

Міністерство освіти і науки України  
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки  
(повна назва кафедри)

Нейлюк Уляна Романівна  
Neiliuk Uliana

УДК 004:681.5

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота  
на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Розробка 3D-принтера на основі платформи Arduino  
Design of 3D-printer on Arduino board

Науковий керівник:

д. фіз.-мат. наук, доц. Мандзюк В. І.

Рецензент:

к.ф.-м.н., доц. Гарпуль О. З.

Івано-Франківськ  
2020



## АНОТАЦІЯ

В бакалаврській роботі розроблено 3D-принтер на основі платформи Arduino, що друкує методом FusedDepositionModeling (FDM).

В роботі розглянуто апаратну та програмну частину принтера, вибрано картезіанську схему переміщення осей, де платформа рухається по горизонтальні осі – X , а екструдер по Y та у вверх-вниз. Мікроконтролер Arduino Mega 2560 прошитий мікропрограмою Marlin 2.0, налаштовану під параметри принтера та компілювану в середовищі ArduinoIDE.

Результатом роботи є 3D-принтер, що друкує 3D-моделі.

## ABSTRACT

In graduation work, based on the Arduino platform 3D printer was designed, which prints using the FusedDepositionModeling (FDM) method.

The work unfolds the hardware and software of the printer, the Cartesian scheme of axis movement is selected, where the platform moves along the horizontal axes - X, and the extruder along the Y and up and down. The Arduino Mega 2560 microcontroller is stored Marlin 2.0 firmware, configured for printer settings and compiled in the ArduinoIDE environment.

The result is a 3D printer that prints 3D models.

					123.УДК:004:681.5			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розробила		НейлюкУ.Р.			Анотація	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
Перевірив		Мандзюк В. І.					3	1
Н. Контр.								
Затвердив								

Міністерство освіти і науки України  
 Державний вищий навчальний заклад  
 «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»  
 Фізико-технічний факультет  
 Кафедра «Комп'ютерної інженерії та електроніки»

**Пояснювальна записка**  
 до кваліфікаційної роботи на тему:

Розробка 3D-принтера на основі платформи Arduino

					123.УДК:004:681.5			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
Розробила		Шкандрій Ю.В.			Пояснювальна записка	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркуші</i>
Перевірив		Голота В. І.					4	51
Н. Контр.								
Затвердив								

## ЗМІСТ

Розділ 1. Технологія тривимірного друку	7
1.1. Способи друку тривимірних об'єктів	7
1.2. Матеріали, що використовуються для друку	9
1.3. Створення віртуальної 3D-моделі	11
Розділ 2. Будова та принцип роботи тривимірного принтера, що друкує методом Fused Deposition Modeling	15
2.1. Принцип роботи	15
2.2. Особливості технології	16
Розділ 3. Апаратна частина принтера	18
3.1. Каркас принтера	18
3.1.1. Осі переміщення	18
3.1.2. Каркас-основа принтера	20
3.2. Електроніка	21
3.2.1. Крокові двигуни	21
3.2.2. Гарячий столик	22
3.2.3. Екструдер	23
3.2.4. Плата Arduino	27
3.2.3. Додаткове обладнання	30
Розділ 4. Вибір програмного забезпечення	33
4.1. Підготовка та завантаження мікропрограми	33
4.2. Програмне забезпечення для керування принтером	34
4.3. Налаштування принтера та підбір оптимальних параметрів	35
Розділ 5. Техніка безпеки	39
5.1. Правила експлуатації 3D-принтера	39

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

41

Перелік використаної літератури

42

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНОЛОГІЯ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ

### 1.1. Способи друку тривимірних об'єктів

3D-друк або адитивне виробництво – це процес виготовлення тривимірних твердих об'єктів на основі віртуальної 3D-моделі [3].

Створення 3D-друкованого об'єкта досягається за допомогою адитивних процесів. У адитивному виробництві об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу до тих пір, поки об'єкт не буде створений. Кожен з цих шарів можна розглядати як тонко нарізаний горизонтальний переріз потенційного об'єкта.

3D-друк дозволяє створювати складні форми, використовуючи менше матеріалу, ніж традиційні способи виготовлення.

Друк здійснюється спеціальним пристроєм – 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес виробництва.

Існує кілька способів 3D-друку. Всі ці технології є адитивними, відрізняються головним чином способом побудови шарів для створення об'єкта.

З 2010 р. American Society for Testing and Materials (ASTM) group “ASTM F42 – Additive Manufacturing” розробила набір стандартів ASTM F2792/1549323-1, відповідно до якої адитивні технології поділені на 7 категорій [5]:

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. VatPhotopolymerisation – фотополімеризація або пошарове затвердження фотополімерних смол.
  - a. Stereolithography (SLA)
  - b. DigitalLightProcessing (DLP)
  - c. ContinuousLiquidInterfaceProduction (CLIP)
2. MaterialJetting – розбризування або пошарове струменеве нанесення конструкційного матеріалу.
3. BinderJetting – розбризування або пошарове струменеве нанесення зв'язуючого матеріалу.
4. MaterialExtrusion – видавлювання матеріалів або пошарове нанесення розплавленого конструкційного матеріалу через екструдер.
  - a. FusedDepositionModeling (FDM)
  - b. FusedFilamentFabrication (FFF)
5. PowderBedFusion – розплавлення матеріалу в попередньо сформованому шарі або послідовне формування шарів порошкових конструкційних матеріалів і вибіркоче (селективне) спікання частин конструкційного матеріалу.
  - a. MultiJetFusion (MJF)
  - b. SelectiveLaserSintering (SLS)
  - c. DirectMetalLaserSintering (DMLS)
6. SheetLamination – з'єднання листових матеріалів або пошарове формування виробу з листових конструкційних матеріалів.
7. DirectedEnergyDeposition – прямий підвід енергії безпосередньо в місце конструювання або пошарове формування виробу методом внесення конструктивного матеріалу безпосередньо в місце підведення енергії.

										123.УДК:004:681.5	Арк.
											8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							



## 1.2. Матеріали, що використовуються для друку

Під час 3D-друку вибір правильного матеріалу для виробу є не менш важливим, як вибір найкращої технології друку. Наприклад, PLA – це чудовий матеріал для фігурок, оскільки він не схильний до викривлення, але не підходить для амортизатора, оскільки він досить крихкий.

Для 3D-друку можна використовувати шість видів матеріалів: пластмаси, метали, бетон, кераміка, папір та деякі харчові продукти (наприклад, шоколад). Матеріали часто виготовляються у вигляді нитки, порошкоподібної форми або рідкої смоли. Усі сім раніше описаних методів 3D-друку охоплюють використання цих матеріалів, хоча найчастіше застосовуються полімери.

У табл. 1.1 та 1.2 наведені найбільш використовувані полімери та метали для 3D-друку, а також методи та технології де вони використовуються.

Полімери - хімічна високомолекулярна сполука (з молярною масою від декількох тисяч до декількох мільйонів), в якій атоми, сполучені хімічними зв'язками, утворюють лінійні або розгалужені ланцюги, а також просторові тривимірні структури. Полімери утворюються з мономерів унаслідок полімеризації [4].

