q = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{зв}} - Q_{\text{вит}} \quad (1.2)$$

де $Q_{\text{пр}}$ – продуктивності екструдера від прямого потоку;

$Q_{\text{зв}}$ – продуктивності екструдера від зворотнього потоку;

$Q_{\text{вит}}$ – продуктивності екструдера від витоків розплаву.

Загальна продуктивність шнекового екструдера виражена наступною залежністю:

$$Q = a \cdot n \cdot \beta \cdot \frac{\Delta P}{\mu \cdot L'} \quad (1.3)$$

де n — частота обертання шнека;

ΔP — тиск на виході із шнека (у кінці зони III);

μ — ефективна в'язкість розплаву;

L — довжина шнека;

α — константа швидкості прямого потоку;

β — константа швидкості зворотного потоку, які залежать від геометричних параметрів шнека.

1.2.2 Основні параметри екструзійного процесу

До переліку визначальних технологічних параметрів екструзійного процесу належать:

- температурний режим полімерного матеріалу у функціональних зонах пластикації та дозування;
- тиск розплаву в робочій зоні;
- частота обертання шнека (кутова швидкість);
- параметри охолодження екструдату після виходу з формувальної фільери;
- поточні геометричні характеристики (діаметр) філаменту;
- лінійна швидкість роботи тягового пристрою;
- швидкість намотування та сумарна довжина (обсяг) акумульованої готової продукції.

1.2.3 Матеріалт що використовуються для екструзії

Переважає більшість термопластичних матеріалів та композицій на їх основі придатні до переробки методом екструзії. Необхідною умовою реалізації цього процесу є дотримання часових обмежень: тривалість перебування розплаву в робочому просторі екструдера за робочої температури не повинна

перевищувати період термостабільності полімеру за аналогічних термічних умов.

Надмірно висока в'язкість розплаву суттєво ускладнює технологічний процес, зумовлюючи зростання гідравлічного опору течії та виникнення режимів нестійкості потоку. Зазначені явища безпосередньо призводять до погіршення якості продукції та появи дефектів.

Спроби корекції в'язкості шляхом підвищення температури переробки створюють ризик термодеструкції полімеру. Водночас, компенсація високої в'язкості за рахунок збільшення тиску та потужності приводу за низьких температур може спричинити механічне руйнування вузлів обладнання.

Враховуючи викладене, для стабільного екструзійного процесу доцільно використовувати полімерну сировину, що характеризується регламентованим інтервалом варіювання в'язкості.

Найбільш поширені типи полімерів, що застосовуються для виготовлення матеріалів для 3D-друку, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1-Види полімеру

Тип полімеру	Температура екструзії	Теплоємність $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	В'язкість, Па·с
ABS	220-250	1935	1738
PLA	190-220	1500	1678
PETG	230-250	1200	1440
Nylon	220-270	1310	1921
Flex	225-245	2100	1556

1.2.4 Проблема переробки пластику

Кількість твердих відходів у світі постійно зростає, включаючи такі матеріали, як пластик, харчові відходи, шини, тваринні екскременти та деревна біомаса. Особливе занепокоєння викликають пластикові відходи через їхнє масове виробництво, неправильну утилізацію на звалищах та неефективні методи переробки, що значно шкодять навколишньому середовищу. З моменту

широкого впровадження пластику в 1950-х роках його виробництво різко зросло. За оцінками, щорічне виробництво пластикових відходів у період з 2016 по 2030 рік становить від 260 до 460 мільйонів тонн. Прогнозується, що до 2050 року загальне виробництво пластику перевищить 500 мільйонів тонн, що в 33 рази більше, ніж 15 мільйонів тонн, вироблених у 1960-х роках. У 2021 році 90,2% світового виробництва пластику базувалося на викопних матеріалах. Водночас пластик на біологічній основі та перероблений після споживання складав лише 1,5% та 8,3% від загального обсягу виробництва відповідно.

Незважаючи на глобальні зусилля щодо переробки та спалювання пластикових відходів, лише 9% з них переробляється, а 12% спалюється, що призводить до потрапляння 79% пластикових відходів в океани, на звалища та інші природні середовища. Щорічно, за підрахунками, близько 12 мільйонів тонн пластику опиняється в океанах. Токсичність пластикових відходів може тривати від сотень до тисяч років: волосінь зберігається 600 років, пластикові пакети – 20 років, пляшки з-під напоїв – 450 років, пластикові стаканчики – 50 років, а недопалки – 5 років. Це спричиняє значну шкоду навколишньому середовищу, забруднюючи водні джерела, орні землі та потрапляючи в харчовий ланцюг.

3D-друк має значний потенціал для впровадження принципів циклічної економіки завдяки зменшенню споживання первинних матеріалів, використанню перероблених матеріалів, оптимізації процесів проєктування та виробництва, а також сприянню місцевому та децентралізованому виробництву. Останніми роками 3D-друк набув значної популярності через свою здатність створювати складні конструкції та геометрії, мінімізувати матеріальні відходи, знижувати споживання енергії та полегшувати виробництво на вимогу. Ця технологія застосовується в різних галузях, включаючи аерокосмічну, медичну, автомобільну та споживчі товари. Використання переробленого пластику в 3D-друці надає значні екологічні переваги, зокрема зменшення відходів і споживання енергії. Переробка та повторне використання пластику можуть скоротити викиди вуглецю на 30-80% порівняно з обробкою та виробництвом первинного пластику. Стандарт ISO/ASTM 52900 класифікує 3D-друк на сім

категорій: струменеве сполучення, спрямоване осадження енергії, екструзія матеріалу, фотополімеризація в кубі, струменеве оброблення матеріалу, ламінування листів і сплавлення порошкового шару. Для повного розуміння різних методів порівняння найбільш часто використовуваних методів наведено в таблиці 2.1, де описані їх характеристики, використані матеріали, переваги та недоліки.

Таблиця 1.2 Методи 3Д друку

Техніка 3Д-друку	Опис	Матеріали друку	Переваги	Недоліки
Моделювання плавненого осадження(FDM)	Розплавлення нитки шар за шаром для створення об'єктів шар за шаром	Термопласти та композити	Простий у використанні	Обмежена роздільна здатність і обробка поверхні,
Стереолітографія (SLA)	Рідка смола шар за шаром твердне за допомогою джерела світла або лазера	Фотополімерна смола	Висока роздільна здатність, гладка поверхня	Обмежений розбір збірки, дороге обладнання та матеріали
Вибіркове лазерне спікання(SLS)	Вибіркове розплавлення порошкоподібного матеріалу за допомогою лазера шар за шаром	Нейлон, термопластичний поліуретан та інші пластики, кераміка	Широкий вибір матеріалів, складні геометрії деталей	Шорська поверхня яка вимагає постобробки

«Переробка» відноситься до будь-якого процесу, який перетворює відходи, небажані побічні продукти або інші малоцінні ресурси на більш цінні. Це слово було введено Райнером Пільцом в інтерв'ю журналісту Кею у 1994 році. Пільц використав цей термін, щоб відрізнити альтернативні методи, які підвищують

цінність відходів, від звичайних методів переробки, які він назвав «даунсайклінгом».

Основні методи переробки та повторного використання пластикових відходів включають первинну, вторинну, третинну та четвертинну переробку. Первинна переробка полягає у повторному введенні пластикового лому, промислових залишків або однотипних полімерів назад у процес екструзії для створення продукту, характеристики якого подібні до оригіналу.

Вторинна переробка стосується перетворення пластикових відходів у продукти з характеристиками, що відрізняються від вихідного матеріалу. Третинна переробка включає хімічне розщеплення полімерів на менші молекули. Четвертинна переробка, також відома як рекуперація енергії або спалювання, полягає у отриманні теплової енергії шляхом спалювання пластикових відходів.

Таблиця 1.3 Порівняння методів переробки

Термінологія ASTM D5033	Еквівалент на термінолог ія ISO 15270	Тип пластикових відходів	Процедури переробки	Приклади використання
Первинна переробка	Механічна	Чистий термопластичний полімер	Екструзія, лиття під тиском,виду -вання, вакуумне формування	Пляшки з поліетилентерефталату (ПЕТ) після споживання в нові пляшки, невдало надруковані на 3D деталі та опори в нитку для виготовлення того самого типу продукту
Вторинна переробка	Механічна	Суміш термопластичних і термореактивних еластомерів	Екструзія, лиття під тиском, компресійне формування	Пластикові пляшки до пластикових волокон для килимів, перетворення перероблених пляшок на філамент.

