

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри КСУ
_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»
на тему: «Автоматизована система керування процесом виготовлення
філаменту для 3д принтера»

Здобувача групи СУм.дн-21п

Руденко Дмитро Сергійович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело.

(підпис)

Дмитро РУДЕНКО

Керівник завідувач кафедри КСУ, к. т. н., Петро ЛЕОНТЬЄВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Руденко Дмитро Сергійович

(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування процесом виготовлення філамента для 3д принтера.

затверджена наказом ректора СумДУ № _____ від " _____ " _____ 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, технічна документація, перелік літературних джерел.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню): огляд існуючих систем для виготовлення філаменту і способів екструзії пластику, переваги та недоліки такого таких систем, автоматизована система виготовлення філамента для 3д принтера, виконавчі механізми для автоматизації процесу екструзії.

5. Перелік графічних матеріалів: 29 рисунків, 9 схем.

6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Аналіз завдання. Огляд літератури.	07.11.2023 – 08.11.2023
2	Розгляд існуючих систем виготовлення філаменту для 3д принтеру	09.11.2023 – 15.11.2023
3	Створення контурів регулювання та їх математичних моделей.	16.11.2023 – 22.11.2023
4	Розрахунок регуляторів для системи виготовлення філаменту для 3д принтеру.	23.11.2023 – 26.11.2023
5	Розроблення схем автоматизації.	27.11.2023 – 28.11.2023
6	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації	28.11.2023 – 15.11.2023

7. Дата видачі завдання " 07 " листопада 2023 р.

Керівник проекту:

Завідувач кафедри КСУ, к. т. н
(науковий ступінь, вчене звання, посада)

(підпис)

Петро ЛЕОНТЬЄВ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач:
студент гр. СУм.дн-21п
(шифр групи)

(підпис)

Дмитро РУДЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Руденко Дмитро Сергійович. Автоматизована система керування процесом виготовлення філаменту для 3д принтера. Дипломна робота. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Робота містить: 45 сторінок, 29 рисунків, 9 схем.

Магістерська робота присвячена розробці та дослідженню системи автоматизованого керування процесом виготовлення філаменту. Основний акцент робиться на системі, яка в автоматичному або напівавтоматичному режимі зможе виготовляти філамент достойної якості, та зможе підтримувати задані параметри в потрібних межах. Система включає в себе систему давачів, які моніторять потрібні параметри в реальному часі, та виконавчі пристрої, які регулюють процес виготовлення та протяжки філаменту.

Було розглянуто основні способи виготовлення філаменту, відмінність в матеріалах пластику, та існуючі установки для виготовлення філаменту. Створено математичні моделі. Розроблено систему регулювання обертів двигуна та температури.

Ключові слова: автоматизація, 3Д друк, філамент, пластик, система керування.

ABSTRACT

Dmytro Serhiyovych Rudenko. Automated system for controlling the filament manufacturing process for a 3D printer. Graduate work. Sumy State University. Sumy, 2023

The work contains: 45 pages, 29 drawings, 9 schemes.

The master's thesis is devoted to the development and research of the automated control system of the filament manufacturing process. The main emphasis is placed on the system, which in automatic or semi-automatic mode will be able to produce filament of decent quality, and will be able to maintain the set parameters within the required limits. The system includes a system of sensors that monitor the

required parameters in real time, and executive devices that regulate the filament manufacturing and drawing process.

The main methods of manufacturing filament, the difference in plastic materials, and existing installations for manufacturing filament were considered. Mathematical models have been created. A system for regulating engine speed and temperature has been developed.

Keywords: automation, 3D printing, filament, plastic, control system.

Зміст

1. Аналіз існуючих технологій друку та методів виготовлення філаменту для 3Д друку.	9
1.1 Види 3Д принтерів.	9
1.2 Види філаменту для 3Д принтерів.	13
1.3 Виготовлення філаменту методом екструзії.	15
1.4 Виготовлення PETG філаменту вторинної сировини.	18
2. Огляд існуючих систем для виготовлення філаменту.	22
2.1 EVO Extruder.	22
2.2 Noztek PRO HT.	23
2.3 Noztek Xcalibur 3.	25
2.4 3Д принтери з можливістю використання гранул замість філаменту.	26
3. Автоматизація процесу виготовлення філаменту.	29
3.1 Регулювання температури сопла.	31
3.1.1 Математична модель регулятора температури.	32
3.2 Регулювання швидкості обертання двигуна намотки філаменту.	36
3.2.1 Створення математичної моделі регулювання швидкості обертання двигуна намотки філаменту.	36
4. Вибір засобів автоматизації.	40
4.1 STM32.	40
4.2 Давач температури.	41
4.3 Твердотільне реле.	42
4.4 Двигун з редуктором.	43
4.5 Кільцевий нагрівач.	44
ВИСНОВКИ.	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.	47

ВСТУП

З постійним розвитком технологій 3Д – друку попит на якісні матеріали для друку, такі як філамент, росте з кожним днем. Від якості та виду пластику для друку залежить те, наскільки деталь буде міцна та витривала до перепадів температури. Незважаючи на те, що зараз на ринку існує велике різноманіття пластику для друку, існує потреба в постійному вдосконаленні та пришвидшенні його виготовлення. Для цього необхідно розробити автоматизовані системи керування, які здатні автоматично регулювати процес виготовлення філаменту, підвищити ефективність та якість таких екструдерів для пластику.

Актуальність автоматизованої системи виготовлення філаменту важко переоцінити, оскільки деталі надруковані на 3Д принтері часто використовують в медицині, інженерії та навіть у військовій справі для виготовлення деталей для військових дронів, хвостовиків до боєприпасів, кріплень для амуніції тощо. Оскільки пластик використовують в таких важливих галузях, це збільшує потребу в удосконаленні та покращенні якості пластику. Автоматизовані системи керування здатні забезпечити точний контроль та покращити якість продукції в разі, оскільки під час виготовлення мінімізується участь людини в процесі виготовлення, а це в свою чергу дозволяє виробляти пластик зі сталою якістю.

Мета даної магістерської роботи – це розробити, дослідити та впровадити автоматизовану систему керування процесом виготовлення філаменту для 3Д принтерів. З використанням новітніх технологій та правильних регуляторів, система буде спроможна контролювати та оптимізувати параметри виробництва з метою досягнення високої якості фінального продукту та підвищення швидкості виробництва.

Результат магістерської роботи – це розроблена система, яка здатна керувати процесом екструзії, охолодження, та регулювання товщини пластику для 3Д принтерів, було описано та підібрано виконавчі механізми, які дозволять реалізувати таку систему, та створено математичну модель процесу

нагріву екструдера та регулювання обертів двигуна на подачу пластикових гранул, та двигуна на забір готового філаменту після екструдера.

1. Аналіз існуючих технологій друку та методів виготовлення філаменту для 3Д друку.

3Д принтер – це прилад або установка, яка здатна пошарово створити об'ємний об'єкт використовуючи раніше створену і особливим способом підготовлену 3Д модель.

Основні процеси 3Д друку:

1. Для початку потрібно створити, або завантажити 3Д модель бажаної деталі або фігури. Після чого фігура завантажується в «слайсер», який розділяє фігуру на безліч шарів, в залежності від налаштувань та товщини сопла принтеру кількість шарів та час друку може змінюватись. Спеціальна програма генерує G – код, який містить в собі координати кожної точки та команди для принтеру, по яким він буде працювати.
2. Далі потрібно завантажити готовий G-код в принтер, перевірити наявність пластику та почати друк.
3. Після деякого часу модуль буде надруковано, потрібно почекати доки вона охолоне, і можна знімати її на обробку і використання.

1.1 Види 3Д принтерів.

На сьогоднішній день існує декілька основних видів принтерів, які здатні друкувати фігури та деталі різної міцності та надійності. За основу використовують різні технології, для досягнення максимально ефективного результату. Основні види включають:[11]

Fused Deposition Modeling(FDM) – найбільш популярний та найбільш дешевий вид принтерів. Ці принтери використовують пластикову нитку(філамент) з різних матеріалів, таких як ABS або PLA. Пластикова нитка подається в спеціальний модуль екструдера де пластик плавиться, і наноситься тонким шаром (від 0.1 до 0.5 мм) на спеціальну нагріту платформу.