Таблиця 1.1. Полімери

Полімер	Метод	Технологія	Приклади виробів
Нейлон-6 (PA-6)	PowderBed Fusion	SLS, MJF	Запчастини для трубопроводів, резервуари для рідин, промислові товари
Нейлон-11 (PA- 12)	PowderBed Fusion	SLS, MJF	Устілки, протези
Нейлон-12 (PA- 12)	PowderBed Fusion	SLS, MJF	З'єднувачі, корпуси

Нейлон-66 (PA-66 GF)	PowderBed Fusion	MJF	Інструменти, корпуси
Термопластичний поліуретан (TPU)	Extrusion, PowderBed Fusion	FFF/FDM, SLS, MJF	Взуття, шланги та трубки.
Кремній	VatPolymerization, MaterialJetting	DLP, SLA, DOD	Медичні прилади, стоматологія
Поліетеретеркетон (PEEK)	Extrusion, PowderBed Fusion	FFF/FDM, SLS	Аерокосмічна, медична, електрична галузь
Поліетеримід (PEI)	Extrusion	FFF/FDM	Аерокосмічна, автомобільна, електрична галузь
Акрилонітрил стирольний акрилат (ASA)	Extrusion	FFF/FDM	Зовнішні функціональні частини
Поліпропілен	Extrusion, PowderBed Fusion	FFF/FDM, SLS	Механічні частини з низьким тертям і упаковки для харчових продуктів
Полікарбонат	Extrusion	FFF/FDM	Кронштейни, світильники, хомути
Акрилонітрилбутадієн стирол (ABS)	Extrusion	FFF/FDM	Моделі, вирівнювальні джиги, легкі прототипування

										Арк.
										10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

123.УДК:004:681.5

Найбільш твердими матеріалами для 3D-друку є метали. Вони мають високу міцність та хороші теплові властивості. Більшість металів використовуються тільки у вигляді сплаву.

Таблиця 1.2. Метали та сплави

Метали/сплави	Метод	Технологія	Приклади виробів
Нержавіюча сталь	Extrusion, BinderJetting	FFF/FDM, BJ	Інструменти, шестерні, прикраси
Алюміній	PowderBed Fusion	SLM, DMLS	Запчастини, функціональні компоненти
Титан	PowderBed Fusion	SLM, DMLS	Біомедичні імплантати та інструменти, ювелірні вироби
Мартенситна нержавіюча сталь	PowderBed Fusion	SLM	Деталі печі, інструмент
Кобальт-хром	PowderBed Fusion	SLM, DMLS	Запчастини двигуна, деталі печі, імплантати
Вольфрам	PowderBed Fusion	SLM	Збалансуйте ваги, МРТ

### 1.3. Створення віртуальної 3D-моделі

Кожен 3D-друк починається як 3D-модель, згенерована в програмі моделювання. 3D-моделювання – це процес розробки математичного представлення будь-якої тривимірної поверхні об'єкта за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Продуктом моделювання є 3D-модель. 3D-моделі можуть створюватись вручну або автоматично, у тому числі за допомогою 3D-сканера [8].

Зараз доступно багато простих у використанні варіантів програмного забезпечення для моделювання.

Програмне забезпечення для 3D-моделювання:

**Tinkercad** – це програмне забезпечення для 3D-дизайну на основі браузера, має інтуїтивну концепцію побудови блоків, що дозволяє розробляти моделі з набору основних форм. багатий на функції та включає інструменти для анімації, моделювання, візуалізації, відсте

**Blender** – програмне забезпечення для 3D-моделювання, яке спочатку було для 3D-анімації та візуалізації за допомогою методів полігонального моделювання. Blender женьня руху та редагування відео.

**BRL-CAD** – це вдосконалена система моделювання з інтерактивним редагуванням, має велику бібліотеку простих і складних форм. Програмне забезпечення було досить дорогим, однак його було перетворено у відкритий код кілька років тому. Воно включає понад 400 інструментів та також працює з великою швидкістю.

**DesignSparkMechanical** – це вишукане та безкоштовне програмне забезпечення для САПР. Користувацький інтерфейс порівняно простий, і програмне забезпечення працює швидко, що означає ефективне проектування. Також є функція розрахунку вартості друку 3D-моделей.

**Fusion 360** – безліч функцій, таких як моделювання, генеративний дизайн, складання, 3D-друк. Fusion зберігає всю історію моделі, включаючи її зміни. Доступні численні варіанти дизайну, включаючи вільну форму, суцільне та сітчасте моделювання.

**Maya** – корисна для багатьох аспектів 3D-моделювання, особливо з точки зору математично гладких поверхонь та форм. Майя спочатку планувалася як програмне забезпечення для 3D-анімації, але дуже корисна і для 3D-друку.

**3DS Max** – орієнтована на анімацію, 3DS Max пропонує деякі чудові функції 3D-моделювання, такі як інструменти затінення, параметричне моделювання сітки та моделювання полігонів.

									Арк.
									12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.УДК:004:681.5

**Modo** – має зручні для художника інструменти для моделювання, анімації, текстурування та візуалізації, забезпечує інструменти для моделювання поверхонь для 3D-полігонів та підрозділів з великою гнучкістю, що дозволяє створювати як моделі вільної форми, так і точні сітки за допомогою одного і того ж програмного забезпечення.

**OpenSCAD** – це програмне забезпечення з безліччю функцій і унікальним способом створення моделей. Це програмне забезпечення застосовує програмний підхід до 3D-моделювання, що робить його унікальним доповненням до цього переліку програмних засобів для друку з 3D-версії. Замість традиційного інтерфейсу для інтерактивного моделювання користувачі записують код у файл сценарію, який описує параметри 3D-об'єкта. OpenSCAD має можливість імпортувати 2D-малюнки та видавлювати їх у вигляді тривимірних. Він використовує профіль частини з малюнків, зроблених у стандартному програмному засобі для ескізів, і для цього використовують файл SXF.

Після створення 3D-моделі, файл потрібно потрібно обробити в слайсері.

Слайсер – це комп'ютерне програмне забезпечення, яке використовується в більшості процесів 3D-друку для перетворення 3D-об'єктної моделі в специфічні інструкції для принтера.

**UltimakerCura** – можна використовувати майже з будь-яким 3D-принтером.

**Simplify3D** – потужний інструмент, який допомагає покращити якість 3D-друку. Simplify3D має функцію виправлення дефектів моделей та дозволяє переглядати кінцевий результат.

**Slic3r** – це програмне забезпечення з відкритим кодом включає додаткове нарізання в режимі реального часу, попередній перегляд 3D тощо. Це одне з найбільш широко використовуваних програмних засобів для друку 3D.

**Repetier** – це програмне забезпечення для зрізування з відкритим кодом, що підтримує три різні двигуни нарізки; Slic3r, CuraEngine та Skeinforge. Repetier також може одночасно обробляти до 16 екструдерів з різними типами і кольорами ниток, і може візуалізувати свій кінцевий результат перед друком.

									Арк.
									13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

**3DPrinterOS** – цехмарне програмне забезпечення для управління 3D-принтером. Основна ідея - це управління всім процесом 3D-друку за допомогою однієї платформи. Користувачі можуть редагувати та ремонтувати конструкції, нарізати STL-файли з хмари та навіть надсилати файли для друку з будь-якої точки світу. Програмне забезпечення також має можливість обміну CAD-файлами.

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2

### БУДОВА ТА ПРИЦИП РОБОТИ ТРИВИМІРНОГО ПРИНТЕРА, ЩО ДРУКУЄ МЕТОДОМ FUSED DEPOSITION MODELING

#### 2.1. Принцип роботи

Найчастіше використовуваною технологією в цьому процесі є FusedDepositionModeling (FDM) (рис. 2.1).

