

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Чорноморський національний університет імені Петра Могили**

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ**

т. в. о завідувача кафедри АКІТ

кандидат технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ М. І. Сіделев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р

**МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПА-  
РАМЕТРІВ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РУХУ В ПРОСТОРИ**

Спеціальність «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

151 – МНР – 671.21617104

**Студентка**

\_\_\_\_\_ Т.В. Гекова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Керівник** кандидат техн. наук, доцент б.в.з.

\_\_\_\_\_ О.Є. Беліков  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Консультант** доктор техн. наук, професор, доцент

\_\_\_\_\_ О.М. Трунов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Миколаїв – 2022**

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

т. в. о завідувача кафедри АКІТ  
кандидат технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ М. І. Сіделєв

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р

## ЗАВДАННЯ

### на виконання магістерської наукової роботи

Видано студентці групи 671 факультету комп'ютерних наук

Гековій Тетяні Володимирівні

*(прізвище, ім'я, по батькові студента)*

1. Тема кваліфікаційної роботи

Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

Затверджена наказом по ЧНУ від « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р. № \_\_\_\_\_

2. Строк представлення кваліфікаційної роботи « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

3. Очікуваний результат роботи та початкові дані, якщо такі потрібні

Підвищення техніко-економічних показників автоматизованого устаткування FDM 3D принтерів за рахунок моделювання і формування набору параметрів на основі каркасних механічних структур пошарового паралельного руху із автоматизованим налагодженням точності переміщень РО малогабаритного обладнання.

4. Перелік питань, що підлягають розробці

1. Аналіз тенденцій розвитку сучасних типів конструкцій устаткування, кінематичних схем, моделей і методів синтезу нових елементів.

2. Формування критерії вибору раціональних компонок малогабаритного технологічного устаткування на рівні синтезу схем і конструкцій.

3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.

4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування виконавчого органу устаткування з МПС каркасної будови від кутових положень приводів.

5. Дослідити та розробити методика, конструкції для автоматизованого калібрування, оцінки похибки та підвищення точності МПС.

6. Запропонувати вузли та пристрої, що здатні підвищити жорсткість модуля паралельних переміщень.

5. Перелік графічних матеріалів: 16 слайдів презентації

6. Консультанти:

Консультант	Кафедра (організація)	Частина роботи
Беліков О.Є.	Автоматизація та КІТ	1 розділ
Беліков О.Є.	Автоматизація та КІТ	2 розділ
Трунов О.М.	Автоматизація та КІТ	3 розділ
Щербак Ю.Г.	Екології	4 розділ

Керівник роботи Беліков Олександр Євгенович

\_\_\_\_\_ (підпис)

Завдання прийнято до виконання Гековою Тетяною Володимирівною

\_\_\_\_\_ (підпис)

Дата видачі завдання «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

### виконання магістерської наукової роботи

Тема: Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

№	Найменування роботи	Початок	Закінчення	Примітки
1.	Розробка та затвердження завдання на виконання	09.09.2021	17.09.2021	
2.	Огляд літератури за темою роботи	20.09.2021	21.10.2021	
3.	Складання календарного плану	22.10.2021	25.10.2021	
4.	Аналіз предметної області	28.10.2021	11.11.2021	
5.	Розробка проектних рішень	15.11.2021	10.12.2021	
6.	Моделювання та конструювання	15.12.2021	10.01.2022	
7.	Робота над основною частиною	15.01.2022	01.05.2022	
8.	Розробка спеціальної частини з охорони праці	05.05.2022	01.06.2022	
9.	Оформлення та презентація	01.06.2022	07.06.2022	
10.	Відгук керівника	25.06.2022	25.06.2022	
11.	Попередній захист	24.06.2022	24.06.2022	
12.	Рецензування	27.06.2022	27.06.2022	
13.	Завершення оформлення	27.06.2022	27.06.2022	
14.	Захист кваліфікаційної роботи	30.06.2022	30.06.2022	

Розробила студентка Гекова Тетяна Володимирівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

Керівник роботи Беліков Олександр Євгенович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

## АНОТАЦІЯ

до магістерської наукової роботи

«Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі»

Студентки 671 Гекової Тетяни Володимирівни

Керівник: кандидат технічних наук, доцент кафедри АКІТ б.в.з. Беліков О.Є.

Процеси адитивного виробництва вважаються технологіями виробництва, які в середньостроковій перспективі змінять наш спосіб виробництва в багатьох сферах і навіть можуть змінити їх у деяких областях. У цій темі, за якою також з великою увагою стежать засоби масової інформації, слід принципово розрізнити високоточні та технічно складні виробничі процеси, які були встановлені в промисловості десятиліттями, і 3D-принтери за менш ніж 1000 євро для домашнього використання. Ідея про те, що домашні користувачі можуть виробляти складні вироби та запчастини або роздруковувати їх вдома за допомогою дешевих 3D-принтерів, які, по суті, засновані на пошаровому нанесенні розплавленого пластику, дуже мало ймовірна через недостатню технологічну зрілість.

Основною сферою застосування процесів адитивного виробництва в промисловості є конструювання прототипів у швидкому побудові моделей (швидке створення прототипів). Крім того, їх використовують для виробництва дуже дрібних і дрібних серій. Однак це переважно прості компоненти, по суті тверді компоненти, виготовлені з пластмас. Виготовлення більш складних компонентів, наприклад твердих компонентів у поєднанні з м'яким компонентом, таким як гумове ущільнення, на одному етапі виробництва можливе, але воно все ще використовується в меншій кількості.

