

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка системи керування
малогабаритним 3D-принтером

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група РМз-21-1


Підпис


А.В. Гаврилук
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

к.т.н., доц. П.С. Майдан
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н., ст. викл. С.І. Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. В.С. Неймак
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр і назва

Спеціалізація _____

Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2025

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гаврилюк Артем Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка системи керування малогабаритним 3D-принтером

керівник роботи Майдан Павло Сергійович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2 06 25

3. Вихідні дані до роботи механічні та енергетичні характеристики силового обладнання

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

Вступ. 1 Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень малогабаритних 3D-принтерів. 2. Проєктування системи керування малогабаритним 3D-принтером. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність. Загальні висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Види кінематики 3D-принтерів (ДО, А1). 2. Система керування малогабаритним 3D принтером (С2, А1). 3 Компоненти малогабаритного 3D принтеру (Д1, А1). 4. Система керування малогабаритного 3D-принтеру (Е1, А1). 5. Силова частина малогабаритного 3D-принтеру (Е1, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

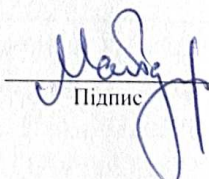
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень малогабаритних 3D-принтерів		
2. Проектування системи керування малогабаритним 3D-принтером		
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент


Підпис

А.В. Гаврилюк
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

П.С. Майдан
Ініціали, прізвище

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гаврилюк Артем Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

Тема роботи Розробка системи керування малогабаритним 3D-принтером

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

2. Обсяг бакалаврської роботи: креслень 5 арк, сторінок записки 64

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень малогабаритних 3D-принтерів, описано проблематику використання малогабаритних 3D-принтерів та розглянуто особливості технологічного процесу 3D-друку. В другому розділі виконано проектування системи керування малогабаритним 3D-принтером. Проведено розрахунок необхідних робочих моментів на осях малогабаритного 3D-принтеру, виконано підбір крокових двигунів для осей малогабаритного 3D-принтеру. В третьому розділі Виконано розрахунки, що підтверджують працездатність проєкту. А саме виконано розрахунок головних параметрів малогабаритного 3D-принтера та розроблено алгоритм функціонування системи керування малогабаритним 3D-принтером .

Підпис студента _____

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ:

Протокол 3 від 26 06 2025 р.

Оцінка роботи ЕК 4,0 / 5

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

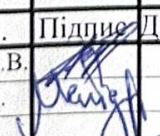
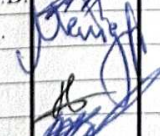


Підпис

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 26 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

	с.
Вступ	5
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ МАЛОГАБАРИТНИХ 3D-ПРИНТЕРІВ	8
1.1 Проблематика використання малогабаритних 3D-принтерів	8
1.2 Особливості технологічного процесу 3D-друку	13
Висновки до першого розділу	31
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИМ 3D-ПРИНТЕРОМ	32
2.1 Розрахунок необхідних робочих моментів	32
2.2 Підбір крокових двигунів для малогабаритного 3D-принтеру	50
Висновки до другого розділу	53
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність	54
3.1 Розрахунок головних параметрів малогабаритного 3D-принтера	54
3.2 Розробка алгоритму функціонування системи керування малогабаритним 3D-принтером	60
Висновки до третього розділу	62
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	64
ДОДАТКИ	68

<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Гаврилюк А.В.		
Перевір.		Майдан П.С.		
Н.контр.		Пундик С.І.		
Затвер.		Неймак В.С.		
Розробка системи керування малогабаритним 3D-принтером			Літера	Аркуш
			у	4
			ХНУ ір. РМз-21-1	

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку багато виробництв вимагають створення макета конструкції або цілого прототипу пристрою, що розробляється. Для виготовлення подібних проєктів потрібно використовувати пристрій, що дозволяє за достатньо короткий проміжок часу і з суттєво малими витратами створити необхідний виріб. В якості даного типу пристрою можна застосовувати, наприклад 3D-принтер.

Загально відомо, що 3D-принтер – це пристрій, що використовує метод пошарового створення фізичного об'єкта за існуючою цифровою моделлю.

Відомо декілька різних технологій 3D-друку із використанням досить різноманітних матеріалів, але в основі будь-якої з даних технологій лежить принцип пошарового створення (або навіть вирощування) виробу [1-6].

З сучасних технологій 3D-друку найпоширеніші наступні:

- Fused Deposition Modeling або моделювання методом наплавлення (FDM) – виріб формується шляхом пошарового накладання розплавленої нитки з певного робочого матеріалу (наприклад, метал, пластик, віск) [1-5];

- Selective Laser Sintering або вибіркоче лазерне спікання (SLS) – виріб буде створено із плавкого порошкового матеріалу з діаметром частинок не більше як 50-100 мкм (наприклад, пластик, метал, скло) шляхом спікання порошкового матеріалу лазерним випромінюванням. Існує декілька варіації такої технології [1-5]:

- Electron Beam Melting або електронно-променеве плавлення (EBM) – замість лазера застосовується електронний промінь; може виконуватись лише у вакуумній камері, але дозволяє використовувати навіть титан [1-6];

- Selective Laser Melting або селективне лазерне плавлення (SLM) – лише для роботи з чистими металами без домішок полімеру і дозволяє створити готовий виріб за один етап виконання [1-5].

- Laminated Object Manufacturing або виготовлення виробів із

використанням ламінування (LOM) – виріб формується пошаровим склеюванням (тиском чи нагріванням) тонких плівок із робочого матеріалу з наступним вирізанням потрібних контурів на кожному окремому шарі за допомогою використання ріжучого інструменту чи лазерного променя [1-6];

- StereoLithography Apparatus або лазерна стереолітографія (SLA) – виріб виготовляється зі спеціального рідкого фотополімеру, до якого додано спеціалізований реагент для затвердіння, затвердіння відбувається під дією лазерного випромінювання [1-5].

Крім того, 3D-друк можливо використовувати для швидкого виготовлення виробів, яке служить недорогою альтернативою стандартним методам при виготовленні дрібносерійного виробництва [1-6].

Процес 3-D друку носить назву - Rapid Prototyping (або швидке прототипування), використовується для полегшення повторного тестування з послідовною модернізацією виробу [1-5].

Сфери використання технологій 3-D друку наступні:

- створення моделей та прототипів майбутніх виробів;
- створення макетів та наступне виготовлення нових конструкцій;
- розробка форм для лиття при дрібносерійному виробництві;
- протезування та виготовлення імплантатів у медичній сфері;
- виробництво сувенірної продукції та іграшок;
- створення наочних виробів для студентів;
- ремонт малих пластикових виробів вдома.

Відомо також про розробку моделі 3D-принтерів для використання в харчовій промисловості.

Використання саме 3-D друку – серйозна альтернатива старим базовим методам прототипування та використанню дрібносерійного виробництва.

Тому нами було розроблено конструкцію пристрою, що формує тривимірний виріб Fused Deposition Modeling. Дана технологія FDM передбачає створення тривимірних виробів саме шляхом пошарового накладання

розплавленої нитки. Робочий матеріал подається в спеціальну екструзійну головку, яка видавлює на платформу, що нагрівається, тонку нитку матеріалу, формуючи таким чином поточний шар розроблюваного виробу. Далі платформа, що нагрівається, опускається (або відбувається підйом екструзійної головки) на товщину одного шару, для того щоб виконати нанесення наступного шару. В якості матеріалів для 3-D друку виступають термопластики, що продаються у вигляді катушок ниток або спеціальних прутків [1-6].

Основними задачами кваліфікаційної роботи є:

- розробка схем і підбір елементів системи керування (СК);
- створення робочої конструкції 3D-принтера;
- побудова алгоритму і налаштування програми керування (прошивки) для контролера СК;
- вибір і налаштування програмного забезпечення для 3-D друку.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ МАЛОГАБАРИТНИХ 3D-ПРИНТЕРІВ

1.1 Проблематика використання малогабаритних 3D-принтерів

Загально відомо, що малогабаритний 3D-принтер являє собою цілу мехатронну систему, оснащену механізмами переміщення і електроприводами, інформаційно-вимірювальними пристроями і системою автоматизованого програмного керування (САПК), що керує встановленим обладнанням 3D-принтера.

У багатьох випадках конструкція малогабаритного 3D-принтера нагадує верстат з ЧПК, лише в якості робочого органу використовується екструдер пластику.

В залежності від руху екструдера і платформи, конструкції малогабаритних 3D-принтерів класифікують на чотири базові групи:

- екструдер здійснює переміщення по осях X і Y ; платформа виконує переміщення тільки по осі Z . Виріб, що формується на платформі, що рухається, не виконує переміщення в горизонтальних площинах, що позитивно позначається на якості друку. Платформа постійно знаходиться в площині, яка строго паралельна рухам робочого органу; дискретність переміщення платформи по осі Z зазвичай вище, ніж по осях X і Y за рахунок використання спеціалізованих гвинтових передач.

У конструкцію даних малогабаритних 3D-принтерів закладають складні передаточні механізми для переміщення робочого органу в двох горизонтальних напрямках;

- екструдер – переміщення по осях Y і Z ; платформа – переміщення тільки по осі X . Основною відмінністю даних малогабаритних 3D-принтерів є відкрита платформа і трикутний каркас бічних стінок [1-6].

Виділяють також стандартні конструкції вертикальних напрямних для

переміщення механізмів осі Y і, відповідно, для горизонтального переміщення платформи. Дана конструкція є найбільш популярною в промислових і аматорських моделях малогабаритних 3D-принтерів.

Недоліки конструкції - люфт і вібрації у малогабаритних 3D-принтерів полегшеної конструкції, за рахунок руху платформи з виробом в горизонтальній площині;

- екструдер – X, Y та Z, платформа нерухома взагалі. Дані малогабаритні 3D-принтери оснащені рухомою друкуючою головкою та стаціонарною робочою платформою. Носять назву «дельта-принтери» через розташовані по колу спеціальні маніпулятори, які приводять в рух друкуючу головку [1-6].

Дельта-принтери мають наступні переваги - точність позиціонування, висока швидкість роботи, і велика область друку по вертикалі.

Недоліки: велика інерція при використанні масивних конструкцій екструдерів; невелика область друку в горизонтальних напрямках; складний процес налаштування малогабаритного 3D-принтера [1-6];

- екструдер – переміщення по осі Y, платформа – переміщення по осях X та Z. 3D-принтери даної групи не отримали широкого використання через складність складання і подальшого налаштування [1-6]. Недолік - переміщення платформи з виробом в двох напрямках.

Великий вплив на точність позиціонування головки принтера та відносну жорсткість має матеріал, з якого виготовлена сама рама малогабаритного 3D-принтера.

Промислові моделі малогабаритних 3D-принтерів виконують зі спеціального станочного профілю, алюмінію або, навіть, сталі. В якості бюджетної альтернативи для Replicating Rapid Prototyper або RepRap принтерів використовують шпильки з кріпленнями з акрилу, пластику або фанери, набагато менше – профіль виготовлений із алюмінію. Завдяки використанню жорсткої рами, малогабаритний 3D-принтер піддається меншим вібраціям в процесі виготовлення виробу – відповідно, поліпшується загальна якість друку.

Похибка позиціонування також може залежати від механічних елементів малогабаритних 3D-принтера, що виконують лінійні переміщення.

Напрямні верстатів з ЧПК являють собою вузли для переміщення робочого органу і виробів по заданій траєкторії із вказаною точністю.

У верстатобудуванні та металорізальному обладнанні найчастіше використовують 2 типи напрямних:

- напрямні кочення з використанням різних типів тіл кочення (ролики чи кульки) і конструктивними формами;

- напрямні ковзання з різними режимами тертя ковзання [1-7].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд прецизійних напрямних

Прецизійні вали або циліндричні лінійні напрямні. Переваги - простота монтажу, мінімальні експлуатаційні вимоги, нетрудомістке обслуговування і адекватна ціна.

Недолік – при великих довжинах направляючих може з'явитися прогин під дією навантаження. Люфти лінійних підшипників, що використовуються в конструкції, по відношенню до рейкових вищі, відповідно навантажувальна здатність циліндричних направляючих нижча.

Поліровані вали на опорі або циліндричні рейкові лінійні напрямні (рис. 1.2). Опора виготовлена із алюмінію, усуває головний недолік направляючих

валів – прогин і збільшує жорсткість та точність переміщення, а отже і вантажопідйомність.

Даний тип направляючих використовуються в системах точних лінійних переміщень – осях з ЧПК, у фрезерних чи гравірувальних верстатах, лінійних модулях, малогабаритних 3D-принтерах.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд полірованих валів на опорі

Профільні рейкові лінійні напрямні (рис. 1.3), переваги – висока жорсткість, зносостійкість, точність, плавність ходу, що робить їх найбільш поширеним видом лінійних напрямних при виготовленні верстатів з ЧПК будь-яких видів.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд профільної рейкової лінійної напрямної

Механічні передачі використовуються для перетворення обертового руху

головного валу електроприводу в поступальний рух уздовж осі, найбільш поширені наступні види передач:

- зубчасто-пасова;
- зубчасто-рейкова;
- гвинт-гайка;
- кульково-гвинтова.



а – зубчасто-рейкова; б – зубчасто-пасова; в – гвинт-гайка; г – кульково-гвинтова

Рисунок 1.4 – Існуючі види механічних передач:

Перетворення енергії від джерела живлення в механічну енергію руху для елементів 3D-принтера виконується за допомогою використання приводів. Вибір типу приводу впливає на точність, швидкість, розвинуті зусилля і плавність рухів компонентів 3D-принтера.