Третинна переробка	Хімічна	Суміш термопластичних і термореактивних еластомерів	Спалювання, термічна обробка	Перетворення ПЕТ шляхом гліколізу в діоли та диметилтерефталат для отримання первинного ПЕТ
Четвертинна переробка	Відновлення енергії	Валоризація	Рафінування полімерного ланцюга,	Паливо, отримане зі списаних шин

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Розробка структурної схеми керування

Структурна схема розробленої системи автоматизації побудована за принципом централізованого керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК). Система являє собою сукупність взаємопов'язаних функціональних блоків, що забезпечують збір даних, їх логічну обробку, формування керуючих впливів та взаємодію з оператором.

Функціонування системи розпочинається з отримання інформації про стан технологічного процесу від первинних перетворювачів. Встановлені у зонах нагріву термопари, а також датчики тиску розплаву та роликів вимірювач діаметру філаменту формують безперервні аналогові сигнали, пропорційні вимірюваним фізичним величинам. Ці сигнали надходять на входи модулів аналогово-цифрового перетворення контролера, де трансформуються у цифровий формат для подальшої обробки центральним процесором.

Програмний алгоритм контролера здійснює порівняння отриманих фактичних значень із заданими уставками. Для підтримки температурного режиму реалізовано закон ПД-регулювання, на основі якого формуються керуючі сигнали для вихідних модулів. Виконавчими механізмами в контурі нагріву виступають твердотільні реле, які здійснюють безконтактну комутацію силових ланцюгів кільцевих нагрівачів, забезпечуючи точне дозування потужності.

Одночасно з регулюванням температури контролер виконує керування електромеханічною частиною установки. Розраховані сигнали швидкості передаються на частотний перетворювач головного двигуна, протягуючого пристрою та намотувача. Синхронізація роботи приводів забезпечується програмно, що гарантує стабільність лінійної швидкості екструзії та запобігає деформації нитки.

Взаємодія оператора з системою реалізована через людино-машинний інтерфейс (НМІ). Даний інтерфейс замінює традиційні пульти керування, об'єднуючи функції задання параметрів процесу (температури, швидкості), візуалізації поточних показників у цифровому вишляді. Обмін даними між ПЛК та панеллю оператора відбувається в реальному часі через промисловий інтерфейс зв'язку.

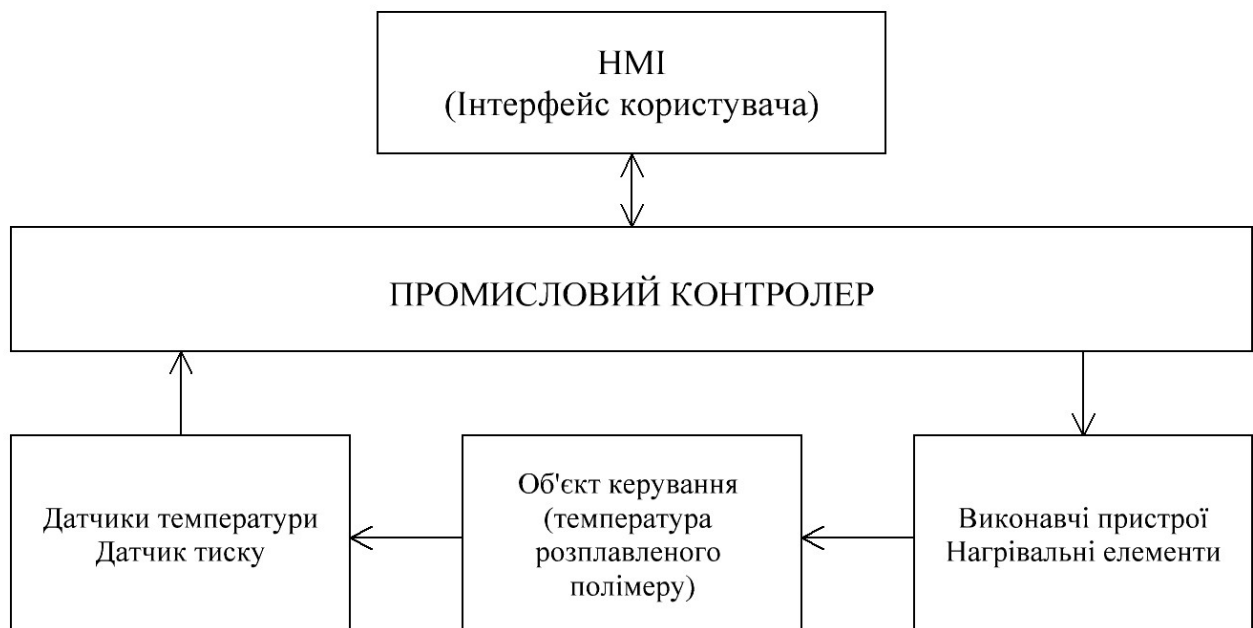


Рис. 2.1 Структурна схема системи автоматизації

2.2 Вибір апаратного забезпечення системи автоматизації

2.2.1 Вибір датчиків

Датчик температури

Призначенням автоматизованої системи керування температурним режимом екструдера при виробництві полімерного філаменту є підтримання температури розплавленого полімеру у середині матеріального циліндра на заданому рівні (в межах робочої точки $200^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Датчик температури розплавленого матеріалу розташовується у спеціальному посадковому місці на корпусі екструдера, при цьому його чутливий елемент має бути занурений безпосередньо в зону розплаву або мати надійний тепловий контакт зі стінкою циліндра.

Дійсне значення температури полімерного матеріалу повинно передаватися до модуля аналогового вводу програмованого логічного контролера з мінімальними похибками.

Враховуючи вимоги до точності та необхідність передачі сигналу в умовах промислових завод, для контролю температури обрано термоперетворювач опору платиновий ТСП-101 виробництва НВФ «РегМік» (Україна) . Даний датчик використовується в комплекті з нормуючим перетворювачем (вбудованим або монтованим в головку), що перетворює зміну опору чутливого елемента Pt100 в уніфікований струмовий сигнал 4...20 мА. Таке рішення дозволяє використовувати стандартні бібліотечні блоки масштабування в програмі контролера.



Рис. 2.2 Датчик температури ТСП-101

Конструктивно датчик ТСП-101 являє собою захисну арматуру з нержавіючої сталі діаметром 6 мм. Важливою особливістю обраної конфігурації є використання рухомого штуцера ШП-01, який дозволяє регулювати глибину

занурення чутливого елемента в тіло екструдера, забезпечуючи універсальність монтажу та точність вимірювання саме в потрібній точці перерізу потоку.

Діапазон вимірюваних температур обраної модифікації датчика складає від -50 до $+500^{\circ}\text{C}$, що повністю перекриває технологічні вимоги екструзії більшості термопластів (PLA, ABS, PETG), температура плавлення яких зазвичай не перевищує 260°C . Клас допуску «В» забезпечує достатню точність вимірювання для даного технологічного процесу. Вихідний сигнал $4\ldots 20$ мА забезпечує високу завадостійкість лінії зв'язку та можливість діагностики обриву лінії (signal wire break) засобами контролера.

Датчик тиску

Критично важливим параметром, що визначає стабільність геометричних розмірів (діаметру) філаменту та відсутність дефектів екструзії, є тиск розплавленого полімеру в формуючій головці екструдера. Коливання тиску призводять до пульсації подачі матеріалу, що неприпустимо для якісного 3D-друку.

Для безперервного контролю цього параметру обрано датчик тиску розплаву серії Sand PT124B-123. Датчик монтується у спеціальний різьбовий отвір (M14x1.5) безпосередньо в корпусі екструзійної головки перед філь'єрою. Чутливий елемент датчика (мембрана з нержавіючої сталі) контактує з розплавом, витримуючи високі температури та абразивний вплив наповнених пластиків.

Принцип дії датчика базується на тензометричному ефекті: деформація мембрани передається на вимірювальний міст, який формує слабкий електричний сигнал (мВ/В). Оскільки модуль аналогового вводу промислового контролера S7-300 розрахований на роботу зі стандартними рівнями сигналів, у вимірювальному каналі передбачено використання вторинного нормуючого перетворювача (підсилювача). Цей пристрій перетворює сигнал тензодатчика в уніфікований струмовий сигнал $4\ldots 20$ мА.



Рис. 2.3 Датчик тиску Sand PT124B-123

Вибір моделі Sand PT124B-123 обумовлений його технічними характеристиками, що відповідають вимогам процесу екструзії термопластів:

- Жорсткий шток (Rigid stem): забезпечує надійність конструкції та віддалення електронної частини від гарячої зони.
- Робочий діапазон температур: до $+400^{\circ}\text{C}$, що значно перевищує максимальну температуру переробки стандартних полімерів (250°C).
- Діапазон вимірювання тиску: $0\ldots 50$ МПа ($0\ldots 500$ Бар), що дозволяє фіксувати як робочий тиск, так і критичні пікові навантаження при "холодному пуску" або засміченні філь'єри.