Використання методів найбільш розвинене в аерокосмічній, автомобільній, електроніці та секторах стоматологічних технологій. Причина, чому процеси адитивного виробництва до цих пір могли зарекомендувати себе в першу чергу в цих галузях промисловості, пов'язана з їхніми головними перевагами: вони дозволяють полегшити конструкцію (аерокосмічна, автомобільна), інтегрувати

нові функції в компоненти (електроніка) та індивідуалізувати продукції (зубо-техніка).

Іншою перевагою є в основному безкоштовний дизайн елементів, що підлягають виготовленню, що часто навряд чи було б можливим за допомогою традиційних методів. Основними гальмуючими факторами для подальшого поширення технології є те, що функціонування систем адитивного виробництва вимагає як обґрунтованих, спеціальних знань з боку оператора, так і високих вимог до постійності роботи. Умови (постійна вологість тощо), тобто в цілому все ще дуже складні, хоча за останні два роки в системній технології було зроблено великі стрибки в якості. Крім того, якість компонентів, вироблених за допомогою адитивних виробничих процесів, значною мірою залежить від процесів і матеріалів, що використовуються. У деяких випадках після процесу адитивного виробництва все ще необхідна складна пост обробка, щоб забезпечити бажані властивості. Наприклад, компоненти просочуються або покриваються пластиковими смолами для їх зміцнення, або вони проходять подальший процес спікання. Крім того, більшість технологічних ланцюгів у виробництві ще не налаштовані на подальшу переробку компонентів, виготовлених за адитивною методикою.

Інвестиції в адаптацію виробничих ланцюгів є значними і все ще змушують багато компаній ухилятися. З огляду на це, цілком імовірно, що процеси адитивного виробництва в середньостроковій перспективі будуть далі поширюватися в промисловості, особливо в тих сферах застосування, в яких їх користь можна відносно легко оцінити. Так, наприклад, у галузях, які через свій продуктивний портфель мають високу частку виробництва запасних частин і мають утримувати відповідно велику кількість дорогих складів з інструментами для пост обробки. Як приклад можна навести промисловість побутової електроніки для виробництва «білих товарів».

**Метою** роботи є підвищення техніко-економічних показників автоматизованого устаткування FDM 3D принтерів за рахунок моделювання і формування набору параметрів на основі каркасних механічних структур пошарового

паралельного руху із автоматизованим налагодженням точності переміщень РО малогабаритного обладнання.

**Об'єктом** дослідження є технологічні процеси, що реалізують адитивні технології.

**Предметом** дослідження є моделі, методи моделювання процесів в елементах устаткування, що автоматизують адитивні технології.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі **задачі**:

1. Провести аналіз тенденцій розвитку сучасних типів конструкцій устаткування, кінематичних схем, моделей і методів синтезу нових елементів.
2. Сформувати критерії вибору раціональних компоновань малогабаритного технологічного устаткування на рівні синтезу схем і конструкцій.
3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.
4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування виконавчого органу устаткування з МПС каркасної будови від кутових положень приводів.
5. Дослідити та розробити методику, конструкції для автоматизованого калібрування, оцінки похибки та підвищення точності МПС.
6. Запропонувати вузли та пристрої, що здатні підвищити жорсткість модуля паралельних переміщень.
7. Теоретично дослідити статистичними методами та експериментально підтвердити працездатність і ефективність синтезованих конструкцій верстатів, для переліку обґрунтованих технологічних параметрів, що залежать від геометрії компоновання та інерційних навантажень.
8. Сформувати пропозиції по практичному впровадженню вузлів точного переміщення та удосконалення малогабаритних автоматизованих верстатів у виробництво і навчальний процес.

У висновках сформульовано основні наукові та практичні результати магістерської наукової роботи. У додатках наведено 3D моделі принтера.

Структура магістерської наукової роботи складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел – 40 та п'яти додатків. Загальний обсяг – 144 сторінок, з них 5 додатки на 9 сторінках, 26 таблиць, 50 рисунків.



## ANNOTATION

to the Master's scientific work

«Experimental study of kinematic parameters of robotic motion systems in space»

Student of group 671: Hekova Tetiana

Supervisor: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of AKIT Belikov O.

Additive production processes are considered production technologies that in the medium term will change our way of production in many areas and may even change them in some areas. In this topic, which is also closely monitored by the media, a distinction should be made between high-precision and technically complex manufacturing processes that have been established in the industry for decades, and 3D printers for less than 1,000 euros for home use. The idea that home users can produce complex products and spare parts or print them at home using cheap 3D printers, which are essentially based on layered application of molten plastic, is highly unlikely due to lack of technological maturity.

The main area of application of additive production processes in industry is the construction of prototypes in the rapid construction of models (rapid prototyping). In addition, they are used for the production of very small and small series. However, these are mostly simple components, essentially solid components made of plastics. It is possible to make more complex components, such as hard components in combination with a soft component such as a rubber seal, at one stage of production, but it is still used in smaller quantities.

The use of methods is most developed in the aerospace, automotive, electronics and dental technology sectors. The reason why additive production processes have so far been able to prove themselves primarily in these industries is related to their main advantages: they allow to facilitate design (aerospace, automotive), integrate new functions into components (electronics) and individualize products. dental technique).