Технологія FDM працює з використанням пластикової нитки або металевого дроту, який розкручується з котушки і подається до екструдера, який може включати і вимикати потік матеріалу. Насадка нагрівається для розплавлення матеріалу і може переміщуватися як в горизонтальному, так і у вертикальному напрямках за допомогою цифрового керованого механізму, безпосередньо керованого програмним пакетом комп'ютерного виробництва (CAM). Об'єкт утворюється шляхом екструдювання розплавленого матеріалу з утворенням шарів, оскільки матеріал твердне відразу після екструзії з форсунки. Ця технологія найширше застосовується з двома пластиковими нитками 3D-принтера: ABS (акрилонітрил-бутадієн стирол) та PLA (полімолочна кислота) [3].

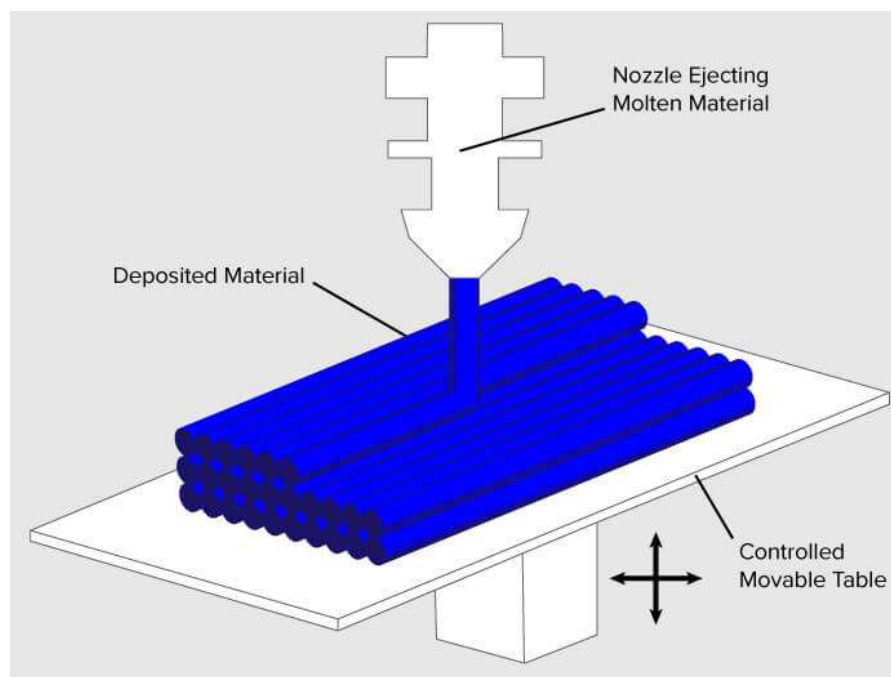


Рис. 2.1. FusedDepositionModeling

					123.УДК:004:681.5	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

FDM був винайдений Скоттом Крапом наприкінці 80-х. Після патентування цієї технології він заснував компанію Stratasys в 1988 році. Термін «FusedDepositionModeling» та його аббревіатура FDM є торговою маркою StratasysInc.

FusedFilamentFabrication – еквівалентний термін FusedDepositionModeling, був придуманий членами проекту RepRap, щоб дати назву, яка юридично не обмежує його використання.

## 2.2. Особливості технології

Дана технологія має ряд недоліків:

1. невисока швидкість роботи (для побудови великих і складних моделей потрібні багато годин і навіть десятки годин);
2. більш-менш помітної шаруватості поверхні виготовленої моделі(для отримання гладкої поверхні потрібно додаткова обробка моделі);
3. проблеми з фіксацією моделі на робочому столі (перший шар повинен прилипнути до поверхні платформи, але так, щоб готову модель можна було зняти);
4. для нависаючих елементів потрібно створювати підтримуючі структури, які згодом доводиться видаляти;
5. термоусадка, яка призводить до зміни розмірів зразка після охолодження.

При такій кількості проблем ця технологія зараз є популярною за рахунок ряду причин:

1. ціна як на самі принтери, так і на витратні матеріали;
2. поява проекту RepRap, або ReplicatingRapidPrototyper – самовідновлювальний механізм швидкого прототипування. Самовідтворення стосується виготовлення на вже зробленому принтері частин для іншого подібного принтера;

									Арк.
									16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.УДК:004:681.5



3. поява і вдосконалення різного програмного забезпечення для роботи з подібними 3D-принтерами;

4. великий вибір витратних матеріал з різними властивостями і різних кольорів;

5. можливість легко оснастити принтер декількома друкуючими головками.

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3

### АПАРАТНА ЧАСТИНА ПРИНТЕРА

#### 3.1. Каркас принтера

##### 3.1.1. Осі переміщення

Кожний принтер має свою кінематичну схему, відповідно до якої рухаються механічні частини приладу: платформа та екструдер. Є чотири типи FDM 3D-принтера:

1. картезіанський;
2. дельта;
3. полярний;
4. роботизований маніпулятор.

Найбільш поширеними є принтери з картезіанською кінематикою. Заснована на декартовій системі координат, ця технологія працює на основі трьох осей – X, Y та Z.

Є п'ять варіантів переміщення друкуючої головки та платформи:

1. Платформа рухається по одній з горизонтальних осей – X або Y, а екструдер по іншій та у висоту.
2. Платформа рухається у висоту по осі Z, а екструдер переміщається вперед-назад і вправо-вліво.
3. Платформа переміщається по одній з горизонтальних осей та у висоту, а екструдер – по іншій осі.
4. Платформа нерухома, переміщається тільки екструдер.
5. Платформа рухається по осям XY, а екструдер у висоту.

Дельта-принтери відрізняються від картезіанських способом реалізації механіки (рис. 3.1). Головна відмінність в способі переміщення екструдера відносно робочого столика.

					123.УДК:004:681.5	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.1. Дельта-принтер.

Дельта-механіка для 3D-принтера візуально представлена закріпленням на трьох точках екструдером, з'єднаних в єдину конструкцію з нерухомою платформою для друку.

Полярна схема є досить новою. В друці використовується полярна система координат – замість звичних XYZ, позиціонування екструдера задається радіусом і кутом (рис. 3.2).

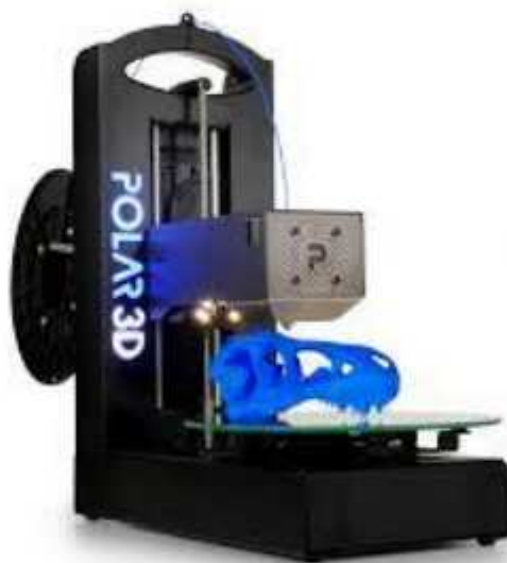


Рис. 3.2. Полярний 3D-принтер.