Сьогодні в приводах подачі сучасних верстатів з ЧПК використовують лише 2 типи приводів: сервоприводи та крокові електродвигуни (КЕД). Головна відмінність використання полягає в дискретному режимі роботи КЕД (n кроків на один повний оберт ротора) і плавності обертання синхронного

електродвигуна.

КЕД використовуються переважно в системах керування (СК) без використання зворотних зв'язків, що вимагають невеликих величин прискорень при русі – так звана розімкнута СК [1-7].

Сервоприводи вимагають наявності спеціальних давачів зворотного зв'язку по швидкості чи положенню, і зазвичай використовуються в швидкісних високодинамічних системах – так звана замкнута СК [8-10].

Керування малогабаритним 3D-принтером виконується за допомогою використання системи числового програмного керування (СЧПК), яка включає в себе контролер з вбудованою системою і ПК із спеціалізованим ПЗ [8-10].

Контролер вирішує завдання формування заданої траєкторії руху робочого органу, технологічних команд керування пристроями автоматики (LCD-дисплей і нагрівальні елементи) та інформаційно-вимірювальними пристроями (кінцеві давачі і давачі рівня температури).

3D-принтер для виконання своєї роботи вимагає відповідного ПЗ, необхідного для підготовки і керування процесом друку [1-7]. У такому випадку відкрите ПЗ володіє рядом переваг перед ліцензованими ПЗ. Відкриті джерела – це підхід до проєктування, розробки та наступного розповсюдження, що надає доступ до джерел продукту, які можуть бути змінені відповідно до необхідних вимог.

1.2 Особливості технологічного процесу 3D-друку

Загально відомо, що технологічний процес (ТП) 3D-друку зводиться до взаємодії механічних, електричних та програмних компонентів СК. Вибір елемента СК виконується в залежності від технічних та економічних показників.

В основу конструкції розроблюваного малогабаритного 3D-принтера покладено алюміній, товщиною вісім мм. Рама являє собою дві плити, розташовані перпендикулярно, з упорами з боків, що забезпечує велику

жорсткість моделі (рис. 1.5).

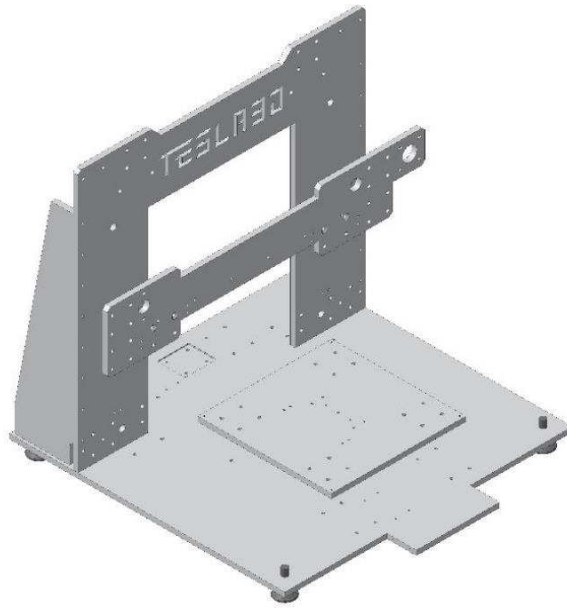


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд конструкції рами

У конструкції даної рами (рис. 1.5) передбачено переміщення платформи з виробом по осі X і, відповідно, переміщення екструдера по осях Y та Z . У корпусі малогабаритного 3D-принтера підготовлені отвори для проведення проводів та кріплення до стінок корпусу. Для коригування рівня малогабаритного 3D-принтера під поверхнею встановлені спеціальні регульовальні ніжки.

Для виконання руху у вертикальній площині (або вісь Z) використані циліндричні лінійні напрямні діаметром більше десяти мм, що дозволяє виключити можливий люфт у вертикальній площині, оскільки навантаження в такому положенні буде розподілено на два встановлені вали. Конструкція осі Y закріплена на вертикальних напрямних за допомогою використання чотирьох лінійних підшипників.

Для переміщення по осі X вибір зроблено на використання циліндричних рейкових напрямних, оскільки прецизійні вали мають лише дві точки опори, а профільні напрямні – занадто дорогі. Використання даних напрямних буде запобігати прогину конструкції під дією навантаження при великій довжині

напрямних і великій масі рухомої платформи з розташованим на ній виробом (рис.1.6).



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд направляючих малогабаритного 3D-принтера

Для переміщення екструдера по осі Y встановлена спеціальна профільна рейкова напрямна завдяки своїм розмірам і непоганим масо-габаритним показникам. Використання лише однієї опори і каретки дозволить знизити загальну вагу конструкції осі Y в порівнянні з використанням циліндричних рейкових напрямних і прецизійних валів із додатковим кріпленням [1-7].

При виборі механічних передач малогабаритного 3D-принтера необхідно враховувати здатність до навантаження, максимальну швидкість переміщення та необхідну точність.

Беручи до уваги відсутність навантаження на робочий орган і достатньо високу швидкість переміщення в горизонтальній площині, на осях X та Y встановлені зубчасті-пасові передачі (див. рис. 1.4). Використаний пас із формою зуба типу T2,5 (зуб трапецієподібний, крок два з половиною мм).

Для переміщення по осі Z встановлений спеціальний гвинт (рис. 1.7) із трапецієподібною різьбою 12x3 (діаметр гвинта 12 мм, крок різьби 3 мм), оскільки суттєво висока швидкість переміщення тут не потрібна, але потрібна

достатньо висока точність позиціонування і здатність утримувати вагу екструдера та горизонтальної напрямної.

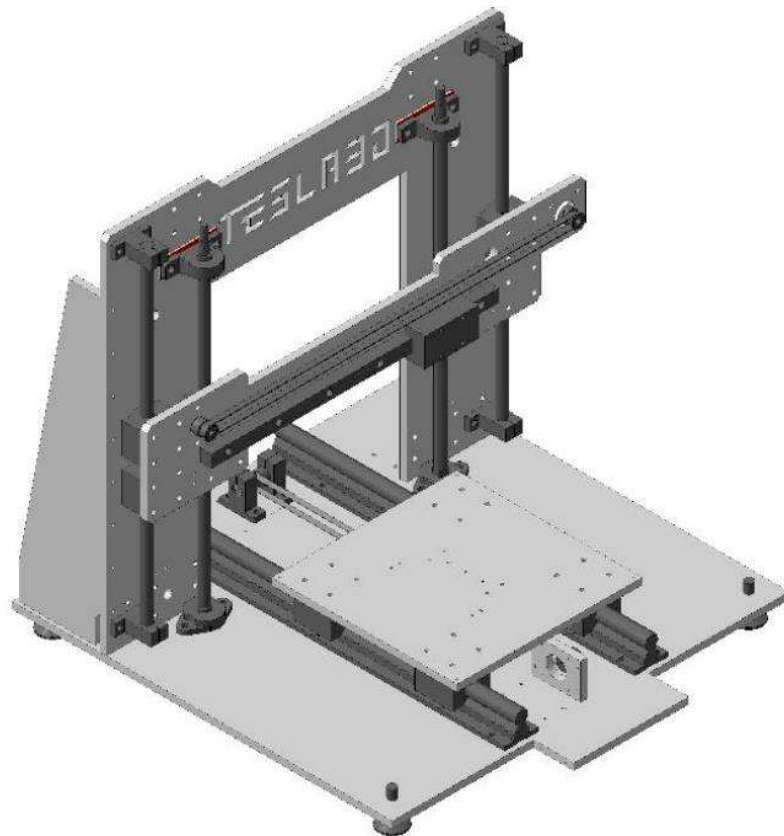


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд направляючих та механічних передач

Приведення в рух механічних елементів малогабаритного 3D-принтера здійснюється за допомогою КЕД, оскільки вони не вимагають наявності датчиків положення головного валу, мають просту конструкцію і є прийнятними з економічної точки зору в порівнянні з використанням сервосистем.

Для механічного з'єднання головного валу електродвигуна і механізмів переміщення використовують спеціальні зубчасті шківни (тип 16-T2,5-6 BF), капролонові гайки (тип 12x3) та з'єднувальні муфти. Також використовуються спеціальні кулачкові розбірні муфти із поліуретановою вставкою, що дозволяє гасити вібрації, що виникають при обертанні головного валу.

Керування малогабаритним 3D-принтером виконується за допомогою ПЗ, встановленого на ПК. Для автономного керування процесом друку, на 3D-принтері повинен бути змонтований текстовий LCD-дисплей і модуль для

підключення SD-карти пам'яті [1-7].

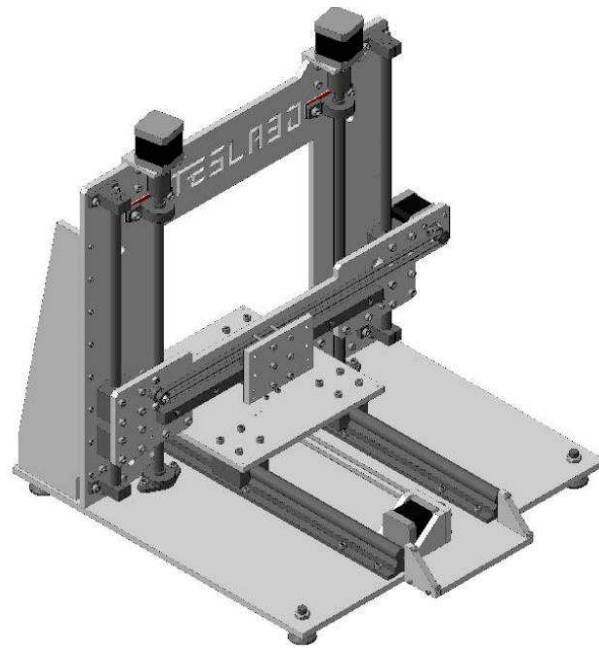


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд запропонованої конструкції малогабаритного 3D-принтера

1.3 Структурна схема системи керування малогабаритним 3D-принтером

На структурній схемі представлені основні функціональні частини СК малогабаритного 3D-принтеру та їх взаємозв'язки (рис. 1.9 та БРМА 25.00.00.000С2).

Для виготовлення моделі малогабаритного 3D-принтера необхідно визначити елементну базу СК 3D-принтером. Всі основні компоненти СК можливо класифікувати на шість частин:

- КЕД;
- драйвери КЕД;
- контролер;
- екструдер;
- нагрівальна платформа;
- кінцеві вимикачі.

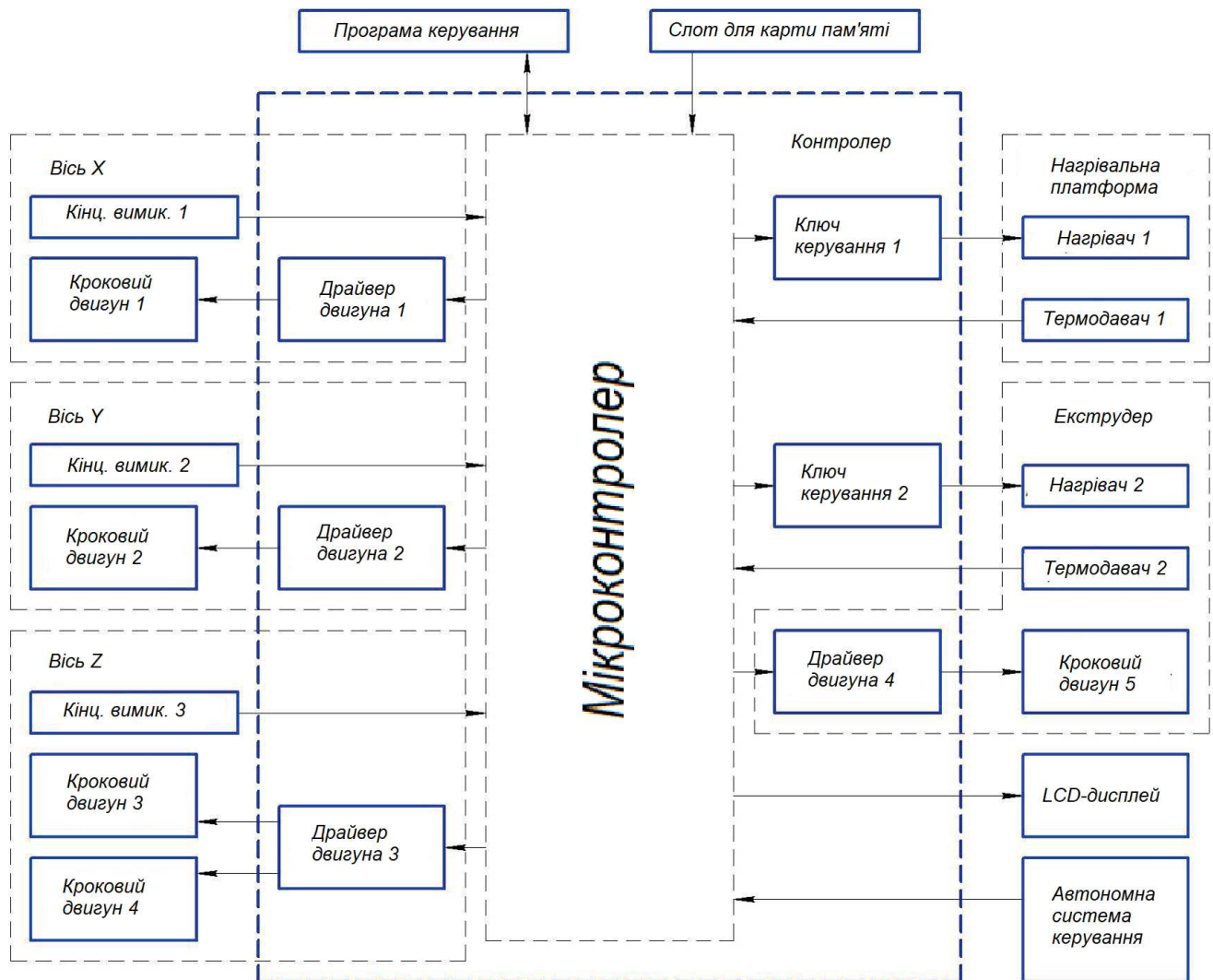
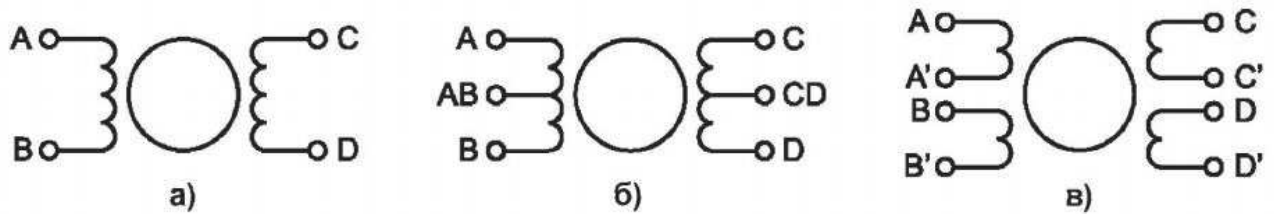


Рисунок 1.9 – Загальний вигляд структурної схеми СК малогабаритним 3D-принтером

Відомо, що КЕД відносяться до класу безколекторних електродвигунів постійної сили струму. Як і будь-які безколекторні електродвигуни, вони мають високу надійність і достатньо великий термін служби [8-10].