Another advantage is the free design of the elements to be manufactured, which is often unlikely to be possible with traditional methods. The main inhibiting factors for the further spread of technology is that the operation of additive production systems

requires both sound, specialized knowledge of the operator, and high requirements for continuity. Conditions (constant humidity, etc.), ie in general, are still very difficult, although in the last two years in the system technology have made great leaps in quality. In addition, the quality of components produced by additive manufacturing processes depends largely on the processes and materials used. In some cases, after the additive manufacturing process, complex post-processing is still required to provide the desired properties. For example, the components are impregnated or coated with plastic resins to strengthen them, or they undergo a further sintering process. In addition, most technological chains in production are not yet set up for further processing of components made by additive methods.

Investments in the adaptation of production chains are significant and still force many companies to evade. Given this, it is likely that the processes of additive production in the medium term will continue to spread in industry, especially in those applications where their benefits can be relatively easily assessed. For example, in industries that, due to their product portfolio, have a high share of spare parts production and have to maintain a correspondingly large number of expensive warehouses with tools for post-processing. An example is the consumer electronics industry for the production of «white goods».

The aim is to increase the technical and economic performance of automated equipment FDM 3D printers by modeling and forming a set of parameters based on frame mechanical structures of layered parallel motion with automated adjustment of the accuracy of displacements of small equipment.

The object of research is the technological processes that implement additive technologies.

The subject of research are models, methods of modeling processes in the elements of equipment that automate additive technologies.

To achieve this goal, the following tasks were set:

1. To analyze the development trends of modern types of equipment structures, kinematic schemes, models and methods of synthesis of new elements.

2. To form criteria for selection of rational configurations of small-barite technological equipment at the level of synthesis of schemes and constructions.

3. Using a multilevel morphological approach to synthesize new designs of small machines based on a limited number of modules using the concept of frame bearing systems, MPS and the modular principle.

4. To establish mathematical dependences of calculation of positioning of executive body of the equipment from MПC of a frame structure on angular positions of drives.

5. Investigate and develop methods, designs for automated calibration, error estimation and improving the accuracy of the MES.

6. Suggest nodes and devices that can increase the stiffness of the module of parallel movements.

7. Theoretically investigate by statistical methods and experimentally confirm the efficiency and effectiveness of synthesized machine tools, for a list of reasonable technological parameters that depend on the geometry of the layout and inertial loads.

8. To form offers on practical introduction of knots of exact movement and improvement of small-sized automated machines in production and educational process.

The conclusions formulate the main scientific and practical results of the master's scientific work. The appendices show 3D printer models.

The structure of the master's scientific work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used - 40 and five appendices. The total volume is 144 pages, including 5 appendices on 9 pages, 26 tables, 50 figures.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
<b>1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ І ВПРОВАДЖЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ 3D ДРУКУ..</b>	<b>8</b>
1.1 Адитивні виробничі процеси в житті та промисловості .....	8
1.2 Огляд особливостей технічних рішень за даними літературних джерел та патентної інформації.....	24
1.3 Класифікація принтерів за кінематичною схемою будови .....	30
1.4 Завдання на проектування.....	34
Висновки до першого розділу.....	34
<b>2 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ, ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ АСК .....</b>	<b>36</b>
2.1 Сутність будови 3D–принтера та інноваційні особливості для удосконалення .....	36
2.2 Обґрунтування та вибір блоків 3D–принтера .....	46
2.3 Розвиток функціональної блок - схеми 3D–принтера, як основи адитивних технологій .....	65
2.4 Особливості реалізації електричної – принципової схеми 3D принтера ...	68
2.5 Особливості узагальненого алгоритму роботи 3D принтера та його удосконалення .....	80
2.6 Моделювання компонентів системи 3D принтера.....	87
2.6.2 Друк конструктивних компонентів (деталей) з пластику 3D принтера ...	90
Висновки до другого розділу .....	92
<b>3 ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АДИТИВНОГО 3D ПРИНТЕРА.....</b>	<b>94</b>
3.1 Розвиток комплексної моделі 3D принтера узагальненої конструкції.....	94
3.2 Розвиток електромеханічної моделі 3D принтера та моделювання у середовищі Matlab .....	102
3.3 Розробка методики оцінки альтернативних механізмів за оцінкою	

достовірності різниць між групами експериментальних вибірок .....	107
Висновки до третього розділу .....	114
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>	<b>116</b>
4.1 Оцінка умов праці в лабораторії адитивних технологій та 3D друку .....	116
4.2 Розрахунок загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами .....	120
4.3 Заходи безпека у надзвичайних ситуаціях .....	124
Висновки до четвертого розділу .....	127
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>129</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....</b>	<b>131</b>
Додаток А .....	136
Додаток Б.....	137
Додаток В .....	138
Додаток Г .....	139
Додаток Ґ .....	140
Додаток Д .....	142

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

АСК – автоматизовані системи керування

РО – робочий орган

CAD – Computer Aided Design (укр. комп'ютерне проектування)

FDM – Fused Deposition Modeling (укр. моделювання методом пошарового наплавлення)

SLS – Selective Laser Sintering (укр. селективне лазерне спікання)