Для реалізації підсистеми неперервного моніторингу геометричних параметрів екструдованого виробу обрано прецизійний датчик лінійних переміщень серії DC-SE виробництва компанії TE Connectivity (модель DC-SE 100).

Даний пристрій належить до класу LVDT (Linear Variable Differential Transformer — лінійний варіабельний диференційний трансформатор), який модифіковано для роботи в ланцюгах постійного струму.

На відміну від класичних LVDT-датчиків змінного струму, серія DC-SE містить інтегровану електронну схему обробки сигналу, розміщену безпосередньо в корпусі приладу. Це дозволяє здійснювати живлення датчика

від стандартного джерела постійної напруги та отримувати на виході лінійно масштабований сигнал напруги, пропорційний переміщенню штока.

Принцип дії базується на зміні коефіцієнта взаємодукції між первинною та двома вторинними обмотками при осьовому переміщенні феромагнітного осердя, зв'язаного зі штоком. Завдяки відсутності фізичного електричного контакту між рухомим осердям та обмотками, датчик характеризується теоретично необмеженою роздільною здатністю та високою довговічністю внаслідок відсутності тертя.



Рис. 2.4 Датчик діаметру філаменту

2.2.2 Вибір виконавчих пристроїв

Для забезпечення нагріву циліндра екструдера в двох зонах застосовано резистивні кільцеві (хомуткові) нагрівачі з ізоляцією на основі міканіту виробництва компанії «INTMAX». Цей тип нагрівачів є оптимальним рішенням для переробки термопластичних полімерів завдяки поєднанню високої надійності, механічної міцності та економічної ефективності.

Нагрівач має багат шарову конструкцію типу «сендвіч», що складається з наступних функціональних елементів:

1. Нагрівальний елемент: Джерелом тепла виступає резистивна стрічка (або дріт) з високоомного сплаву (ніхром NiCr), яка перетворює електричну енергію в теплову за законом Джоуля-Ленца. Використання стрічки замість круглого дроту дозволяє збільшити площу теплопередачі.
2. Ізоляційний шар: Резистивний елемент розміщується між шарами електротехнічного міканіту (слюдопласту). Цей матеріал виконує подвійну функцію: забезпечує високу діелектричну міцність (ізолює корпус від напруги) та водночас має достатню теплопровідність для передачі тепла від спіралі до корпусу.
3. Захисний корпус: Зовнішня оболонка виготовляється з листової нержавіючої сталі марки AISI 304 (або аналогів). Корпус захищає крихкий міканіт від механічних пошкоджень, запобігає окисленню внутрішніх елементів та фіксує форму нагрівача.
4. Система фіксації: Монтаж на циліндр екструдера здійснюється за допомогою стяжних гвинтів ("вушок"), що дозволяє створити значне зусилля притискання для мінімізації повітряних зазорів.



Рис. 2.5 Кільцевий нагрівач

Для керування резистивним навантаженням (кільцевими нагрівачами екструдера) у проекті застосовано однофазний тиристорний регулятор потужності (Power Controller) серії SPC1-50-E виробництва компанії Autonics.

На відміну від електромагнітних пускачів або дискретних твердотільних реле (SSR), що працюють у ключовому режимі («Увімкнено/Вимкнено»), даний пристрій забезпечує безперервне аналогове регулювання напруги, що подається на нагрівальний елемент. Це дозволяє реалізувати високоточне ПІД-регулювання температури без характерних для релейних схем коливань та перерегулювань.

В основу роботи пристрою покладено принцип фазового керування (Phase Angle Control). Силова частина регулятора складається із зустрічно-паралельно включених силових тиристорів (SCR). Вбудована електронна схема керування аналізує вхідний аналоговий сигнал від ПЛК (4...20 мА) і, синхронізуючись з частотою мережі, змінює кут відкриття тиристорів у кожному напівперіоді синусоїди напруги.

Чим більший керуючий сигнал надходить від контролера, тим більшу частину синусоїди тиристор пропускає до навантаження, плавно збільшуючи діюче значення напруги та, відповідно, теплову потужність нагрівача.



Рис. 2.6 Регулятор потужності SPC1-50-E

2.2.3 Вибір пристроїв керування

Враховуючи вимоги до швидкодії та надійності системи автоматизації температурного режиму екструдера, в якості центрального пристрою керування обрано мікропроцесорний програмований логічний контролер (ПЛК) серії SIMATIC S7-300 компанії Siemens, який є загальновизнаним стандартом для задач середньої складності в промисловості.

Для забезпечення своєчасної реакції системи на збурення (зміни температури, тиску, швидкості) повний цикл виконання робочої програми контролера, включаючи обробку ПІД-алгоритмів, має тривати не більше 10-20 мс, що значно менше допустимої інерційності теплового об'єкта. Промисловий контролер повинен мати достатній обсяг робочої пам'яті (не менше 128 Кбайт) для розміщення блоків організації, функціональних блоків керування (FB41, FC105) та структур даних (DB), що забезпечують взаємодію з HMI.

Враховуючи, що архітектура системи передбачає підключення значної кількості периферійних пристроїв (термоперетворювачі опору, датчики тиску, тиристорні регулятори потужності, частотні перетворювачі), контролер зобов'язаний мати модульну структуру. Це дозволяє гнучко конфігурувати систему, додаючи спеціалізовані сигнальні модулі вводу-виводу (SM331, SM332) та комунікаційні процесори.

Сучасна дворівнева система автоматизації з панеллю оператора (HMI) на базі WinCC вимагає наявності високошвидкісного інтерфейсу обміну даними. Для забезпечення надійного зв'язку між контролером та засобами візуалізації, а також для потенційної інтеграції в заводську мережу, ПЛК повинен мати вбудований інтерфейс Industrial Ethernet / PROFINET.

Найкраще цим вимогам відповідає центральний процесорний модуль CPU 315-2 PN/DP. Дана модель характеризується високою продуктивністю: час

виконання логічної операції з бітами складає всього 0.05 мкс, а операції з плаваючою комою (необхідної для точних температурних розрахунків) — 0.45 мкс. Модуль має 384 Кбайт робочої пам'яті, що є достатнім для реалізації складних алгоритмів керування екструзією.



Рис. 2.7 Зовнішній вигляд мікропроцесорного модуля контролера

Дійсні значення технічних характеристик мікропроцесорного модуля контролера представлено у таблиці 2.1.

Таблица 2.1 Технічні характеристики мікропроцесору

№	Найменування параметру	Значення
1	Модель модуля	CPU 315-2 PN/DP
2	Повний обсяг пам'яті, МБайт	до 8
3	Обсяг робочої пам'яті, кБайт	384
4	Загальна кількість модулів(макс.),шт	32
5	Присутність інтерфейсу Ethernet	Присутній
6	Значення напруги живлення, В	24(DC)
7	Значення потужності, Вт	4,6

Для забезпечення безперебійного живлення компонентів нижнього та середнього рівня автоматизованої системи (модулів контролера S7-300, панелі

оператора HMI, датчиків та кіл керування реле) обрано стабілізований блок живлення моделі SITOP PSU100C (24 V/4 A) виробництва компанії Siemens.

Даний пристрій належить до серії SITOP Compact, яка розроблена спеціально для розподілених систем автоматизації та встановлення в шафах керування з обмеженим монтажним об'ємом.

Принцип дії базується на високочастотному імпульсному перетворенні енергії (Switched-mode power supply), що забезпечує стабільність вихідної напруги незалежно від коливань у мережі живлення. Пристрій монтується на стандартну DIN-рейку (35 мм) та має вбудований електронний захист від короткого замикання і перевантаження з функцією автоматичного перезапуску після усунення аварії.



Рис. 2.8 Блок живлення SITOP PSU100C

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики блоку живлення SITOP PSU100C

№	Найменування параметру	Значення
1	Модель модуля	SITOP PSU100C 24V/4A
2	Номінальна вхідна напруга, В	120 ... 230
3	Номінальна вихідна напруга, В	24
4	Номінальний вихідний струм, А	4

5	Активна вихідна потужність, Вт	96
6	Коефіцієнт корисної дії, %	88

Для керування головним електроприводом екструдера, обрано перетворювач частоти модульного типу SINAMICS G120 виробництва компанії Siemens.

Головним завданням даного пристрою є перетворення трифазної напруги мережі промислової частоти (50 Гц) у напругу зі змінною частотою та амплітудою. Це дозволяє плавно регулювати швидкість обертання асинхронного двигуна та підтримувати необхідний крутний момент на валу шнека, що є критично важливим для стабільності тиску розплаву та продуктивності лінії.

