

Електроніка

Сумський державний університет

Автор: Шаповалов Олексій Ігорович

Керівник: Знаменщиков Ярослав Володимирович, асистент кафедри електроніки
і комп'ютерної техніки

КОНКУРСНА РОБОТА

на тему:

«Система друку струмопровідних доріжок
електронних приладів»

Шифр: «Доріжка»

Суми 2019

ЗМІСТ

Вступ	2
РОЗДІЛ 1 Аналіз технологій друку струмопровідними матеріалами	3
1.1 Особливості друку електроніки	3
1.2 Існуючі у наш час 3D-системи друку електронних виробів	6
1.2.1 3D-принтер Voxel8	6
1.2.1 3D-принтер Voltera V-One	10
РОЗДІЛ 2 Розробка функціональних блоків та електричної схеми системи тривимірного друку	13
2.1 Розробка структурної схеми та алгоритм роботи системи	13
2.2 Вибір елементної бази та її обґрунтування	14
2.2.1 Вибір плати керування	14
2.2.2 Вибір драйвера та крокового двигуна системи	15
2.2.3 Вибір оптичних датчиків граничного положення	17
2.4 Розрахунок теоретичних характеристик системи	18
2.5 Вибір програмного забезпечення	20
2.6 Розробка функціональної схеми	21
ВИСНОВКИ	25
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	26

ВСТУП

У наш час спостерігається перехід від традиційного способу створення предметів побуту та промисловості, шляхом складання їх з окремих частин, отриманих різанням, литтям чи іншим способом, до адитивного виробництва, в якому об'єкт формується в одному робочому циклі за рахунок пошарового нанесення різноманітних матеріалів (металів, пластмас, скла, тощо) за допомогою 3D принтеру. На наш час 3D-системи вже достатньо широко розповсюджені в світі, їх використовують для створення найрізноманітніших речей, будь то приготування їжі, виготовлення пластикових конструкцій різної складності, деталей ракетних двигунів, протезування, побудова житлових приміщень, тощо. За роки існування цієї технології з'явилися безліч різноманітних моделей та модифікацій систем тривимірного друку, в тому числі - для друку елементів схем в галузі електроніки та електротехніки.

Фундаментом будь-якого сучасного електронного приладу є друкована плата - пластина з діелектрику, на поверхні та/або в об'ємі якої сформовані електропровідні кола електронної схеми. Її важливість складно переоцінити, адже саме через неї взаємодіють різні частини пристроїв.

Створення складної розгалуженої макетної плати в умовах невеликої лабораторії, або ще гірше в домашніх умовах – заняття досить складне. Кустарне виготовлення макету електричного кола: травлення, нагрівання та інші супутні завдання відбирають багато сил, а головне – часу інженера-електроніка. Тому у наш час мало хто цим займається. Частіше замовляють виготовлення плат у спеціалізованих компаній, але в цьому випадку доводиться чекати свого замовлення багато днів – аматор втрачає дорогоцінний час. Інша сторона медалі – високі ціни на виготовлення таких плат.

Аналіз ринку 3D-систем в галузі друку електроніки показав, що даний ринок знаходиться на початковій стадії розвитку. Хоча перший 3D-принтер,

що має можливість друкувати струмопровідні елементи електричного кола, з'явився ще в 2015 році, суттєво на ринок це не вплинуло - на сьогодні в найкращому випадку існує не більше десяти моделей таких систем, а ціна на них починається від декількох тисяч доларів. Вищенаведене схиляє до думки щодо створення власної системи друку макетних плат електричних кіл та готових до використання електронних пристроїв.

Основною метою даної роботи є розробка функціональних блоків та електричної схеми, вибір компонентів та програмного забезпечення двоекструдерної системи 3D-друку, що друкує електричні компоненти та електронні пристрої, використовуючи струмопровідні чорнила та пластиковий філамент.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ДРУГУ СТРУМОПРОВІДНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

1.1 Особливості друку електроніки

Друкована електроніка – один з напрямів електроніки, що займається розробкою методів і технічних засобів друку струмопровідних доріжок, електронних приладів, електронних схем за допомогою друкуючого обладнання, яке дозволяє наносити на поверхню підкладки спеціальний струмопровідний, напівпровідниковий або резистивний матеріал (чорнила, пасти, тощо). [1-3]

Розвиток та впровадження методів друкованої електроніки надало можливість суттєво зменшити розмір електронних пристроїв шляхом зменшення розміру з'єднувальних дротів, елементів електричних кіл та пристроїв. Можливість значного спрощення конструювання одразу готових до використання пристроїв, інтеграції з різноманітними поверхнями, отримання готових до використання електричних схем, які інтегровані в корпус, або поєднання багатьох мікросхем в одному корпусі за один етап друкування надає чималій актуальності цій галузі.

Умовно друк електроніки можна розділити на:

- **Двовимірний друк**
- **Тривимірний друк**

Двовимірний друк – сукупність технологій друку, які використовують для друкування **тонких** об'єктів, тобто – друк відбувається за двома координатами.

В **двовимірному друці** електроніки використовуються технології та обладнання для трафаретного друку, флексографії, ротогравюрного і офсетного друку, а також струменеві технологію друку. При цьому як чорнила можуть використовуватися будь-які матеріали, в тому числі

органічні та неорганічні напівпровідники, металеві провідники, наночастинки, вуглецеві нанотрубки та інше.

Даний вид друку і вищевказані технології використовуються при друкуванні RFID-позначок, великих дисплеїв на жорстких і гнучких матеріалах, тонкоплівкових сонячних елементів, органічних польових транзисторів, тачпадів, тощо.

Багато пристроїв вже друкують повністю або частково, в основному струменевим способом, частково флексографічним і глибоким друком: фотодефектори, гальванічні фотоелементи, соленоїди, тонкі транзисторні схеми на плівці, батареї і т. ін. Нижче нами більш детально буде розглянутий тривимірний друк.

Тривимірний друк – сукупність технологій друку, які використовуються для отримання об'єктів за цифровою 3D-моделлю зразка в довільній системі координат.

Тривимірний друк електроніки зовсім нещодавно розпочав свій розвиток, саме тому загальна сукупність технологій, що використовуються в існуючих пристроях невелика, але деякі з існуючих технологій можна запозичити з класичного 3D-друку.

Тривимірний друк електроніки функціонує так само, як двовимірний друк, але з суттєвою перевагою - можливістю створювати 3D-об'єкти з електронікою всередині, вбудованою в матеріал корпусу об'єкту. Також це дозволяє створювати продукти, які є легшими, меншими за габаритами, більш ефективними та ергономічними. Більшість пристроїв, що створені з використанням тривимірного друку практично неможливо створити за стандартними двовимірними технологіями.