## ВСТУП

Аддитивні виробничі процеси — це ті виробничі процеси, які можна використовувати для виробництва тривимірних виробів шляхом нанесення матеріалів шарами. Це дозволяє створювати об'єкти зі складною геометричною структурою, звідси й термін «3D-друк». Метод винайшов у 1983 році американець Чарльз Халл. На відміну від звичайних процесів, таких як свердління, фрезерування або токарні роботи, матеріали не видаляються, щоб дістатися до готового продукту, а наносяться шарами під контролем комп'ютера. Крім того, для виготовлення виробів не потрібно створювати складні форми, наприклад, за допомогою процесу лиття під тиском. Обробляються рідкі, порошкоподібні або тверді матеріали, які перетворюються на «двовимірні» шари за допомогою тривимірних, створених комп'ютером шаблонів проектування (файли CAD). Залежно від застосування та використовуваного процесу товщина цих шарів зазвичай становить від 0,001 до 0,2 мм [1-3]. Типовими обробленими матеріалами є пластмаси, метали, синтетичні смоли та кераміка. Крім того, можна обробляти папір, гіпс, бетон або шоколад. Останні розробки рухаються в напрямку друку дерева (комбінація дерево-пластик) і полістиролу. У біомедичних дослідженнях робляться спроби «роздрукувати» тканини людини або тварин, накладаючи живі клітини на каркас за допомогою друкуючої головки. Однак поки що клітини, створені таким чином, могли проіснувати лише дуже короткий час [2,4].

Процеси адитивного виробництва для переробки пластмас і металів для промислових цілей вже є найсучаснішими, і зазвичай їх можна придбати за п'ятизначну суму в євро. Використання інших матеріалів, таких як кераміка, наразі є ще рідше. Потенціал спостерігається в природних, органічних, біосумісних, біорозкладних матеріалах, а також у технічних термопластах, наноматеріалах або металевих композитах [5]. За цими технологіями вироблялися прототипи та вироби з перших спроб стерео літографії в середині 1980-х років. Процеси адитивного

виробництва використовуються в медицині протягом багатьох років, наприклад, у стоматології або для виготовлення протезів та імплантатів. Крім того, процеси знайшли свій шлях в інших галузях, таких як аерокосмічна, автомобільна та електронна. Адитивні процеси також все більше поширюються в інших сферах застосування, наприклад, для виробництва спортивного обладнання, ювелірних виробів або дизайнерських об'єктів. Розвиток можливих застосувань адитивних процесів багато в чому визначається закінченням терміну дії патентів. Після того, як у 2009 році закінчився термін дії основних патентів на моделювання плавленого осадження (FDM), це внесло значний внесок у створення 3D-принтера з відкритим кодом RepRap [3,4]. Як наслідок, поставки 3D-принтерів вирости, що призвело до різкого зниження цін, що з 2011 року зробило відповідні пристрої доступними для приватних осіб. Ще один важливий патент на селективне лазерне плавлення закінчився 28 січня 2014 року. Як результат, для цієї технології очікується подібний інноваційний поштовх, що, ймовірно, вплине насамперед на інновації, важливі для промислових застосувань.

**Метою** роботи є підвищення техніко-економічних показників автоматизованого устаткування FDM 3D принтерів за рахунок моделювання і формування набору параметрів на основі каркасних механічних структур пошарового паралельного руху із автоматизованим налагодженням точності переміщень РО малогабаритного обладнання.

**Об'єктом** дослідження є технологічні процеси, що реалізують адитивні технології.

**Предметом** дослідження є моделі, методи моделювання процесів в елементах устаткування, що автоматизують адитивні технології.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі **задачі**:

1. Провести аналіз тенденцій розвитку сучасних типів конструкцій устаткування, кінематичних схем, моделей і методів синтезу нових елементів.
2. Сформулювати критерії вибору раціональних компонувань



малогабаритного технологічного устаткування на рівні синтезу схем і конструкцій.

3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.

4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування виконавчого органу устаткування з МПС каркасної будови від кутових положень приводів.

5. Дослідити та розробити методику, конструкції для автоматизованого калібрування, оцінки похибки та підвищення точності МПС.

6. Запропонувати вузли та пристрої, що здатні підвищити жорсткість модуля паралельних переміщень.

7. Теоретично дослідити статистичними методами та експериментально підтвердити працездатність і ефективність синтезованих конструкцій верстатів, для переліку обґрунтованих технологічних параметрів, що залежать від геометрії компонування та інерційних навантажень.

8. Сформулювати пропозиції по практичному впровадженню вузлів точного переміщення та удосконалення малогабаритних автоматизованих верстатів у виробництво і навчальний процес.

# **1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ І ВПРОВАДЖЕННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ 3D ДРУКУ.**

## **1.1 Адитивні виробничі процеси в житті та промисловості**

### **Виробництво зразків компонентів та інструментів**

Процеси адитивного виробництва вже використовуються в багатьох галузях промисловості. Ступінь зрілості та зручність використання технології сильно відрізняються залежно від сектора. Сучасний стан варіюється від перших експериментальних підходів до виходу на ринок до стандартних процесів, які були встановлені протягом багатьох років.

### **Швидке створення прототипів**

Процеси адитивного виробництва переважно використовуються для швидкого конструювання корисних моделей (швидке створення прототипів). Вони дозволяють створювати прототипи швидко і дешево. Це було звичайним явищем на цьому ранньому етапі розробки продукту протягом трьох десятиліть. В принципі, процеси можна використовувати в усіх секторах, в яких розробляються прототипи. Wohlers Associates<sup>1</sup>, американська консалтингова фірма [6], навіть бачить, що обсяг ринку адитивних виробничих процесів у швидкому створенні прототипів зростає: з 1,5 мільярда доларів США в 2012 році до 5 мільярдів доларів США в 2020 році.