В залежності від конфігурації обмоток, КЕД класифікують на біполярні та уніполярні [8-10].

Біполярний КЕД має лише одну обмотку в кожній фазі, яка для зміни напрямку магнітного поля повинна змінювати полюс за допомогою драйверу. Для такого типу КЕД потрібен або мостовий драйвер або напівмостовий із двополярним живленням. Всього біполярний КЕД має дві обмотки і, відповідно, чотири виводи (рис. 1.10, а) [8-10].



а – біполярний; б – уніполярний шести вивідний; в – уніполярний восьми вивідний

Рисунок 1.10 - Типи КЕД [8-10]:

Уніполярний КЕД також оснащений однією обмоткою в кожній фазі, але від середини обмотки виконані виводи (рис. 1.10, б). Це дозволяє виконувати зміну напрямку магнітного поля, створюваного обмоткою, простим перемиканням половинок обмотки, суттєво спрощується схема драйвера. Драйвер повинен містити лише чотири простих ключа. Таким чином, в уніполярному КЕД використовується інший спосіб зміни напрямку магнітного поля [8-10].

Деякі уніполярні КЕД мають роздільні чотири обмотки, з цієї причини помилково носять назву - чотирьох фазних КЕД. Кожна обмотка має окремі виводи, тому всього виводів вісім (рис. 1.10, в).

При відповідному з'єднанні обмоток даний КЕД можна використовувати і як уніполярний так і як біполярний. Уніполярний КЕД з 2-ма обмотками і виводами теж можна використовувати в біполярному режимі роботи, якщо виводи залишити непідключеними [8-10].

Якщо порівнювати між собою уніполярний і біполярний КЕД, то біполярний володіє більш високою питомою потужністю. При однакових розмірах біполярні КЕД забезпечують більший крутний момент [8-10].

Крутний момент, що створюється КЕД, пропорційний величині магнітного поля, що створюється обмотками статора. Шлях для підвищення магнітного поля – це збільшення сили струму або збільшення числа витків обмоток.

Природним обмеженням при підвищенні сили струму обмоток є небезпека насичення залізного сердечника. Набагато більш істотним є обмеження по

нагріванню КЕД внаслідок втрат в обмотках. В уніполярному КЕД в кожен момент часу використовується лише половина обмоток. Інша половина просто займає місце в вікні сердечника, що, в свою чергу, змушує робити обмотки дротом меншого діаметра. У той же час в біполярному КЕД завжди працюють всі обмотки, тобто їх використання є більш оптимальним. У такому КЕД перетин окремих обмоток удвічі більший, а опір, відповідно, удвічі нижчий. Це, в свою чергу, дозволяє збільшити силу струму при тих же втратах, що дає перевагу в крутному моменті приблизно на 40%. Якщо ж підвищеного крутного моменту не потрібно, уніполярний КЕД дозволяє знизити габарити або просто працювати із меншими втратами [8-10].

При виборі приводів малогабаритного 3D-принтера висувають високі вимоги до крутного моменту, і, відповідно, до значення сили струму електродвигуна, що обумовлено переміщенням достатньо громіздких виконавчих механізмів. У такому випадку вигідніше використовувати біполярні КЕД.

Драйвери КЕД - так як керувати КЕД набагато складніше, ніж звичайним колекторним електродвигуном: потрібно в певній послідовності перемикаєти напруги в обмотках з одночасним контролем сили струму, тому для керування КЕД розроблені спеціальні пристрої [8-10].

Драйвери КЕД – це силові електронні пристрої, що керують сильнострумівими обмотками КЕД на основі дискретних сигналів керування. З їх допомогою КЕД виконує свою безпосередню функцію – робить кроки (тобто, виконує обертання) [8-10].

Існує кілька способів керування КЕД:

- напівкроковий – кожен другий крок вмикається лише одна фаза, а в інших випадках живляться дві; кутове переміщення ротора складає половину кута кроку [8-10];

- повнокроковий – забезпечується почерговим підключенням фаз, при цьому в один момент часу включена лише одна фаза; недоліком даного способу

є те, що для біполярного КЕД в один і той же момент часу використовується 50% обмоток, а для уніполярного КЕД – лише 25%; відповідно, в такому режимі не може бути отриманий повний крутний момент [10];

- мікрокроковий – сила струму у фазах змінюється невеликими кроками, забезпечуючи дроблення половинного кроку на мікрокроки; існує багато різних мікрокрокових режимів із величиною кроку від 1/3 до 1/32 повного кроку і навіть нижче [10];

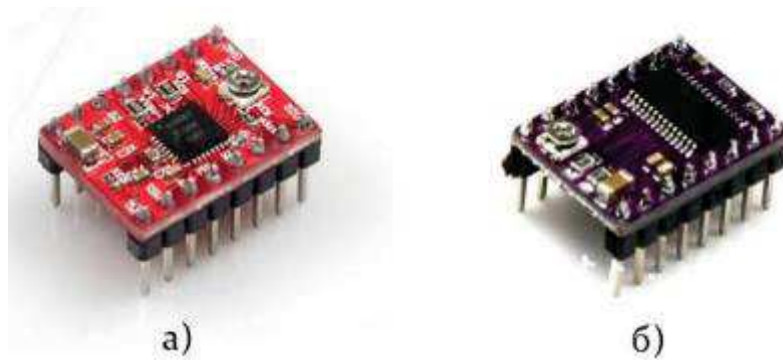
- повнокроковий з перекриттям – при цьому способі керування ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора – дві фази включені в один і той самий момент часу; таким чином, забезпечується приблизно на 40% більший крутний момент, ніж у випадку однієї включеної фази [8-10].

У сфері керування КЕД існують стандарти – це сигнали STEP, DIR і ENABLE. Сигнал STEP відповідає за крок КЕД, DIR – за напрямок обертання, а ENABLE є сигналом вмикання для драйвера [10].

Для найбільш плавного обертання ротора на низьких частотах, в СК малогабаритного 3D-принтера належить використовувати драйвери, що підтримують саме мікрокроковий режим роботи. Це також призведе до збільшення точності позиціонування і роздільної здатності.

В якості такого пристрою можуть бути використані драйвери фірми-виробника Allegro A4988 або A4983. Вони підтримують максимальну вихідну силу струму до 2 А і мікрокроковий режим 1/16 кроку. Модуль A4988 підтримує додаткові можливості, наприклад, вбудовану систему відключення при перегріві.

Існують готові модулі для керування КЕД із драйверами і обв'язкою з резисторів і конденсаторів, згідно з технічним описом (datasheet) драйверів. Наприклад, модулі фірми Pololu A4988 і DRV8825 (рис. 1.11). Вони призначені для керування біполярними КЕД, підтримують автоматичне визначення режиму спаду сили струму, теплову схему відключення і регулювання максимальної вихідної сили струму за допомогою потенціометра.



а – А4988; б – DRV8825

Рисунок 1.11 – Драйвери КЕД фірми Pololu [11]:

Остаточний вибір драйверів може бути виконано лише після вибору КЕД.

Під контролером мається на увазі пристрій (або декілька пристроїв), який безпосередньо керує роботою малогабаритного 3D-принтера.

Умовно, контролер можливо поділити на 2 частини: «логічну» та «силову». В якості логічної частини розглядають мікроконтролер або промисловий логічний контролер (PLC). Силова частина містить елементи, необхідні для керування потужним навантаженням – драйвери КЕД і ключі керування для столу з підігрівом та екструдера. В якості ключів можуть бути використані стандартні польові транзистори.

Важливою характеристикою PLC є кількість каналів, які він здатний синхронізувати (керувати) – для цього потрібна висока продуктивність і відповідне ПЗ [11].

Вимогами до PLC СК є наступні:

- автономна робота без підключення до ПК;
- можливість підключення LCD-дисплея;
- наявність USB-інтерфейсу;
- можливість керування драйверами Pololu.

Велика популярність і економічна складова (низька ціна) є додатковим фактором при виборі PLC.

Одним з підходящих під перераховані вимоги є PLC Arduino Mega 2560 R3

на основі мікроконтролера Atmega 2560 [12].

З характеристик даного контролера необхідно вказати:

- 16 аналогових входів;
- 54 дискретних входи/виходи (14 з яких можуть бути використані як виходи ШІМ);
- 256 кБ Flash-пам'яті, 8 кБ ОЗУ і 4 кБ EEPROM;
- кварцовий генератор 16 МГц;
- чотири послідовних порти UART;
- робоча напруга на рівні 5В;
- перетворювач USB-TTL на основі Atmega 8U2;
- встановлений завантажувач, що дозволяє виконувати запис нових програм без використання спеціальних зовнішніх програматорів [12].

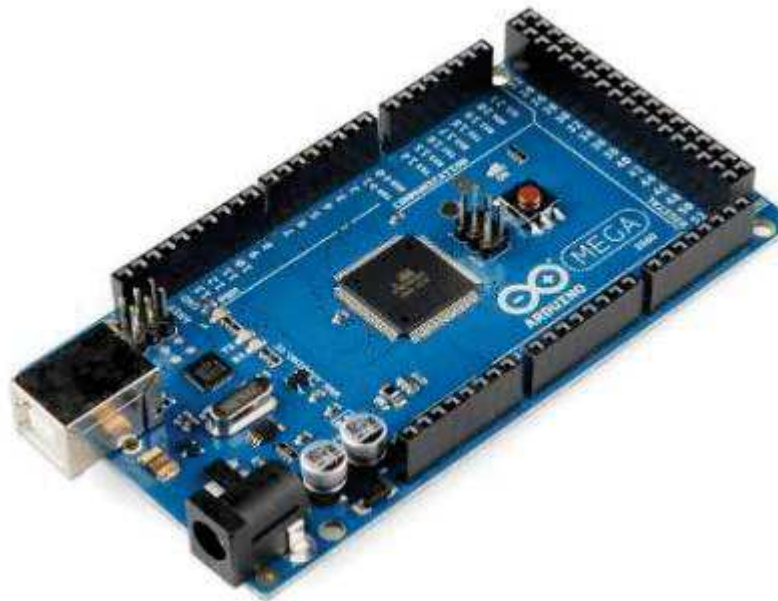


Рисунок 1.12 – Загальний вигляд мікроконтролеру Arduino Mega 2560 R3

Arduino Mega 2560 R3 [12] – це лише логічна частина (рис. 1.12). В якості силової частини використовується спеціальна плата розширення RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4 (RAMPS 1.4) (рис. 1.13), яка оснащена рознімами для підключення драйверів Pololu та MOSFET-транзистори для керування виконавчими пристроями сили струму до 12 А кожен. Додатково до RAMPS 1.6

[13] можуть бути підключені до трьох аналогових датчиків, шести датчиків замикання/розмикання контакту, адаптер SD-карти пам'яті та LCD-дисплей.

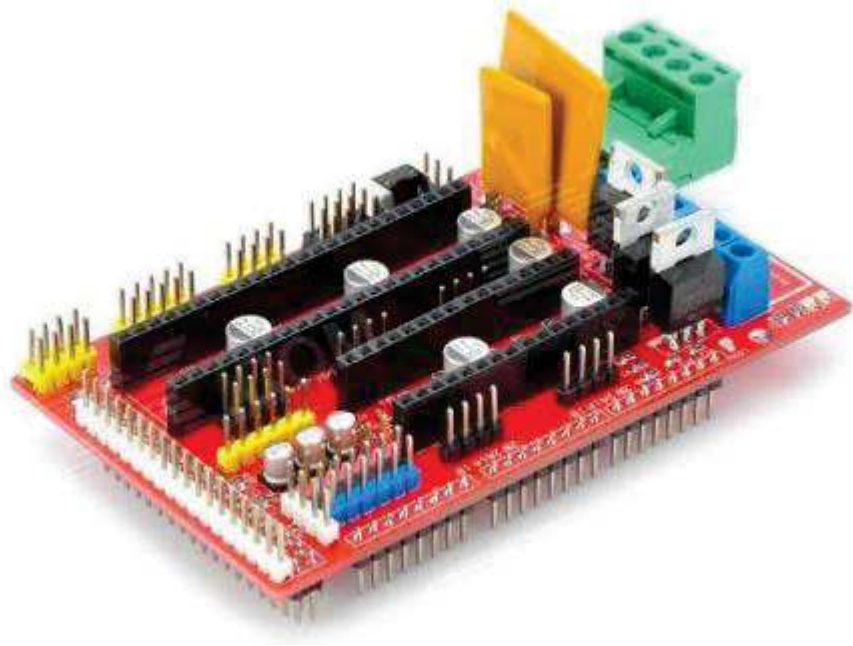


Рисунок 1.13 – Загальний вигляд плати розширення RAMPS 1.6 [13]

Для візуалізації контрольованих параметрів і керування малогабаритним 3D-принтером під час автономної роботи встановлено модуль з LCD-дисплеєм 20x4 і адаптером SD-карти пам'яті (рис. 1.14). Дисплей має чотири рядки по двадцять символів у кожному, керується по спеціальній інтерфейсній шині I2C. Слот SD-карти закріплений із зворотного боку пристрою.