На відміну від компактних перетворювачів, SINAMICS G120 має модульну структуру, що складається з двох основних блоків:

- Керуючий модуль (Control Unit, CU): В проекті обрано модуль серії CU240E-2. Він відповідає за логіку керування, обробку сигналів з датчиків та обмін даними з контролером S7-300.
- Силовий модуль (Power Module, PM): Обрано модуль PM240-2, який безпосередньо комутує силові ланцюги двигуна, забезпечуючи перетворення енергії.



Рис. 2.9 Перетворювач частоти SINAMICS G120

Таблиця 2.3 Технічні характеристики SINAMICS G120

№	Найменування параметру	Значення
1	Серія перетворювача	SINAMICS G120
2	Модель керуючого модуля (CU)	CU240E-2 DP
3	Модель силового модуля (PM)	PM240-2
4	Напруга живлення (Вхід), В	3 фази, 380...480 В AC
5	Номінальна потужність, кВт	0.75 ... 1.5
6	Інтерфейс зв'язку	PROFIBUS DP

Для реалізації приводів механізмів протягувача та намотувача обрано комплектні сервосистеми серії ASDA-B2 виробництва компанії Delta Electronics (Тайвань).

Вибір даного обладнання обумовлений необхідністю зниження собівартості системи автоматизації при збереженні високих показників точності керування.

функціонування електроприводу, проведення пусконаладжувальних робіт, діагностики несправностей, а також є вихідною базою для розробки схем з'єднань та підключень (монтажних схем).

Графічна частина схеми відображає вичерпну сукупність функціональних вузлів, необхідних для реалізації та контролю енергетичних та інформаційних процесів у системі. На кресленні фіксуються електричні, магнітні та кінетичні зв'язки, а також комутаційні термінали вхідних і вихідних кіл. Візуалізація компонентної бази здійснюється за допомогою умовних графічних позначень (УГП) відповідно до чинних стандартів Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД).

Складні функціональні вузли, що мають власну розгалужену внутрішню структуру, на загальній схемі зазвичай представляються у вигляді спрощених функціональних блоків (прямокутників) із зазначенням зовнішніх виводів. У такому випадку алгоритм роботи системи визначається сукупністю загальної схеми електроприводу та технічної документації на окремий вузол.

Згідно з нормативними вимогами, усі комутаційні елементи зображуються на схемі у знеструмленому стані та за відсутності зовнішніх механічних впливів. З метою підвищення наочності та читабельності креслення переважно застосовується рознесений метод зображення, при якому складові частини одного апарата (наприклад, електромагнітна котушка та контактні групи реле) розташовуються у різних функціональних ланцюгах схеми. Ідентифікація належності рознесених елементів до одного пристрою забезпечується наскрізним позиційним позначенням.

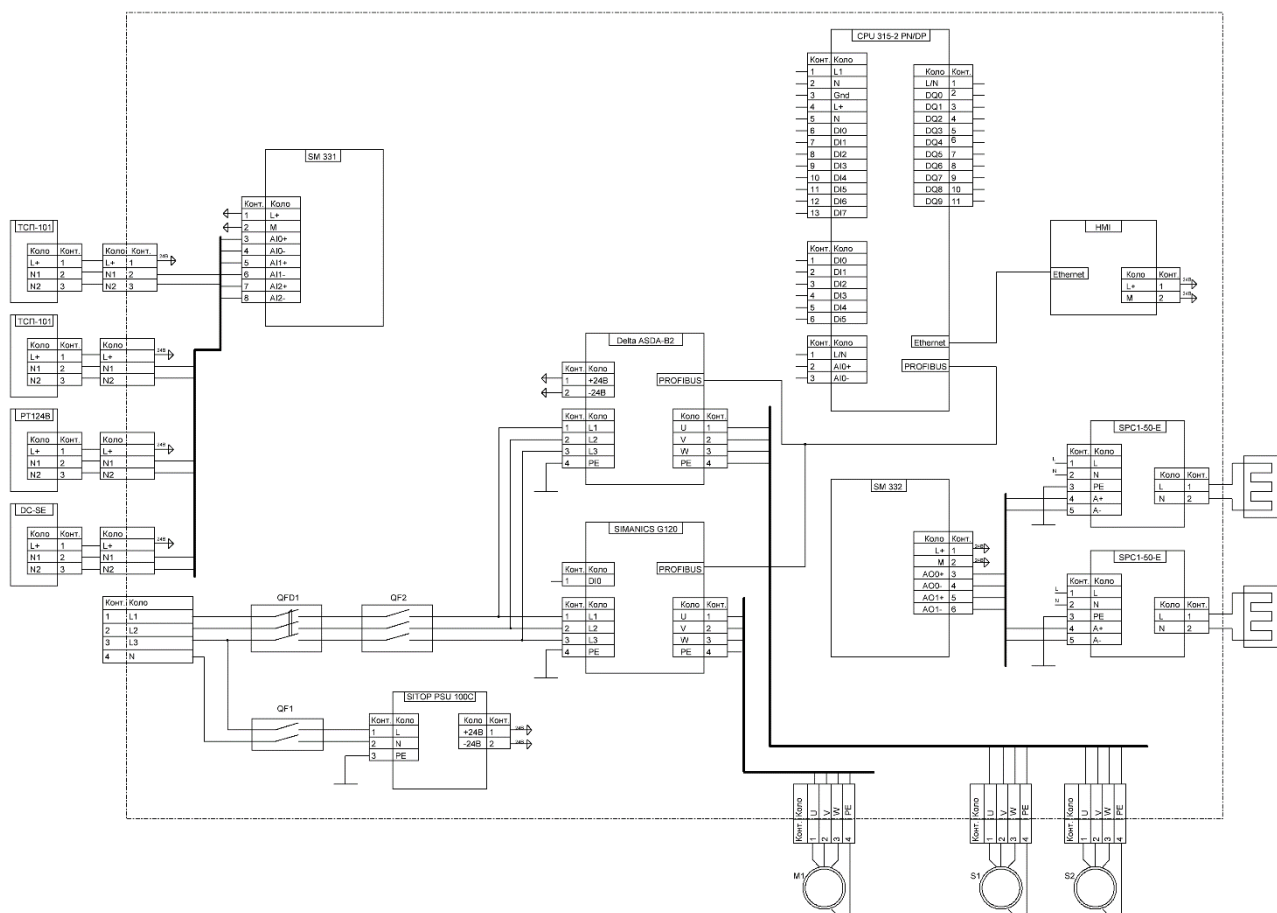


Рис. 2.11 Принципова схема автоматизації

Розроблена принципова електрична схема (див. графічний матеріал) відображає взаємозв'язок між силовими елементами, засобами вимірювання, керуючим контролером та виконавчими механізмами екструзійної лінії.

Живлення силової частини екструзійної установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В (50 Гц) через ввідний автоматичний вимикач QFD1. Захист кіл живлення електродвигунів та частотних перетворювачів забезпечується автоматичним вимикачем QF2. Для живлення контролера, датчиків та інтерфейсних модулів використовується джерело живлення постійного струму SITOP PSU 100C, яке перетворює змінну напругу мережі (через автомат QF1) у стабілізовану напругу +24 В DC.

Центральним обчислювальним вузлом системи є програмований логічний контролер (ПЛК) серії Siemens SIMATIC S7-300. Використано процесорний модуль CPU 315-2 PN/DP, який поєднує функції керування технологічним процесом та комунікації. Модуль оснащений вбудованими цифровими

входами/виходами (DI/DQ) для обробки дискретних сигналів (кнопки керування, кінцеві вимикачі, світлова сигналізація) та комунікаційними інтерфейсами PROFIBUS DP та PROFINET (Ethernet).

Введення аналогових сигналів від первинних перетворювачів реалізовано через модуль аналогового вводу SM 331, підключений до внутрішньої шини контролера. До входів модуля приєднані:

- ТСП-101 (2 шт.): Термоперетворювачі опору для контролю температури в зонах нагріву матеріального циліндра екструдера.
- PT124B: Датчик тиску розплаву, необхідний для захисту обладнання від надлишкового тиску та стабілізації подачі сировини.
- DC-SE: Датчик лінійних переміщень (LVDT) з вихідним сигналом по напрузі, який використовується для безперервного вимірювання діаметра філаменту в реальному часі.

Керування виконавчими органами здійснюється через цифрові інтерфейси. Головний привод екструдера (M1), керується перетворювачем частоти SIMAMICS G120. Обмін даними з ПЛК (задання швидкості, зчитування стану) реалізовано через польову шину PROFIBUS. Сервоприводи протягування/намотування (S1,S2), побудовані на базі серводрайвера Delta ASDA-B2, який забезпечує високоточне керування швидкістю та моментом для стабілізації натягу нитки. Підключення до системи керування також виконано через інтерфейс PROFIBUS.