Такий принтер працює у трьох основних напрямках (ось X, Y, Z), кожен

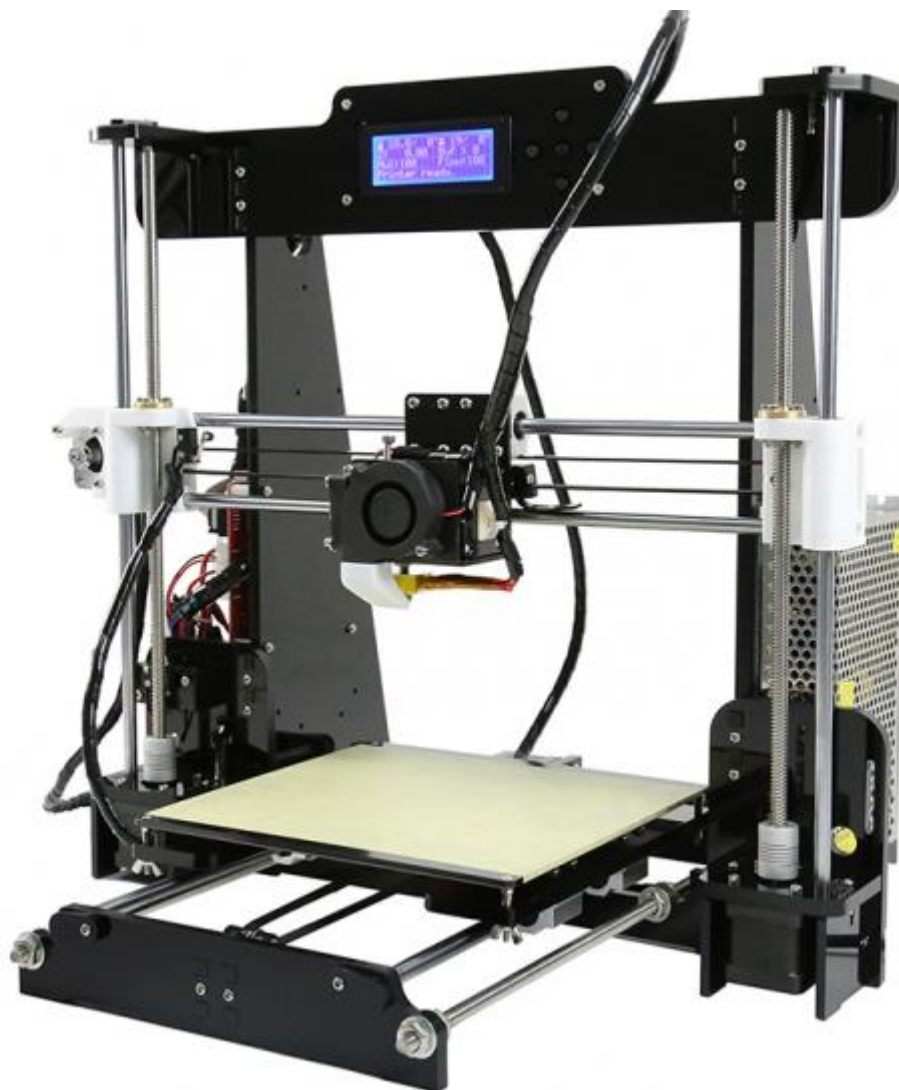


Рисунок 1 Зовнішній вигляд 3Д принтеру

шар прикріплюється до попереднього, і для максимальної адгезії, в камері друкування повинна підтримуватись температура, яка залежить від окремого виду пластику яким друкують. Регулювання товщини шару дозволяє отримувати деталі з різною якістю деталізації, та різними параметрами жорсткості та гнучкості.

Якщо деталь має нависання то програма – слайсер побудує спеціальні підтримки, на які буде спиратися, ще теплий пластик.

Stereolithography (SLA) – принтер який використовує ультрафіолетове світло, щоб спеціальна смола затверділа. Як і попередній принтер цей вид фіксує пошарово, на платформі, яка перевернута та знаходиться у спеціальній рідкій смолі.

Спеціальні лазери або світлодіоди направляють ультрафіолетове світло на поверхню смоли, в тих областях, де це потрібно формуючи цілу деталь. Після кожного засвітлення, платформа підіймається на задану висоту, доки деталь не буде повністю сформовано.

Після завершення друку, деталь потрібно промити для видалення надлишкової смоли.

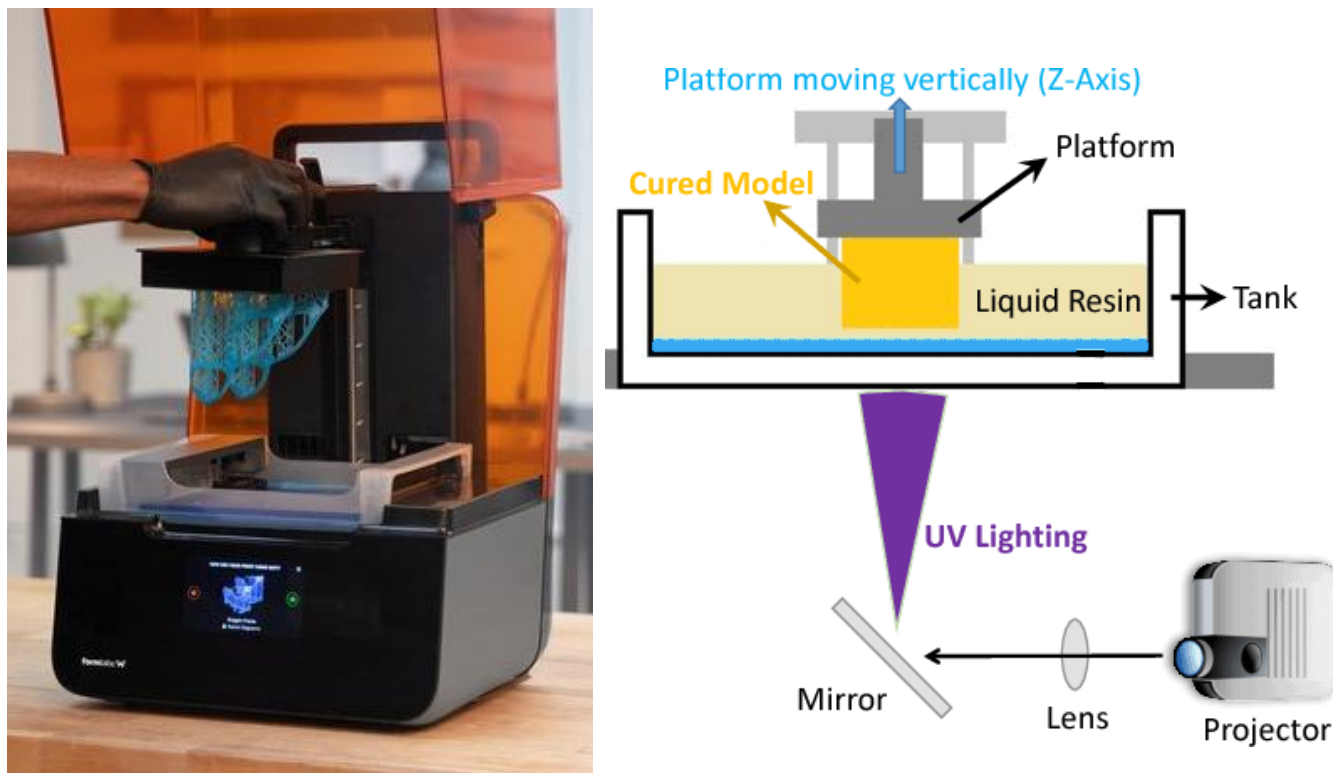


Рисунок 2 Принцип роботи та зовнішній вигляд SLA принтеру

SLA технологія дозволяє отримувати деталі та фігури відмінної якості, з мінімальною видимістю слоїв та максимальною адгезією. За допомогою цієї технології фігури отримують максимальний рівень деталізації та міцності, вона дозволяє друкувати складну геометрію. З мінусів можна виділити малі розміри можливих моделей, малий вибір матеріалів з яких можна друкувати та велика ціна матеріалів в порівнянні з попередньою технологією.

Binder Jetting – в основі цих принтерів лежить аддитивне виробництво, яке використовується для створення об'єктів шляхом нанесення тонких шарів порошкоподібних матеріалів(пісок, кераміка, окремі види металів) які пов'язують разом за допомогою спеціальної зв'язуючої рідини.

Основні етапи виробництва деталі: спочатку наносять тонкий шар спеціального порошку, який рівномірно розподіляється на друкарській

платформі. Потім друкарська платформа наносить спеціальну рідину, у місцях де потрібно зєднати матеріал разом.

Після застигання процес повторюється доки деталь не буде готова. Після закінчення друкарства деталь очищується від надлишкового порошку. Такий

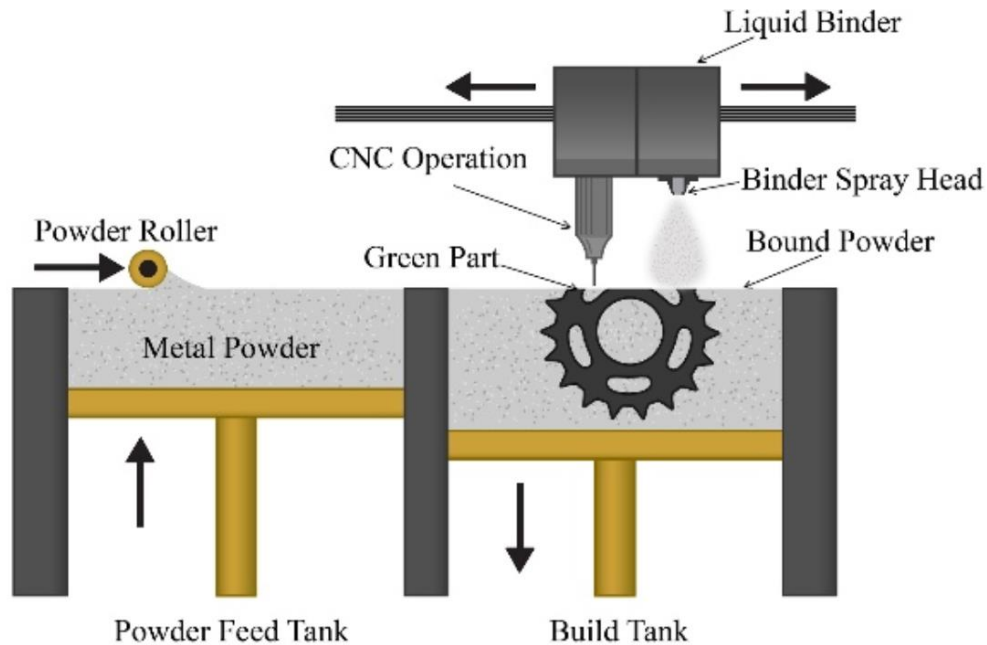


Рисунок 3 Принцип роботи принтеру з технологією Binder Jetting

спосіб дозволяє друкувати деталі швидше ніж іншими методами.

Такий метод використовується для створення металевих, керамічних та композитних деталей. Основним недоліком такого методу це ідність деталей, оскільки порошок склеюється це не дає такої надійності як при виливанні або фрезеруванні металеві деталі.

1.2 Види філаменту для 3Д принтерів.

На ринку філаменту існує багато видів пластику, який кардинально відрізняється між собою своїми характеристиками міцності, зносостійкості, гнучкості, довговічності тощо.

Основні види пластику:

PLA(Polylactic Acid) – являється одним із найпопулярніших видів філаменту. Він являється екологічним та натуральним видом пластику. Виготовляється з кукурузного крохмалю або цукрового тростнику, що дозволяє пластику бути біорозкладним та екологічно чистим. [1]

Цей пластик має низьку температуру плавлення, що спрощує з ним роботу, особливо якщо ви новачок у сфері 3Д друку. PLA має широкий вибір кольорів з додаванням ефектів таких як блиск, матування тощо.