### **Швидка оснастка**

Процеси адитивного виробництва використовуються у виробництві інструментів і форм протягом багатьох років (швидка оснастка). Це означає, що інструменти для звичайного масового виробництва можуть виготовлятися так само, як і спеціальні інструменти. Наприклад, для виробництва Opel Adam по всій Європі використовується близько 40 різних складальних інструментів, виготовлених адитивно, з пластику [3,6]. Виготовлення інструментів і форм є одним з найдорожчих

і трудомістких етапів у всьому виробничому процесі. На додаток до можливої економії коштів та часу залежно від застосовуваного адитивного процесу в порівнянні зі звичайними виробничими процесами (наприклад, лиття під тиском), головною перевагою адитивного виробництва є те, що в інструменти можуть бути вбудовані додаткові функції, такі як канали охолодження в прес-формах [7], які забезпечують кращі термічні властивості і, таким чином, триваліший термін служби інструментів і форм.

### **Промислове застосування в перших галузях промисловості**

Процеси адитивного виробництва в даний час використовуються для виробництва функціональних компонентів і виробів (швидке виробництво), в основному в аерокосмічній промисловості, автомобільна промисловість, електроніка, а також медичні та стоматологічні технології.

Властивості та переваги адитивних виробничих процесів [8] особливо важливі в цих галузях. До них належать:

- Об'єкти можна створювати виключно відповідно до функціональних критеріїв використання; «дизайн для виробництва» більше не потрібен.
- Можна реалізувати максимум налаштувань.
- Можливі форми, які неможливо реалізувати за допомогою звичайних виробничих процесів або можуть бути реалізовані лише з великими зусиллями.
- Якщо в звичайних виробничих процесах об'єкти обробляються в кілька етапів на різних машинах, адитивні процеси виробництва дозволяють виготовляти компоненти за допомогою одного пристрою.
- Різноманітність матеріалів (металів, кераміки, полімерів) для лазерних адитивних виробничих процесів достатня для реалізації різноманітних і складних властивостей продукції.
- Можна досягти високого рівня ефективності використання матеріалів у виробництві.

У лазерних системах адитивного виробництва оптичні системи можуть бути

безпосередньо інтегровані для контролю якості в режимі реального часу, які безпосередньо використовують світло лазера, що випромінюється під час «процесу друку».

Залежно від застосовуваного адитивного процесу виготовлення, висока точність (допуски менше 30 мікрон) і висока якість (щільність матеріалу металевих елементів становить 99% сировини [2]; отже, лазерне плавлення не створює в матеріалі порожнин або подібних) бути досягнуто.

Поширеними технологіями в області адитивних процесів виробництва є а) процеси екструзії та б) процеси на основі порошку. У процесах екструзії, в першу чергу, пластикові нитки продавлюються через нагрівальне сопло та наносяться в розплавленому вигляді (залежно від використовуваного пластику при приблизно 200 градусах Цельсія) на бажану поверхню об'єкта [7]. Найвідомішим процесом екструзії є моделювання плавленого осадження (FDM fusion layering).

У процесах на основі порошку подрібнені матеріали наносяться та сплавляються в бажаному місці за допомогою лазера. Лазерування підходить для обробки як пластмас (насамперед лазерне спікання), так і металів (насамперед лазерне променеве плавлення, електронно-променеве плавлення).

Труднощі, пов'язані з широким використанням процесів адитивного виробництва, в даний час полягають у тому, що кожен із цих процесів має як переваги, так і недоліки. Наприклад, для досягнення високої точності у виготовленому компоненті можна використовувати стерео літографія або струменеве струменеве [8]. У той же час, однак, обидва методи не мають задовільної швидкості виробництва. Стерео літографія також не має можливості обробляти різні кольори. З одноструменним струменем обмежується не тільки вибір матеріалу, а й розмір компонентів для друку. Хоча лазерне спікання та лазерне плавлення також досягають високої точності, а також можна використовувати широкий спектр матеріалів, існують обмеження щодо розміру та маси. Крім того, поверхня тут погана, а ціна системи дуже висока. Деякі процеси адитивного виробництва все ще вимагають складної

пост обробки для забезпечення бажаних властивостей [9,10]. Наприклад, компоненти просочуються або покриваються пластиковими смолами для їх зміцнення, або вони проходять подальший процес спікання.

Нижче наведено огляд усіх галузей застосування [1,2] процесів адитивного виробництва з типовими прикладами застосування, крім швидкого створення прототипів. Для повноти обговорюються новітні сектори, а також можливі застосування та випробування в інших секторах, у науці чи військових. Також коротко окреслено перспективи майбутнього в галузі медицини, які останнім часом все частіше обговорюються в ЗМІ, наприклад, «друк» функціональних органів.

### **1.1.1 Аерокосмічна промисловість**

Аерокосмічний сектор знаходиться на передньому краї індустрії користувачів і вважається сферою, в якій процеси адитивного виробництва змогли розвинути свій найбільший потенціал на сьогоднішній.

Адитивні процеси становлять особливий інтерес в авіаційній промисловості, оскільки їх можна використовувати для виробництва складних, високоякісних легких компонентів з новими властивостями та функціями за низьких витрат [1]. Ці процеси в основному використовуються для компонентів, які призводять до економії палива за рахунок зменшення ваги або зменшення викидів шуму завдяки новим методам проектування.

Прикладом цього є насадка пальника, розроблена компанією General Electric3, яка може бути виготовлена за допомогою технології лазерного плавлення металу та, серед іншого, буде використовуватися в реактивних двигунах Airbus A320 [6]. У порівнянні з традиційними форсунками пальників, вони складаються лише з одного компонента, який є легшим, стабільнішим і стійкішим до високих температур. За даними Klemp (2014), це зменшує споживання палива на 3%. Відповідальний генеральний менеджер з електрики Грег Морріс також наголошує на спрощенні виробництва: «Кожен принтер замінює до 70 звичайних

верстатів» [1,6].