									Арк.
									19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.УДК:004:681.5

Платформа таких 3D-принтерів має круглу форму, крутиться по колу і переміщується цілком по одній горизонтальній осі, а екструдер тільки вгору та вниз.

3D-принтери з роботизованим маніпулятором представляють конструкцію механічним запрограмованим маніпулятором-захватом, що може бути замінений на екструдер. В основному використовується в промисловості.

### 3.1.2. Каркас-основа принтера

Для каркасу основи можна використовувати різні матеріали, кожен з яких має свої переваги та недоліки. В основному використовують три типи матеріалу:

1. Дерево – досить дешевий матеріал і легкий в обробці. Деякі види твердої деревини можуть бути дорогими.
2. Алюміній – алюмінієві балки є досить дорогими.
3. Сталь – не дорога і є великий вибір.

Апаратна частина модуля складається з осей 3D-принтера, робочої площадки, вертикальної площадки, крокових двигунів та мікроконтролера, реле, механічних кінцевиків (EndstopSwitchModule), джерела живлення, драйверів крокових двигунів, керуючого мікроконтролера, кріплень (гайок, болтів, ізоляційної стрічки тощо) та проводів.

Габарити вертикальної площадки  $\approx 39 \times 20 \text{ см}^2$ .

Габарити горизонтальної площадки  $\approx 26 \times 22 \text{ см}^2$ .

Каркас принтера буде зроблений зі сталевих прутів (рис. 3.3).

Платформа рухається по осі X, а екструдер по Y та у висоту.

										Арк.
										20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

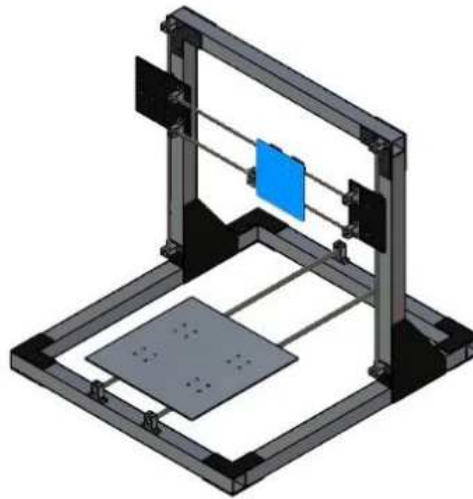


Рис. 3.3. Каркас принтера

## 3.2. Електроніка

### 3.2.1. Крокові двигуни

У конструкції 3D-принтера використовуються крокові двигуни. Ці електромеханічні пристрої забезпечують переміщення по координатним осях, їх застосовують для керування переміщенням екструдера. Такі мотори встановлюють на всьому автоматизованому обладнанні, крокові двигуни 3D-принтера мають невелику вагу і високий обертовий момент. Цим вони вигідно відрізняються від більшості моторів струменевих принтерів, які іноді використовуються при конструюванні 3D-принтерів.

Розрізняють біполярні та уніполярні крокові двигуни.

У біполярного двигуна використовуються 4 проводи для підключення мотора до контролера. Обмотки з'єднуються всередині послідовно або паралельно [2].

В уніполярному двигуні загальний провід підключений до точки, де дві обмотки з'єднані разом [2].

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш популярними є крокові двигуни Nema 17 (рис. 3.5). У числі їх переваг – крок в 1,8 градуса, він забезпечує точне позиціонування переміщуваного пристрою.

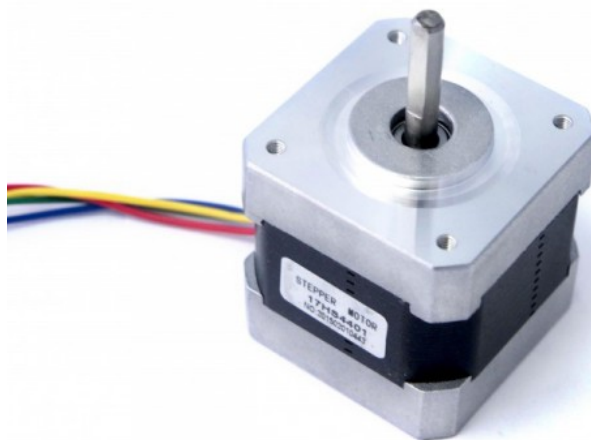


Рис 3.5. Кроковий двигун Nema 17

### 3.2.2. Гарячий столик

Поверхня друку (рис. 3.6) – це робоча поверхня, на якій друкуються 3D-деталі.

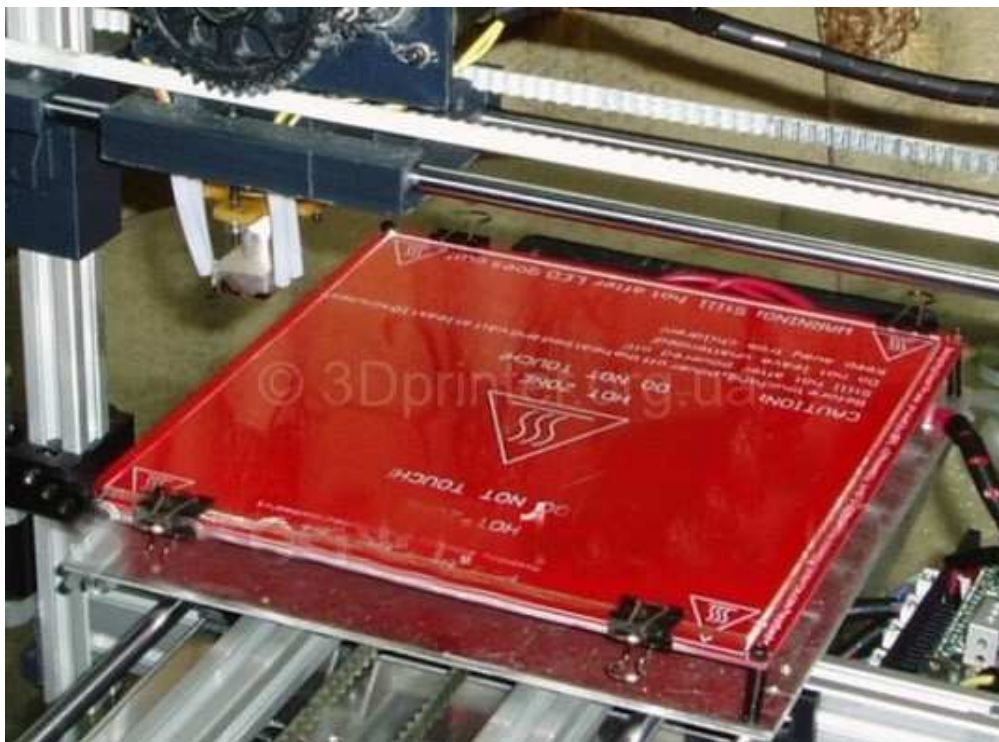


Рис. 3.6. Платформа 3D-принтера

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

123.УДК:004:681.5

Арк.

22

Розмір робочої поверхні варіюється зазвичай в діапазоні від 100 до 200 мм<sup>2</sup>. Завдання платформи – не допустити розривів або тріщин моделі, а також забезпечити надійне зчеплення між першими шарами друкованої деталі і робочою поверхнею.

Структура столика для 3D-друку:

- нижній шар: нагрівальний елемент;
- середній шар: алюмінієва платформа з термопастою;
- робочий шар: знімне скляне покриття.