Цей вид пластику ідеально підійде для виготовлення прототипів, декоративних виробів та предметів, які не потребують високої міцності та довговічності, оскільки з часом втрачає свої властивості та менш стійкий до високих температур.

ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) – це також популярний філамент для 3Д друку. Він має високу міцність та гарну ударостійкість, що дозволяє друкувати з нього механічні деталі, шестерні, нескладні механізми, які можуть піддаватися ударним навантаженням.

Також, важливою перевагою ABS пластику є його термостійкість, що дозволяє йому витримувати набагато більші температури ніж інший пластик. Цей вид пластику добре оброблюється, шліфується та за допомогою хімії можна надати глянцевий вигляд кінцевій деталі, що дозволяє друкувати з нього міцні декоративні накладки, з можливістю вибрати пластик по кольору з широкої палітри наявних кольорів.

Із мінусів цього пластику можна виділити шкідливі викиди при друкуванні, тому друк повинен проходити в добре провітрюваному приміщенні, або в спеціальному боксу для принтеру. Також ABS пластик схильний до деформації, тому кінцева деталь після охолодження може мати менші розміри ніж ті які закладалися в програмі моделювання. Цей пластик

може не підходити для новачків, оскільки для роботи з ним потрібні підвищені температури друку, але не всі принтери можуть підійти за параметрами.

TPU(Thermoplastic Polyurethane) – це особливий гнучкий вид пластику, який має гарну стійкість до зношування. Особливість цього пластику це те, що готова деталь за своїми характеристиками схожа на гумову, вона повертається в свою початкову форму після згинання, стиснення або розтягування. Цей матеріал має високу стійкість до зношування, що дозволяє друкувати деталі для умов постійного тертя.

TPU пластик добре витримує удари та має високу адгезію між шарами, що дозволяє уникнути деформації під час друку, та розшарування деталі під час експлуатації. Використовують цей пластик під час виготовлення взуття, пружин, амортизаційних деталей, упорів, спортивних товарів та медицині.

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) – особливий вид пластику, який в собі поєднує пластивості PLA та ABS пластику. Він має високу міцність, стійкість до хімії та ударів.

Це один із небагатьох видів пластику який після друкування може бути прозорим, з нього можна виготовляти повністю прозорі або напівпрозорі деталі. Для роботи з ним не потрібно багато знань, і він не вимагає спеціальних умов використання.

Також великою перевагою цього виду пластику є його ціна, та можливість виготовлення філаменту в домашніх умовах з використанням нарізаних звичайних пластикових пляшок або контейнерів, які пропускають через екструдер. Такі установки не складно виготовити в домашніх умовах, для зменшення собівартості друкованих деталей.

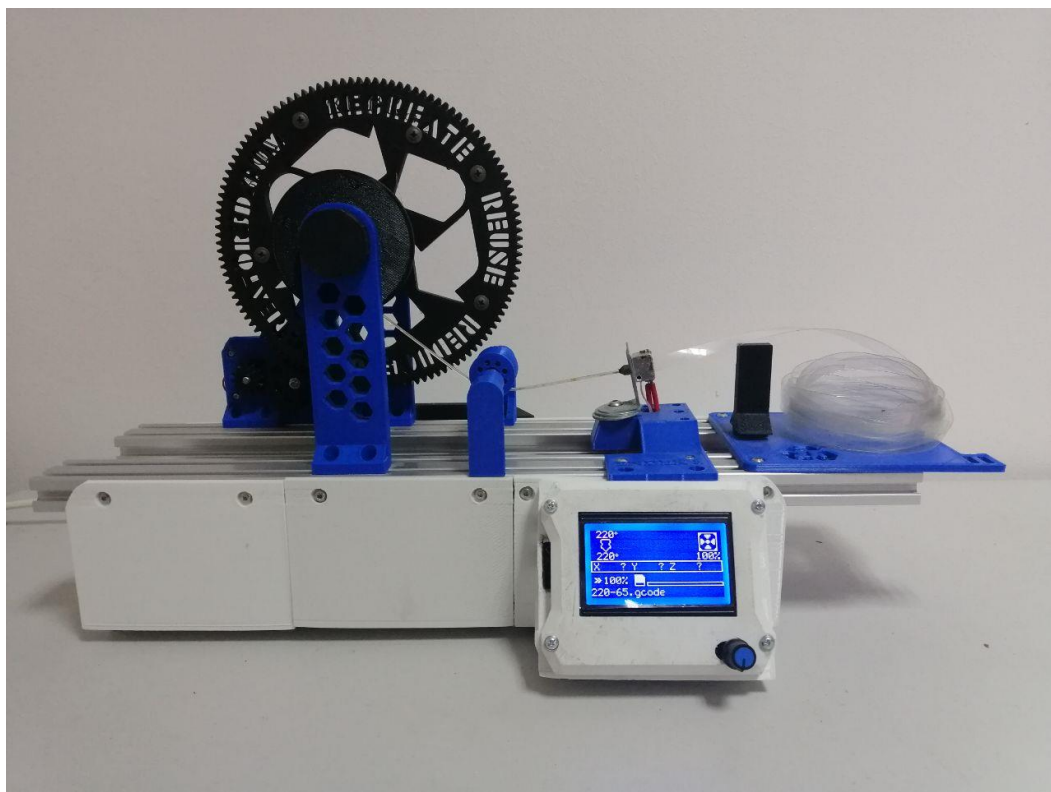


Рисунок 4 Саморобна установка для виготовлення філаменту з
PETG

1.3 Виготовлення філаменту методом екструзії.

Процес екструзії являє собою виготовлення виробів за допомогою продавлювання розплавленого або густого матеріалу через формувальний отвір. Цей метод є основним для виготовлення філаменту для 3Д принтерів. При виготовленні філаменту розплавлений пластик за допомогою шнеку продавлюють через нагрівальний екструдер. Під час роботи установки для виготовлення філаменту важливо контролювати швидкість подачі матеріалу, тиск у екструдері, швидкість намотування готового філаменту та температуру екструдера. [2]

Найбільш поширені види екструдерів:

- Одношнекові екструдери. Найдешевший та найрозповсюдженіший тип, вони мають один шнек, який подає матеріал до сопла, де він продвальноється та формує нитку.
- Двошнекові екструдери. Мають два шнека, один живильний, інший дозувальний, це дає більшу продуктивність, краще контроль процесу та однорідніший філамент.
- Планетарні екструдери мають декілька шнеків, які обертаються навколо головного, нерухомого шнека. З переваг таких екструдерів можна виділити високу продуктивність і якість готового філаменту.
- Екструдери з роликовою системою окрім шнека, мають систему валків які здатні витягувати і калібрувати розплавлений матеріал, це дозволяє отримати гладеньку та блискучу поверхню філаменту.

Також важливим параметром шнека є дегазація, іноді такі шнеки використовують при виготовленні особливо примхливого пластику. Дегазація - це процес видалення газів з рідкого, розплавленого матеріалу, безпосередньо перед подачею в головку. Дегазація потрібна щоб запобігти утворення пустот в готовому філамент, оскільки це значно погіршує якість готового продукту, та може пошкодити або забити екструдер 3Д принтеру. Дегазація може відбуватися за допомогою вакууму, ультразвуку, або відцентровим насосам, які відводять гази з рідкого матеріалу.

Також методи нагріву самого екструдера можуть відрізнятися, але для наших задач вистачить екструдера з електричним нагрівом та одним шнеком без зони дегазації.

Основний елемент в екструдері, який приводить механізм в роботу це

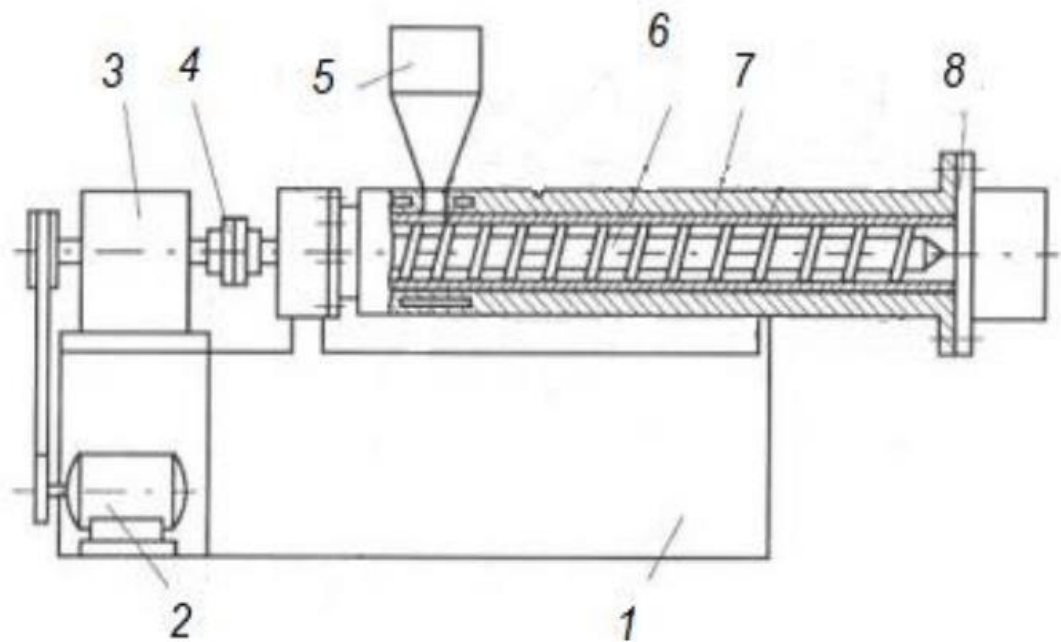


Рисунок 5 Схема екструдера

двигун з редуктором, який обертає шнек.

- 1- Корпус; 2 – Двигун; 3 – Редуктор; 4 – Муфта; 5 – Бункер завантаження;
6 – Шнек; 7 – Циліндр; 8 – Формуючий отвір.