За допомогою 3D-друку об'єкти можна створювати в лічені хвилини або години в залежності від складності конструкції. Це робить 3D-друк ідеальною технологією для створення прототипів і виробництва предметів невеликими партіями.

1.2 Існуючі у наш час 3D-системи друку електронних виробів

В наш час існує не більше п'яти пристроїв, які виробляються серійно і спроможні виконувати друк струмопровідними матеріалами. Всі вони, не зважаючи на переваги, мають суттєві критичні недоліки: деякі в економічному плані, а деякі - і в технологічному. Розглянемо принцип та технології друку електронних виробів на прикладі існуючих систем.

1.2.1 3D-принтер Voxel8

Voxel8 – двоекструдований 3D-принтер, що друкує пластиком філаментом PLA (поліактид) за технологію FFF (Fused Filament Fabrication) та струмопровідними чорнилами на основі срібла за технологію PDW (Pneumatic Direct Write). Звучить просто, але таке поєднання двох технологій відкриває безліч можливостей. Так, на виставці CES-2017, компанія презентувала окрім принтера для друку (рис 1.1), ще й квадрокоптер, який був майже повністю виготовлений з використанням даної системи (рис. 1.2). PLA і елементи з'єднання електричного кола керування квадрокоптером були надруковані. Електроніка, акумулятор та двигуни були вставлені в корпус в процесі його друку (рис 1.1). [4]

Fused Filament Fabrication - технологія друку філаментом, що передбачає створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі (рис.1.3.). Як правило, в якості матеріалів для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді котушок дроту або прутків

Конкретно в даному випадку в ролі термопластика використовується PLA-пластик - нетоксичний біорозпадний біосумісний термопластичний поліефір, основою якого є молочна кислота.



Рисунок 1.1 – Перша в світі система тривимірного друку, що друкує струмопровідними чорнилами



Рисунок 1.2 – Квадрокоптер надрукований системою Voxel8

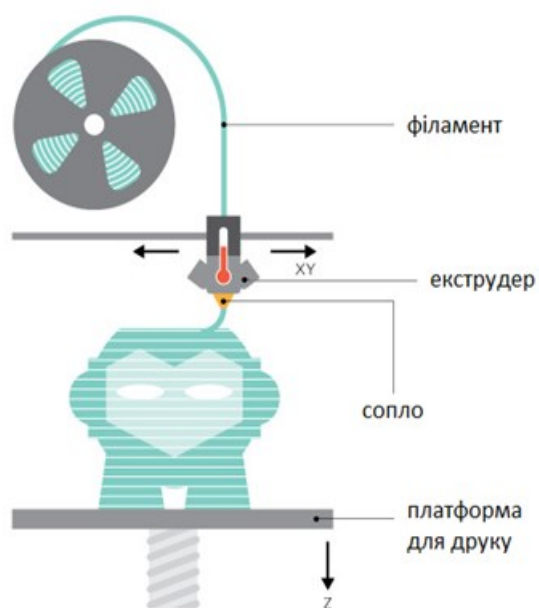


Рисунок 1.3 – Технологія друку Fused Filament Fabrication

Струмopрoвідні доріжки виконуються за технологію PDW (Pneumatic Direct Write) – технологія прямого пневматичного рисування. Сама технологія PDW мало чим відрізняється від технології FFF – в обох випадках матеріал для друку екстругується на поверхню друку (рис. 1.4 - 1.5). Різниця лише в тому, що в PDW матеріал не нагрівається до екструзії, на відміну від FFF.

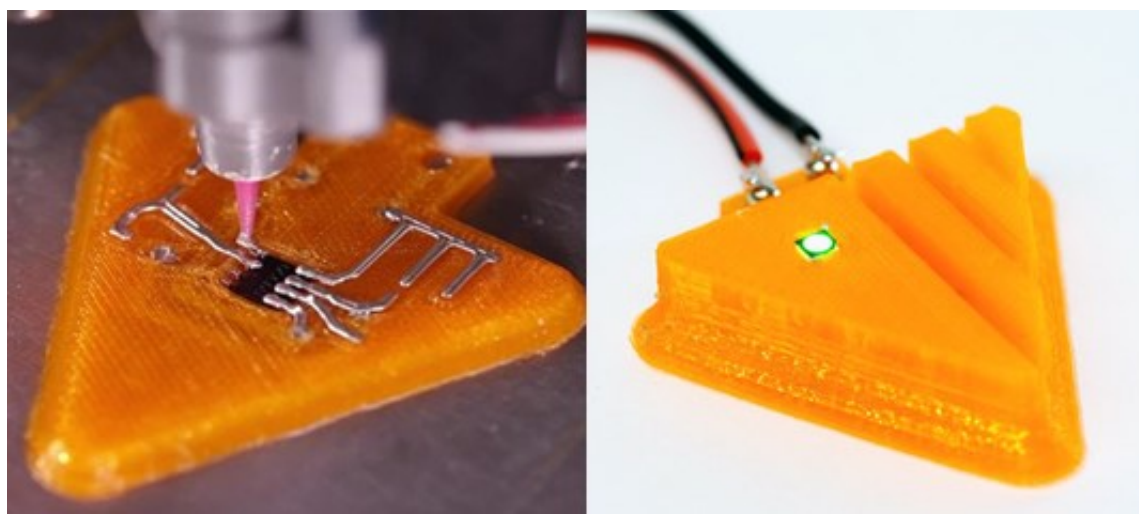


Рисунок 1.4 - Процес створення електронного пристрою системою Voxel8 та готовий варіант електронного пристрою в корпусі