Поверхня платформи зазвичай робиться зі скла або алюмінію для кращого розподілу тепла, гладкості і рівності поверхні. Скло дає більш рівну поверхню, в той час як алюміній краще розподіляє тепло в разі підігріву платформи. Щоб запобігти відклеюванню моделі під час процесу створення, поверхня часто покривається будь-якою клейкою стрічкою або плівкою, яку буде недорого міняти в разі потреби. Такі матеріали часто складаються з каптона або поліамідної стрічки, Пета або поліестерної кремнієвої стрічки, все залежить від типу пластика.

### 3.2.3. Екструдер

Однією з найважливіших частин 3D-принтера є екструдер, яка здійснює фактично друк. Його можна порівняти з друкуючою голівкою звичайного струменевого принтера, тільки замість чорнила використовується пластикова нитка. Екструдер складається з двох основних частин: корпусу з механізмом, що подає і хотенда (hotend).

Екструдери поділяються на два типи (рис. 3.7):

- прямої подачі (direct);
- Бовден (Bowden) [3].

									Арк.
									23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

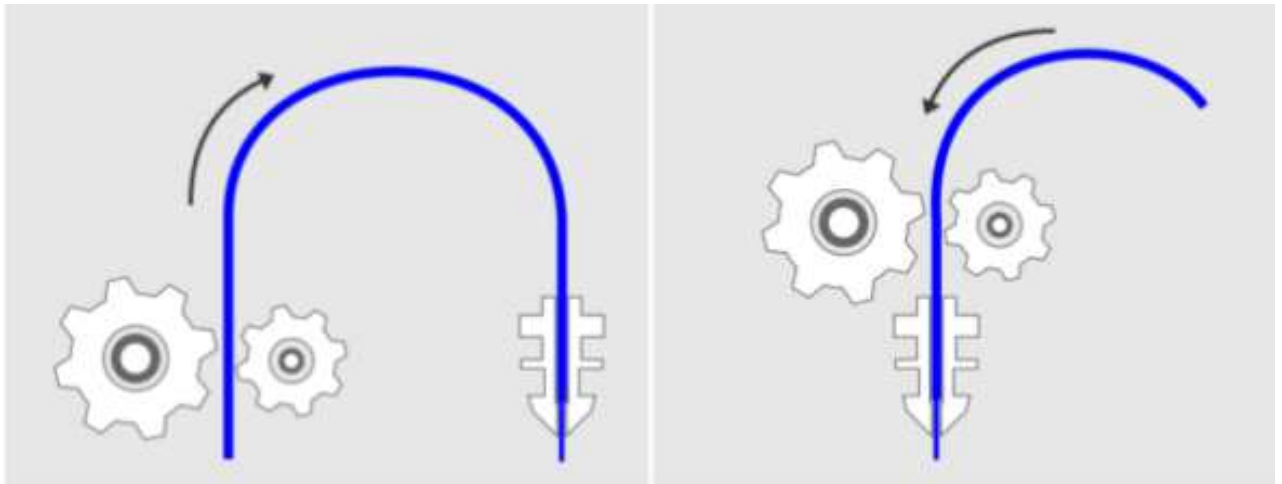


Рис. 3.7. Схема Бовден (ліворуч) та прямої подачі (праворуч) екструдерів

У більшості 3D-принтерів використовується система прямої подачі, де кроковий двигун екструдера знаходиться в одному корпусі з друкуючою головкою, він проштовхує пластикову нитку безпосередньо в хотенд.

У Боуден екструдері корпус з механізмом, що подає, відокремлений від хотенда. Пластикову нитку подається механізмом по PTFE трубці до хотенду.

Хотенд служить для розплавлення пластика, з якого друкується сама модель (рис. 3.8).

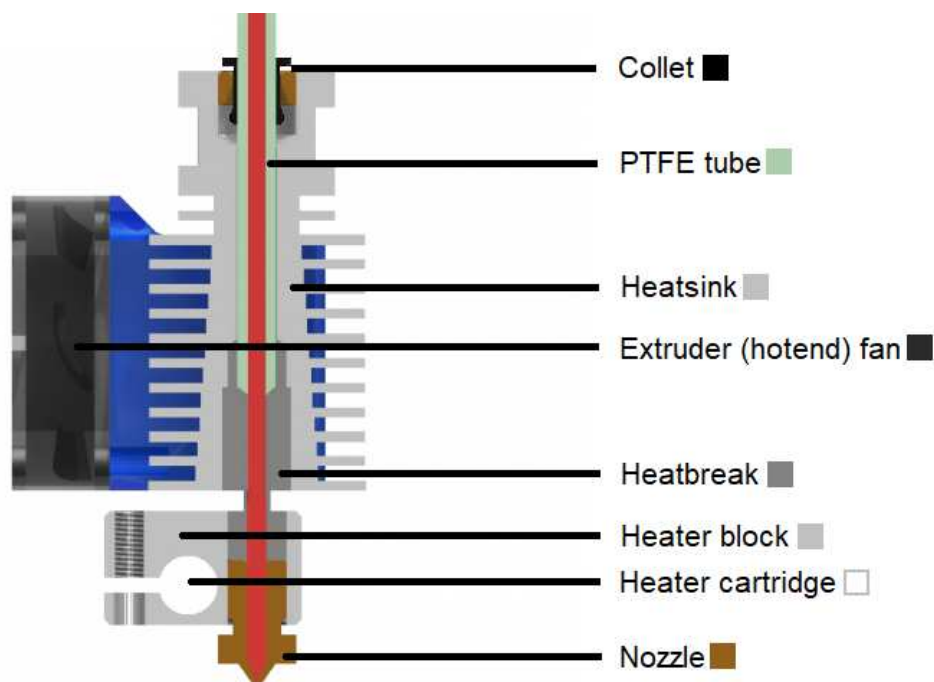


Рис. 3.8. Хотенд



Хотенд складається з чотирьох основних компонентів:

- сопло, діаметр вихідного отвору якого диктує якість деталей і швидкість друку;
- термобар'єр – деталь, через яку надходить нитку в гаряче сопло;
- нагрівальний блок – сполучна ланка для нагрівального елемента, термістора, сопла і термобар'єра;
- радіатор – забезпечує відведення тепла від термобар'єра.

У соплі відбувається плавлення самого пластику, на виході з сопла виходить розплавлена нитка з діаметром рівним діаметру вихідного отвору сопла (рис. 3.9).

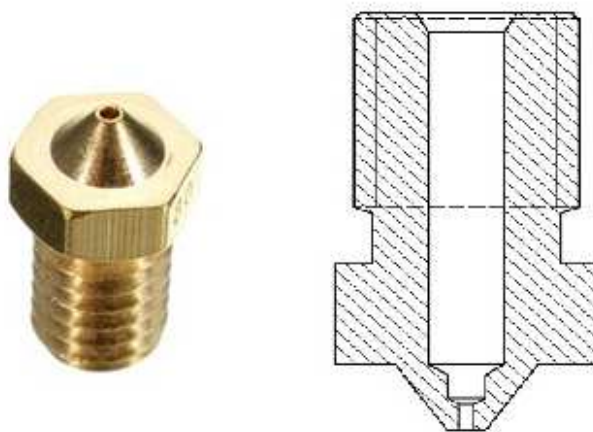


Рис. 3.9. Сопло

Як правило, сопла виготовляють з латуні. Найпоширеніший діаметр сопла 0,4 мм, звичайно бувають і інші: від 0,1 мм до 1,2 мм. Чим менший діаметр сопла, тим роздруковані моделі виходять більш якісні, але витрачається більше часу. Залежно від завдань підбирається оптимальний діаметр.