Під час процесу екструзії важливим етапом є транспортування матеріалу в зону топлення. Це відбувається за допомогою шнеку, який розрахований таким чином, щоб матеріал створював потрібний тиск та не застрягав в циліндрі під час роботи екструдера.

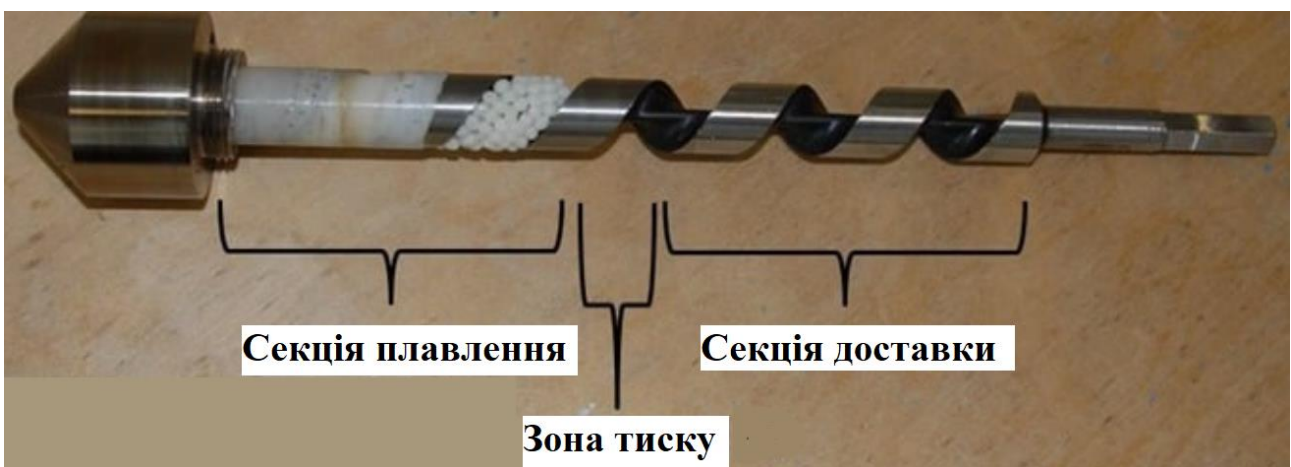


Рисунок 6 Зображення секцій плавлення пластикових гранул

На зображенні можна побачити розподіл зон, при роботі екструдера. Важливо створити перепад температури, щоб пластик плавився моментально, це дозволить створити потрібний тиск і прискорити процес екструзії, тому для цього встановлюють в зоні доставки та зоні тиску додаткове охолодження у вигляді радіаторів.

В секцію доставки, з бункера поступають гранули, за рахунок обертання шнека. Після чого відбувається деформація цих гранул під дією температури. В зоні тиску відбувається початкове плавлення та перехід матеріалу із пористої форми у текучий, густий стан. Як правило шнек виготовлений таким чином, щоб ближче до екструдера мати менше глибину прорізу, що дозволяє матеріалу рівномірніше та швидше прогріватися, та створює відповідний тиск.



Рисунок 7 Зовнішній вигляд шнеку

Зазвичай такі шнеки продаються у вигляді шнекової пари, тобто сам шнек йде відразу з циліндром в якому він має мінімальний проміжок між стінками, що дозволить використовувати його максимально ефективно.

1.4 Виготовлення PETG філаменту вторинної сировини

Виготовлення PETG філаменту з вторинної для 3Д принтеру доволі складний процес, який включає в себе багато складних етапів:

1. Для початку потрібно підготувати сировину, з якої буде виготовлятися філамент, це можуть бути спеціальні гранули, або пластик, який подрібнили.
2. Підгоовлений матеріал подається в нагрітий екструдер, де він плавиться та продавлюється через сопло порібного діаметру. Філамент утворюється за рахунок проходження розплавленого матеріалу через сопло, після чого пластик охолоджується та затвердіває.

3. Ще теплий філамент після екструдера потрапляє до системи охолодження, для остаточного затвердіння.
4. Філамент проходить через спеціальний мікрометр, який вимірює товщину філаменту, і в разі відхилення більшого за норму, дає сигнал на мікроконтролер.
5. Охоложений та перевірений філамент намотується на катушку, для подальшого використання в 3Д принтерах.

Це описано метод виготовлення PETG пластику в умовах промислового виготовлення, але зараз існує практика виготовлення таких станків в домашніх умовах, які здатні власника 3д принтера звільнити від потреби в покупці філаменту.

Такі установки можуть автономно працювати, не потребують складного налаштування і для виготовлення потребують пластикові пляшки, які нарізані на смужки товщиною 8 мм.



Рисунок 8 Прилад для нарізання пластикових пляшок на полоски

Далі готову пластикову стрічку намотують на катушку та пропускають через нагрітий екструдер, який створює готовий філамент, який готовий для використання в 3д принтері. [7]

Отриманий філамент намотується на катушку за допомогою двигуна з редуктором, швидкість якого можна регулювати.

На відміну від дорогих професійних устатковок для виготовлення філаменту, в цій простішій установці замість гранул використовується стрічка, яка зварюється в пруток.

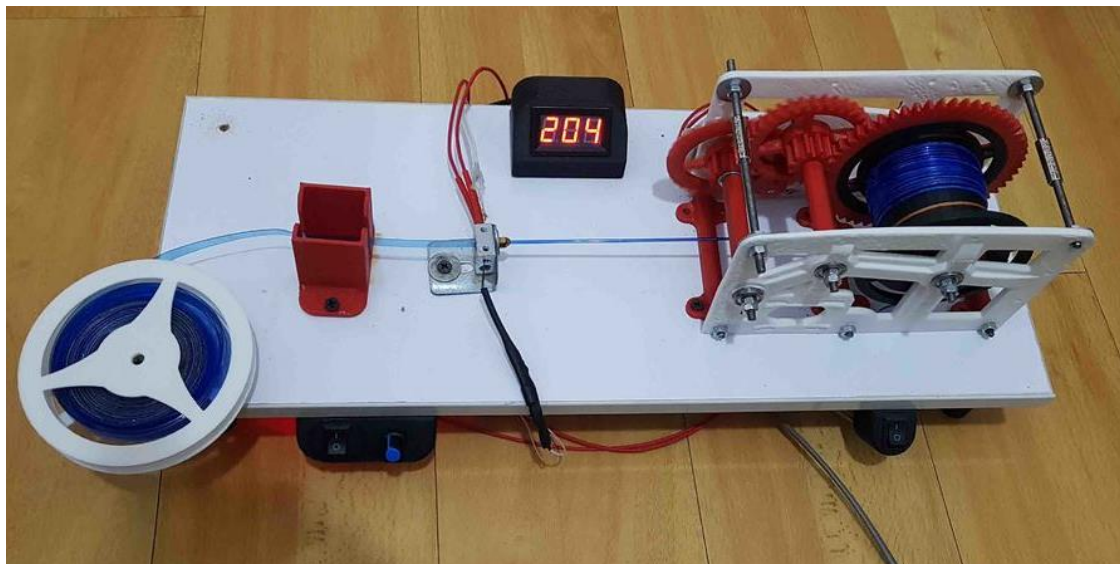


Рисунок 9 Установа для виробництва філаменту з стрічки

2. Огляд існуючих систем для виготовлення філаменту.

Майже всі установки для виготовлення філаменту для 3Д принтеру, які представлені на ринку використовують метод екструзії для виготовлення філаменту. Існує широкий спектр таких екструдерів, які відрізняються за типом, продуктивністю, особливістю конструкції та сферою застосування.

Існуючий асортимент екструдерного устаткування дозволить гнучко налаштувати процес виробництва під потрібні задачі.

2.1 EVO Extruder

EVO Extruder – це компактний, одношнековий екструдер, призначений для виготовлення філаменту для домашнього використання, розроблений компанією EVO Plastics.



Рисунок 10 Зовнішній вигляд екструдера EVO Extruder

Він має компактну та надійну конструкцію, а корпус виготовлений з алюмінію. Шнек має діаметр 35 мм та тефлонове покриття, що забезпечує легке відлипання матеріалу який застиг. Максимальна температура розігріву 300 градусів, що дозволить працювати зі всіма видами пластику. Продуктивність цієї установки приблизно 3-4 кілограми на годину.

Він має вбудований сенсорний дисплей для керування та моніторингу параметрів, а діаметр нитки може налаштовуватись шляхом заміни сопла.

В комплекті до нього йде охолоджуюча ванна та пристрій для намотки філаменту на котушки. Цей екструдер дозволить отримувати якісний філамент, в умовах домашнього виробництва.[5]

2.2 Noztek PRO HT

Для більш професійного та масштабного виробництва філаменту існує



Рисунок 11 Зовнішній вигляд екструдера
Noztek PRO HT

одношнековий високотемпературний екструдер Noztek PRO HT.

Основною перевагою цього екструдера є його виока температура роботи. Максимальна температура 600 градусів, що дозволяє робити філамент з таких пластиків як PEЕК, PEI, PPS та інші, які потребують великої температури та призначені для професійного використання. [10]

Нагрівач має потужність 1250 Вт, а діаметр шнеку 18 мм, який пофарбований порошковою емаллю для захисту.



Рисунок 12 Вигляд сопла

Максимальна продуктивність такого екструдера близько 6 кг на годину. На установці є регулювання швидкості обертання шнека, функції безпеки, запобіжники. Модульна система дозволить легко обслужити екструдер.