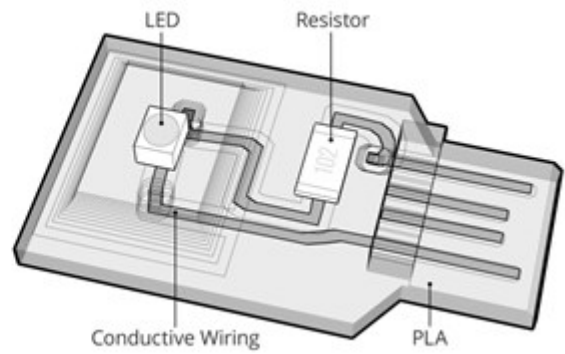
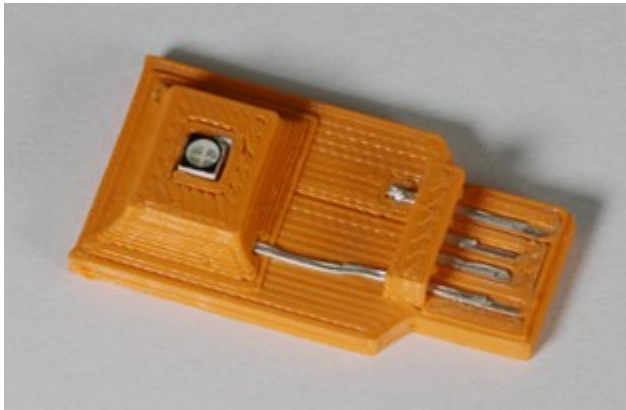


Рисунок 1.5 – Готовий електронний пристрій та його томографія

Як видно на рисунках 1.4 та 1.5 тривимірна система **Voxel8** – друкує як типова тривимірна двоекструдерна система, з різницею лише в типах друкуючих матеріалів. Система здатна будувати об'єкти розміром 150x150x100 мм. Є можливість перервати процес друку та відповідно продовжити його з місця зупинки. В системі використовуються струмопровідні чорнила з наночастинками срібла та філамент PLA - нетоксичний біорозпадний біосумісний термопластичний поліефір, основою якого є молочна кислота. Ширина струмопровідної доріжки 250 мкм. Питомий опір чорнил 0,5 мкОм*м. Час затвердіння чорнил – 5 хвилин. Товщини філаменту, що використовується – 1,75 мм. Роздільна здатність шару – 200 мкм.

Ще одною перевагою цього принтера – є використання саме струмопровідних чорнил на основі срібла, адже вони мають суттєві переваги над існуючі аналогами (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Порівняння чорнил на основі срібла з іншими струмопровідними матеріалами

Переваги та недоліки системи друку Voxel8 підсумовані у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки системи друку Voxel8

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none">● Висока швидкість та якість друку● Відсутність аналогів● Два екструдери● Висока провідність струмопровідних чорнил в порівнянні з іншими матеріалами	<ul style="list-style-type: none">● Висока вартість системи● Висока вартість струмопровідних чорнил● Підтримка лише пластика PLA● Складності в модифікуванні

1.2.2 3D-принтер Voltera V-One

Voltera V-One – псевдотривимірна система друку (рис.1.7), що друкує струмопровідними чорнилами на основі срібла на площині діелектричної підкладки за технологією PDW (Pneumatic Direct Write). Система має можливість друкувати як струмопровідними чорнилами, так і чорнилами-діелектриками для ізоляції шарів один від одного.

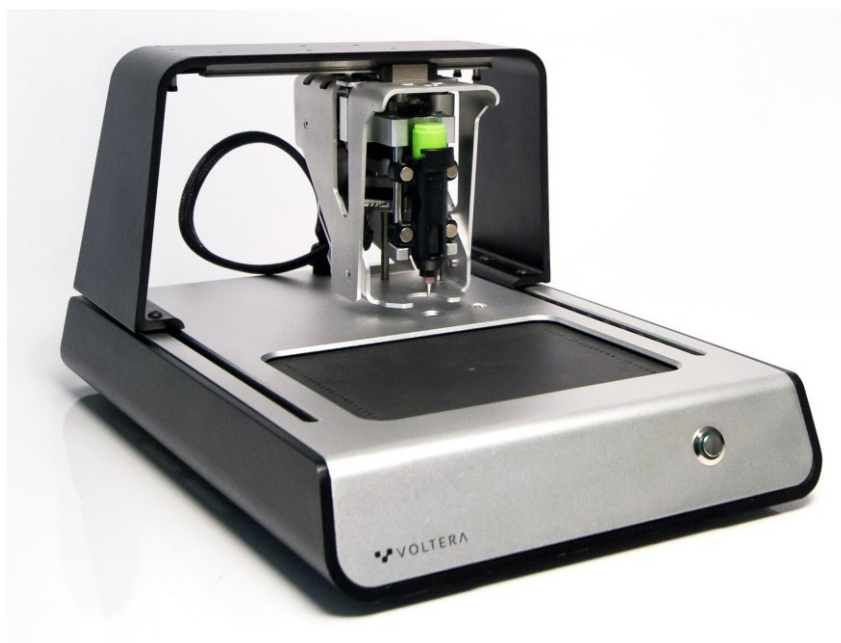


Рисунок 1.7 – 3D принтер Voltera V-One

Нажаль, кількість шарів, які можна нанести на підкладку обмежена і дорівнює двом. Принтер має свою ОС Gerber, яка спрощує процес розробки та друку схем. Для руку необхідно лише завантажити схему та почати процес друку.

Ще однією перевагою цієї системи є продумана ергономіка - відсутність складних кріплень. Насадки фіксуються на магнітних кріпленнях, отже отримуємо швидку заміну вичерпних матеріалів, що використовуються при друкуванні: картриджів з чорнилами та підкладок для друку.

Оперуючи провідними та діелектричними чорнилами, V-One дозволяє користувачам друкувати складні плати, не виходячи з приміщення. Цей пристрій значно відрізняється у позитивну сторону від традиційних станків обробки друкованих плат, що представлені на сучасному ринку.

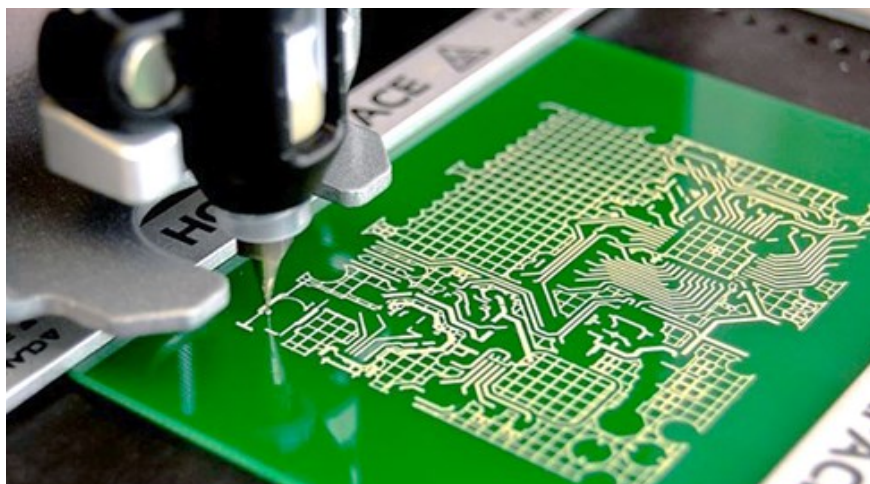


Рисунок 1.8 – Процес друку мікросхеми системою Voltera V-One

Переваги та недоліки системи друку Voxel8 підсумовані у таблиці 1.1.