Керування нагрівальними елементами (резистивними нагрівачами) здійснюється за допомогою однофазних тиристорних регуляторів потужності SPC1-50-E. Керуючий сигнал надходить від модуля SM 332, що дозволяє реалізувати ПД-закон регулювання температури шляхом плавної зміни потужності нагріву.

Для візуалізації технологічного процесу, введення уставок (температури, швидкості, діаметра) та відображення аварійних повідомлень у схемі передбачено панель оператора (HMI). Зв'язок з контролером забезпечується

через високошвидкісний інтерфейс Industrial Ethernet, що гарантує швидке оновлення даних на екрані.

2.4 Розробка функціональної схеми автоматизації

Основним документом, що визначає архітектуру системи керування та взаємодію технічних засобів з технологічним обладнанням, є функціональна схема автоматизації (ФСА). Цей документ є підставою для виконання усіх подальших проектних робіт, включаючи вибір апаратного забезпечення та проектування монтажних креслень. ФСА графічно демонструє повний контур керування об'єктом, включаючи елементи вимірювання, логічної обробки та виконавчі органи.

Отже весь технологічний процес розроблюваного дипломного проекту буде складатися з:

1. Збору матеріалу;
2. Сортування відповідно до виду пластику;
3. Дріблення;
4. Очищення від бруду та етикеток;
5. Сушіння;
6. Екструзія та намотка.

Знаючи які вимоги ставлять до автоматизованої системи та які функції вона повинна виконувати, можна розробити функціональну схему системи.

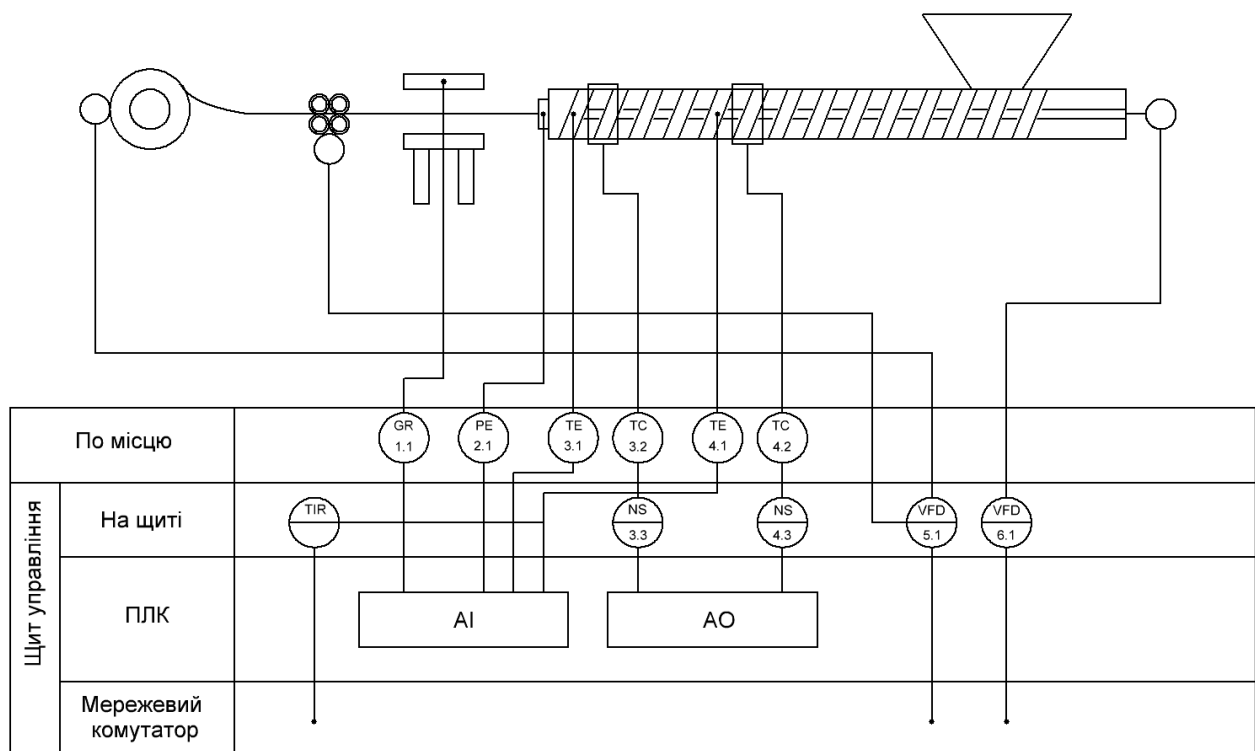


Рис.2.12 Функціональна схема системи автоматизації

Функціональна схема автоматизації відображає структуру технічних засобів керування технологічним процесом виробництва філаменту. Схема побудована за ієрархічним принципом і розділена на чотири рівні.

Контур регулювання температури. Система підтримує заданий температурний режим у двох зонах матеріального циліндра екструдера. Вимірювання здійснюється первинними перетворювачами температури TE 3.1 та TE 4.1, встановленими «по місцю». Сигнали надходять на модулі аналогового вводу (AI) контролера. ПЛК обробляє отримані дані за ПІД-законом і формує керуючий вплив через модулі аналогового виводу (AO). Аналогові сигнали надходять на тиристорні регулятори потужності NS 3.3 та NS 4.3, розташовані в шафі керування. Ці пристрої здійснюють фазове або широтно-імпульсне керування потужністю електричних нагрівачів екструдера.

Контур контролю тиску розплаву. Для захисту обладнання та контролю стабільності екструзії передбачено вимірювання тиску. Датчик тиску PE 2.1, встановлений на виході екструдера.

Він перетворює тиск розплаву в уніфікований електричний сигнал, який подається на вхідний модуль (AI) контролера.

Це дозволяє реалізувати аварійне відключення приводу при перевищенні критичного тиску.

Контур контролю геометрії філаменту. Забезпечення якості філаменту здійснюється шляхом безперервного вимірювання його діаметру. Лазерний мікрометр GR 1.1 встановлений після вузла охолодження. Прилад вимірює діаметр нитки та передає сигнал на аналоговий вхід (AI) контролера. Це значення використовується для моніторингу якості та корекції швидкості тягучого пристрою.

Контур керування електроприводами. Керування швидкістю обертання шнека та тягучого пристрою/намотувача реалізовано через цифрову мережу. Частотні перетворювачі VFD 5.1 (головний двигун) та VFD 6.1 (привід намотувача/протягувача) підключені до системи через Мережевий комутатор. На відміну від аналогового керування, таке підключення дозволяє контролеру не лише задавати швидкість, а й зчитувати статус приводу, струм двигуна та коди помилок в реальному часі.

Людино-машинний інтерфейс. Панель оператора TIR підключена до мережевого комутатора. Вона забезпечує візуалізацію поточних параметрів процесу (температури, тиску, діаметру) та дозволяє оператору вводити задачі та команди керування.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

4.1 Конфігурація апаратних засобів

Розробка проекту починається з налаштування апаратної конфігурації контролера в утиліті HW Config. Для реалізації системи автоматичної екструзії філаменту обрано центральний процесор CPU 315-2 PN/DP.

Конфігурація головної стійки (Rack 0) включає наступні модулі:

1. **Slot 1 (PS 307 5A):** Блок живлення системи, що забезпечує перетворення напруги мережі у стабілізовану напругу 24V DC.
2. **Slot 2 (CPU 315-2 PN/DP):** Центральний процесорний модуль, який виконує функції керування технологічним процесом та підтримує інтерфейси Industrial Ethernet (PROFINET) та PROFIBUS DP.
3. **Slot 4 (DI16xDC24V):** Модуль дискретного вводу (SM 321) для підключення сигналів від кнопок керування та датчиків положення.
4. **Slot 5 (DO16xDC24V/0.5A):** Модуль дискретного виводу (SM 322) для керування індикацією та пускачами.
5. **Slot 6 (AI8x14Bit):** Модуль аналогового вводу (SM 331), налаштований на адреси 256...271, призначений для збору даних з датчиків температури, тиску та діаметру.
6. **Slot 7 (AO4x16Bit):** Модуль аналогового виводу (SM 332) з адресацією 256...263, що використовується для керування тиристорними регуляторами нагріву.

Також на схемі відображено мережу PROFIBUS DP master system, до якої підключено децентралізовану периферію (приводи): Winder_Driver, Puller_Drive та SINAMICS, що забезпечує цифрове керування виконавчими механізмами.