2.3 Noztek Xcalibur 3

Noztek Xcalibur 3 це оновлена версія, яка має нову операційну систему, здану обмінюватись даними з ПК або ноутбуком. Xcalibur це один із найбільших настільних екструдерів. Він має потрійні нагрівальні елементи, що дозволяють стабільно тримати температуру 600 градусів. Цей екструдер розроблений для максимально універсального використання в домашніх

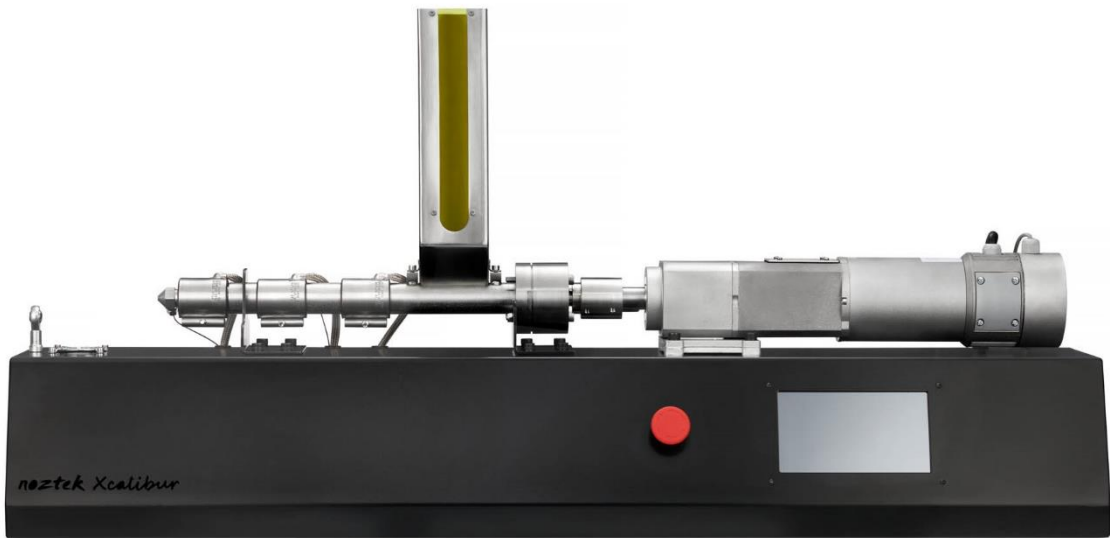


Рисунок 13 Зовнішній вигляд екструдера Noztek Xcalibur 3

умовах. [14]

Для підтримки постійних, стабільних обертів, використовується потужний двигун постійного струму, який може регулювати оберти до 57 об/хв. Екструдер здатний виробляти 2 кг пластику на годину. Всі параметри записуються, для зручного моніторингу. Він має вбудований таймер та бункер з нержавіючою сталі, який вміщує 1 кг пластикових гранул.

З останніми оновленнями стало можливе керування екструдером віддалено, що дозволить постійно контролювати необхідні параметри, що дозволить отримувати максимально якісний філамент з максимальною продуктивністю.

2.4 3Д принтери з можливістю використання гранул замість філаменту.

3Д принтери з можливістю друку використовуючи лише гранули пластику замість філаменту. Такий метод друку дозволяє зробити цей процес набагато дешевшим, простішим та легшим. В даний час небагато принтерів вміють працювати з цією технологією, але ця сфера стрімко розвивається. Основні переваги такої технології це зменшення собівартості надрукованих деталей та можливість працювати з більшим переліком матеріалів в різних сферах використання.

Основна складність таких систем полягає у видаленні повітря з гарячої пластмасової маси, оскільки при потраплянні повітря в деталь яка друкується, е буде створювати внутрішні пустоти, що в рази зменшує міцність готової деталі. Через це такі принтери використовують в основному для друку великих предметів, де такі пустоти майже не помітні і не впливають на кінцевий результат. Також в таких принтерах немає ретракту, тобто втягування розплавленого пластику для уникнення «павутини».[4]

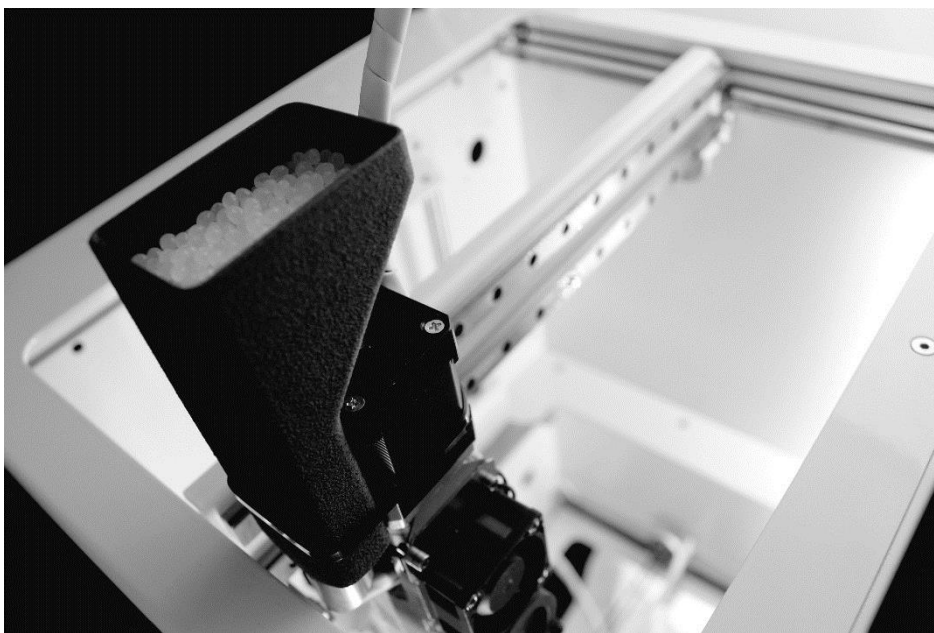


Рисунок 14 Бункер для завантаження гранул

Основна та найдорожча частина такого принтеру це екструдер. Він повинен поєднувати в собі функції розплавлення матеріалу та подачу розплавленого матеріалу в сопло. За допомогою цього екструдера, можна модернізувати звичайні принтери інтегрувавши таку систему замість



Рисунок 15 Схема екструдера з можливістю друку класичного екструдера.

Для використання таких екструдерів використовують спеціальну мікрогранулу, які мають діаметр від 1.8 до 2.1 мм. Мікрогранули мають менший час плавлення, та під час плавлення утворюється менше повітряних порожнин, що дозволяє зробити процес друкування більш стабільним та якісним.



Рисунок 16 Промисловий принтер з можливістю друку гранулою

3. Автоматизація процесу виготовлення філаменту.

Процес виготовлення філаменту для 3Д принтеру включає в себе декілька основних стадій виробництва: завантаження матеріалу, далі він плавиться та переміщується, потім йде екструзія через формувальну головку, регулювання діаметра за допомогою швидкості витягування філаменту, охолодження та зберігання готового філаменту в котушках.

Щоб автоматизувати ці процеси використовують такі рішення:

- Автоматична подача пластикових гранул.
- Контроль температури нагрівальної головки за допомогою мікроконтролеру або ПЛК.
- Моніторинг діаметра філаменту за допомогою лазерного давача, та регуляція швидкості намотування.
- Система водяного або повітряного охолодження.
- Автоматичне намотування філаменту на котушки.

Автоматизація процесу дозволить мінімізувати участь людини в процесі екструзії, що в свою чергу дозволить збільшити швидкість виробництва та в рази підвищити якість філаменту. Повністю автоматизовані лінії дозволять випускати великі об'єми філаменту з мінімальною участю персоналу та стабільною якістю.

Для автоматизації процесу потрібно розробити блок схему, за якою буде працювати автоматизована система виробництва філаменту.[6]

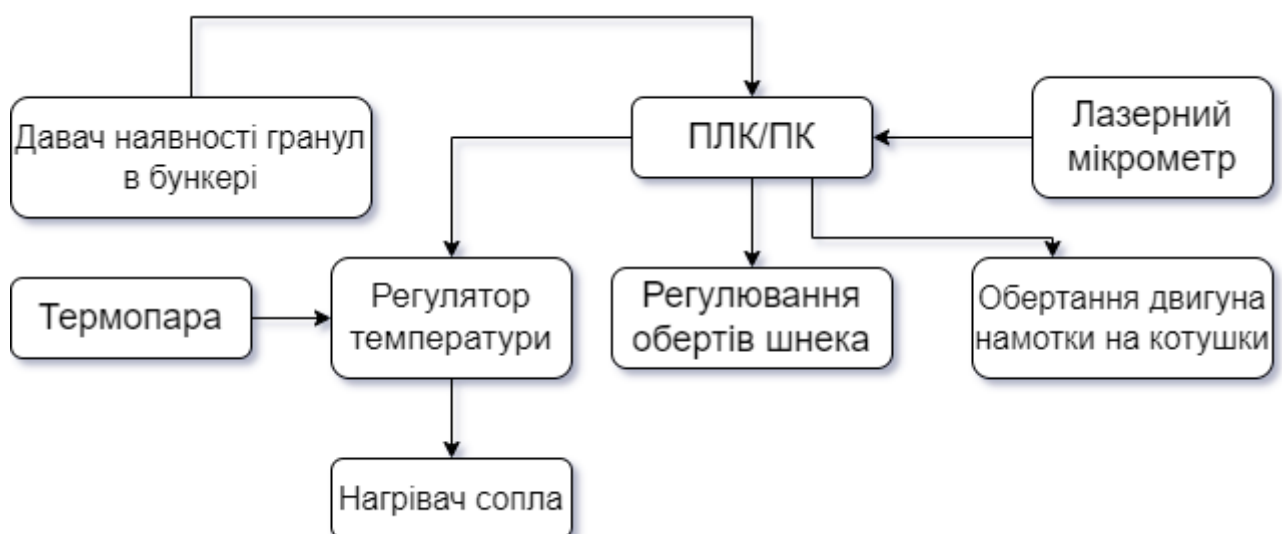


Рисунок 17 Блок схема автоматизації установки для виготовлення філаменту

З цієї блок схеми, ми можемо бачити основні напрями регулювання, це регулювання температури, обертів шнека та обертів котушки для намотки вже готового філаменту. Регулювання температури відбувається за допомогою ПІД регулятора, який керує нагрівачами через твердотільне реле.

Регулювання обертів двигуна намотки філаменту на котушки відбувається за рахунок даних, які приходять з лазерного мікрометра, якщо філамент товще, оберти пришвидшуються, якщо навпаки то оберти сповільнюються.

Оберти шнека регулюють тиск який створюється в камері плавлення, тому в основному це стала величина, яка може змінюватися в залежності від матеріалу з якого буде виготовлено філамент.