Хоча нами були проаналізовані не всі системи тривимірного друку електроніки, а тільки лідери ринку, можна сказати, що цей ринок знаходиться у зародковому стані [5].

Таблиця 1.2 – Переваги та недоліки системи друку Voltera V-One

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> ● Висока швидкість друку ● Гарна ергономіка ● Зрозуміле в експлуатації програмне забезпечення 	<ul style="list-style-type: none"> ● Висока вартість ● Обмеження друку двома шарами чорнил ● Неможливість створення самої плати з нуля (необхідна підкладка) ● Складності в модифікуванні

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ ТРИВИМІРНОГО ДРУКУ ТА ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Ситуація на ринку тривимірних систем друку електроніки сьогодні, а саме: надвисока вартість систем та витратних матеріалів, складність їх модифікування, спонукають до розробки системи, яка збере в собі якнайбільше переваг існуючих систем будучі відносно дешевою.

В даному розділі будуть розглянуті питання розробки структурної та електричних схем, функціональних блоків, підбору елементної бази, розрахунку мінімальної теоретичної точності позиціонування та мінімального теоретичного об'єму екструзії струмопровідним матеріалом, вибір програмного забезпечення двоекструдерної системи тривимірного друку з можливістю одночасного друку пластиковим філаментом та струмопровідними чорнилами на базі наночастинок срібла.

2.1 Розробка структурної схеми принтера

Для якісного друку тривимірних структур, які б повністю задовільнили майбутні потреби, за необхідну роздільну здатність друку було вирішено вибрати мінімальну теоретичну точність позиціонування екструдера в 1 мкм. Тобто, виникає задача вибору програмного забезпечення, та компонентів принтера, що забезпечать майбутній системі необхідну роздільну здатність друку, а саме - двигунів, драйвера системи двигунів, а також системи позиціонування. Для цього був проаналізований ринок пристроїв та вибрана компонентна база, яка задовольняє наші потреби в роздільній здатності друку з найкращим відношенням ціни/якості. Загальна структурна схема системи 3D друку зображена на рис. 2.1 [6-7].



Рисунок 2.1 – Структурна схема тривимірної системи друку

2.2 Вибір елементної бази та її обґрунтування

2.2.1 Вибір плати керування

Платою керування було вибрано MKS Gen V1.4, яка має високу надійність та істотні переваги над іншими платами: оскільки була розроблена спеціально для тривимірного друку.

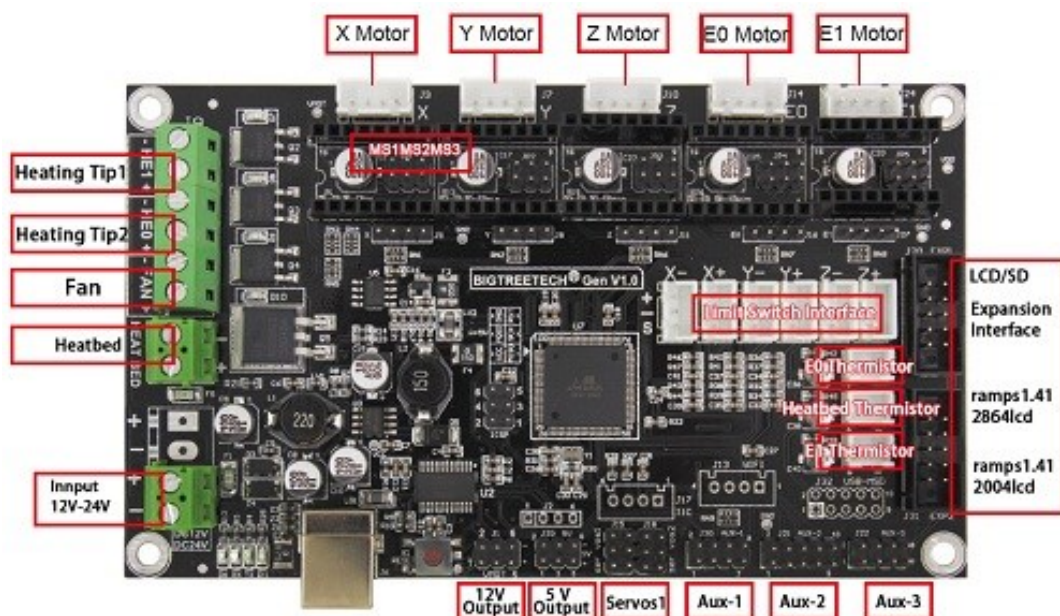


Рисунок 2.2 – Плата керування MKS Gen V1.4

Основні характеристики плати керування MKS Gen V1.4: наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики плати керування MKS Gen V1.4

8 бітний мікроконтролер ATmega2560;	Наявність роз'єму під LCD та SD-карти;
Шість 3-х пінових роз'ємів для кінцевих вимикачів	Підтримка основних драйверів КД: A4988, DRV8825, TMC2100, LV8729
Можливість підключення до 5 драйверів КД з налаштуванням мікрокроків (мікроперемикачі).	4 потужних MOSFET-транзистора для живлення, нагрівання столу, двох екструдерів і вентилятора;
Додаткові піни для обв'язки 3D принтера: AUX-1, AUX-2, AUX-3, Servos1	3 додаткових виходу живлення 3 В і 12-24 В (в залежності від живлення, що подали на плату);
Можливість підключення до 3 термісторів	Напруга живлення 12 - 24 В;

2.2.2 Вибір драйвера та крокового двигуна системи

Для керування кроковими двигунами принтеру необхідний пристрій, який перетворюватиме керуючі сигнали малої потужності в струми, достатні для управління кроковими двигунами - драйвер двигунів. В ролі драйверів крокових двигунів був вибраний - DRV8825, який має характеристики наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Характеристики драйвера крокового двигуна DRV8825

Напруга живлення: від 8.2 до 45 В	Розмір плати: 15 x 15 мм
Можливість установки кроку: від 1 до 1/32 від максимального кроку	Габарити драйвера: 19 x 15 x 11 мм
Напруга логіки: 3-5.5 В	Габарити радіатора: 9 x 5 x 9 мм
Захист від перегріву	Вага з радіатором: 4 г
Максимальний струм на фазу: 1,5 А без радіатора, 2,2 А з радіатором	Вага без радіатора: 3 г
Відстань між рядами ніжок: 12 мм	

Схема підключення драйвера до крокового двигуна наведена на рисунку 2.3.