Майбутні проблеми для подальшого технологічного проникнення до адитивних виробничих процесів полягають не в виробництві та створенні вартості, а в запуску на ринок через суворі вимоги до сертифікації, які є поширеними в авіації.

Тим не менш, лідер німецького ринку MTU Aero Engines<sup>4</sup> оголосив у березні 2014 року, що це одна з перших компаній, яка використовує адитивні процеси для масового виробництва промислових концентраторів ендоскопів з нікелевим покриттям для нового Airbus A320neo [1,6]. З 2015 року планується подальше розширення виробничих потужностей на основі технології селективного лазерного плавлення присадок.

Під час польоту влітку 2014 року NASA<sup>5</sup> відправило 3D-принтер на міжнародну космічну станцію МКС. Ідея полягає в тому, щоб мати можливість роздрукувати запчастини в космосі безпосередньо на місці. По-перше, функціональність 3D-принтера слід перевірити в невагомості. Подальші міркування полягають у оснащенні майбутніх місій на Марс 3D-принтерами, які використовуватимуть біополімери, вироблені в біореакторах, для виробництва будівельних сегментів для бази Марса та запасних частин за потреби [1,2]. Таким чином, потребу в транспортуванні будівельних матеріалів можна було б зменшити на кілька тон.

З 2013 року ESA<sup>6</sup> також перевіряє, чи можна зробити місячну базу з місячних матеріалів за допомогою адитивних процесів виробництва. Це може спростити логістичні проблеми в разі можливої колонізації Місяця. Однак 3D-принтери все ще найкраще працюють при кімнатних температурах і не адаптовані до умов на Місяці.

### **1.1.2 Автомобільна промисловість**

Легкі компоненти також необхідні в автомобільному секторі, тому використання адитивних процесів виробництва тут добре підходить. Процеси адитивного виробництва використовуються для багатьох застосувань з 2000 року [1,5].

Ще до серійного виробництва мініатюрні моделі та компоненти виготовляються в оригінальних розмірах для аналізів та випробувань. Крім того, є програми для виробництва окремих деталей для автомобілів класу люкс або ретро.

Сподіваємося не тільки на виробництво прототипів або окремих деталей, але й на друк модулів і, в майбутньому, навіть на комплектні кузови автомобілів у серійному виробництві. Проте виробництво комплектних кузовів автомобілів із застосуванням адитивних процесів виробництва — це бачення, яке ще далеко від промислового застосування. Тим не менш, процеси адитивного виробництва вже впливають на розробку в автомобільній промисловості, наприклад, щодо оптимізації кузовів для захисту пасажирів: за допомогою адитивного виробництва компанія EDAG Engineering AG<sup>7</sup> з Fulda вперше створила високоякісний виготовлено складну кузовну скульптуру з концепцією «Genesis» [6], яка заснована на біонічному малюнку панцира черепахи і може закласти основу для нових стандартів безпеки в автомобілях.

Восени 2014 року Local Motors<sup>8</sup> оголосила про перший друк повністю робочого автомобіля. Названий «Strati» (італійською «зміни») автомобіль з 49 частин був побудований компанією Local Motors за 44 години (звичайний автомобіль складається з 5000 деталей). Однак «роздрукували» лише шасі та кузов, вони зроблені з армованого вуглепластиком. Усі інші окремі деталі, такі як акумулятор, двигун тощо, виготовляються традиційно. Електромобіль Strati розвиває максимальну швидкість 80 км/год. Наразі виробник намагається отримати дозвіл на дорогу від органів дорожнього руху, щоб мати можливість зробити перші замовлення і таким чином почати виробництво до кінця 2015 року. Очікується, що автомобіль коштуватиме від 18 000 до 30 000 доларів.

### **1.1.3 Електроніка**

Через їх використання в пристроях з коротким інноваційним і життєвим циклом, електронні компоненти доводиться знову і знову адаптувати. Тому значні

сфери застосування існують у виробництві інструментів для виготовлення електронних компонентів і в конструюванні самих електронних частин. У міру розвитку технології адитивні процеси виробництва також можуть використовуватися для виробництва тривимірних носіїв схем, які досі зазвичай виготовляється за допомогою процесів лиття під тиском. Носії схеми складаються з тривимірного пластикового компонента, на який спочатку наноситься схема за допомогою лазера, а потім металізується [10-12]. Несучі тривимірних ланцюгів можна використовувати різними способами, насамперед через їх високий потенціал мініатюризації, наприклад, в антенах, датчиках або медичних техніках.

Крім побудови схем на пластикових носіях, також очікується використання адитивних процесів для побудови схем на металевих корпусах/ В даний час новий процес дає можливість використовувати металеві тіла як носії ланцюга, на які наноситься порошкове покриття та структурується за допомогою лазера.

Іншими сферами застосування процесів адитивного виробництва є виробництво RFID-чіпів або MEMS (мікроелектромеханічних систем) [13].

Бачення використання адитивних виробничих процесів у сфері електроніки полягає в тому, щоб вбудувати електронні функції в компоненти з дуже складною геометрією і таким чином виробляти компоненти з інтегрованою електронікою. На додаток до несучої структури, мікроелектронні структури (кабелі, конденсатори, трансформатори, резистори, схеми) мають бути пошарово побудовані одночасно. Наприклад, компанія WZR Ceramic Solutions GmbH пропонує процес, у якому використовуються фарби з металевими або керамічними частинками [13].