Під час роботи автоматизованої системи виникають збурення, створені зовнішніми факторами, це може заважати роботі або взагалі порушити роботу системи, оскільки це призводить до відхилення параметрів температури або обертів двигунів. Головне завдання системи автоматичного керування це усунення або взагалі мінімізація таких збурень. Керування системою відбувається по заданому закону зміни вхідних значень по відношенню до вихідних. Система автоматизації описується диференціальними рівняннями, та являє собою взаємодію між виконавчими механізмами та об'єктом керування.

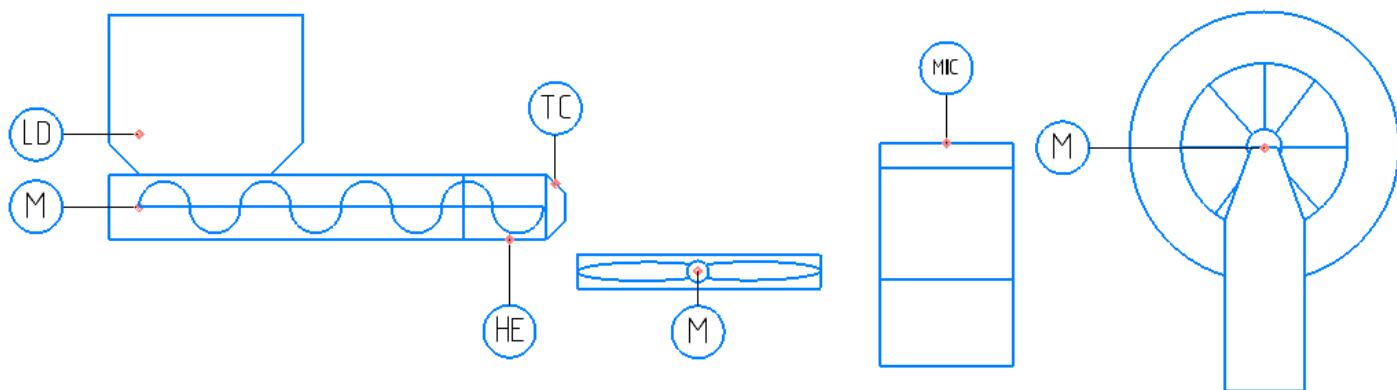


Рисунок 18 Функціональна схема автоматизації установки для виготовлення філаменту

3.1 Регулювання температури сопла.

Важливим етапом при автоматизації установки для виготовлення філаменту є – точний контроль температури. Регулювання температури в автоматизованій установці для виготовлення філаменту для 3Д принтеру відбувається за допомогою однієї або декількох термопар, які встановлені максимально щільно та близько до сопла, щоб якомога точніше вимірювати температуру в реальному часі. Отримані дані приходять на контролер, і він за допомогою заданого закону вираховує який керуючий вплив потрібно прикласти до нагрівача, щоб утримувати задану температуру.

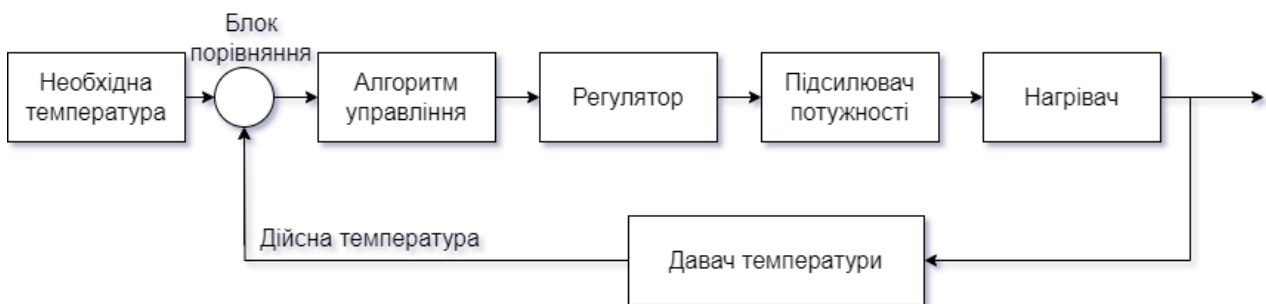


Рисунок 19 Блок-схема регулятора температури

Блок-схема регулятора температури із зворотним зв'язком містить наступні основні компоненти:

На вхід системи надходить сигнал із заданим значенням температури. Цей сигнал подається на блок порівняння. Туди ж надходить сигнал поточного значення температури від датчика, розміщеного безпосередньо на об'єкті регулювання - у приміщенні або технологічному апараті.

В блоці порівняння визначається різниця між заданою і фактичною температурою - сигнал похибки регулювання.

Далі сигнал проходить через алгоритм управління та потрапляє до регулятора, який на його основі формує керуючий вплив для виконавчого механізму - нагрівального елемента.

Сформований сигнал через підсилювач надходить на виконавчий механізм, який змінює тепловиділення і, відповідно, температуру об'єкта.

При цьому сигнал з датчика температури через зворотний зв'язок постійно надходить на регулятор, дозволяючи йому коригувати керуючий вплив для більш точного регулювання.

3.1.1 Математична модель регулятора температури

Для точного регулювання потрібно створити математичну модель процесу нагрівання сопла екструдера. Припустимо, що сопло нагрівається електричним нагрівачем потужністю P (Вт). Тепловіддача сопла в навколишнє середовище пропорційна різниці температур сопла T_c ($^{\circ}\text{C}$) та довкілля T_z ($^{\circ}\text{C}$).

Тоді математична модель системи матиме вигляд:

$$C(dT_c/dt) = P(t) - k \cdot (T_c - T_z),$$

де C - теплоємність сопла,

k - коефіцієнт тепловіддачі (пропорційності),

t - час.

Це диференціальне рівняння описує баланс тепла в соплі: його нагрів електричним нагрівачем, та втрати тепла в навколишнє середовище. На основі цієї моделі можна розробити регулятор температури, який буде автоматично змінювати потужність нагрівача $P(t)$ залежно від відхилення T_c від заданого значення. Далі потрібно знайти невідомі дані.

Для розрахунку теплоємності сопла екструдера потрібно знати його матеріал, масу та питому теплоємність матеріалу. Припустимо, сопло виготовлене з нержавіючої сталі з наступними даними:

Маса сопла - 0,5 кг

Питома теплоємність сталі - $c = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$

Тоді теплоємність сопла розраховується за формулою:

$$C = cm$$

де: c - питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$

m - маса тіла, кг

Підставляємо значення:

$$C = 500 \times 0,5 = 250 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$$

Отже, теплоємність сопла з масою 0,5 кг, виготовленого з нержавіючої сталі, становитиме $250 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$. Це значення теплоємності потрібно буде використати у математичній моделі системи регулювання температури даного сопла екструдера.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі k сопла екструдера скористаємось емпіричною формулою для розрахунку конвективного теплообміну:

$$k = \alpha * S / V,$$

де: α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²*°C)

S - площа поверхні теплообміну, м²

V - об'єм тіла, м³

Прийmemo наступні характеристики сопла:

діаметр сопла - 10 мм

довжина сопла - 40 мм

коефіцієнт тепловіддачі для повітря $\alpha = 10$ Вт/(м²*°C)

Розрахуємо:

S -площа бокової поверхні сопла (циліндра) = $2\pi RL = 23,140,0050,04 = 0,0013$ м²

V - об'єм сопла (циліндра) = $\pi R^2L = 3,140,00520,04 = 0,0000314$ м³

Підставляємо числові значення в формулу:

$$k = 10 * 0,0013 / 0,0000314 = 413 \text{ Вт/(м}^3\text{*°C)}$$

Коефіцієнт тепловіддачі розрахованого сопла становитиме приблизно 413 Вт/(м³*°C).

Щоб визначити час нагрівання сопла екструдера до заданої температури, скористаємось побудованою раніше математичною моделлю системи:

$$C(dT_c/dt) = P(t) - k*(T_c - T_3)$$

Розв'яжемо це диференціальне рівняння відносно T_c :

$$T_c(t) = (P/k) * (1 - \exp(-k*t/(C))) + T_3$$

де: P - потужність нагрівача сопла,

Вт k - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м³*°C)

C - теплоємність сопла, Дж/°C

T_3 - температура навколишнього середовища, °C

Припустимо, необхідно нагріти сопло від 20°C до 240°C за допомогою нагрівача потужністю $P = 100$ Вт. Сталі значення $C = 250$ Дж/°C та $k = 413$ Вт/(м³*°C).

Підставляємо числові значення і визначаємо час: $t = 230 \text{ с} = 3 \text{ хв } 50 \text{ с}$
Висновок: за допомогою нагрівача потужністю 100 Вт дане сопло нагріється від 20°C до 240°C приблизно за 3 хвилини 50 секунд.

Розрахуємо параметри та налаштуємо ПІД регулятор для системи керування нагрівальним елементом сопла екструдера.

Для налаштування ПІД-регулятора скористаємося методом Циглера-Нікольса.

Визначимо параметри моделі об'єкта регулювання:

$$K = P/k = 100/413 = 0,24$$

$$T = C/k = 250/413 = 0,6 \text{ с}$$

За методом Циглера-Нікольса отримуємо налаштування регулятора:

$$K_p = 0,6$$

$$T_i = 2T = 1,2 \text{ с}$$

$$T_d = 0,5T = 0,3 \text{ с}$$

Далі переходимо в Matlab Simulink для моделювання роботи регулятора та його подальшого налаштування.