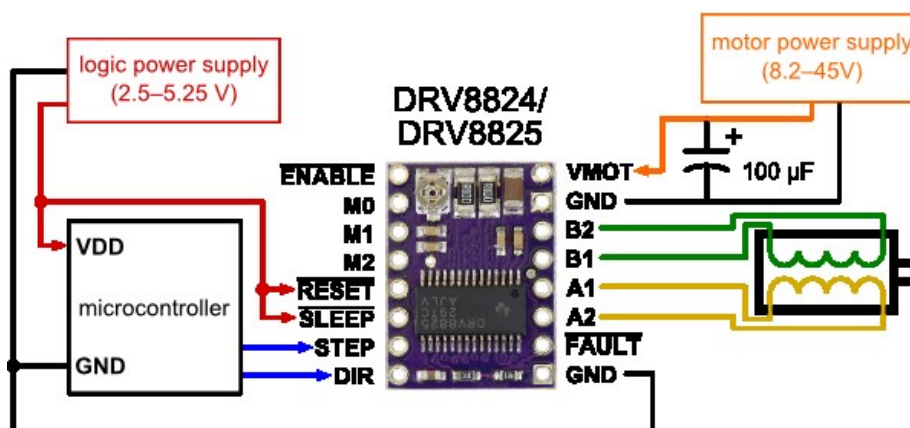


Рисунок 2.3 – Схема підключення драйвера до крокового двигуна

В ролі двигуна принтера був вибраний кроковий двигун Nema 17. Його характеристики представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики крокового двигуна Nema 17

Кут повороту за один крок: 1.8°	Обертальний момент утримання: 40 Н/см (4.08 кгс/м)
Діаметр валу: 5 мм	Обертальний момент спокою: 2.2 Н/см (0.22 кгс/м)
Довжина двигуна: 40 мм	Інерція ротора: 54 г/см^2
Струм на обмотку: 1.7 А	Кількість проводів: 4
Опір обмотки: 1.5 Ом	Маса: 280 гр
Індуктивність обмотки: 2.8 мГн	

Вся система має п'ять крокових двигунів різного призначення: три двигуна виконують позиціонування екструдера та столу один відносно одного. Решта (два) використовуються в двох різних екструдерах, а саме - для екструзії двох друкуючих матеріалів на площину друку.

2.2.3 Вибір оптичних датчиків граничного положення

В процесі експлуатації системи тривимірного друку може відбуватися незначне зміщення початкової точки відліку внаслідок ковзання та механічних деформацій в міжелементних з'єднаннях. Наприклад, зміщення екструдера вже на 100 мкм від необхідної позиції суттєво впливає на якість друку. Окрім цього, в деяких випадках можливе навіть пошкодження екструдерів або поверхні друку внаслідок невірного позиціювання. Рішенням проблеми є калібрування точки відліку перед кожним сеансом друку за допомогою кінцевих вимикачів. В більшості 3D-систем друку використовуються механічні кінцеві вимикачі, які мають суттєвий недолік пов'язаний з низькою точністю, що негативно впливає на роздільну здатність системи. З цієї причини кінцевим вимикачем був вибраний оптичний датчик положення TCST1103, який має значно більшу точність та ряд переваг над механічними аналогами. Його характеристики наведені у таблиці 2.4, а вигляд та схема включення представлені на рис.2.4.

Таблиця 2.4 - Характеристики оптичного датчика граничного положення TCST1103

Режим роботи: просвіт	Струм випромінювача (ном): 60 мА
Тип виходу: фототранзистор	Комутована напруга (макс): 70 В
Робоча відстань: 3,1 мм	Комутований струм (макс): 4 мА
Спосіб монтажу: на плату, вихідний	

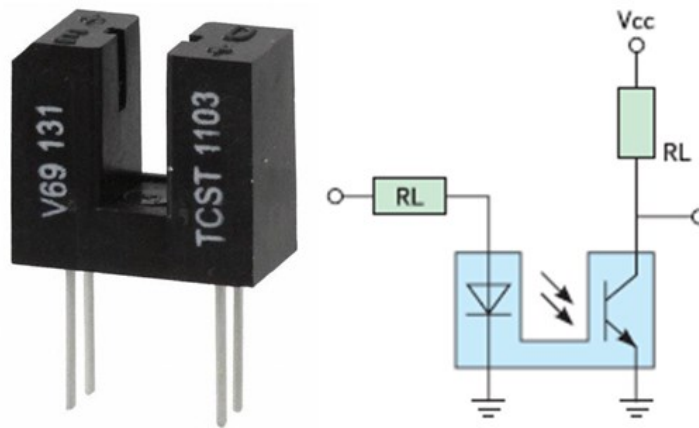


Рисунок 2.4 - Оптичний датчик граничного положення TCST1103 та його схема включення

2.3 Розрахунок теоретичних характеристик системи

Нижче представлений розрахунок точності позиціонування двигуна Nema 17 в парі з драйвером DRV8825.

За один крок кут повороту двигуна Nema 17 дорівнює 1.8° , отже, на повний оберт двигун здійснює

$$N_{об} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ кроків.}$$

Драйвер двигуна дозволяє поділити крок на 16 мікрокроків, тобто, на повний оберт маємо:

$$N_{16} = 200 * 16 = 3200 \text{ мікрокроків.}$$

Крок гвинта – 1 мм, отже точність позиціонування двигуна:

$$d_{розд} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{3200} = 0.3 \text{ мкм.}$$

При кожному кроці двигуна відбувається зміщення поршня шприца, отже, відповідно - зміна об'єму ємності шприца зі струмопровідною пастою. Розрахуємо мінімальний теоретичний об'єм екструзії струмопровідного матеріалу. Для шприца з радіусом поршня 20 мм мінімальний об'єм екструзії ΔV_{min} (рис 2.5) матеріалу при розрахованій нами роздільній здатності двигуна в $d_{розд} = 0,3$ мкм.