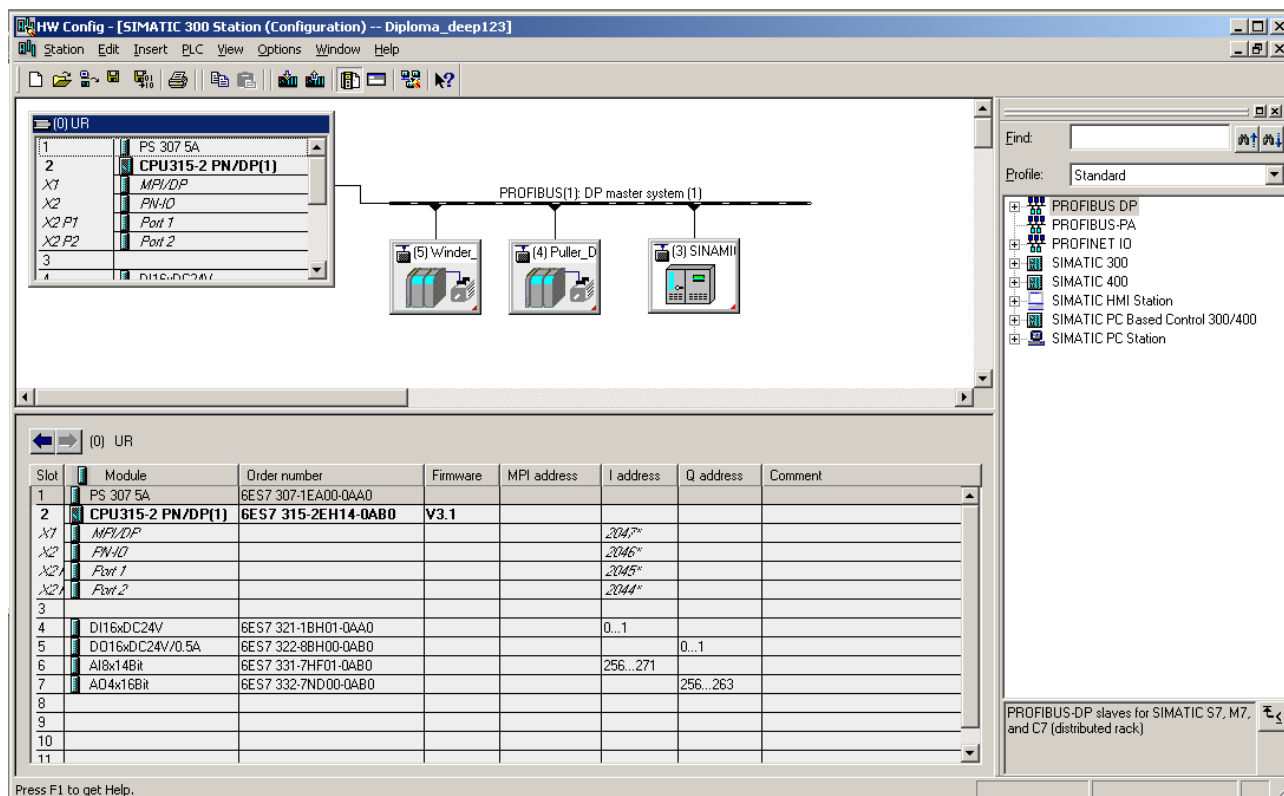


Рис. 4.1. Вікно Hardware configuration

На рисунку 4.2 представлено графічне відображення мережевої топології автоматизованої системи. Схема демонструє дворівневу структуру обміну даними:

- Верхній рівень (Industrial Ethernet/PROFINET):** Позначений зеленою лінією. Об'єднує контролер SIMATIC 300 Station та станцію візуалізації SIMATIC HMI Station (панель оператора на базі WinCC flexible). Використання Ethernet забезпечує високошвидкісний обмін даними для моніторингу процесу та архівації параметрів.
- Нижній рівень (PROFIBUS DP):** Позначений фіолетовою лінією. Виступає в ролі польової шини, де контролер (Master) керує веденими пристроями (Slaves). До шини підключено три станції приводів:
 - Winder_Driver (привід намотувача);
 - SINAMICS G130/G150 (головний привід екструдера);
 - Puller_Drive (привід тягучого пристрою).

Така топологія забезпечує розділення інформаційних потоків та гарантує детермінованість керування приводами в реальному часі.

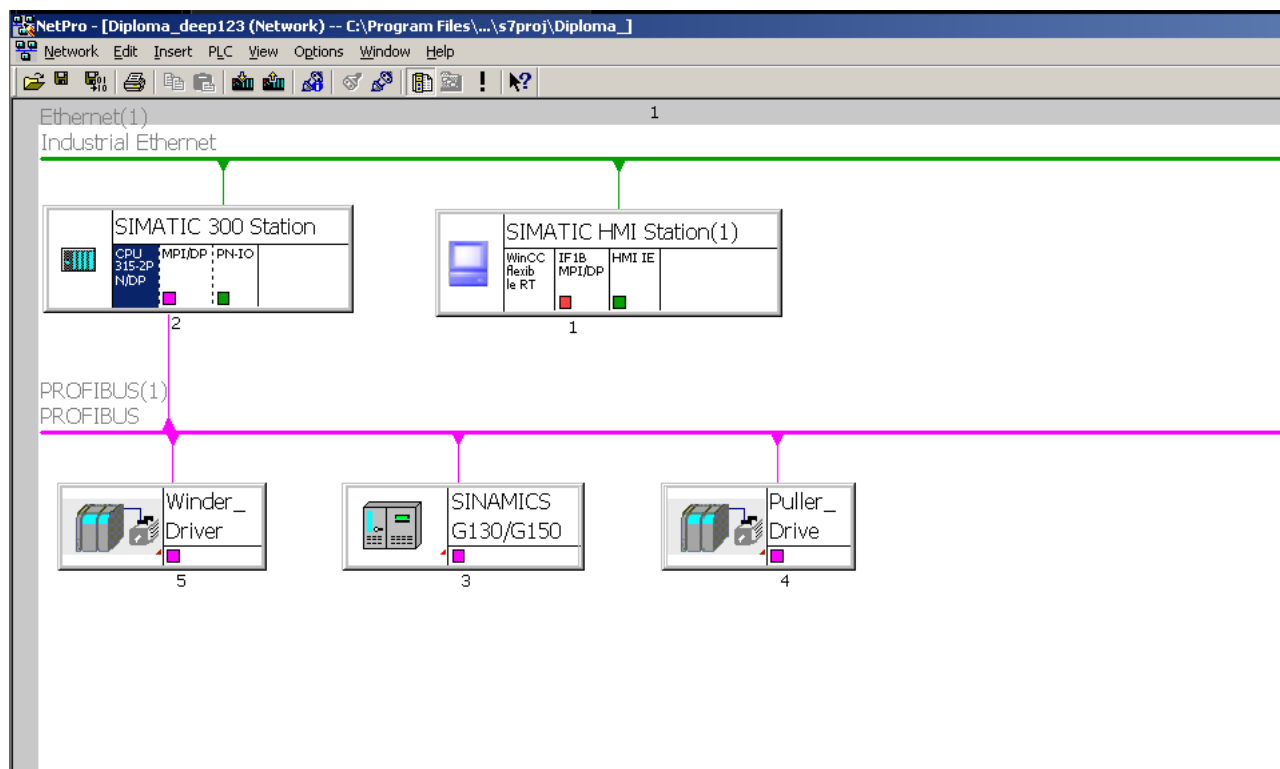


Рис. 4.2 Обмін даними

Для підвищення читабельності програмного коду та зручності налагодження було створено таблицю символів (Symbol Editor), де абсолютним адресам пам'яті присвоєно символічні імена.

У таблиці визначено наступні групи змінних:

- **Аналогові входи (PIW):** AI_Temp1, AI_Temp2 (температурні зони), AI_Press (тиск розплаву), AI_Diam (датчик діаметру). Тип даних INT відповідає формату даних АЦП.
- **Аналогові виходи (PQW):** AO_Heat1, AO_Heat2 (керування нагрівачами), а також канали керування приводами Drv_Main, Drv_Puller, Drv_Winder.
- **Системні функції та блоки:** Задекларовано функціональні блоки ПІД-регулювання CONT_C (FB41) та функції масштабування аналогових сигналів SCALE (FC105) і UNSCALE (FC106).

	Status	Symbol	Address	Data type	Comment
1		AI_Diam	PIW 262	INT	
2		AI_Press	PIW 260	INT	
3		AI_Temp1	PIW 256	INT	
4		AI_Temp2	PIW 258	INT	
5		AO_Heat1	PQW 256	WORD	
6		AO_Heat2	PQW 258	WORD	
7		CONT_C	FB 41	FB 41	Continuous Control
8		Drv_Main	PQW 294	INT	
9		Drv_Puller	PQW 279	INT	
10		Drv_Winder	PQW 264	INT	
11		m1.0	M 1.0	BOOL	Monopolar
12		SCALE	FC 105	FC 105	Scaling Values
13		UNSCALE	FC 106	FC 106	Unscaling Values
14					

Рис. 4.3. Символьна таблиця

Організація обміну даними між програмою контролера та панеллю оператора (HMI) реалізована через структуру глобального блоку даних DB1. Змінні розподілено за функціональним призначенням:

- **Командні сигнали (BOOL):** System_Start, System_Stop для керування режимами роботи лінії.
- **Уставки (REAL):** Параметри з суфіксом _SP (Setpoint), такі як Temp_Zone1_SP та Motor_Speed_SP, призначені для введення заданих значень технологічних параметрів з панелі оператора.
- **Поточні значення (REAL):** Змінні з суфіксом _PV (Process Value), наприклад Pressure_PV та Diametr_PV, використовуються для відображення реального стану процесу на екрані візуалізації.