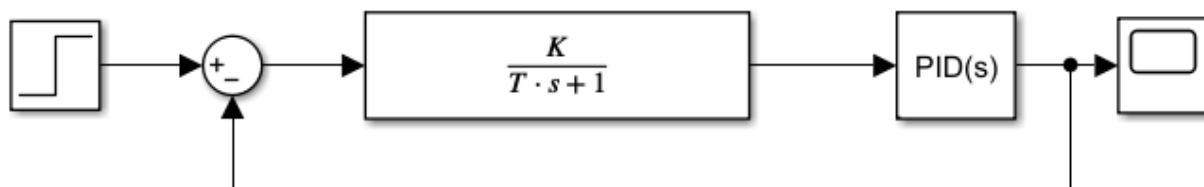


Рисунок 20 Схема контуру регулювання температури

Будуємо модель зі зворотнім зв'язком:

Вводимо всі відомі значення, та налаштовуємо регулятор на найменший

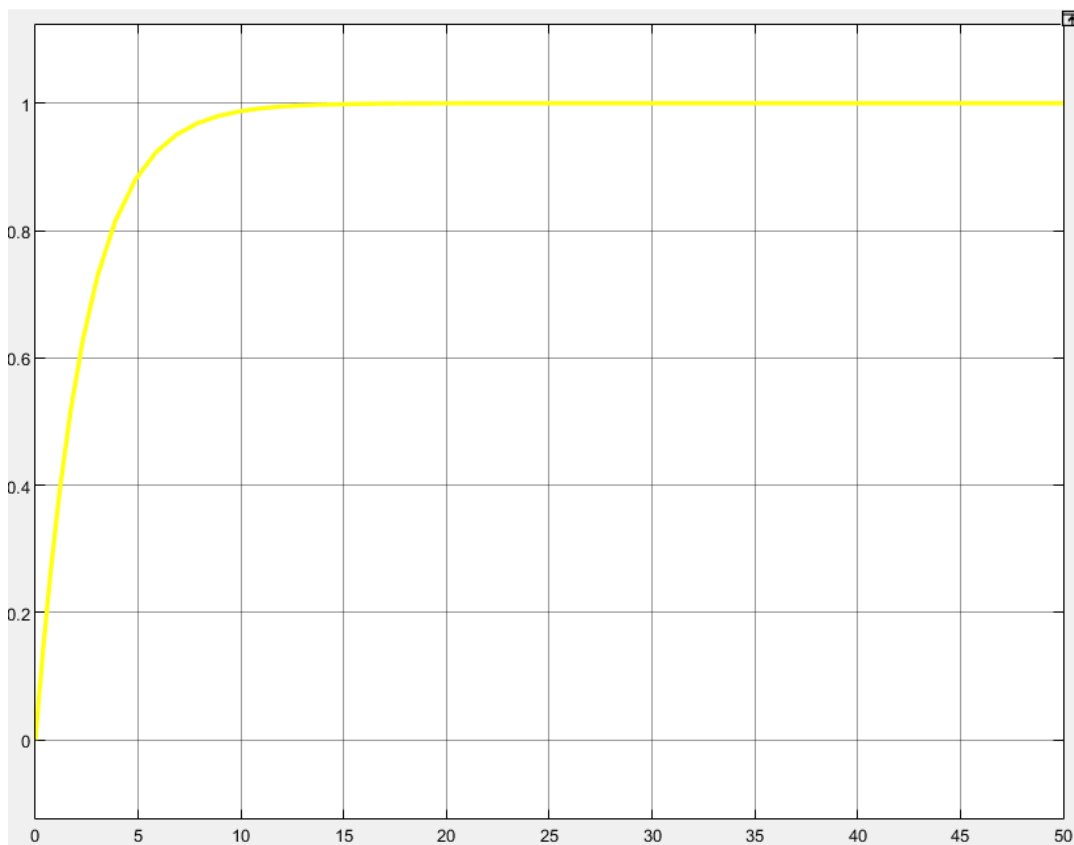


Рисунок 21 Перехідний процес регулювання температури

перехідний процес при мінімальному перерегулюванні:

3.2 Регулювання швидкості обертання двигуна намотки філаменту.

Для точного регулювання товщини філаменту та витягування його і намотки на катушки потрібно точно вимірювати його товщину та регулювати оберти двигуна. Вимірювати товщину будемо за допомогою лазерного мікрометра, і за допомогою мікроконтролеру будемо розраховувати з якою швидкістю повинен крутитись двигун намотки філаменту.

Розглянемо блок схему регулятора обертів

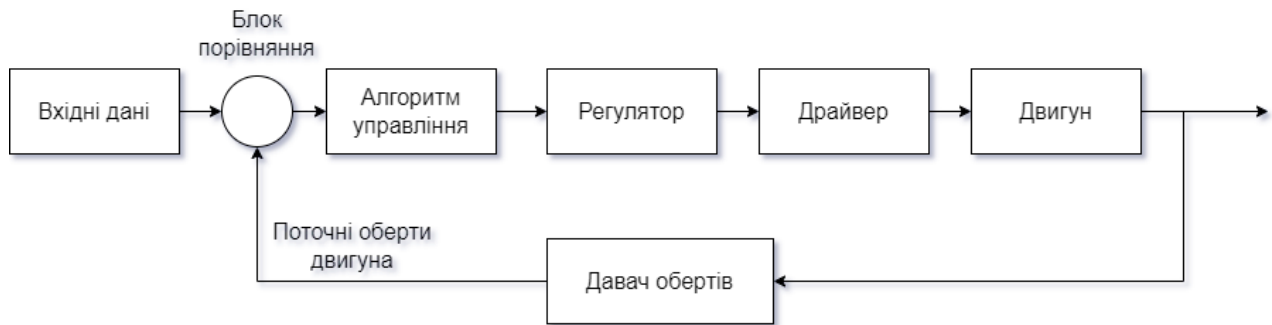


Рисунок 22 Блок схема регулятора обертів двигуна

Блок-схема регулятора обертів двигуна зі зворотнім зв'язком складається з наступних компонентів:

На вхід системи подається сигнал із заданою величиною обертів двигуна за хвилину, яку необхідно підтримувати. Даний сигнал надходить до блоку порівняння. Також на цей блок порівняння подається сигнал поточної кількості обертів від датчика обертів, встановленого безпосередньо на валу двигуна.

В блоці порівняння відбувається обчислення різниці сигналів - похибки регулювання обертів.

Отримана похибка, через алгоритм управління подається на регулятор, який на її основі формує керуючий вплив, що змінює оберти двигуна драйвер.

При цьому сигнал зворотного зв'язку постійно надходить на регулятор, дозволяючи йому коригувати сигнал управління для точнішого регулювання заданих обертів.

3.2.1 Створення математичної моделі регулювання швидкості обертання двигуна намотки філаменту

Створимо математичну модель об'єкту.

Позначимо:

$\omega(t)$ - кутова швидкість (оберти) двигуна в момент часу t

$u(t)$ - сигнал керування регулятором в момент часу t

τ - стала часу двигуна

Рівняння динаміки регулювання обертів двигуна має вигляд:

$$\tau * d\omega(t)/dt = -\omega(t) + K * u(t)$$

де K - коефіцієнт підсилення регулятора.

Це рівняння описує залежність зміни кутової швидкості двигуна від її поточного значення та керуючого впливу $u(t)$.

Метою регулятора є формування такого сигналу керування $u(t)$, який би забезпечив бажану швидкість обертання двигуна $\omega_{зад}(t)$. Для цього використовуються різні стратегії, наприклад ПД-регулювання.

Знайдемо сталу часу двигуна. Щоб знайти сталу часу двигуна τ , можна скористатися наступним підходом.

Розглянемо рівняння динаміки регулювання обертів двигуна:

$$\tau * d\omega(t)/dt = -\omega(t) + K * u(t)$$

Припустимо, що на вхід двигуна подається одиничний сигнал $u(t)=1$. Тоді рівняння набуде вигляду:

$$\tau * d\omega(t)/dt = -\omega(t) + K$$

Або, після перетворення,

$$\tau * \omega'(t) = -\omega(t) + K$$

Це лінійне диференціальне рівняння 1-го порядку. Загальний розв'язок має вигляд:

$$\omega(t) = K - (K - \omega(0)) * e^{(-t/\tau)}$$

де $\omega(0)$ - початкове значення кутової швидкості. Якщо при $t \rightarrow \infty$, то $\omega(t) \rightarrow K$. Це усталений режим. Тоді стала часу двигуна визначає час, за який відбувається зміна швидкості від початкового значення до 63% від усталеного значення K .

Отже, стала часу двигуна дорівнює:

$$\tau = t|_{\omega=0.63K}$$

Тобто експериментально фіксується час досягнення 63% від усталеної швидкості.

Щоб знайти коефіцієнт підсилення K регулятора обертів двигуна, можна скористатися таким підходом.

Розглянемо знову рівняння динаміки:

$$\tau * d\omega(t)/dt = -\omega(t) + K * u(t)$$

Припустимо, що на вхід системи подається одиничний сигнал $u(t)=1$. Тоді в усталеному режимі при $t \rightarrow \infty$ матимемо:

$$0 = -\omega(\infty) + K*1$$

Звідси:

$$\omega(\infty) = K$$

Тобто усталене значення кутової швидкості двигуна дорівнює коефіцієнту підсилення K регулятора.

Отже, щоб знайти K експериментально, потрібно:

- Подати одиничний сигнал керування $u(t)=1$
- Дочекатися виходу в усталений режим роботи двигуна
- Виміряти усталене значення кутової швидкості $\omega(\infty)$
- Отримане значення $\omega(\infty)$ і буде шуканим коефіцієнтом підсилення:

$$K = \omega(\infty)$$

Тобто коефіцієнт підсилення дорівнює усталеній швидкості двигуна при одиничному керуванні.

Збираємо систему використовуючи Matlab Simulink

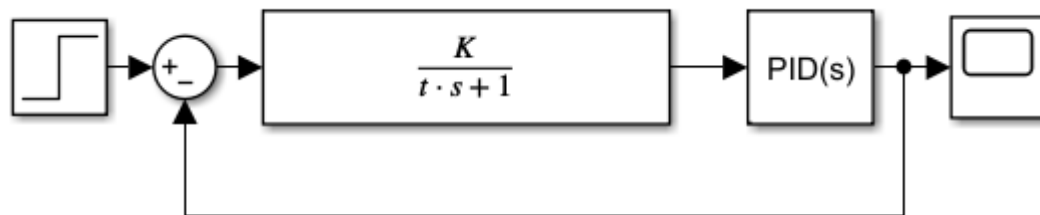


Рисунок 23 Схеми контуру регулювання обертів двигуна

Далі запускаємо систему та підбираємо параметри ПД, які будуть забезпечувати необхідну якість перехідного процесу.