#### **1.1.4 Медична техніка, протезування, медичні засоби**

Процеси адитивного виробництва вже доступні на ринку та впроваджені в технології стоматологічних і слухових апаратів. Для виробництва індивідуально адаптованих слухових апаратів, слухові проходи вимірюються лазером, а внутрішня частина, адаптована до вуха, адитивно виготовляється.



З 2000 року також стало можливим цифрове 3D-сканування внутрішньої частини ротової порожнини, щоб використовувати 3D-принтери для виготовлення керамічних зубних протезів на цій основі. Однак у порівнянні зі звичайним виробництвом (фрезеруванням) цей процес має той якісний недолік, оскільки під час адитивного виробництва утворюються шорсткі поверхні, що робить необхідним подальшу обробку. У сфері стоматологічних технологій вже є на ринку перші пристрої [8], за допомогою яких можна рентабельно виготовляти приблизно 450 коронок на день, тоді як звичайні методи можна використовувати лише для виготовлення приблизно 20 коронок на день і пристрій. Деякі з цих машин продають баварські компанії EOS GmbH<sup>10</sup> і Concept Laser GmbH<sup>11</sup> [13]. Сфера стоматологічних технологій розглядається як інноваційний драйвер для адитивних виробничих процесів, оскільки в майбутньому все більше і більше зуботехнічних лабораторій використовуватимуть її для виготовлення цілих зубів, мостів, коронок і стоматологічних моделей. Sackmann посилається на дослідження інституту маркетингових досліджень IDTech, згідно з яким очікується, що галузь зросте в п'ять разів протягом наступних десяти років.

У протезуванні та імплантології процеси адитивного виробництва все ще знаходяться на більш ранній стадії розвитку (Ott 2014), але вже мають деякі сфери застосування. У сфері заміщення кісток вже використовуються імплантати, виготовлені за допомогою адитивних процесів виробництва, наприклад, для реконструкції кісток черепа або щелепи після переломів, спричинених нещасними випадками або після пухлинних захворювань. Наприклад, у 2014 році вперше була пересаджена штучна тубетейка, виготовлена адитивно з пластику. Близько трьох років у Німеччині все частіше використовуються колінні з'єднання, виготовлені на замовлення, виготовлені з пластику (поліетилену). У Німеччині клініка Дортмунда є піонером, щороку імплантуючи близько 250 адитивно виготовлених колінних суглобів. Для цього дані комп'ютерної томографії колінного суглоба надсилаються до Бостона, де виготовляють протез [6]. Ціна на цю процедуру лише

трохи вища, ніж на протез колінного суглоба, який не адаптований індивідуально, і становить близько 1000 євро. Проте ще невідомо, якою мірою індивідуальний протез колінного суглоба сприятиме кращому відновленню, як очікувалося. Іншими прикладами заміників кістки, які вже були трансплантовані, є тіла хребців та протези стегна. Крім того, існують компанії та проекти, які займаються ортопедичними вставками для взуття. Інші цілі – це передусім недорогі протези рук, кистей або ніг, наприклад, для жертв збройних конфліктів або людей у країнах, що розвиваються, при цьому плани будівництва доступні як відкритий код, а протези, виготовлені таким чином, коштують лише кілька 100 доларів США повинні коштувати[4]. Однак поки що такі міркування стосуються єдиного благодійного проекту, фінансованого компанією Not Impossible Labs<sup>17</sup>. Наскільки ця ідея може бути профінансована та реалізована на місці, поки неясно.

### 1.1.5 Архітектура

У 2013 році голландська архітектурна фірма Universe Architecture<sup>18</sup> оголосила, що побудує будинок із застосуванням адитивних процесів виробництва. Будинок має форму нескінченної петлі у вигляді вісімки. Для цього потрібно роздрукувати кілька секцій, кожна розміром 6 на 9 метрів, з яких буде збирати будинок. Дуже великий 3D-принтер під назвою D-Shape [6], який використовується для цієї мети, використовує суміш піску та сполучного речовини, яка з'єднується під час процесу друку, утворюючи матеріал, схожий на мармур. Вартість одного будинку оцінюється в чотири-п'ять мільйонів євро.

В інших країнах також проводяться дослідження щодо будівництва цілих будинків із застосуванням адитивних процесів виробництва. Наприклад, Університет Південної Каліфорнії співпрацює з компанією Contour Crafting над будинками, які теоретично можна роздрукувати протягом 24 годин. Повинна бути можлива значна економія матеріалів, оскільки немає відходів. Крім того, можна було б прискорити процес будівництва та зменшити кількість нещасних випадків на

виробництві в будівельному секторі [1,5]. Будівництво житла в бідних країнах або в кризових районах, створення аварійних притулків після стихійних лих або колонізація космосу описані як можливі сфери застосування.

У Китаї вже вдалося надрукувати десять дуже маленьких будинків за один день. Будинки, виготовлені компанією Shanghai WinSun Decoration Design and Engineering, мають лише один поверх, площею близько чотирьох на шість метрів і коштують близько 4800 доларів США. Для цього 3D-принтер виробляє компоненти із переробленого будівельного матеріалу, який є занадто рідким, які нагадують будівельні блоки порожнини та забезпечують отвори для вікон, водопроводу або ліній електропередач [2,8]. Основною перевагою адитивного виробництва порівняно зі звичайними процесами є уникнення.