На модулі також встановлений енкадер для переміщення по пунктах екранного меню і тактильна кнопка для підтвердження обраних параметрів.

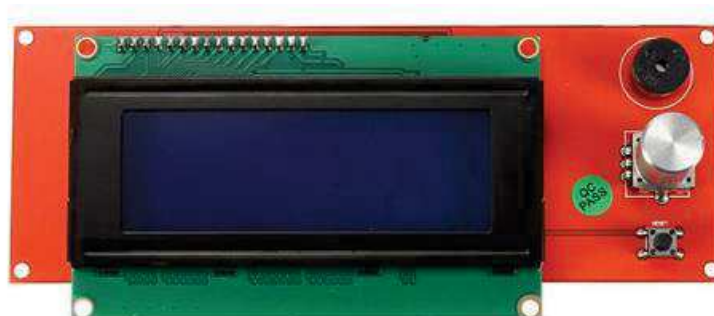


Рисунок 1.14 – Загальний вигляд модуля із LCD-дисплеєм 20x4

Функціонування всіх елементів PLC має великий вплив як на якість виробів, що отримуються, так і на зручність керування малогабаритним 3D-принтером.

Екструдер (рис. 1.15) є одним з найважливіших компонентів і найбільше впливає на кінцеву якість друку [14].

Конструкцію екструдера можна умовно розділити на 2 складові частини: cold-end або блок з механізмом подачі філаменту і hot-end або сопло з нагрівачем.



Рисунок 1.15 – Загальний вигляд екструдера Geeetech GT9S J-Head V2.0 [14]

Завданням cold-end є дозована подача матеріалу в hot-end. Сопло з нагрівачем, в свою чергу, плавить матеріал і видавлює розплавлений пластик тонким струменем.

Подача філаменту здійснюється за рахунок шестерні, з'єднаної з електродвигуном (безпосередньо або через редуктор) і притискного механізму. Шестерня, обертаючись, витягує філамент з котушки і направляє його в сопло з нагрівачем, де пластик плавиться під впливом високого рівня температури і видавлюється через отвір в соплі. Для відстеження і подальшого регулювання рівня температури, до сопла екструдера кріпиться давач рівня температури [1-7].

Важливим аспектом є розмір сопла екструдера – від нього більшою мірою залежить кінцева якість друку. Зазвичай моделі екструдерів оснащують соплами

з отвором діаметром в діапазоні від 0,4 до 0,5 мм. Використання сопла меншого діаметра (діапазон від 0,2 до 0,3 мм), в свою чергу, може забезпечити кращу деталізацію, чіткість граней і чистоту поверхні виробу, так як видавлюються більш дрібні краплі пластику. Але з іншого боку, при використанні маленького сопла зростає загальний час друку виробу [1-7].

На сучасному етапі розвитку існує велика кількість моделей екструдерів, які відрізняються способом подачі матеріалу, матеріалом корпусу, кількістю головок для друку, а також рознесеною конструкцією частин екструдера (так звані Bowden-екструдери).

Екструдери розраховані на використання пластикової нитки діаметром або 1,75 мм або 3 мм, кожна із моделей призначена для друку лише певними типами пластику. Найчастіше в FDM-пристроях використовуються термопластики PLA і ABS.

Для розроблюваної моделі малогабаритного 3D-принтера буде використано екструдер Geeetech GT9S J-Head V2.0 з КЕД 42SHD0217 (рис. 1.15).

Екструдер побудований за принципом «прямої подачі» і виконаний з металу без пластмасових вставок – така конструкція виключає люфт між передавальними шестернями і можливих проблем із перегрівом проміжних компонентів.

У конструкції екструдера використовується два спеціальних охолоджувальних вентилятори для створення теплового бар'єру, що дозволяє виштовхувати пластик із сопла, і встановлений додатковий терморезистор, опором 100 кОм.

Основні характеристики Geeetech GT9S J-Head V2.0 [14]:

- робочий рівень температура головки екструдера в діапазоні від 180°C до 260°C;
- діаметр сопла в діапазоні: 0,3, 0,35, 0,4 або 0,5 мм;
- роздільна здатність друку: 0,1 мм;
- товщина шару, який друкується в діапазоні від 0,1 до 0,3 мм;

- швидкість пересування до 50 мм/с;
- величина напруги живлення компонентів екструдера - 12В.

У найпростішому варіанті виконання платформа для 3D-друку являє собою квадратний лист металу або скла, що переміщається на підшипниках по напрямних осі X і приводиться в рух КЕД за допомогою пасової передачі. Але, як правило, стіл виконують «двоповерховим».

Перший «поверх» жорстко кріпиться на підшипниках, другий «поверх», на якому відбувається 3D-друк, утримується болтами і пружинами строго над першим. Така підвіска дозволяє легко варіювати висоту столу і вирівнювати положення стола відносно сопла екструдера.

Підігрів столу необхідно виконувати для того, щоб підвищити адгезію пластику до поверхні столу. Перший шар виробу друкується прямо на платформі, і необхідно, щоб гарячий матеріал добре прилипав до поверхні столу, а не тягнувся за соплом екструдера. До нагрітої поверхні матеріал прилипає значно легше, ніж до холодної.

Існує кілька варіантів підігріву столу для 3D-друку:

- нагрівальна плита, виготовлена з гетинаксу з мідними «доріжками»;
- силіконова пластина з нагрівальними елементами, закріплена на нижній поверхні столу;
- окремі нагрівальні елементи, встановлені на нижній поверхні металевої платформи.

Рівномірний нагрів платформи можуть забезпечити силіконова пластина і плита з гетинаксу, але силіконова пластина має собівартість в кілька разів вищу за собівартість конструкції з гетинаксу. Тому на малогабаритному 3D-принтері в якості платформи обраний нагрівальний стіл PCB Heatbed MK2B [15] з розмірами сторін 214 x 214 мм (рис. 1.16).

Стіл володіє величиною напруги живлення або 12 В або 24 В, про що свідчить таблиця включень на платі столу, і три контакти на краю платформи. У конструкції столу передбачений SMD-світлодіод для індикації роботи і давач

рівня температури, що фіксує зміну нагріву поверхні столу.

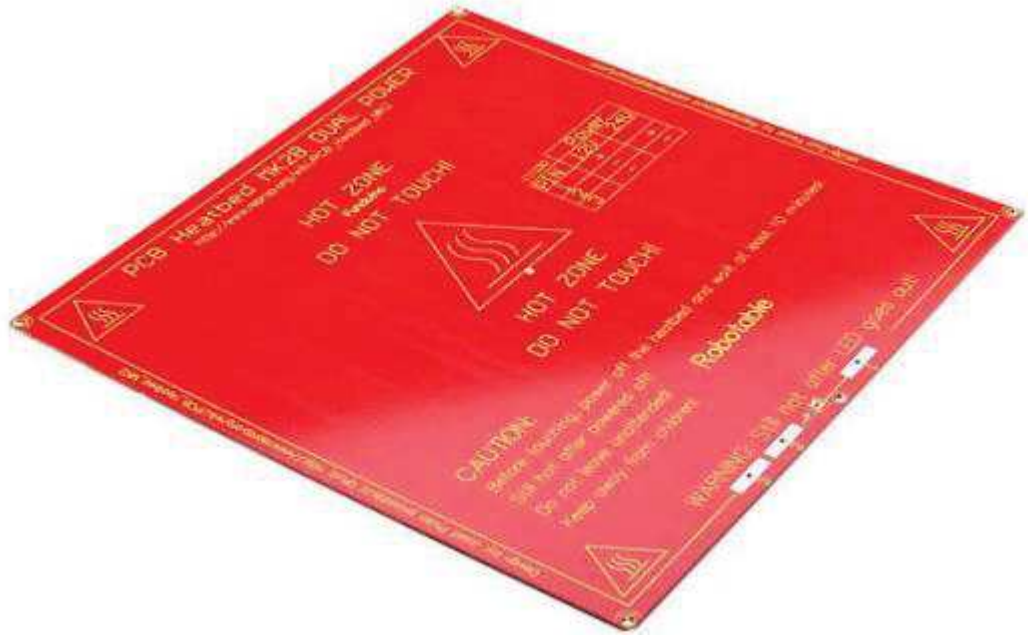


Рисунок 1.16 – Загальний вигляд нагрівальної платформи PCB Heatbed MK2B

Таким чином, робоча область 3D-друку багато в чому залежить від конструкції платформи, яка також впливає на якість всього виробу – рівномірний нагрів і хороша адгезія сприяють високій кінцевій якості виробів.

Кінцеві вимикачі використовують для обмеження робочих рухів рухомих механізмів малогабаритного 3D-принтера, щоб програмний збій не змусив КЕД переміщати каретку осі до обмежувача і не пошкодив конструкцію. Також вони можуть бути використані для встановлення так званого «нульового положення» осей 3D-принтера.

У системах контролю малогабаритних 3D-принтерів використовують переважно два типи кінцевих давачів:

- оптичні;
- механічні.

Оптичні кінцеві вимикачі точніші і не оснащені рухомими частинами - відповідно, вони не мають жодної механічної зносостійкості. Але за великої кількості пилу, оптичні давачі забруднюються, що призводить до похибок в роботі.

У конструкції малогабаритного 3D-принтера будемо використовувати оптичні давачі, оскільки під час 3D-друку не буде виділятися великої кількості відходів у вигляді стружки або пилу [БРМА25.00.00.000ДІ].

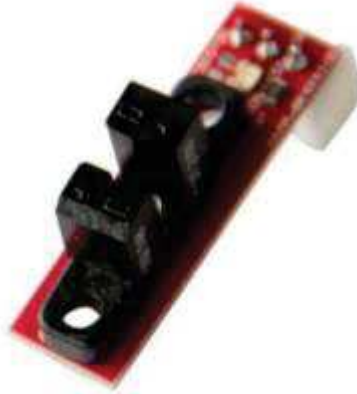


Рисунок 1.17 – Загальний вигляд оптичних кінцевих вимикачів

ПЗ необхідне для підготовки та керування ТП 3D-друку виробу.

Процес підготовки до 3D-друку складається з трьох складових частин:

- створення і підготовка моделі;
- генерація керуючої програми;
- завантаження керуючої програми в PLC 3D-принтера.

Створення та підготовка моделі - для створення моделі використовують спеціальні CAD-системи - програми тривимірного проектування, які носять назву 3D-редактори.

3D-редактори можна умовно класифікувати на дві групи:

- програми твердотільного моделювання;
- програми поверхневого моделювання.

Головна відмінність у тому, що програми поверхневого моделювання створюють так звані «порожнисті» об'єкти, які не можливо використати для 3D-друку. Якщо в виробі утвориться хоча б один отвір, то весь виріб зруйнується на наступному кроці підготовки. Тому для створення виробів найчастіше використовують саме програми твердотільного моделювання [1-7].

Після створення моделі необхідно виконати експорт в один із

стандартизованих форматів. У технологіях швидкого прототипування для цього використовують формат файлу .stl, у якому інформація про виріб зберігається у вигляді списку трикутних граней, що описують поверхню виробу.

Створення моделей для друку на розроблюваному малогабаритному 3D-принтері виконується в програмі SolidWorks 2024 [16], яка оснащена вбудованим механізмом експорту інформації в спеціальний .stl-файл.

Для автоматизованого створення програми керування 3D-принтера використовуються спеціалізовані САМ-системи. Програма керування для PLC 3D-принтера має бути представлена в G-code або коді ISO-7 біт, який описує необхідні переміщення вузлів осей і керування рівнем температури екструдера і столу.

Перед процесом генерації G-code виконується slicing, тобто модель виробу нарізається на тонкі шари. Висота шару, як і велика кількість інших параметрів, вказується в налаштуваннях програми, що виконує slicing. Потім кожен шар аналізується і для нього генерується окремий маршрут, за яким буде рухатись сопло екструдера, видавлюючи матеріал. На основі інформації про всі маршрути і генерується керуюча програма в спеціальному G-code.

Завантаження отриманого G-code у PLC 3D-принтера може бути виконано двома шляхами:

- на SD-карті пам'яті в модуль, розміщений на PLC 3D-принтера, що дає змогу працювати із зовнішніми флеш-накопичувачами;
- через програму керування ТП 3D-друку через дротовий інтерфейс.

ПЗ, необхідне для керування ТП 3D-друку, складається з наступних частин:

- програми керування, встановленої на ПК;
- вбудованої системи PLC 3D-принтера.

Вбудована система - низькорівневе ПЗ, так звана прошивка PLC. У прошивці описано стандартні налаштування й алгоритм керування під'єднаних до PLC виконавчих механізмів [1-7].