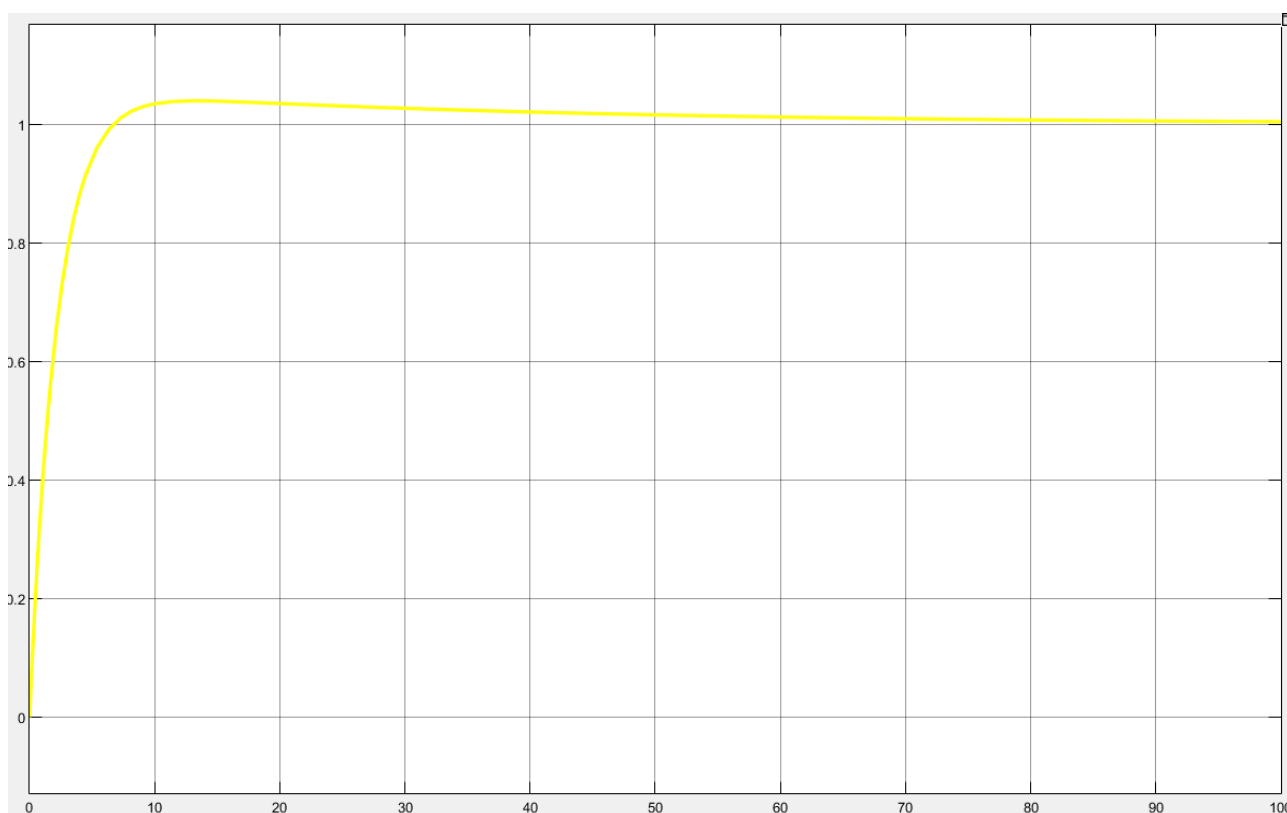


Рисунок 24 перехідний процес регулювання обертів двигуна

4. Вибір засобів автоматизації

Автоматизація технологічних процесів та виробничих операцій неможлива без застосування автоматичних та автоматизованих систем керування на базі мікропроцесорної техніки, датчиків, виконавчих пристроїв тощо. Для довгої та надійної роботи автоматизованої системи важливо правильно підібрати виконавчі механізми та датчі, які будуть виконувати всю основну роботу.

Вибір зазначених компонентів базується на аналізі поставлених задач та вимог до автоматизованої системи.

4.1 STM32

Система автоматизованого виробництва філаменту вимагає обробки великої кількості даних з датчиків, керувати обертами двигунів та іншими виконавчими пристроями. Для виконання цих задач будемо використовувати мікроконтролер STM32F407VGT6.[13]



Рисунок 25 Зовнішній вигляд STM32

Основні характеристики даного мікроконтролера:

- Сімейство – STM32F4 High Performance MCU
- Ядро – ARM Cortex – M4
- Тактова частота – 168 МГц
- Об'єм пам'яті – 1 Мбайт
- Об'єм RAM – 192 Кбайт
- Кількість АЦП – 3 шт
- Розміри корпусу – LQFP100 14x14 мм

4.2 Давач температури

Для точного та швидкого вимірювання температури будемо використовувати термопару К-типу.



Рисунок 26 Зовнішній вигляд термопары

Основні характеристики термопары:

- Тип термоелектродів – хромель - алюмель
- Діапазон вимірюваних температур: -200 – 1200 °C
- Клас точності: 2
- Діаметр електродів: 0,5 мм
- Виведення: температуростійкий провід.

4.3 Твердотільне реле

Для бездротової комутації нагріваючих елементів та деяких виконавчих пристроїв використаємо твердотільне реле ZGT-40DA.[12]



Рисунок 27 Зовнішній вигляд
твердотільного реле

Основні характеристики твердотільного реле ZGT-40DA:

- Призначення: керування резистивним, індуктивним або ємнісним навантаженням.
- Кількість каналів: 1
- Струм навантаження: 40А
- Максимальний струм комутації: 400А, 20 мс
- Напруга керування: 3-32В DC
- Клас захисту: IP20

4.4 Двигун з редуктором

Для намотування філаменту на котушки, та для обертання шнека будемо використовувати двигун постійного струму Takanaawa RS-555.



Рисунок 28 Зовнішній вигляд двигуна з редуктором

Основні характеристики двигуна постійного струму з редуктором RS – 555:

- Напруга живлення: 3В – 24В
- Оберти: 3В – 10 об/хв, 12В – 40 об/хв, 24В – 80 об/хв.
- Довжина валу: 25мм
- Струм: 2,5 А

4.5 Кільцевий нагрівач

Для рівномірного та швидкого нагрівання сопла екструдера будемо використовувати міканітовий кільцевий нагрівач.[3]



Рисунок 29 Кільцевий нагрівач

Основні характеристики такого нагрівача:

- Застосування: нагрівання екструдера, формувальних матриць, ємностей.
- Потужність: 750 Вт.
- Споживча напруга: 230В
- Максимальна температура: 350 ° С

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі було розроблено автоматизовану систему керування процесом виробництва філаменту для 3Д принтеру, яка дозволяє вести безперервний моніторинг та керування технологічним процесом з високою точністю та якістю. Обрана структура автоматизовано системи забезпечує надійний контроль температурних режимів екструзії, підтримки заданої швидкості та діаметру філаменту.

Було проведено аналіз технологічного процесу виготовлення філаменту та визначено основні параметри, що підлягають контролю та регулюванню. Розроблено функціональну схему автоматизації установки для виробництва філаменту. Розроблено математичні моделі, створено блок схему контурів регулювання та змодельовано контури регулювання в середовищі Matlab Simulink. Виконано вибір основних технічних засобів автоматизації та виконавчих механізмів.

В результаті впровадження даної системи досягається висока стабільність якості та неперервність виробництва філаменту для 3Д-друку, що задовольняє потреби сучасних промислових підприємств та технологічних компаній

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. FILAMENT MAKERS: <https://3devo.com/filamentmakers/#7-winder>
2. Lyman_filament_extruder_manual:
file:///C:/Users/User/Downloads/LYMAN_FILAMENT_EXTRUDER_MANUAL_Revision_10.pdf
3. Кільцевий нагрівач: <https://intmax.com.ua/promislovi-nagrivachi/kilcevi-nagrivachi/metalevi-kilcevi-nagrivachi-mikanit/kilcevij-mikanitovij-100-h-150-mm-450-vt-230-v.html>
4. 3д друк полімерною гранулою:
<https://monofilament.com.ua/ua/publikatsiji/zd-druk-polimernoju-granuloju>
5. Make your own 3D printing filament with Felfil filament maker system:
<https://felfil.com/?v=5ea34fa833a1>
6. DIY Filament Extruders: The Best Filament Makers in 2023:
<https://all3dp.com/2/best-diy-filament-extruder-kit-maker/>
7. Filament from bottle: https://electronoobs.com/eng_arduino_tut174.php
8. ABS PLA PEEK 3d Printer Filament Extruder Machine:
<https://www.friendplasticmachine.com/sale-12799276-20kg-h-abs-pla-peek-3d-printer-filament-extruder-machine.html>
9. Make your filament at home for cheap: <https://medium.com/endless-filament/make-your-filament-at-home-for-cheap-6c908bb09922>
10. Экструдер NOZTEK PRO HT:
<https://3ddevice.com.ua/product/%D1%8D%D0%BA%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B5%D1%80-noztek-pro-ht/>
11. Типи 3D Принтерів: <https://get3d.tech/articles/typy-3d-prynteriv/>
12. Реле твердотільне ZGT-40DA:
https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/rele-tverdotilne-zgt-40da-cg-odnofazne-3-32vdc-25ma-24-480vac-40a_166376.html
13. High-performance foundation line, Arm Cortex-M4 core with DSP and FPU, 1 Mbyte of Flash memory, 168 MHz CPU, ART Accelerator, Ethernet, FSMC:
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html>
14. The Xcalibur: <https://noztek.com/product/xcalibur/>

15. Design and Manufacturing of a 3D printer filaments extruder:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321621001967>

16. Pushing boundaries in 3D printing: Economic pressure filament extruder for producing polymeric and polymer-ceramic filaments for 3D printers :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067223000937>

17. Design and fabrication of filament extruder with spooler:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321021222>

18. Modeling and control of 3D filament extruder:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321621002043>

19. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612518301981>

20. Viscous sintering kinetics of biopolymer filaments extruded for 3D printing:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941819303216>