DB1 -- Diploma_deep123\SIMATIC 300 Station\CPU315-2 PN/DP(1)				
Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	System_Start	BOOL	FALSE	Start
+0.1	System_Stop	BOOL	FALSE	Stop
+0.2	System_Active	BOOL	FALSE	Active_Trigger
+2.0	Temp_Zone1_SP	REAL	0.000000e+000	Temp1_HMI
+6.0	Temp_Zone2_SP	REAL	0.000000e+000	Temp2_HMI
+10.0	Motor_Speed_SP	REAL	0.000000e+000	Motorspeed_HMI
+14.0	Temp_Zone1_PV	REAL	0.000000e+000	Real_Temp1
+18.0	Temp_Zone2_PV	REAL	0.000000e+000	Real_Temp2
+22.0	Pressure_PV	REAL	0.000000e+000	Real_Press
+26.0	Diametr_PV	REAL	0.000000e+000	Real_Diam
+30.0	Motor_Out_Word	INT	0	Math_Motor
=32.0		END_STRUCT		

Рис. 4.4 Дата блок

4.2 Опис логіки керування

Реалізація алгоритму включення та блокування системи виконана у першому сегменті (Network 1) організаційного блоку OB1. Логічна схема представляє собою класичний тригер з самопідхватом, який забезпечує запам'ятовування стану «Робота» після короткочасного натискання кнопки «Старт» (DB1.DBX0.0).

Відключення системи відбувається при розмиканні нормально-замкненого контакту «Стоп» (DB1.DBX0.1). Результат логічної операції записується у біт активності системи (DB1.DBX0.2), який надалі використовується як дозвільний сигнал (Enable) для роботи регуляторів та приводів.

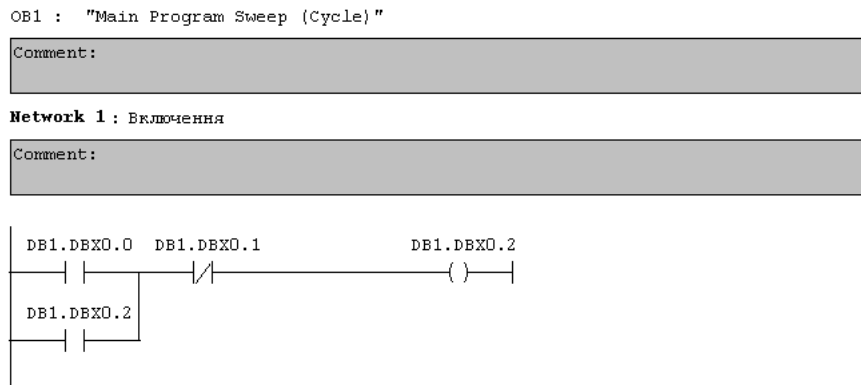


Рис. 4.5 Логіка керування пуском системи

Первинна обробка вимірювальної інформації здійснюється у сегменті Network 2 за допомогою стандартних функцій системної бібліотеки FC105 ("SCALE"). Блоки виконують перетворення та нормалізацію уніфікованих електричних сигналів (кодів АЦП), що надходять на периферійні адреси входів (PIW256...PIW262), у дійсні фізичні величини формату REAL (плаваюча кома).

Результати перетворення (температура зон, тиск розплаву, діаметр нитки) записуються у відповідні комірки глобального блоку даних (DB1.DBD14...DB1.DBD26) для подальшого використання у контурах регулювання та візуалізації.

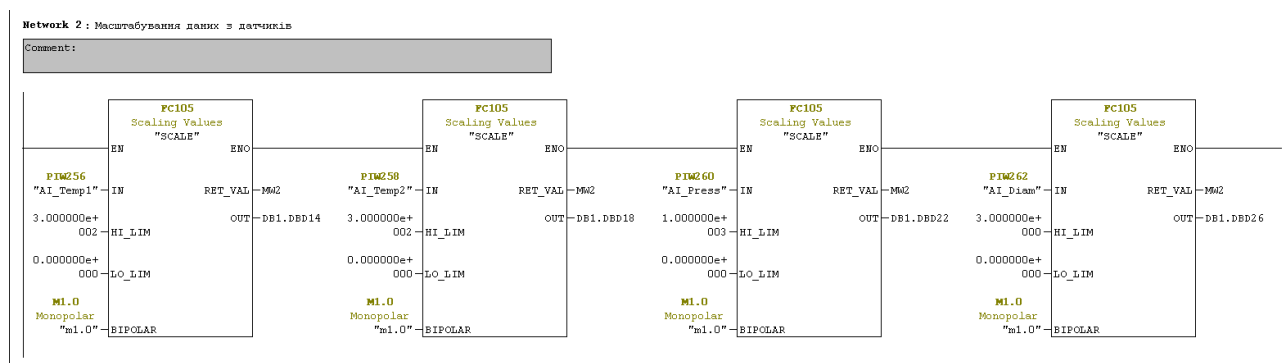


Рис. 4.6 Нормування сигналів з датчиків

Реалізація закону автоматичного регулювання температури у першій зоні нагріву (Zone 1) виконана на базі функціонального блоку FB41 ("CONT_C"), який реалізує неперервний ПД-алгоритм.

На вхід завдання SP_INT подається уставка з блоку даних (DB1.DBD2), яку задає оператор. На вхід зворотного зв'язку PV_IN надходить поточне значення температури (DB1.DBD14). Блок розраховує керуючий вплив на основі узгоджених коефіцієнтів (пропорційного, інтегрального та диференційного) і формує вихідний сигнал на периферійну адресу PQW256, до якої підключено тиристорний регулятор потужності.

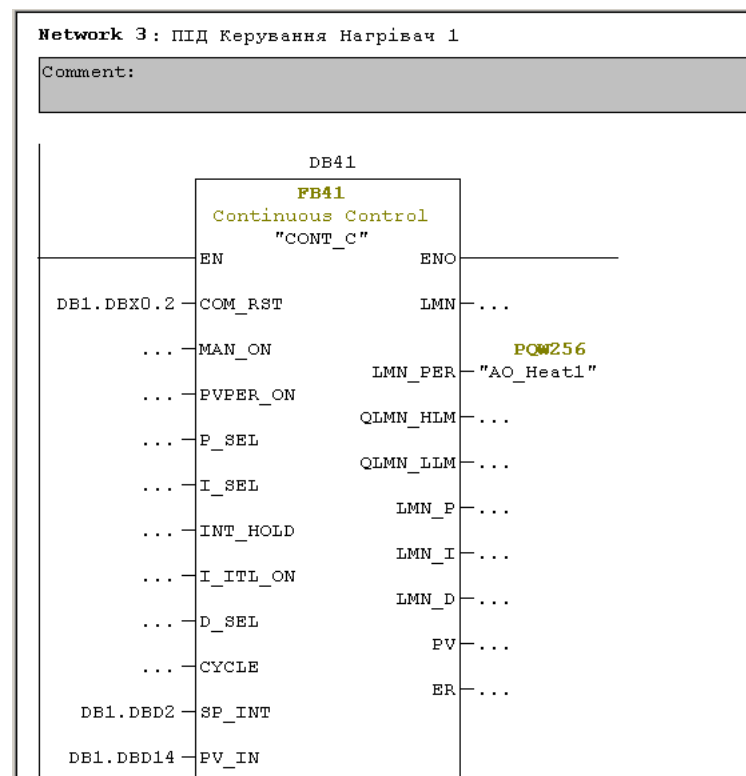
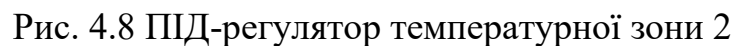


Рис. 4.7 ПІД – регулятор температурної зони 1

Керування температурним режимом другої зони (Zone 2) здійснюється аналогічним чином у сегменті Network 4 за допомогою окремого екземпляру функціонального блоку FB41 (Instance DB42).

Регулятор опрацьовує відхилення поточної температури (DB1.DBD18) від заданої уставки (DB1.DBD6) та формує керуючий сигнал на вихід PQW258. Використання окремих блоків регулювання для кожної зони забезпечує незалежність контурів та високу точність підтримки температурного профілю екструдера.