Програма керування, встановлена на ПК, містить налаштування 3D-друку, відображає контрольовані параметри рівнів температури екструдера та столу, дає змогу спостерігати за ТП 3D-друку, відображаючи траєкторію руху екструдера в процесі роботи. Деякі виробники ПЗ інтегрують підтримку слайсингу в програми керування процесом 3D-друку, що дає можливість використовувати одну програму.

Етапи підготовки та керування ТП 3D-друку представлені на рисунку 1.18.

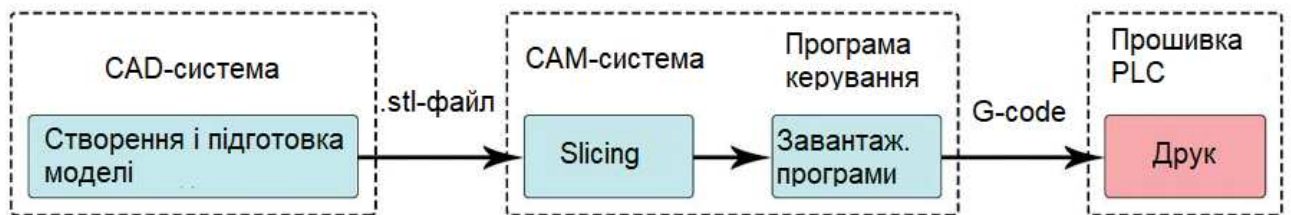


Рисунок 1.18 - Етапи підготовки та керування ТП 3D-друком

Для керування ТП 3D-друку використовується програма Repetier-Host [16], яка має вбудований slicing і надає можливість генерувати G-code без використання додаткового ПЗ.

Висновки до першого розділу

Виконано огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень малогабаритних 3D-принтерів, описано проблематику використання малогабаритних 3D-принтерів та розглянуто особливості технологічного процесу 3D-друку.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МАЛОГАБАРИТНИМ 3D-ПРИНТЕРОМ

2.1 Розрахунок необхідних робочих моментів

Для вибору КЕД потрібно виконати розрахунок необхідних робочих моментів, що забезпечують переміщення екструдера, виробу, що виготовляється, і модулів осей по напрямних за допомогою використання механічних передач.

Максимальну лінійну швидкість переміщення по осі X приймемо на рівні 50 мм/с , по осі Y - 100 мм/с , по осі Z - 20 мм/с ; час прискорення – 0,1 с.

2.1.1 Переміщення вузла осі X

Переміщення по осі X виконується по рейкових циліндричних напрямних за допомогою використання зубчасто-пасової передачі. Навантаження, що припадає на рейкові циліндричні напрямні - маса нагрівального столу і виробу, що виготовляється.

Зубчасто-пасова передача складається з 2 шківів і пасу з металевими шнурами в несучому шарі. Конструкція нагрівального столу переміщається на чотирьох каретках по двох рейкових циліндричних напрямних.

Приймемо необхідні дані для виконання розрахунку [1-7]:

- крок зубів пасу – 2,5 мм;
- кількість зубів шківа - 16;
- ширина пасу - 6 мм;
- діаметр отвору шківа - 5 мм;
- зовнішній діаметр шківа - 16 мм;
- робочий діаметр передачі – 12,43 мм;
- маса шківа – 0,01 кг;
- швидкість переміщення по осі X - 50 мм/с;
- маса переміщуваного нагрівального столу близько 2,5 кг;

- робоча область друку - 200x200x200 мм.

Для оцінки потрібного робочого моменту осі X необхідно визначити зусилля, що діє на вали внаслідок натягу зубчастого пасу, врахувати опір тертю під час переміщення конструкції нагрівального столу та інерцію столу з виробом згідно наступної формули [17, 18]:

$$M_x = M_{px} + M_{mrx} + M_{inx}. \quad (2.1)$$

Визначимо натяг пасу

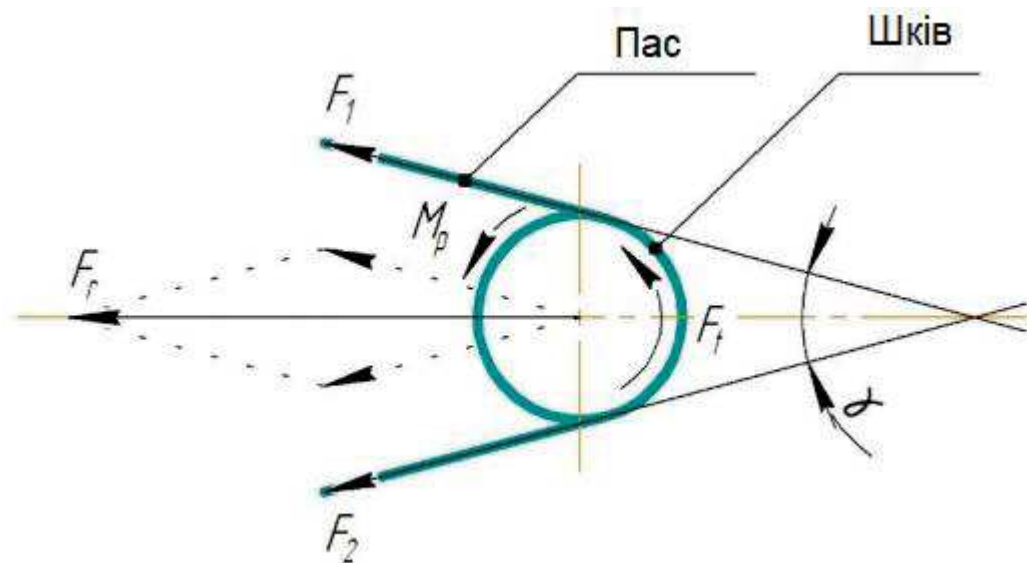


Рисунок 2.1 - Сили, що виникають під час натягу пасу на шківі

За рахунок попереднього натягу пасу F_0 , на шків із пасом передається сила F_t . З умови рівноваги пасу при передачі обертального моменту, запишемо наступну рівність:

$$F_t = F_1 - F_2, \quad (2.2)$$

де F_1, F_2 - натяг ведучої та веденої гілок пасу відповідно, Н.

Оскільки геометрична довжина пасу від навантаження не залежить,

запишемо рівність сумарних натягів гілок пасу у навантаженій або ненавантаженій передачі:

$$F_1 + F_2 = 2 \cdot F_0. \quad (2.3)$$

Тоді сила F_r , що діє на вали передачі за рахунок попереднього натягу пару, дорівнює [17, 18]:

$$F_r = z \cdot \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \gamma} \approx z \cdot (F_1 + F_2) \cdot \cos \frac{\gamma}{2} = z \cdot 2 \cdot F_0 \cdot \cos \frac{\gamma}{2}, \quad (2.4)$$

де z - кількість пасів; γ - кут між гілками пасу.

У механічній передачі на обох кінцях використані однакові шківни, отже, F_1, F_2 паралельні і кут $\gamma = 0^\circ$. На шківни встановлено один пас. Відповідно, сила, що діє на вали передачі, буде рівною:

$$F_r = 2 \cdot F_0. \quad (2.5)$$

Значить попередній натяг у передачі знайдемо із виразу:

$$F_0 = F_y \cdot b + q \cdot b \cdot v^2, \quad (2.6)$$

де F_y - питомий натяг, Н/мм; b - ширина пасу, мм; q - лінійна щільність пасу шириною 1 мм, кг/(м*мм); v - лінійна швидкість переміщення пасу, м/с.

Для визначення F_y і q необхідно знайти модуль пасу m із формули:

$$m = \frac{p_{кз}}{\pi}, \quad (2.7)$$

де $p_{кз}$ - крок зубів, мм.

$$m = \frac{2,5}{\pi} = 0,8 \text{ мм.}$$

Приймаємо $m = 1 \text{ мм}$ зі стандартних значень модулів, тоді відповідно до основних параметрів пасів із трапецеїдальним профілем [17]:

- питомий натяг $F_y = 0,25 \text{ Н/мм}$;

- лінійна щільність пасу $q = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{мм}$.

Визначимо силу, що діє на вали передачі осі X, з наступної формули:

$$F_{rx} = 2 \cdot F_0 = 2 \cdot (F_y \cdot b + q \cdot b \cdot v_x^2); \quad (2.8)$$

$$F_{rx} = 2 \cdot (0,25 \cdot 6 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 0,05^2) = 3 \text{ Н.}$$

Знайдемо момент необхідний для подолання такої сили, з наступної формули:

$$M_{px} = \frac{F_{rx} \cdot d_p}{2}, \quad (2.9)$$

де d_p - робочий діаметр передачі, м.

$$M_{px} = \frac{3 \cdot 12,43 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,86 \text{ Н} \cdot \text{см.}$$

Визначимо опір тертю.

Для переміщення столу з виробом необхідно врахувати опір тертю

поверхні направляючої згідно формули [17, 18]:

$$F_{mp} = \mu \cdot W, \quad (2.10)$$

де μ - динамічний коефіцієнт тертя (для рейкових напрямних приймаємо $\mu = 0,004$); W - номінальне навантаження, Н.

Тоді номінальне навантаження на вісь X дорівнює:

$$W_x = \frac{m_x \cdot g}{4}, \quad (2.11)$$

де m_x - маса, що переміщується по напрямних, кг. Визначимо із наступної формули:

$$m_x = m_{cm} + m_g, \quad (2.12)$$

де m_{cm} - маса столу, кг; m_g - маса деталі, кг.

Визначимо максимальну масу виробу, яка може вміститися на столі, знаючи робочу область друку - 200x200x200 мм і щільність пластику 1,25 г/см³. Вироби великих розмірів виготовляються в більшості випадків із внутрішньою заливкою матеріалу не більше як 25% [1-7].

$$m_g = 0,25 \cdot \rho \cdot V_g; \quad (2.13)$$

$$m_g = 0,25 \cdot 1,25 \cdot 10^3 \cdot 0,2^3 = 2,5 \text{ кг.}$$

Тепер визначимо силу тертя [17, 18]:

$$F_{\text{трх}} = \mu \cdot \frac{(m_{\text{см}} + m_{\text{г}}) \cdot g}{4}; \quad (2.14)$$

$$F_{\text{трх}} = 0,004 \cdot \frac{(2,5 + 2,5) \cdot 9,81}{4} = 0,049 \text{ Н}.$$

Момент, необхідний для подолання сили тертя, дорівнює:

$$M_{\text{трх}} = F_{\text{трх}} \cdot l_x, \quad (2.15)$$

де l_x - плече дії сили, приймаємо $l_x = 11,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$M_{\text{трх}} = 0,049 \cdot 11,85 \cdot 10^{-3} = 0,06 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Визначимо інерцію системи [17, 18].

Конструкція, що переміщується по осі X, по замовчуванню має інерцію, визначимо момент сил інерції на головному валу електродвигуна, використовуючи наступне співвідношення:

$$M_{\text{ін}} = J \cdot \varepsilon, \quad (2.16)$$

де J - приведений до головного валу еквівалентний момент інерції, кг*м²;
 ε - необхідне кутове прискорення ротора електродвигуна, рад/с².

Еквівалентний момент інерції осі X, буде рівним [17]:

$$J_x = J_{\text{навантх}} + 2 \cdot J_{\text{шк}}, \quad (2.17)$$

де $J_{\text{навантх}}$ - момент інерції навантаження осі X, кг*м²; $J_{\text{шк}}$ - момент інерції шківів, кг*м².

Для визначення $J_{\text{навантх}}$ необхідно привести маси, що рухаються поступально, до головного валу електродвигуна.

На підставі рівності запасу кінетичної енергії, запишемо наступний вираз:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.18)$$

де ω - кутова швидкість головного валу електродвигуна, рад/с.

$$\omega_x = \frac{v_x \cdot 2\pi}{P_{\text{шк}} \cdot i}, \quad (2.19)$$

де i - передаточне відношення (кількість зубів шківа).

$$\omega_x = \frac{0,05 \cdot 2\pi}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16} = 7,85 \text{ рад/с.}$$

Тоді, визначимо момент інерції навантаження [17]:

$$J_{\text{навантх}} = m_x \cdot \left(\frac{v_x}{\omega_x} \right)^2; \quad (2.20)$$

$$J_{\text{навантх}} = 5 \cdot \left(\frac{0,05}{7,85} \right)^2 = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначимо момент інерції шківа із формули:

$$J_{\text{шк}} = m_{\text{шк}} \cdot \frac{r_1^2 + r_2^2}{2}, \quad (2.21)$$

де $m_{шк}$ - маса шківів, кг; r_1 - діаметр отвору шківів, м; r_2 - зовнішній діаметр шківів, м.

$$J_{шк} = 0,01 \cdot \frac{(5 \cdot 10^{-3})^2 + (16 \cdot 10^{-3})^2}{2} = 1,41 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Еквівалентний момент інерції осі X згідно (2.17) буде рівним:

$$J_x = 2,03 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-6} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Необхідне кутове прискорення ротора електродвигуна дорівнює [17, 18]:

$$\varepsilon_x = \frac{a_x \cdot 2\pi}{p_{шк} \cdot i}, \quad (2.22)$$

де a_x - величина лінійного прискорення по осі X, м/с².

$$a_x = \frac{v_x - v_0}{t_a}, \quad (2.23)$$

де v_0 - початкова швидкість, приймаємо $v_0 = 0$ м/с²; t_a - час прискорення,

с.

$$a_x = \frac{0,05 - 0}{0,1} = 0,5 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_x = \frac{0,5 \cdot 2\pi}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16} = 78,54 \text{ рад/с}^2.$$

Тоді момент сил інерції дорівнює:

$$M_{inx} = 2,05 \cdot 10^{-4} \cdot 78,54 = 1,61 H \cdot см.$$

Відповідно, необхідний робочий момент на валу електродвигуна осі X буде рівним:

$$M_x = 1,86 + 0,06 + 1,61 = 3,53 H \cdot см.$$

2.1.2 Переміщення вузла осі Y

На осі Y закріплена лінійна рейкова напрямна, по якій рухається каретка екструдера за допомогою зубчасто-пасової передачі.