У нагрівальному блоці фіксується нагрівальний елемент (який безпосередньо і нагріває блок), датчик температури (термістор або термопара), який контролює температуру хотенда, сопла і термобар'єра.

									Арк.
									25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Одна з найбільш важливих частин хотенда – термобар'єр (рис. 3.10). Каналом термобар'єра відбувається подача пластика безпосередньо в гаряче сопло. На термобор'єр накладається ряд вимог.

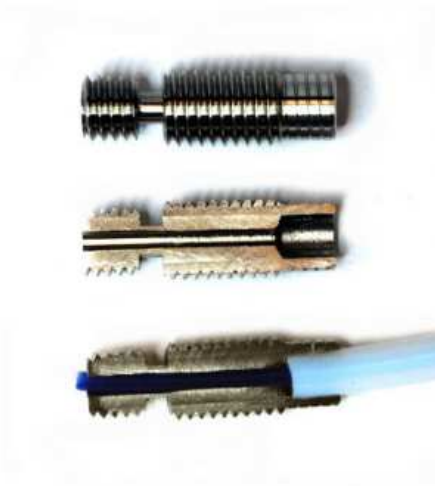


Рис. 3.10 Термобар'єр

В ідеалі, пластик повинен плавитися тільки в соплі, а частина пластика, яка знаходиться зверху, повинна бути тверда, щоб з легкістю проштовхувати вже розплавлений в соплі пластик. Це означає що «гарячу зону» необхідно різко відсікати, чим меншою буде висота перехідної зони (від гарячого до холодного), тим краще. Якщо пластик буде плавитися не тільки в соплі, а й в термобар'єрі, то буде утворюватися м'яка «пробка», яка не зможе проштовхнути пластик в соплі, зважаючи на свій агрегатний стан.

Для того щоб отримати холодну зону з різкою відсічкою від гарячої, можна використовувати вставки з тефлону, алюмінієвий радіатор, активне охолодження, а також матеріали з низькою теплопровідністю, наприклад, нержавіючу сталь.

Крім хотенда, в екструдері присутній сам корпус з механізмом, що подає, в якому використовуються різні зубчасті шестерні, підшипники, можливість регулювання притиску нитки.

									Арк.
									26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.УДК:004:681.5

### 3.2.4. Платформа Arduino

Arduino представляє собою готову апаратно-програмну платформу, головними компонентами якої є невелика плата-контролер введення / виведення і середовище розробки на основі Processing / Wiring [1].

Плати можна розділити на 2 категорії за їх розрядністю. Бувають 8-бітові та 32-бітові [7]. Перші 3D-принтери, засновані на REPRAP, мали в основі поширену плату для робототехніки, орієнтовану на непрофесійних користувачів – Arduino. Для створення мікропрограма використовується власне безкоштовне середовище розробки – Arduino IDE.

Arduino і Arduino-сумісні плати спроектовані таким чином, щоб їх можна було при необхідності розширювати, додаючи в пристрій нові компоненти. Як найбільш потужна була взята плата ArduinoMega 2560 з 8-бітовим процесором (рис. 3.11).



Рис. 3.11. ArduinoMega 2560

Для розширення її можливостей, тобто керування нагріванням гарячого столу (Heatbed), хотенда (Hotend), керування обертанням крокових двигунів,

					123.УДК:004:681.5	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обліку нульового положення за допомогою кінцевих вимикачів та іншого була розроблена плата розширення RAMPS (RepRapArduinoMegaPololuShield) (рис. 3.12).

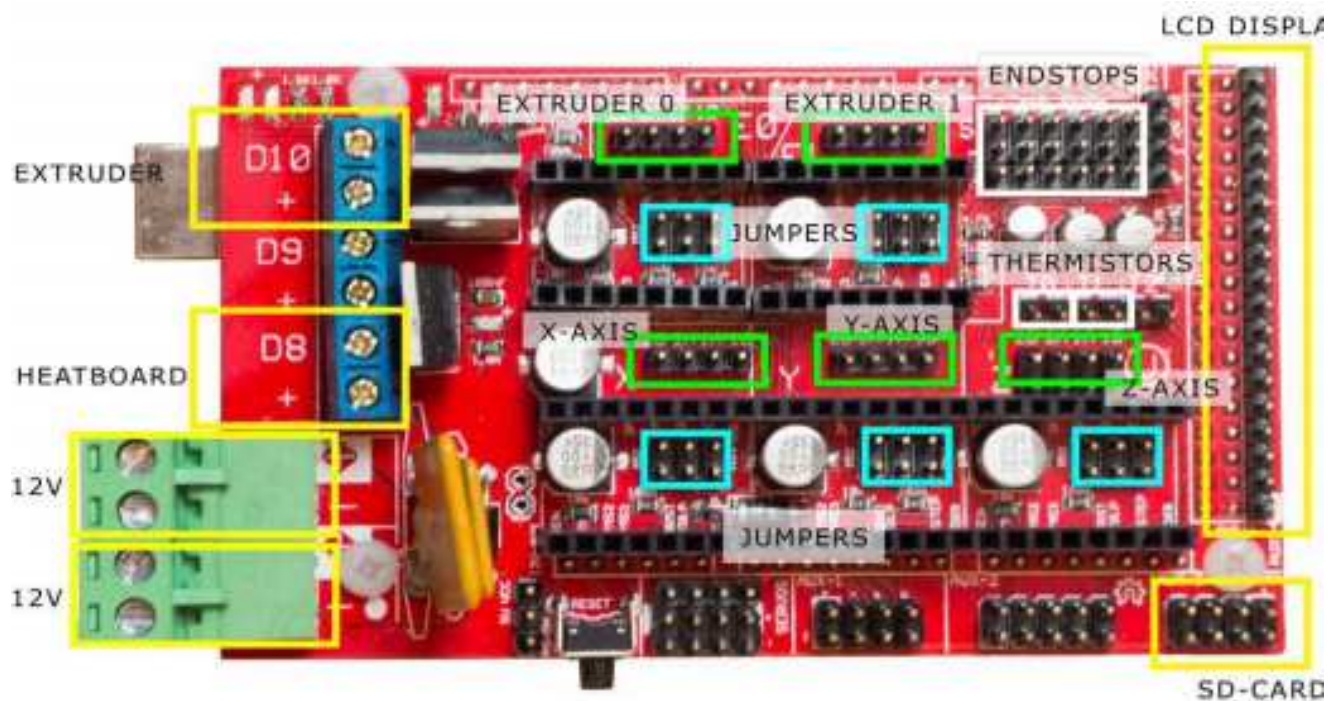


Рис. 3.12. RAMPS

Так само, для керування кроковими двигунами були розроблені драйвера (рис. 3.13), сумісні з цією платою (Pololu драйвера), які вставляються в гнізда плати.



Рис. 3.13. Кроковий драйвер.



### 3.2.3. Додаткове обладнання

На RAMPS є гніздо для підключення LCD-дисплея (рис. 3.15). Він не є обов'язковим. Підключення набору LCD-дисплею до плати повністю позбавляє від необхідності підключати 3D-принтер до комп'ютера через шнур USB. Моделі G-Code можуть завантажуватися безпосередньо через SD-карту, а LCD-екран і кнопки керування дозволяють контролювати хід поточного друку та при необхідності міняти її параметри.