Отримане значення (DB1.DBW26) транслюється за допомогою команд пересилки (MOVE) на вихідні адреси приводів: PQW294 (Головний двигун), PQW279 (Тягучий пристрій) та PQW264 (Намотувач). Це забезпечує синхронну передачу завдання швидкості на всі виконавчі механізми лінії.

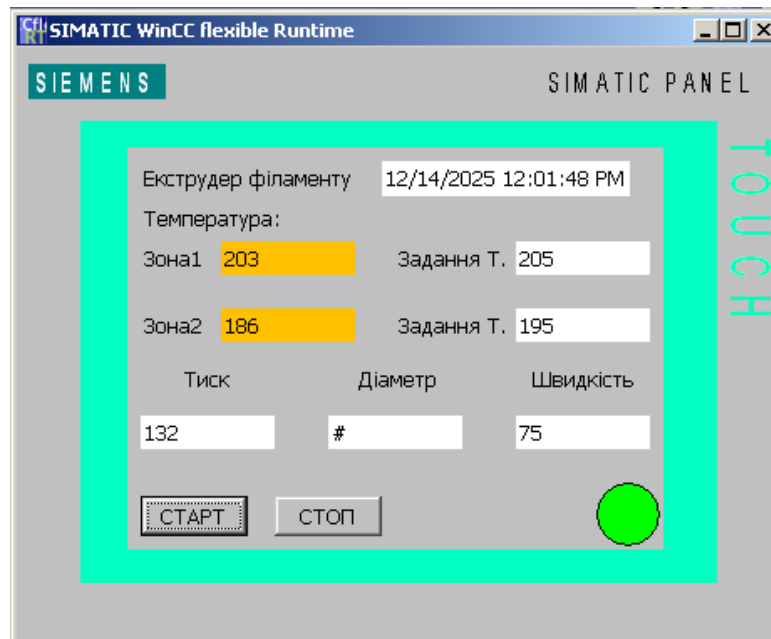


Рис. 4.10 Панель візуалізації

Налаштування інформаційного обміну між контролером та панеллю оператора виконано в редакторі тегів ("Tags"). Таблиця встановлює зв'язок між внутрішніми змінними HMI (наприклад, Act_Temp1, Set_Speed) та відповідними адресами у блоці даних контролера (DB1.DBD14, DB1.DBD10).

Для кожної змінної визначено тип даних (Real або Bool), канал зв'язку (Connection_2) та цикл опитування (Acquisition cycle), що визначає частоту оновлення даних на екрані (від 100 мс для кнопок до 1 с для температур).

Name	Connection	Data type	Symbol	Address	Array elements	Acquisition cycle	Comment
Act_Diam	Connection_2	Real	Diametr_PV	DB 1 DBD 26	1	1 s	Real_Diam
Act_Press	Connection_2	Real	Pressure_PV	DB 1 DBD 22	1	1 s	Real_Press
Act_Temp1	Connection_2	Real	Temp_Zone1_PV	DB 1 DBD 14	1	1 s	Real_Temp1
Act_Temp2	Connection_2	Real	Temp_Zone2_PV	DB 1 DBD 18	1	1 s	Real_Temp2
Btn_Start	Connection_2	Bool	System_Start	DB 1 DBX 0.0	1	100 ms	Start
Btn_Stop	Connection_2	Bool	System_Stop	DB 1 DBX 0.1	1	100 ms	Stop
DB1.System_A...	Connection_2	Bool	System_Active	DB 1 DBX 0.2	1	500 ms	Active_Trigger
Set_Speed	Connection_2	Real	Motor_Speed_SP	DB 1 DBD 10	1	500 ms	Motorspeed_HMI
Set_Temp1	Connection_2	Real	Temp_Zone1_SP	DB 1 DBD 2	1	1 s	Temp1_HMI
Set_Temp2	Connection_2	Real	Temp_Zone2_SP	DB 1 DBD 6	1	1 s	Temp2_HMI

Рис. 4.11 Таблиця тегів

5. ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи було спроектовано та розроблено автоматизовану систему керування (АСК) екструзійною лінією для виробництва філаменту для 3D-друку. Система базується на сучасних засобах промислової автоматизації компанії Siemens, що гарантує високу надійність, точність та відповідність міжнародним стандартам.

Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення: В якості керуючого ядра системи обрано модульний програмований логічний контролер SIMATIC S7-300 (CPU 315-2 PN/DP). Його швидкодія та наявність інтерфейсу PROFINET дозволили реалізувати складні алгоритми керування в реальному часі. Для забезпечення енергоефективного керування нагрівом застосовано тиристорні регулятори потужності Autonics SPC1-50-E.

Розроблено систему електроприводу: Реалізовано схему синхронного керування приводами за принципом «Master-Slave». Використання частотного перетворювача SINAMICS G120 для головного приводу шнека та сервосистеми (або прецизійних приводів) для тягучого пристрою забезпечило стабільність лінійної швидкості протягування та, як наслідок, сталість діаметру філаменту.

Реалізовано алгоритми керування: У середовищі STEP 7 розроблено програмне забезпечення, що включає функціональні блоки ПІД-регулювання (FB41) для температурних зон. Це дозволило досягти точності підтримання температури розплаву в межах $\pm 1^{\circ}\text{C}$, що є критично важливим для переробки різних типів полімерів (PLA, ABS, PETG).

Створено людино-машинний інтерфейс: У середовищі WinCC flexible розроблено зручну систему візуалізації, яка надає оператору можливість моніторингу параметрів (температури, тиску, діаметру, швидкості) та зміни уставок технологічного процесу без необхідності зупинки обладнання.

Забезпечено масштабованість: Завдяки модульній архітектурі контролера та використанню промислових мереж Industrial Ethernet/PROFIBUS, розроблена система має значний потенціал для модернізації, наприклад, шляхом додавання

нових зон нагріву, системи технічного зору для контролю якості поверхні нитки або інтеграції в загальнозаводську SCADA-систему.

Таким чином, розроблена система автоматизації повністю відповідає технічному завданню, забезпечує високу якість кінцевого продукту та енергоефективність виробничого процесу.

6. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Recycling plastic waste for 3D Printing filament by extrusion processing, 2021. – 108с.
2. SIMATIC S7-300. CPU 31xC and CPU 31x: Installation and Operating Manual. – Siemens AG, Automation and Drives, 2011. – 234 p.
3. Programmable Logic Controllers S7-300. Module Data: Reference Manual. – Siemens AG, 2017.
4. Delta Electronics. ASDA-B2 Series Standard AC Servo Drive: User Manual. – Taiwan: Delta Electronics Inc, 2018.
5. Autonics. SPC1 Series Power Controller: User Manual. – Korea: Autonics Corporation, 2018.
6. ПЛАСТИК. ЗАБРУДНЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЯ: реферат / Кураченко Н.М., Кравець В.Д., 2014. – 4с.
7. Шеваленко, Н. В. Нові технології переробки полімерних відходів та використаної тари / Н. В. Шеваленко, Д. Ю. Кіптик, О. В. Макушинський - Хім. пром-ть України. – 2005.
8. Суберляк О.В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів: підручник / О.В. Суберляк, П.І. Баштаник. – Львів: Растр-7, 2015. – 456 с.
9. Сокольський О. Л. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії : монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 252 с.
10. Сердюк О.О. Конфігурування систем автоматизації SIMATIC: конспект лекцій. Краматорськ – 2018.
11. Пупена О.М. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації: навчальний посібник / О.М. Пупена, І.В. Ельперін. – К.: Ліра-К, 2019. – 320 с.
12. Порівняння фізико-хімічних властивостей полімерів для 3D-друку: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>

13. Переробка пластикових відходів в Україні: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://plast-lom.com.ua/pererobka-vidhodiv-plastiku/>
14. 3D-друк у переробці пластикових відходів і відходів біомаси до стійких полімерних сумішей і композитів: [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127523009747#b0285>
15. REGMIK Датчик температури TCM-101П: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://regmik.ua/uk/product/datchiki-temperature-101p/>
16. A2M engineering Перетворювач SINAMICS V20: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.a2m.com.ua/ua/katehoriia/elektropryvid/VFD>
17. Delta ASDA-B2 series контролер сервоприводів: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.deltaww.com/en-us/products/Servo-Systems-AC-Servo-Motors-and-Drives/225>
18. Посібник із вибору матеріалів для 3D-друку та їх властивості: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>
19. Основи екструзії термопластів та огляд обладнання: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://polymeracademy.com/extrusion-basics/>
20. Офіційний каталог технічної документації Siemens Industry Online Support: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com/cs/start?lc=en-WW>