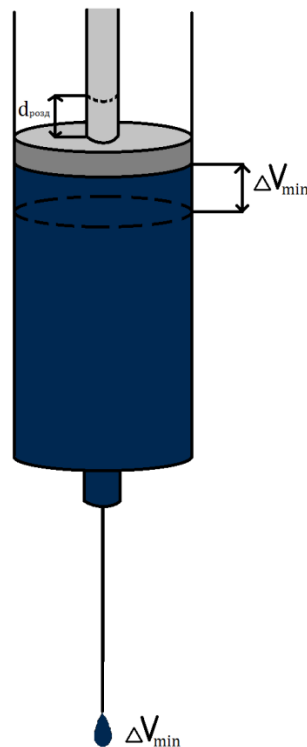


Рисунок 2.5 – Мінімальний об'єм екструзії чорнил під дією мікрокроку двигуна

$$\begin{aligned} \Delta V_{min} &= S_{п} * \Delta h = \pi R^2 * \Delta h = \pi * 4 * 10^{-4} * 3 * 10^{-6} = \\ &= 3,8 * 10^{-6} \text{ л} = 3,8 \text{ мкл} \end{aligned}$$

Отже, теоретична точність позиціонування становить 0,3 мікрони, а мінімальна теоретичний об'єм екструзії 3,8 мікролітри, що з урахуванням подальших існуючих похибок та неідеальної дії рушійних пристроїв

повністю задовольняє потреби в роздільній здатності друку та виправдовує вибір даних компонентів.

2.4 Вибір програмного забезпечення для роботи принтера

Як і будь-який високотехнологічний пристрій, 3D-принтер для своєї роботи потребує відповідного програмного забезпечення. Це програмне забезпечення досить специфічне, адже в результаті обробки моделі об'єкту повинно бути надруковане не плоске зображення, а тривимірний об'єкт. При цьому отримана структура повинна повністю відповідати поставленій оператором задачі. Програмне забезпечення відповідає за налаштування та калібрування тривимірної системи, слайсінг моделі, моніторинг, відстеження та вивід на екран процесу друку, а також за конвертування цифрової 3D-моделі об'єкту в STL або інший формат G-code, який після отримання плата керування перетворить в імпульси, що керуватимуть кроковими двигунами. Також дане програмне забезпечення забезпечує нагрів та інші підготовчі процеси перед друком об'єкту.

Заради тонкого налаштування складної двоекструдерної системи тривимірного друку вирішено вибрати керування системою через персональний комп'ютер програмою, яка підтримує роботу двох екструдерів під назвою «Repetier host», а в роботі з 3D-принтером використовуватиметься мова STL (для опису поверхні заданої моделі будуть використані трикутники).

Інтерфейс програми «Repetier host» представлено на рисунку 2.6.

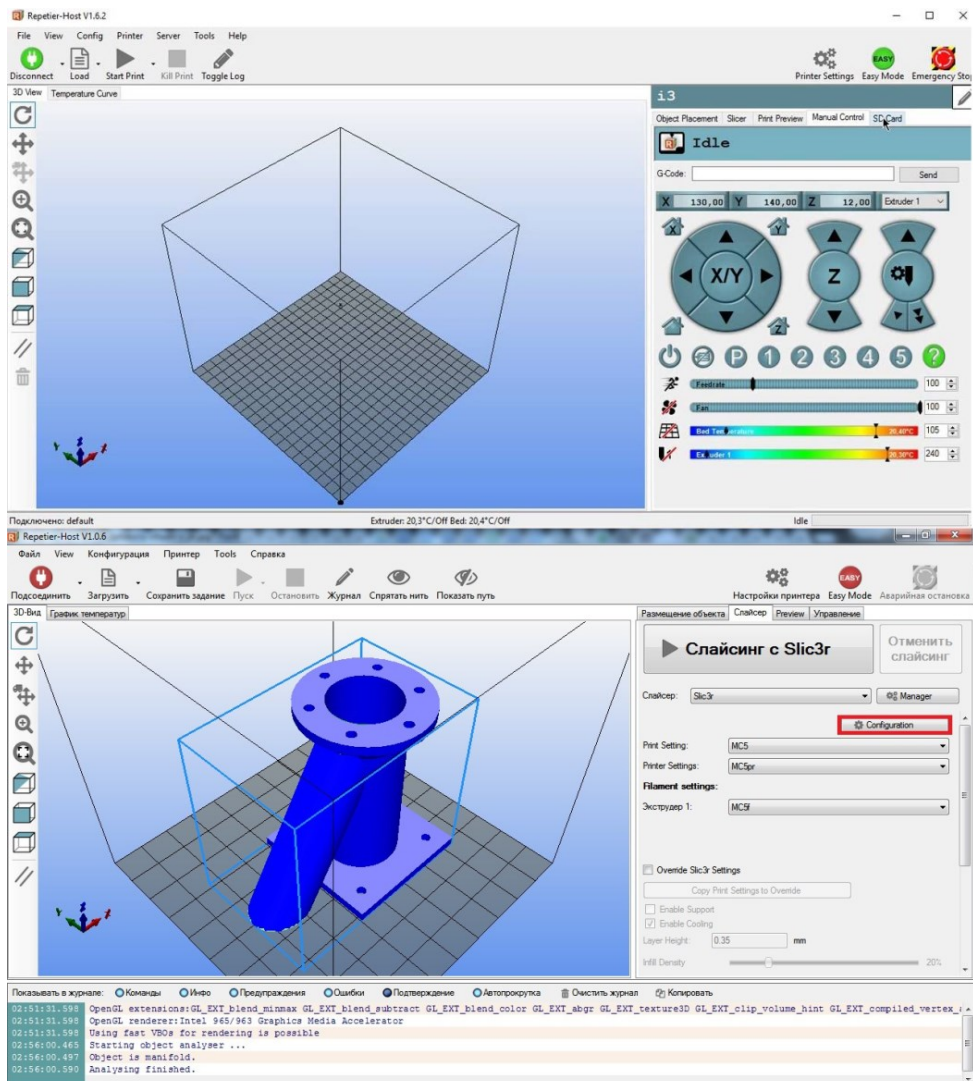


Рисунок 2.6 – Інтерфейс програми « Repetier host»

2.5. Розробка функціональної схеми системи

Відповідно до структурної схеми, з використанням вибраної компонентної бази була складена функціональна схема системи. Основою системи є плата керування MKS GEN V1.4, що керує виконавчими механізмами принтеру (драйверами крокових двигунів, ТЕНами) та зчитує дані з оптичних датчиків положення, відстежує дані термодатчиків. Як вказувалося, система складається з 5 драйверів крокових двигунів DRV8825 та 5 крокових двигунів Nema 17, чотирьох оптичних кінцевиків TCST1103, 2 термодатчиків, 2 термоелектричних нагрівачів (резистивного типу) та 2 термодатчиків (реалізовані на базі терморезисторів) [8].