Дані для розрахунку [1-7]:

Маса вузла екструдера - 1 кг;

Швидкість переміщення по осі Y - 100 мм/с.

Визначимо наступні складові для оцінки необхідного робочого моменту осі Y - натяг ремня, опір тертя, інерція навантаження.

$$M_y = M_{py} + M_{mry} + M_{iny}. \quad (2.24)$$

Визначимо натяг пасу [17, 18].

Сила, що діє на головний вал електродвигуна внаслідок натягу пасу буде рівна згідно (2.8):

$$F_{ry} = 2 \cdot (0,25 \cdot 6 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 0,1^2) = 3 H,$$

де v_y - лінійна швидкість переміщення ремня осі Y, м/с.

Тоді момент, необхідний для подолання цієї сили, дорівнює:

$$M_{py} = \frac{3 \cdot 12,43 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,86 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Знайдемо опір тертю.

Сила тертя згідно наступної формули дорівнює [17, 18]:

$$F_{mry} = \mu \cdot m_e \cdot g, \quad (2.25)$$

де μ - динамічний коефіцієнт тертя (для лінійних рейкових напрямних приймаємо $\mu = 0,004$); m_e - маса вузла екструдера, кг.

Момент, необхідний для подолання сили тертя, буде рівним:

$$M_{mry} = F_{mry} \cdot l_y, \quad (2.26)$$

де l_y - плече дії сили, приймаємо $l_y = 24,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$M_{mry} = 0,0392 \cdot 24,5 \cdot 10^{-3} = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Визначимо інерцію системи.

Еквівалентний момент інерції знайдемо згідно формули (2.17).

Визначимо момент інерції навантаження осі Y:

$$J_{наванту} = m_e \cdot \left(\frac{v_y}{\omega_y} \right)^2, \quad (2.27)$$

де ω_y - необхідна кутова швидкість головного валу електродвигуна осі Y.

$$\omega_y = \frac{0,1 \cdot 2\pi}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16} = 15,71 \text{ рад/с};$$

$$J_{\text{наванту}} = 1 \cdot \left(\frac{0,1}{15,71} \right)^2 = 4,05 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таким чином, еквівалентний момент інерції буде рівним:

$$J_y = 4,05 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-6} = 4,33 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Необхідне кутове прискорення ротора електродвигуна знайдемо із наступної формули:

$$\varepsilon_y = \frac{a_y \cdot 2\pi}{\rho_{\text{шк}} \cdot i}, \quad (2.28)$$

де a_y - лінійне прискорення по осі Y, м/с².

$$a_y = \frac{v_y - v_0}{t_a} = \frac{0,1 - 0}{0,1} = 1 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 \cdot 2\pi}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16} = 157,1 \text{ рад/с}^2.$$

Знайдемо момент сил інерції із формули:

$$M_{\text{іну}} = 4,33 \cdot 10^{-5} \cdot 157,1 = 0,68 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Відповідно, необхідний робочий момент на головному валу

електродвигуна по осі Y буде рівним:

$$M_y = 1,86 + 0,1 + 0,68 = 2,64H \cdot \text{см.}$$

2.1.3 Переміщення вузла осі Z

Конструкція осі Z складається з 2-х циліндричних напрямних, якими у вертикальному напрямі переміщується вузол екструдера за допомогою 2-х гвинтових передач із трапецеїдальною різьбою.

Трапецеїдальні гвинти встановлені в підшипники, що самоцентруються, і приводяться в рух за допомогою двох електродвигунів, що працюють синхронно.

Необхідні дані для розрахунку [1-7]:

- крок різьби гвинта - 3 мм;
- маса трапецеїдального гвинта - 0,33 кг;
- середній діаметр гвинта – 10,5 мм;
- діаметр трапецеїдального гвинта - 12 мм;
- кут профілю різьби - 30°;
- середній діаметр підшипника - 18 мм;
- швидкість переміщення по осі Z - 20 мм/с;
- маса конструкції вузла екструдера – 3,85 кг.

Для оцінки необхідного робочого моменту осі Z визначимо наступні величини: момент, необхідний для створення підйомного зусилля, і момент інерції системи.

Тертя вузла об вертикальні напрямні буде знехтуване - навантаження вузлів осей Y і Z сприймають трапецеїдальні гвинти і фланцеві підшипники в основі.

Знайдемо необхідне підйомне зусилля [17, 18].

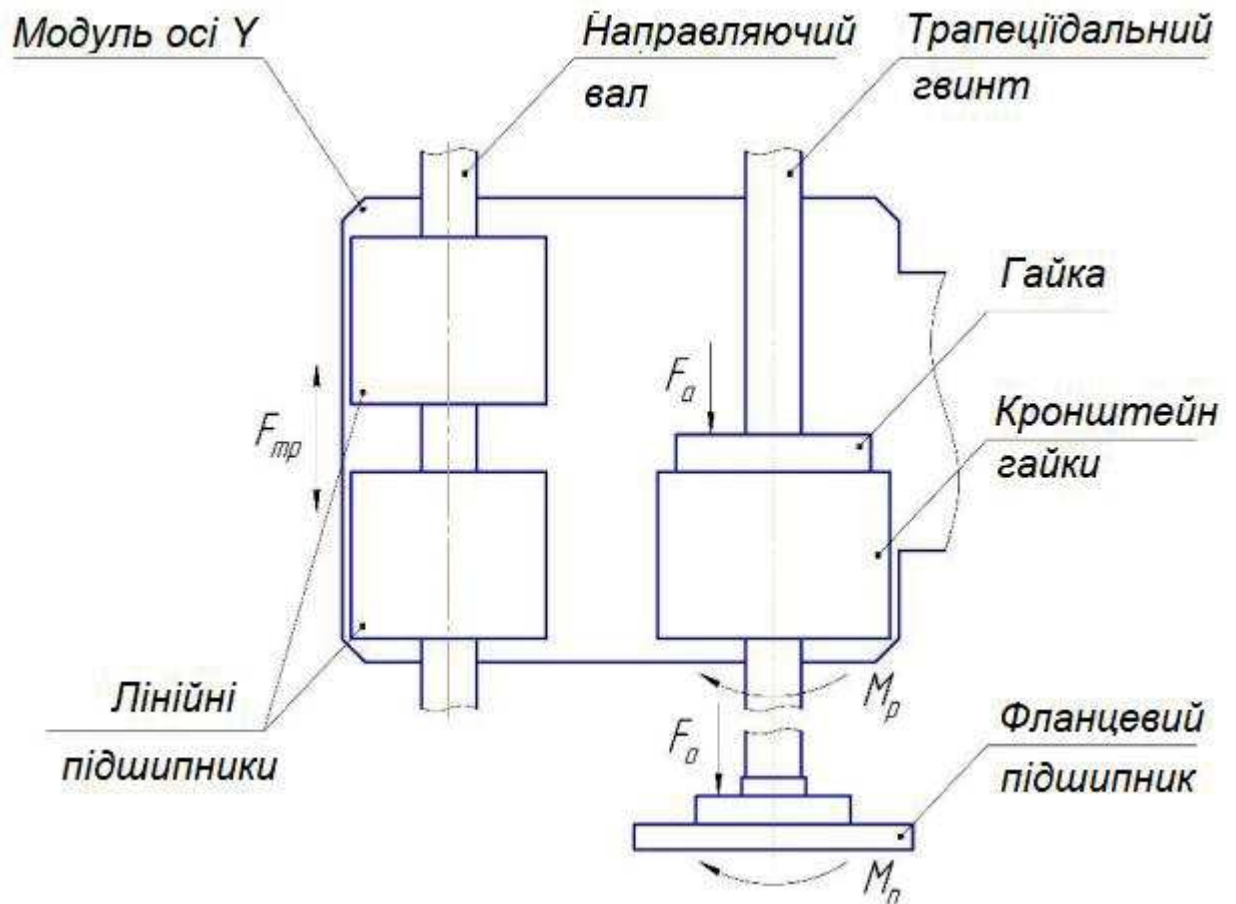


Рисунок 2.2 - Сили, що діють у підйомному вузлі осі Z

Здійснимо розрахунок моменту, необхідного для створення тягового зусилля в різьбі, і моменту для подолання навантаження на фланцевому підшипнику для оцінки необхідного приводного моменту:

$$M_{np} = M_p + M_n. \quad (2.29)$$

Момент M_p для перетворення обертального руху в зворотно-поступальний визначається із наступної формули [17]:

$$M_p = \frac{F_a \cdot p_{гв}}{2\pi \cdot \eta_{гв}}, \quad (2.30)$$

де F_a - робоче навантаження, Н; p_{zg} - крок різьби гвинта, м; η_{zg} - ККД прямого перетворення передач «гвинт-гайка».

Робоче навантаження, відповідно до [10], буде рівною:

$$F_a = \frac{\mu_g \cdot W_y}{n} = \frac{\mu_g \cdot m_y \cdot g}{n}, \quad (2.31)$$

де μ_g - коефіцієнт тертя в різьбі; W_y - номінальне навантаження, Н; n - кількість гвинтів у вузлі; m_y - маса конструкції вузла екструдера, кг.

Передача «гвинт-гайка» складається зі сталевого трапецеїдального гвинта, капролонової (поліамідної) гайки і спеціального кронштейна гайки.

Коефіцієнт тертя в різьбовому з'єднанні матеріалів Сталь-Поліамід, без змащення буде рівною $\mu_g = 0,2 \sim 0,3$.

Таким чином, робоче навантаження буде рівним:

$$F_a = \frac{0,25 \cdot 3,85 \cdot 9,81}{2} = 4,72 \text{ Н.}$$

ККД гвинтової пари визначається із наступної формули [17]:

$$\eta_g = \frac{\tan \psi}{\tan(\psi + \varphi')}, \quad (2.32)$$

де ψ - кут підйому витка різьби; φ' - наведений кут тертя (оскільки в трапецеїдальній гвинтовій передачі присутній додатковий вид тертя пов'язаний із формою профілю різьби).

Тоді кут підйому витка різьби буде рівним:

$$\psi = \arctan\left(\frac{p_g \cdot z_g}{\pi \cdot d_2}\right), \quad (2.33)$$

де z_g - число заходів різьби, приймаємо $z_g = 1$; d_2 - середній діаметр гвинта, м.

$$\psi = \arctan\left(\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{\pi \cdot 10,5 \cdot 10^{-3}}\right) = 5,2^\circ.$$

Визначимо наведений кут тертя із формули:

$$\varphi' = \arctan f' = \arctan\left(\frac{f}{\cos \gamma}\right) = \arctan\left(\frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right), \quad (2.34)$$

де f' - наведений коефіцієнт тертя; f - коефіцієнт тертя передачі «гвинт-гайка», приймаємо $\mu_{zg} = 0,25$; γ - кут нахилу бічної робочої поверхні витка різьби; α - кут профілю різьби.

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{0,25}{\cos \frac{30}{2}}\right) = 14,51^\circ.$$

Таким чином, ККД передачі визначимо із формули (2.32):

$$\eta_{zg} = \frac{\tan 5,2}{\tan(5,2 + 14,51)} = 0,25 = 25\%.$$

Відповідно, визначимо момент M_p із формули (2.30):

$$M_p = \frac{4,72 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 0,25} = 0,89 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Перевіримо гвинтову передачу на виконання умови самогальмування ($\varphi' > \psi$), підставляємо $14,51^\circ > 5,2^\circ$ - умова самогальмування виконується.

Тоді момент, необхідний для подолання навантаження в підшипнику, буде рівним:

$$M_n = F_n \cdot \frac{d_m}{2}, \quad (2.35)$$

де F_n - навантаження на підшипник; d_m - середній діаметр підшипника.

Навантаження на підшипник містить у собі осьову й радіальну складові. Радіальним навантаженням в даній конструкції нехтуємо, оскільки підшипник використовується лише в якості опори трапецеїдального гвинта, сприймаючи переважно осьове навантаження [17, 18]:

$$F_n = \sqrt{F_r^2 + F_0^2} = \sqrt{F_0^2} = F_0, \quad (2.36)$$

де F_r, F_0 - радіальне й осьове навантаження відповідно, Н.

$$F_0 = \frac{f_n \cdot W_n}{n_n} = \frac{f_n \cdot (m_y + 2 \cdot m_{z8}) \cdot g}{n_n}, \quad (2.37)$$

де f_n - коефіцієнт тертя в підшипнику (при напіврідкому режимі приймаємо $f_n = 0,008 \sim 0,08 = 0,08$); W_n - номінальне навантаження на

підшипник, Н; $m_{зв}$ - маса гвинта, кг; n - кількість підшипників.

$$F_0 = \frac{0,08 \cdot (3,85 + 2 \cdot 0,33) \cdot 9,81}{2} = 1,77 \text{ Н.}$$

Згідно формули (2.35):

$$M_n = 1,77 \cdot \frac{18 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,6 \text{ Н} \cdot \text{см.}$$

Таким чином, приводний момент, необхідний для підйому конструкції вузла осі Z, згідно (2.29) буде рівним:

$$M_{np} = 0,89 + 1,6 = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{см.}$$

Визначимо інерцію системи.

Еквівалентний момент інерції осі Z дорівнює:

$$J_z = J_{навантз} + J_{зв}, \quad (2.38)$$

де $J_{навантз}$ - момент інерції навантаження осі Z, кг*м²; $J_{зв}$ - момент інерції гвинта, кг*м².