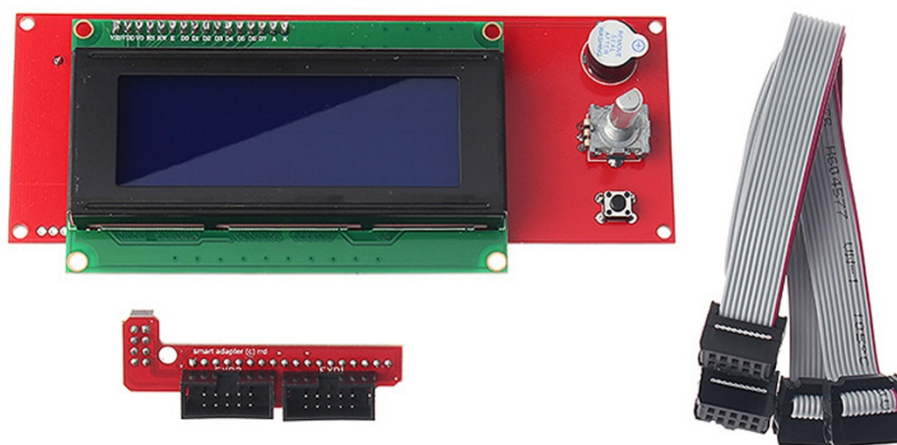


Рис. 3.15 .LCD-екран.

У більшості принтерів, термістор вимірює температуру екструдера HotEnd, а також нагрівального елемента столика.

Термістори – це резистори, що змінюють опір зі зміною температури (рис. 3.16). Хорошої якості термістори є передбачуваними, точно відомо значення опору при кожній температурі в робочому діапазоні. Зниження або підвищення, залежить від типу термістора на градус Кельвіна (або Цельсія), це називається тепловим коефіцієнтом. Позитивний тепловий коефіцієнт (ПТК) – це збільшення опору зі збільшенням температури, негативний (ВТК) буде зменшуватися. Але

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формула на практиці не є лінійною, так що іноді точніше буде таблиця вимірювань, ніж лінійна формула. Ці вимірювання зазвичай можна знайти в документах, які супроводжують термістор.



Рис. 3.16. Термістор

Кінцеві вимикачі (endstops) використовуються на всіх рухомих осях 3D-принтера. Вони виконують дві функції: встановлення початкових координат і захист обладнання.

Після включення 3D-принтера плата контролера принтера не знає, в якому положенні розташовані його осі. Це означає, що системі потрібно спочатку встановити початкову точку фізичної системи координат, процес, який називається Хомінг. Хомінг можна ініціювати або через код або через ПК-контролер.

Інший важливий аспект кінцевого вимикача – захист обладнання від пошкоджень. Якщо екструдер або гарячий столик намагатиметься перевищити фізичні межі машини, кінцевий вимикач припинить рух.

Існує два основні типи вимикачів: апаратні та програмні.

									Арк.
									31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Апаратні кінцеві вимикачі електрично підключені до портів стоп-панелі керування принтера і подають сигнал, коли буде виконано умову зупинки. Зазвичай 3D-принтери оснащені лише апаратними вимикачами на одній стороні кожної осі (рис. 3.17).

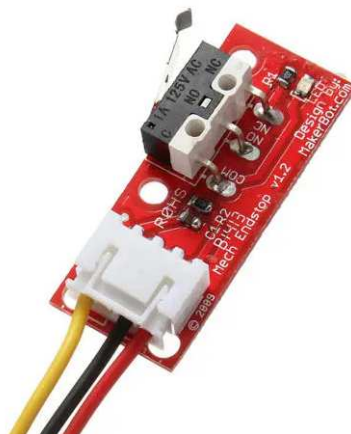


Рис. 3.17. Апаратний кінцевий вимикач

Потужний блок живлення для 3D-принтера призначений для забезпечення живлення електроніки, двигунів, екструдера і нагрівального столу 3D-принтера. Всередині блоку живлення знаходиться кулер, який включається при досягненні високих температур під час інтенсивної роботи блоку, таким чином запобігаючи його перегрів.



Рис. 3.18. Блок живлення.

									Арк.
									32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.УДК:004:681.5



## РОЗДІЛ 4

### ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

#### 4.1. Підготовка та завантаження мікропрограми

Мікропрограма або прошивка для 3D-принтера – це програмне забезпечення, основним завданням якого є зчитування і відтворювання G-коду (G-код – умовна назва мови програмування пристроїв з числовим програмним керуванням). Вивід інформації про процес друку, друк з SD-карти пам'яті, керування принтером через інтерфейси – це все додаткові функції, і в різних прошивках набір цих додаткових модулів різноманітний, як і сама ідея кожної окремої прошивки.

Найбільш поширеними прошивками є:

- Sprinter;
- Teacup;
- SJFW;
- Marlin;
- Sailfish.

Для даного принтеру буде встановлена прошивка Merlin.

Marlin – це мікропрограмне забезпечення з відкритим кодом для 3D-принтера. Marlin використовується для таких 3D-принтерів, як Ultimate, Prusa та Printrbot. Marlin працює в 8-бітових мікроконтролерах.

Марлін – це вбудоване програмне забезпечення. Він підтримує друк через USB або з SD-карт із папками та використовує планування траєкторії випередження. Marlin має ліцензію на основі GNU GPL v3 або новішої версії. Він базується на прошивці Sprinter, ліцензованій під GPL v2 або новішої версії. Прошивка Marlin записується на основну плату 3D-принтера для керування всіма операціями в режимі реального часу на пристрої. Вона координує нагрівачі, кнопки, давачі, вимикачі, дисплей і все, що буде задіяно в операції 3D-друку.

									Арк.
									33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Marlin підходить для адитивної технології FDM. У цьому процесі двигун штовхає термопластичну нитку в гарячу насадку, яка плавить і екструдуює матеріал під час переміщення насадки під керуванням мікроконтролера. Щоб надрукувати модель через Marlin, її потрібно перетворити на G-код за допомогою програми, що називається "slicer".

Встановлення прошивки:

1. Першим кроком у встановленні прошивки є завантаження ID Arduino з веб-сайту Arduino та встановлення його.
2. Завантаження вихідного коду прошивки Marlin.
3. Налаштування Marlin.
4. Компілювання програмного забезпечення за допомогою Arduino IDE.
5. Підключення контролера до ПК за допомогою кабеля USB та завантаження програми прошивки в контролер.

#### 4.2. Програмне забезпечення для керування принтером

Програмне забезпечення, що використовується при 3D-друку не менш важливе, ніж тип 3D-принтера або марка пластика, які використовуються.

Спеціальна програма 3D-принтера, яка називається слайсер (від англійського "slice" – різати), розрізає тривимірні моделі на окремі плоскі шари, які потім будуть надруковані один за іншим. У програмі вказують швидкість і точність друку, температуру та інші параметри. Налаштування передаються спеціальними командами у форматі GCODE, які виконує 3D-принтер.

Найбільш поширені слайсери були розглянуті вище.