Функціональної схеми системи наведена на рисунку 2.7. Пара, що складається з двох драйверів та двох двигунів відповідає за екструзію пластиковим філаментом та струмопровідними чорнилами екструдерами E1 та E2 відповідно. Решта двигунів та драйверів відповідають за позиціонування відносно екструдерів столу, на якому відбувається друк. Драйвера крокових двигунів управляються через входи DIR, STEP, EN, відповідно, на платі управління розташовані керуючі виходи. Відповідно отримуючи керуючі електричні імпульси на входи (3) драйвери перетворюють ці сигнали в електричні імпульси A1, A2, B1, B2 (4) вже для керування кроковими двигунами, що здійснюють позиціонування голівок та екструзію.

Два термоелектричних нагрівача EK1 і EK2 виконують підготовчий нагрів столу та екструдера E1, відповідно, перед процесом друку, а вже в процесі друку - підтримують необхідну температуру процесу. Обидва нагрівача під'єднуються до виходів плати HOTEND і HEAT, відповідно, та до землі. Два термодатчики TERM1 та TERM2, фіксують температуру столу та екструдера E1.

Три оптичні датчики граничного положення LIM X, LIM Y, LIM Z під'єднуються до відповідних виводів та землі. Дані датчики використовуються перед початком друку для калібрування положення екструдерів відносно площини столу, на якому відбуватиметься друк, заданням точки відліку системи координат. Оптичний датчик LIM E2 також під'єднується до відповідного виводу на платі, він відіграє роль датчика граничного положення поршня шприца екструдера з струмопровідним матеріалом.

Керуюча плата підключена до блока живлення та живиться від напруги 12-24 В. Також на платі розташований USB-порт, через який плата керується оператором за допомогою програми «Repetier host».

Зовнішній вигляд розробленої системи та вигляд екструдера для друку провідними чорнилами представлені на рисунку 2.8. Науковою групою також

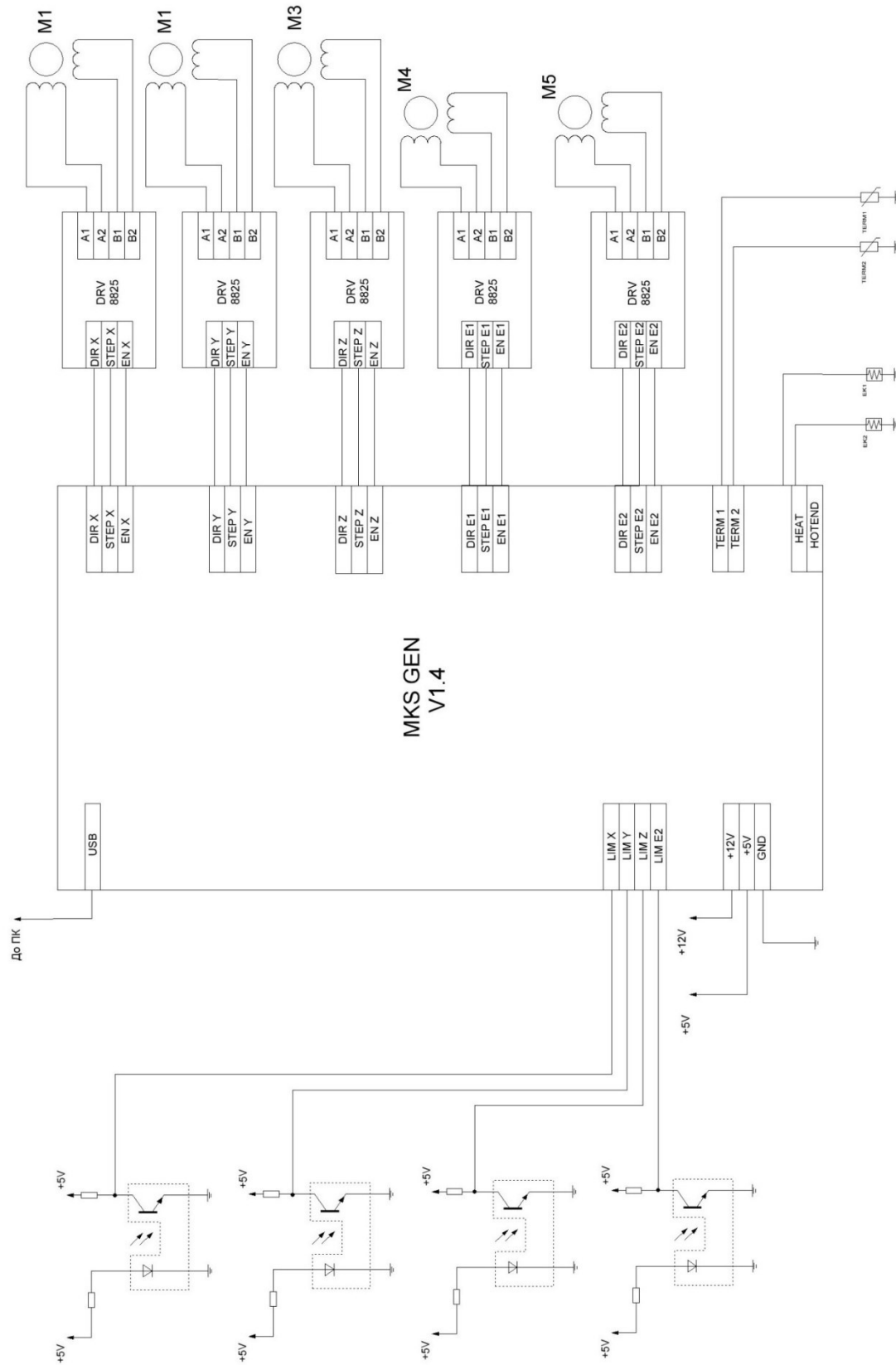


Рисунок 2.7 – Функціональної схеми системи

синтезовані провідні та напівпровідникові чорнила на основі наноточок [9], що в подальшому використовувалися як матеріал для друку струмопровідних доріжок та електричних компонентів.