Визначимо момент інерції навантаження осі Z згідно формули:

$$J_{навантз} = \frac{m_y}{n} \cdot \left(\frac{p_{зв}}{2\pi} \right)^2; \quad (2.39)$$

$$J_{навантз} = \frac{3,85}{2} \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{2\pi} \right)^2 = 4,4 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тоді момент інерції гвинта буде рівним [17]:

$$J_{z\text{г}} = \frac{m_{z\text{г}} \cdot r_{z\text{г}}^2}{2}, \quad (2.40)$$

де $r_{z\text{г}}$ - радіус трапецеїдального гвинта, м.

$$J_{z\text{г}} = \frac{0,33 \cdot 6^2}{2} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Таким чином, еквівалентний момент інерції буде рівним згідно (2.38):

$$J_z = 4,4 \cdot 10^{-7} + 6 \cdot 10^{-6} = 6,44 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Звідки, необхідне кутове прискорення ротора електродвигуна буде рівним:

$$\varepsilon_z = \frac{a_z \cdot 2\pi}{P_{z\text{г}}}, \quad (2.41)$$

де a_z - лінійне прискорення за віссю Z, м/с².

$$a_z = \frac{v_z - v_0}{t_a} = \frac{0,02 - 0}{0,1} = 0,2 \text{ м/с}^2;$$

$$\varepsilon_z = \frac{0,2 \cdot 2\pi}{3 \cdot 10^{-3}} = 418,9 \text{ рад/с}^2.$$

Знайдемо момент сил інерції:

$$M_{inz} = 6,44 \cdot 10^{-6} \cdot 418,9 = 0,27 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Відповідно, необхідний робочий момент на головному валу електродвигуна осі Z буде рівним:

$$M_z = 2,49 + 0,27 = 2,76 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

2.2 Підбір крокових двигунів для малогабаритного 3D-принтеру

Вибір КЕД виконано за необхідним робочим моментом і мінімальною індуктивністю обмоток розрахованими вище. За умови використання драйверів крокових двигунів фірми Pololu [11], сила струму фази КЕД не повинна перевищувати 2,5 А. Обраний тип КЕД - біполярний.

Необхідні робочі моменти КЕД, отримані під час розрахунку:

- Вісь X - $M_x = 3,53 \text{ Н} \cdot \text{см};$

- Вісь Y - $M_y = 2,64 \text{ Н} \cdot \text{см};$

- Вісь Z - $M_z = 2,76 \text{ Н} \cdot \text{см}$ (на кожному КЕД).

Для керування КЕД, з метою зниження вібрації та підвищення плавності ходу, буде використовуватись мікрокроковий режим роботи, який знижує момент КЕД відносно повнокрокового режиму. Значення необхідного крутного моменту під час використання мікрокрокового режиму можна визначити за наступною формулою [8-10]:

$$M_{mku} = \frac{M_{rob}}{\sin\left(\frac{90}{N_{ustep}}\right)}, \quad (2.42)$$

де $M_{роб}$ - необхідний робочий момент КЕД; $N_{μstep}$ - використовуваний режим мікрокроку, приймаємо $N_{μstep} = 1/16$.

$$M_{мкшх} = \frac{3,53}{\sin\left(\frac{90}{16}\right)} = 36H \cdot см;$$

$$M_{мкшy} = \frac{2,64}{\sin\left(\frac{90}{16}\right)} = 26,9H \cdot см;$$

$$M_{мкшz} = \frac{2,76}{\sin\left(\frac{90}{16}\right)} = 28,2H \cdot см.$$

Доцільно виконати вибір КЕД однієї моделі на кожну вісь 3D-принтера.

Таким чином, будемо встановлювати біполярні КЕД 17HS8401 [19], типорозмір NEMA 17 (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд КЕД 17HS8401 [19]

КЕД має такі параметри [19]:

- номінальна сила струму – 1,7 А;
- крок повороту – 1,8°;
- індуктивність фази – 3,2 мГн;
- опір фази – 1,8 Ом;

- статичний синхронізуючий момент - 52 Н*см;

- величина інерції ротора - 68 г*см².

Вибір і розрахунок параметрів драйверів КЕД

Як відомо, номінальна сила струму КЕД – 1,7 А, тому для керування будемо використовувати драйвери Pololu A4988 [11], які можуть підключати обмотки КЕД зі силою струму до 2 А, і підтримують мікрокроковий режим роботи до 1/16.

Обмотка КЕД являє собою індуктивність, тому під час підвищення частоти комутації спостерігається запізнювання в наростанні сили струму, що призводить до зниження крутного моменту ротора. З цієї причини під час живлення обмоток КЕД використовують підвищений рівень напруги з одночасним обмеженням сили струму.

Тому для обмеження сили струму в драйвері А4988 [11] необхідно встановити рівень опорної напруги ЦАП драйвера за допомогою потенціометра.

Драйвер порівнює падіння рівня напруги на резисторах, увімкнених послідовно з обмотками КЕД, з рівнем напруги, заданим потенціометром, не допускаючи збільшення сили струму, що тече через обмотки.

Відповідно до документації для драйвера Pololu A4988 [11], для визначення необхідного рівня опорної напруги скористаємося наступним виразом:

$$I_{trip\max} = \frac{V_{ref}}{8 \cdot R_s}, \quad (2.43)$$

де $I_{trip\max}$ - сила струму обмотки КЕД, А; V_{ref} - значення рівня опорної напруги, В; R_s - значення опорів, встановлених на драйвері, приймаємо $R_s = 0,050\text{М}$.

Сила струму обмотки КЕД розрахована на одну обмотку, Проте у кожен момент часу може бути увімкнено відразу дві обмотки КЕД, відповідно [19]:

$$V_{ref} = 2 \cdot (I_{trip\max17HS} \cdot 8 \cdot R); \quad (2.44)$$

$$V_{ref} = 2 \cdot (1,7 \cdot 8 \cdot 0,05) = 1,36V.$$

У конструкції екструдера будемо використовувати КЕД 42SHD0217, який має наступні параметри [20]:

- номінальна сила струму – 1,5 А;
- величина опору фази – 2,5 Ом.

Для керування КЕД екструдера будемо застосовувати той самий драйвер Pololu A4988 [11], що й для решти КЕД. Визначимо необхідне значення рівня опорної напруги з формули (2.44):

$$V_{ref} = 2 \cdot (1,5 \cdot 8 \cdot 0,05) = 1,2V.$$

Висновки до другого розділу

Виконано проектування системи керування малогабаритним 3D-принтером. Проведено розрахунок необхідних робочих моментів на осях малогабаритного 3D-принтеру, виконано підбір крокових двигунів для осей малогабаритного 3D-принтеру.

3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ

3.1 Розрахунок головних параметрів малогабаритного 3D-принтера

Виконаємо розрахунок споживаної потужності малогабаритного 3D-принтера.

Для вибору джерела живлення необхідно визначити потужність, споживану електронними компонентами малогабаритного 3D-принтера.

КЕД, потужність, споживана одним електродвигуном, дорівнює [21-23]:

$$P_{\text{дв}} = I_{\text{дв}}^2 \cdot R_{\text{дв}} = (2 \cdot I_{\text{Trip max}})^2 \cdot R_{\text{дв}}, \quad (3.1)$$

де $I_{\text{дв}}$ - сила струму обмоток КЕД, А; $R_{\text{дв}}$ - опір фази КЕД, Ом.

Потужність КЕД для переміщення вузлів принтера визначимо із формули (3.1):

$$P_{\text{дв}} = (2 \cdot 1,7)^2 \cdot 1,8 = 20,8 \text{ Вт}.$$

Знайдемо необхідну потужність КЕД екструдера із формули (3.1):

$$P_{\text{дв}} = (2 \cdot 1,5)^2 \cdot 2,5 = 22,5 \text{ Вт}.$$

Наступний компонент - нагрівальний стіл. Рівень напруги живлення столу - 12 В, опір – 1,6 Ом.

$$P_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{ст}}^2}{R_{\text{ст}}}; \quad (3.2)$$

$$P_{cm} = \frac{12^2}{1,6} = 90 \text{Вт}.$$

Наступний елемент - нагрівач екструдера, спіраль з ніхромового дроту із активним опором – 4,4 Ом, рівень напруги живлення - 12 В. Визначимо потужність аналогічно до потужності нагрівального столу:

$$P_e = \frac{12^2}{4,4} = 32,7 \text{Вт}.$$

Наступний компонент - охолоджувальні вентилятори, у вузлі екструдера змонтовано два охолоджувальні вентилятори зі силою струму споживання не більше як 0,1 А і рівнем напруги живлення - 12 В. Загалом у конструкції малогабаритного 3D-принтера може бути встановлено до п'яти таких охолоджувальних вентиляторів, зокрема для охолодження виробу на столі.

$$P_{\text{вент}} = U_{\text{вент}} \cdot I_{\text{вент}}; \quad (3.3)$$

$$P_{\text{вент}} = 12 \cdot 0,1 = 1,2 \text{Вт}.$$

До системи контролю та керування входять [1-7]:

- драйвери КЕД;
- логічна та силова частини PLC;
- модуль з LCD-дисплеєм;
- терморезистори столу та екструдера;
- кінцеві вимикачі.

Живлення елементів логічної частини системи контролю та керування здійснюється через силову частину PLC - плату RAMPS 1.6, [13] на якій встановлено перетворювач рівня напруги на 5В. Максимальна сила струму,

споживана логічною частиною, становить не більше 500 мА.

$$P_y = U_y \cdot I_y; \quad (3.4)$$

$$P_y = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ Вт}.$$

Звідки, загальна споживана потужність буде рівною [21-23]:

$$P_{заг} = 4 \cdot P_{дв17HS} + P_{дв42SHD} + P_{см} + P_e + 5 \cdot P_{вент} + P_y; \quad (3.5)$$

$$P_{заг} = 4 \cdot 20,8 + 22,5 + 90 + 32,7 + 5 \cdot 1,2 + 2,5 = 237 \text{ Вт}.$$

Будемо використовувати імпульсне джерело живлення AS-350-12 [24] потужністю 350 Вт, яке оснащено 3-ма дванадцяти вольтними каналами живлення із силою струму в 10 А кожен.



Рисунок 3.1 - Імпульсне джерело живлення AS-350-12 [24]

Розробка принципової електричної схеми. У схему вмонтовано твердотільне реле К1 для захисту від перегрівання польового транзистора

MOSFET для плати RAMPS 1.6, [13] що керує нагріванням столу. За потужності 90 Вт і рівня напруги живлення столу в 12 В, MOSFET-транзистор керує постійним навантаженням 7,5А, що спричиняє нагрівання (транзистори використовуються лише у електричних схемах із малим навантаженням).

Виконаємо розрахунок дискретності позиціонування малогабаритного 3D-принтера, використовуючи наступні дані [1-7]:

- обраний режим мікрокроку - 1/16;
- крок повороту ротора КЕД – 1,8°;
- кількість зубів шківів - 16;
- крок зубів шківів осей X і Y – 2,5 мм;
- крок трапецеїдального гвинта осі Z - 3 мм.

Визначимо необхідну кількість кроків на один повний оберт КЕД в режимі мікрокроку згідно формули [21-23]:

$$PPS = \frac{360}{\theta} \cdot N_{\mu step}, \quad (3.6)$$

де θ - крок повороту ротора КЕД, °.

$$PPS = \frac{360}{1,8} \cdot 16 = 3,2 \text{ тис. кроків.}$$

Визначимо дискретність переміщення по осях X і Y згідно формули:

$$discr_x = discr_y = \frac{p_{шк} \cdot i}{PPS}; \quad (3.7)$$

$$discr_x = discr_y = \frac{2,5 \cdot 16}{3200} = 12,5 \frac{\text{мкм}}{\text{крок}}.$$

Визначимо дискретність переміщення осі Z згідно формули [21-23]:

$$discr_z = \frac{P_s}{PPS}; \quad (3.8)$$

$$discr_z = \frac{3}{3200} \approx 1 \frac{\text{мкм}}{\text{крок}}.$$

Виконаємо розрахунок екструзії філаменту з сопла, тобто знайдемо мінімальну кількість матеріалу на виході сопла екструдера при повороті КЕД на один крок [1-7]:

- діаметр сопла екструдера – 0,3 мм;
- діаметр прутка філаменту – 1,75 мм.