Після підготовки 3D-моделі запускають 3D-принтер, завантажують необхідний тип пластика і приступають до друку. Команди GCODE передаються принтеру або безпосередньо з комп'ютера через звичайний USB кабель, з можливістю коригування процесу в реальному часі, або створивши спеціальний \* GCODE файл, в якому буде весь необхідний перелік команд, що дозволяє

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

принтеру підготуватися до друку, надрукувати модель і завершити друк самостійно і практично без втручання з боку.

### 4.3. Налаштування принтера та підбір оптимальних параметрів

Для редагування прошивки Marlin, потрібно відкрити файл "configuration.h" в Arduino IDE. Цей конфігураційний файл, який містить основні налаштування. Саме в цій вкладці необхідно провести основні зміни.

1. Встановити швидкість. За замовчуванням там встановлена швидкість 2500000 (47 рядок коду). Для кожної плати виробник рекомендує свої швидкості, тому для зв'язки Arduino Mega 2560 і Ramps 1.4 необхідно поставити 115200:

```
// This determines the communication speed of the printer
#define BAUDRATE 115200
```

2. Після установки швидкості, необхідно вказати використовувану плату керування (55 рядок коду):

```
// The following define selects which electronics board you have.
// Please choose the name from boards.h that matches your setup
#ifndef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_13_EFB
#endif
```

3. Давач температури столика і екструдера (рядок 115-118):

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

									Арк.
									35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				123.УДК:004:681.5	

TEMP\_SENSOR\_0 - відповідає за термістор першого екструдера  
TEMP\_SENSOR\_1 - відповідає за термістор другого екструдера  
TEMP\_SENSOR\_2 - відповідає за термістор другого екструдера  
TEMP\_SENSOR\_BED - відповідає за термістор столу

4. Обмеження максимальної температури (рядок 140-143):

```
#define HEATER_0_MAXTEMP 275  
#define HEATER_1_MAXTEMP 275  
#define HEATER_2_MAXTEMP 275  
#define BED_MAXTEMP 150
```

Числа, що стоять праворуч, а саме 275 і 150 – це максимальні температури екструдера і нагрівального столу відповідно.

Коли температура перевищує максимальну Temp, нагрівач буде вимкнений. Ця функція існує для того, щоб захистити екструдер від випадкового перегріву.

5. Обмеження мінімальної температури (рядок 230). Також в прошивці за замовчуванням стоїть обмеження мінімальної температури екструдера в 170 градусів. Це означає що, якщо температура екструдера буде нижче 170 градусів, то двигун екструдера не буде обертатися і пластик не буде подаватися.

```
#define EXTRUDE_MINTEMP 170
```

6. Налаштування кінцевих вимикачів:

```
#define INVERT_X_DIR true // forMendelsettofalse,  
forOrcasettotrue
```

									Арк.
									36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

```

#define INVERT_Y_DIR false // forMendelsettotrue,
forOrcasettofalse
#define INVERT_Z_DIR true // forMendelsettofalse,
forOrcasettotrue
#define INVERT_E0_DIR false // fordirectdriveextruder v9
settotrue, forgearedextrudersettofalse
#define INVERT_E1_DIR false // fordirectdriveextruder v9
settotrue, forgearedextrudersettofalse
#define INVERT_E2_DIR false // fordirectdriveextruder v9
settotrue, forgearedextrudersettofalse

```

7. Налаштування робочої області:

```

#define X_MAX_POS 250
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MAX_POS 250
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MAX_POS 300
#define Z_MIN_POS 0

```

8. Обмеження максимальної швидкості по осям:

```

#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {200, 200, 5, 25} //
(mm/sec)

```

9. Налаштування прискорення переміщення по осям:

```

#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION
{1000,1000,100,10000}

```

										Арк.
										37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

// X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E default values are good for Skeinforge 40+, for older versions raise them a lot.

```
#define DEFAULT_ACCELERATION 1500
```

// X, Y, Z and E max acceleration in mm/s<sup>2</sup> for printing moves

```
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 3000
```

// X, Y, Z and E max acceleration in mm/s<sup>2</sup> for retracts

## 10. Завантаження мікропрограми в контролер принтера.

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

### 5.1. Правила експлуатації 3D-принтера

Підготовка 3D принтера до роботи:

1. Нанесена підкладка для друку. Потрібно подбати про покриття столу матеріалом, який поліпшує прилипання виробів і полегшує їх видалення з платформи. Це може бути малярський скотч, каптон, або спеціалізовані покриття. Попередньо стіл потрібно якісно очистити.

2. Прохідність екструдера. Залишки застиглого пластика в соплі принтера можуть створювати перешкоду для проходження нового полімеру. Тому перед початком друку краще переконатися в чистоті екструдера і прочистити його в разі потреби.

3. Заправка полімерною ниткою. Переконайтеся, що потрібний вам 3D-пластик заправлений в принтер за всіма правилами.

4. Перевірте подачу електроживлення. При бажанні, на даному етапі можна поставити пристрій на нагрів столика. Це не обов'язково, але дозволить прискорити процес запуску в друк.

Підготовка 3D-моделі:

1. Модель необхідно завантажити в програму-слайсер, що генерує керуючий код для принтера.

2. Після завантаження моделі перевірити її готовність до 3D-друку. Наявність будь-яких помилок і неточностей відразу відіб'ється в програмі, що потребують виправлення 3D-моделі згідно з правилами 3D-моделювання для друку.

3. Якщо ж з цифровою версією створюваного виробу все в порядку, встановлюємо налаштування друку. Правильні налаштування на даному етапі впливають на якість 3D-друкованого зразка. Слід проконтролювати такі налаштування:

					123.УДК:004:681.5	Арк. 39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a. Температура столу і екструдера. Ці значення залежать від типу використовуваного пластику, різним видам полімерів відповідають різні температурні режими.

b. Швидкість друку. Регулювати її також слід в залежності від полімерної нитки.

c. Наявність підтримки. Складні структури з нависаючими елементами доцільно друкувати з підтримуючою конструкцією, це забезпечить точне відтворення моделі і попередить можливі деформації об'єкта під час охолодження.

d. Тип прилипання до столу. Для кращого зчеплення виробу з платформою і захисту від від'єднання кутів існує кілька варіантів налаштування даного параметра. Залежно від типу створюваного елемента і виду пластику вони можуть відрізнятися.

e. Точність друку. Чим вища точність, тим краща деталізація готового виробу. Висоту шару варто вибирати в залежності від вимог до виробу.

Важливо проконтролювати відтворення першого шару, адже від нього часто залежить весь подальший процес друку.

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## ВИСНОВКИ

1. Наведено класифікацію методів друку тривимірних об'єктів та технологій, де застосовуються дані методи. Подано перелік матеріалів, що найчастіше використовуються для тривимірного друку, технології, де застосовуються, та вироби, які з них виготовляються. Розглянуто найпоширеніше програмне забезпечення для створення 3D-моделей та керування 3D-принтером, а також наведено його короткий опис.

2. Описана технологія Fused Deposition Modeling (FDM)/ Fused Filament Fabrication (FFF), принцип роботи FDM 3D-принтера, наведено основні його переваги та недоліки.

3. Описана апаратна частина 3D-принтера, наведені найбільш поширені типи механіки, описана електроніка принтера, розглянуто їхні функції та підключення до плати.

4. Розглянуто прошивку Marlin та налаштовано її під потреби принтера.

5. Описані правила підготовки до роботи та правила експлуатації 3D-принтера.

					123.УДК:004:681.5	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