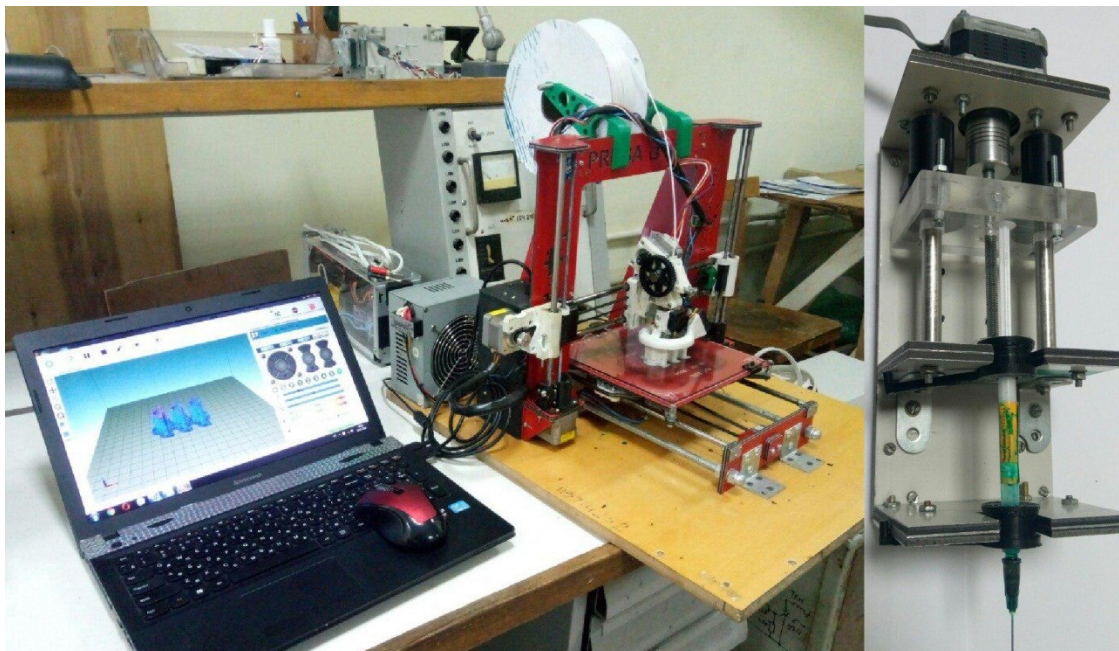


Рисунок 2.8 – Розроблені система 3D-друку та екструдер, що друкує струмопровідними чорнилами

Приклад друку струмопровідних доріжок та мультівібратор створений на основі роздрукованої електронної схеми наведено на рисунку 2.9.

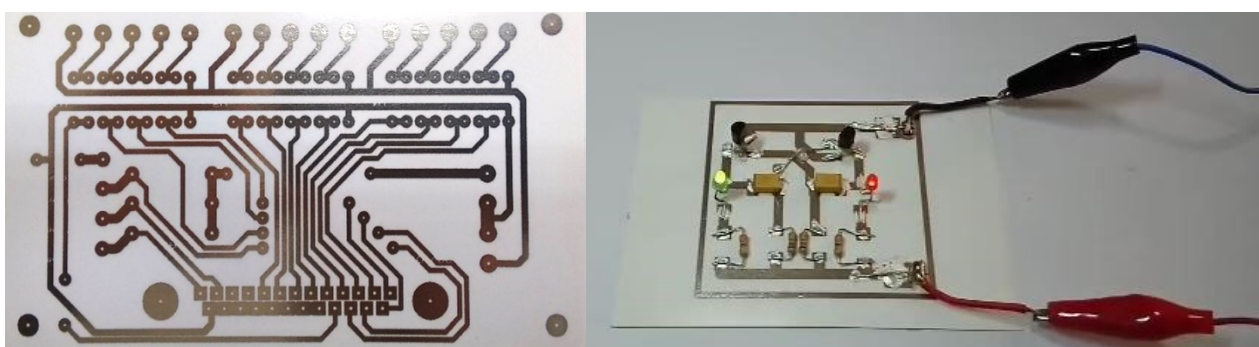


Рисунок 2.9 – Знімок прототипу струмопровідних доріжок, надрукованого з використанням наночорнил на основі срібла (а), та діюча модель мультівібратора зібрана з використанням надрукованої схеми (б)

ВИСНОВКИ

В даній роботі було розроблено електричну систему тривимірного друку для створення елементів корпусу виробу та струмопровідних доріжок і напівпровідникових елементів електронних схем.

1. Розроблені структурна та функціональна схеми двоекструдерної системи тривимірного друку, що друкує струмопровідними чорнилами та пластиковим філаментом.

2. Підібрана та обґрунтована елементна база двоекструдерної системи тривимірного друку. В ролі плати керування була вибрана MKS Gen V1.4. Виконавчими механізмами обрані крокові двигуни та термонагрівачі резистивного типу, в ролі драйвера крокових двигунів – драйвер DRV8825. В ролі датчиків граничного положення обраний оптичний датчик граничного положення TCST1103, а в ролі датчиків температури обрані терморезистори. Здійснений підбір та обґрунтування програмне забезпечення, що керує роботою системи друку «Repetier host».

3. На базі обраної компонентної бази були обчислені максимальна теоретична точність позиціонування та мінімально можливий об'єм екструзії струмопровідного матеріалу. Так, для розробленої системи з вибраною елементною базою максимальна теоретична точність позиціонування складає 0.3 мкм, а мінімально можливий об'єм екструзії струмопровідного матеріалу складає 3,8 мкл.

4. З використанням наночорнил на основі срібла методом 3D друку створений прототип струмопровідних доріжок мультівібратора та діюча модель цього електронного приладу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Пирогова Е. В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. — Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. — 560 с. — (Высшее образование). — ISBN 5-16-001999-5, ISBN 5-8199-0138-X
2. Schelly, C., Anzalone, G., Wijnen, B., & Pearce, J. M. (2015). "Open-source 3-D printing Technologies for education: Bringing Additive Manufacturing to the Classroom." *Journal of Visual Languages & Computing*.
3. <https://3dprint.com>
4. <https://www.voxel8.com>
5. <https://voltera.io>
6. E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro «Low-cost 3D printing for science, education & sustainable development» May 2013, First Edition ISBN 92-95003-48-9
7. «Самостоятельная сборка или покупка готового оборудования для конструирования. 3D-принтер. Часть 1-3». Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/masterkit/blog/253240/>
8. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т.1. Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотип.— Москва: Мир, 1984. — 601 с.
9. Опромінення за допомогою ND: YAG лазеру тонкої спреї-піролізної плівки CZTS для заліковування структурних дефектів / Шамардін А.В., Курбатов Д.І., Опанасюк А.С., Істратов М.Є., Рекунов Є.М. // Науково-технічна конференція «Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2017), Суми.