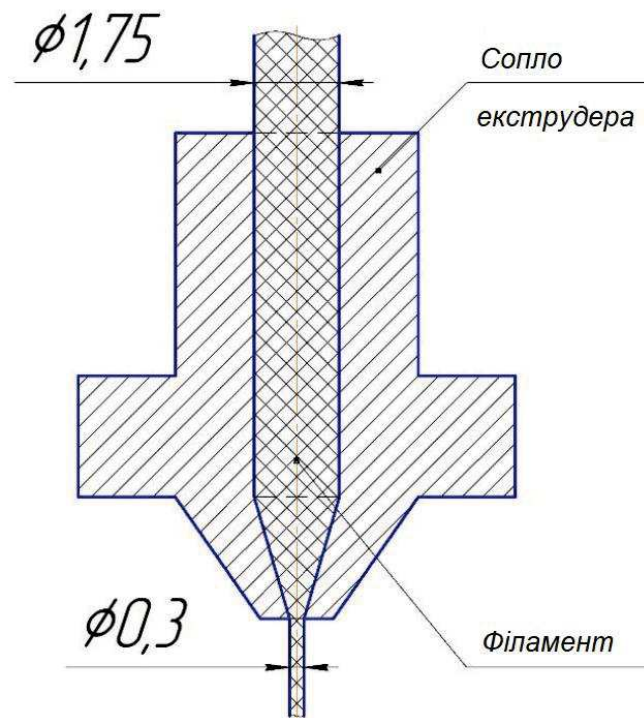


Рисунок 3.2 – Технологічний процес екструзії філаменту з сопла

Визначимо обсяг філаменту завдовжки один мм на вході в сопло екструдера з наступної формули [21-23]:

$$V_{\phi_m} = l_{\phi_m} \cdot S_{\phi_m} = \pi \cdot l_{\phi_m} \cdot r_{\phi_m}^2, \quad (3.9)$$

де l_{ϕ_m} - питома довжина прутка філаменту, мм; S_{ϕ_m} - площа поверхні поперечного перерізу прутка філаменту, мм²; r_{ϕ_m} - радіус прутка філаменту, мм.

$$V_{\phi_m} = 3,14 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1,75}{2}\right)^2 = 2,4 \text{ мм}^3.$$

Матеріали, що використовуються для 3D-друку, володіють характеристикою - коефіцієнт лінійного термічного розширення. Тому на виході сопла екструдера довжина видавленого прутка за рівного вхідного об'єму філаменту для кожного типу пластиків буде різною згідно наступної формули:

$$l = (1 + X \cdot T) \cdot \frac{V_{\phi_m}}{S_{cn}} = (1 + X \cdot T) \cdot \frac{V_{\phi_m}}{\pi \cdot r_{cn}^2} = 34 \cdot (1 + X \cdot T), \quad (3.10)$$

де X - коефіцієнт лінійного термічного розширення, 1/°C (для ABS $X = 0,8 \cdot 10^{-4}$, для PLA - $X = 0,24 \cdot 10^{-4}$); T - рівень температури плавлення пластику, °C (ABS - $T = 220^\circ$, PLA - $T = 180^\circ$); S_{cn} - площа вихідного отвору сопла екструдера, мм²; r_{cn} - радіус вихідного отвору сопла екструдера, мм.

Звідки

$$l_{ABS} = 34 \cdot (1 + 0,8 \cdot 10^{-4} \cdot 220) = 34,63 \text{ мм};$$

$$l_{PLA} = 34 \cdot (1 + 0,24 \cdot 10^{-4} \cdot 180) = 34,2 \text{ мм}.$$

Визначимо кількість пластику на виході із сопла екструдера, при повороті

КЕД на один крок із наступної формули [21-23]:

$$l_{discr} = \frac{l}{PPS}; \quad (3.11)$$

$$l_{discrABS} = \frac{l_{ABS}}{PPS} = \frac{34,63}{3200} = 10,8 \frac{\text{мкм}}{\text{крок}};$$

$$l_{discrPLA} = \frac{34,2}{3200} = 10,68 \frac{\text{мкм}}{\text{крок}}.$$

3.2 Розробка алгоритму функціонування системи керування малогабаритним 3D-принтером

Процес друку на малогабаритному 3D-принтері контролюється за допомогою програми керування на ПК або через використання дротового послідовного інтерфейсу або відтворюється підпрограмою вбудованої системи з модуля SD-карти пам'яті. Алгоритм керування малогабаритним 3D-принтером зводиться до обміну інформацією між пристроєм керування і контролером СК.

Блок-схему алгоритму програми керування малогабаритним 3D-принтером наведено на рисунку 3.3.

Налаштування вбудованої СК PLC

Вбудована СК PLC малогабаритного 3D-принтера розроблена в середовищі програмування Arduino IDE і написана мовою Processing/Wiring - це звичайний C++. Компіляція і завантаження в пам'ять мікроконтролера виконується також через Arduino IDE [25].

Вбудована СК сформована на основі прошивок, що є у відкритому доступі, в бібліотеках та в мережі Інтернет. За основу СК PLC взято прошивку Marlin, що поширюється за ліцензією GNU GPL v3 [26].

Слід вказати наступні особливості прошивки [26]:

- автоматичний вибір роздільної здатності та друк з сталою швидкістю;

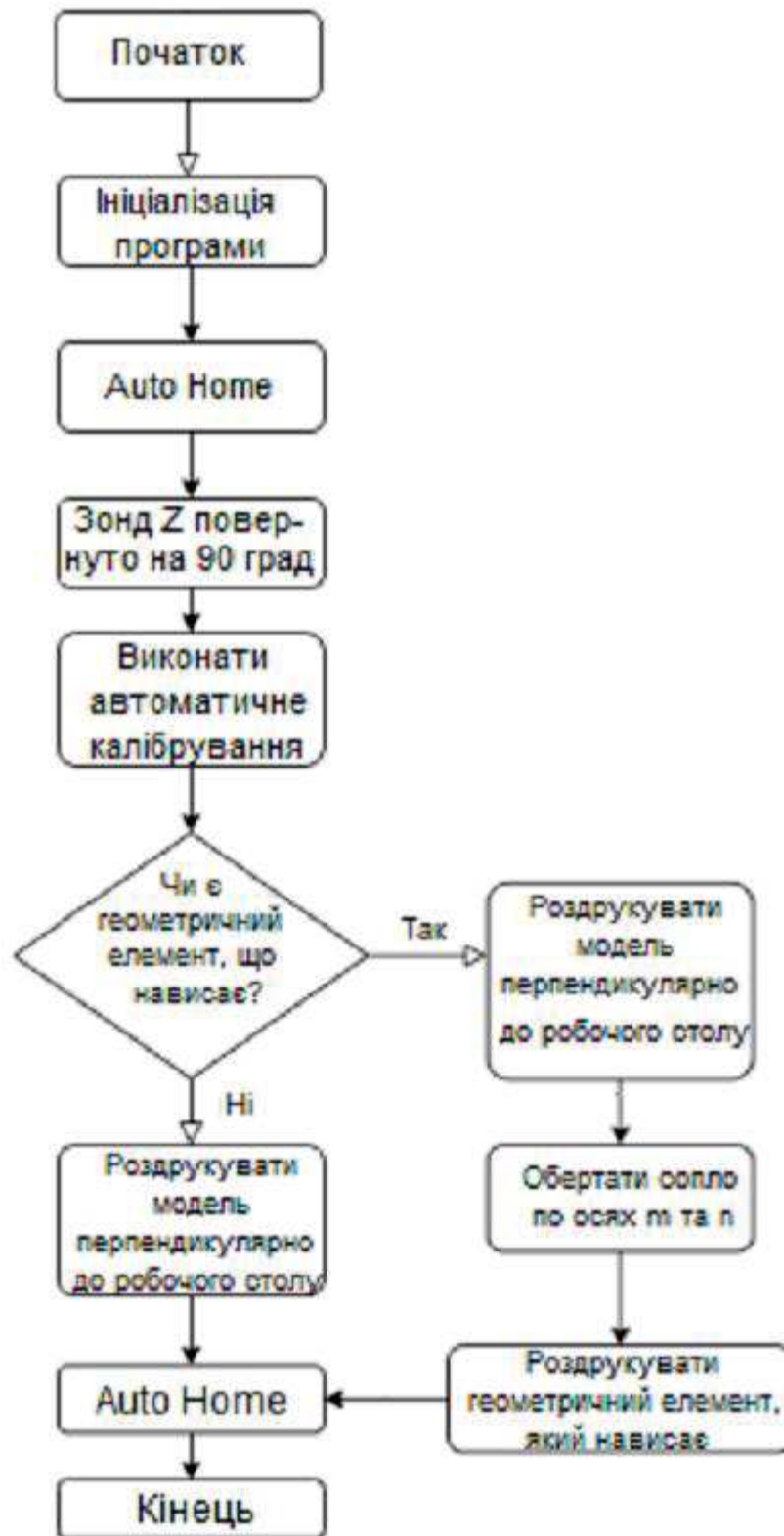


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму програми керування малогабаритним 3D-принтером

- можливість аналізу наступних кроків програми (витримка сталої швидкості друку);
- надсилання даних про нагрівання в Serial-порт;
- ПІД-регулятор для нагріву столу та екструдера;
- температурний захист від перегріву екструдера та столу;
- підтримка використання шести кінцевих давачів;
- підтримка використання SD-карт;
- підтримка LCD-дисплея (20x4 або 128x64);
- підтримка зчитування папок SD-карт;
- збереження конфігурації налаштувань в EEPROM;
- можливість автономної роботи;
- автоматичний режим роботи вентиляторів екструдера.

Після коригування прошивки Marlin виконується компіляція і завантаження вбудованої СК в PLC малогабаритного 3D-принтера. Основні параметри, які необхідно модифікувати в програмі, наведені в табличному вигляді в додатках. Підбір коефіцієнтів ПІД-регулятора виконується в автоматичному режимі під час надсилання малогабаритному 3D-принтеру команди M303 з консолі на ПК.

Висновки до третього розділу

Виконано розрахунки, що підтверджують працездатність проєкту. А саме виконано розрахунок головних параметрів малогабаритного 3D-принтера та розроблено алгоритм функціонування системи керування малогабаритним 3D-принтером.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконано огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень малогабаритних 3D-принтерів, описано проблематику використання малогабаритних 3D-принтерів та розглянуто особливості технологічного процесу 3D-друку

Виконано проєктування системи керування малогабаритним 3D-принтером. Проведено розрахунок необхідних робочих моментів на осях малогабаритного 3D-принтеру, виконано підбір крокових двигунів для осей малогабаритного 3D-принтеру.

Виконано розрахунки, що підтверджують працездатність проєкту. А саме виконано розрахунок головних параметрів малогабаритного 3D-принтера та розроблено алгоритм функціонування системи керування малогабаритним 3D-принтером.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с. ISBN 978-966-641-824-4
2. Короткий посібник з 3D-друку для початківців. Адитивні технології тривимірної системи координат. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://dou.ua/forums/topic/46616/>
3. Kruth J.-P. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping [Text] / J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1998. – Vol. 47, Issue 2. – P. 525–540.
4. Кінематика 3D-принтерів. Види та особливості. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.3dprinter.ua/kinematyka-3d-prynteriv-vydy-ta-osoblyvosti-robymo-svij-vybir/>
5. The types of FDM printers are much more diverse than just CoreXY and Cartesian 3D printers. Read on to get to know them all. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
6. ПОЛІЩУК, АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ, 2024, "УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ", дис. д-ра філософії в галузі техн. наук, ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.
7. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2017. № 6. С.51-59.
[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_6/\(255\)%202017-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2017/2017_6/(255)%202017-6-t.pdf).
8. Проектування синхронних явнополюсних машин : навчально-

методичний посібник з курсового проектування для студентів електротехнічних спеціальностей / О.Ю. Юр'єва, Л.В. Шилкова, Д.В. Потоцький. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – 76 с.

9. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 290 с. ISBN 978-966-657-900-6

10. Основи мехатроніки: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, М.В. Пушкар. – К.: КПІ ім. Ігоря – Електронні текстові дані (1 файл: 23,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с.

11. Pololu Robotics and Electronics. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pololu.com/>

12. Arduino Mega 2560. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560>

13. Плата RAMPS 1.6 під Arduino Mega 2560. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://arduino.ua/prod3175-plata-ramps-1-6-pod-arduino-mega-2560?srsltid=AfmBOorw3BFPLEKpEv865UH_4RZYaDsdnryw63-nvRbqLq6WDym3PCyn

14. Хотенд J-Head V5 для екструдера прямий. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://uamper.com/%D0%A5%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B4-J-Head-%D1%8D%D0%BA%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B5%D1%80-3d-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80?srsltid=AfmBOorrq0jUOrWUSkr95UsSQ-mNzNmNLwsBW9HKWrbqs75ST_SmlPaP

15. PCB Heatbed MK2B Dual Power 214x214 mm. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://3dwayshop.com.ua/pcb-heatbed-mk2b-dual-power-214x214-280240mm/>

16. SOLIDWORKS Education 2025. Empower the workforce of the future.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.solidworks.com/product/solidworks-education-whats-new>

17. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с.

18. Пастух І.М., Харжевський В.О., Олександренко В.П. Деталі машин. Курсове проектування. Навчальний посібник. – Хмельницький : ХНУ, 2023. – 242 с.

19. Кроковий двигун NEMA 17 17HS8401. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.mini-tech.com.ua/ua/17hs8401-nema17-shagoviy-motor>

20. Кроковий двигун Nema17(42) 17HS4401S L40мм 1.7А 0.42Nm.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://mehnika.net.ua/product/nema1742-44mm-1-7a-0-42nm/>

21. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с. ISBN 978-617-7541-11-9

22. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с. ISBN 978-966-1552-11-0

23. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.

24. LRS-350-12 Mean Well Блок живлення 348 Вт, 12 В, 29 А В корпусі.

[Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://meanwell.in.ua/acdc/korpus/lrs-350-12>

25. Arduino IDE 2.3.6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.arduino.cc/en/software/>

26. Загальна громадська ліцензія GNU. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.uk.html>

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця А.1 - Параметри прошивки

Назва параметру прошивки	Значення параметру в прошивці
Номер послідовного порту	SERIAL_PORT «0»
Швидкість обміну послідовного порту	BAUDRATE «250000»
Тип керуючої плати контролера	MOTHERBOARD «BOARD_RAMPS_13_EFB»
Кількість екструдерів	EXTRUDERS «1»
Кількість і тип температурних датчиків	TEMP_SENSOR_0 «11» TEMP_SENSOR_BED «11»
Мінімальна температура нагрівання елементів	HEATER_0_MINTEMP «5» BED_MINTEMP «5»
Максимальна температура нагрівання елементів	HEATER_0_MAXTEMP «275» BED_MAXTEMP «170»
Мінімальна температура екструдера для друку	EXTRUDE_MINTEMP «150»
Визначення положення кінцевих вимикачів	X_HOME_DIR 1 Y_HOME_DIR 1 Z_HOME_DIR -1
Розмір робочої області друку	X_MAX_POS 200 Y_MAX_POS 200 Z_MAX_POS 200