Можна помітити, що все більше архітекторів використовують нові можливості адитивного виробництва для своїх проектів. Наприклад, нью-йоркський архітектор Кушер планує удосконалити 3D-принтер D-Shape, розроблений Енріко Діні, який базується на процесі лазерної стереолітографії, щоб реалізувати великий проект. Повна нерухомість з 4-кімнатним будинком, басейном та басейном планується реалізувати в кілька етапів будівництва. Перш за все, басейн слід «роздрукувати», оскільки це найпростіше реалізувати за допомогою D-Shape [6]. Для друку будинків D-Shape необхідно технічно вдосконалити, тут проблема полягає в друкуванні даху та використанні арматурної сталі. У планах надрукувати окремі складові будинку розміром з контейнер (довжина краю п'ять метрів). Інші розміри неможливо реалізувати через розміри 3D-Shape [6].

В основному, потенціал адитивного виробництва в будівельному секторі полягає не тільки в розширенні творчих можливостей в архітектурі, а й у зменшенні витрат на будівництво будинків у майбутньому в міру подальшого розвитку технологій.

Дизайн, меблева промисловість, мистецтво:

Деякі дизайнери створюють і продають дизайнерські предмети, такі як

меблі або лампи, виготовлені за допомогою адитивного виробництва. Відповідно, в останні роки меблі, виготовлені аддитивно, все частіше представлені на ярмарках меблів та дизайнерів. За допомогою адитивного виробництва об'єкти виготовляються безпосередньо, або виробляються литі з піску форми, які служать формами для виробництва дизайнерських меблів (наприклад, від баварської компанії Voxel jet). Адитивне виробництво також може створювати абсолютно нові конструкції, які неможливо створити за допомогою звичайних методів виробництва.

Одним із піонерів у цій галузі є амстердамська компанія «The Freedom Of Creation»<sup>22</sup>, яка була заснована в Гельсінкі в 2000 році. Компанія продає предмети з різноманітними філігранними структурами, такими як скульптури, чохли для мобільних телефонів, меблі, лампи та ювелірні вироби [5]. У 2010 році бельгійська компанія Materialize представила перші предмети меблів з 3D-принтера на різних ярмарках. Пізніше компанія заснувала дочірню компанію i.materialise, яка співпрацює з дизайнерами. Об'єкти, розроблені дизайнерами з різних місць по всьому світу, можна купити тут через інтернет-сайт, або їх також можна виготовити за власним дизайном.

Берлінський стартап BigRep, заснований у 2014 році, розробив 3D-принтер об'ємом 1,3 м<sup>3</sup>, щоб також можна було друкувати великі об'єкти, такі як стільці, журнальні столики чи тумби. Через все ще високу вартість пропозиція в першу чергу орієнтована на архітекторів та дизайнерів. Використовуються різні матеріали, як-от лайдер – суміш полімерів і деревних волокон, що зовні дуже схожа на деревину, – або цегла, яка створює шорстку поверхню, порівнянну з пісковиком [1,7]. Як повідомляється на сайті компанії, перевага віддається переробці полімерів, які переробляються.

Інший приклад — американська компанія 4AXYZ, яка спеціалізується на адитивному виготовленні дерев'яних меблів. Для цього компанія використовує процес друку для нанесення шарів деревних волокон для створення тривимірних фігур. Цей процес також можна використовувати для додавання додаткових

елементів до існуючих конструкцій меблів. Крім того, в меблі можна інтегрувати електроніку. Структура добавок призначена для збереження значної частини (до 50%) відходів, які виникають у звичайних меблевих конструкціях.

Процеси адитивного виробництва також стають все більш популярними в мистецтві. Численні художники пропонують свої скульптури, виготовлені з нього, на продаж обмеженими тиражами. Також існують форуми користувачів для художнього використання можливостей адитивного виробництва.

### **1.1.6 Виробництво іграшок, комп'ютерних ігор та колекціонування**

Зараз численні компанії пропонують можливість друку реалістичних фігур, для яких необхідно виконати 3D-сканування. На даний момент фігура висотою 15 см коштує близько 200 євро. Деякі приклади – компанії twinkind (Гамбург), Botspot28 (Берлін), 3D Generation29 (Дортмунд), Mr. Make30 (Карлсруе), Figurdruck (Tarp у Шлезвіг-Гольштейн), Omote (Харадзюку, Японія) або Kloneworld31 (Сінгапур).

Ще одна сфера застосування — колекційні фігурки та аватари. Компанія Chimperator, наприклад, пропонує колекційну 3D фігурку музиканта Кро за 119 євро. Комп'ютерна гра Evolve, яка вийшла в 2014 році, заздалегідь рекламувала, що ігрові персонажі роздруковуються на домашньому 3D-принтері, для скачування файли конструкції якого доступні. З 2013 року онлайн-гра «World of Warcraft» також пропонує можливість створення власних аватарів у вигляді 3D-фігур [1,6]. На веб-сайті Sculpteo можна придбати 3D-фігури з найрізноманітнішими темами та матеріалами. Це система shop-in-shop, тобто платформа, на якій інші продавці пропонують власні моделі. Роздруківка виконується Sculpteo, ви також можете роздрукувати власні шаблони.

В ігровій сцені 3D-принтер також використовується для виготовлення або створення власних джойстиків. Наприклад, на веб-сайті Yeg35 близько 150 відповідних файлів дизайну доступні для безкоштовного завантаження.

### 1.1.7 Фільм і ТБ

Аддитивні процеси використовуються в кіно і телебаченні, наприклад, коли йдеться про виробництво реквізиту (наприклад, масок, броні, зброї), декорацій, (моделей) транспортних засобів або концептуальних моделей. Компанія Kerpen Kubikwerk/Fabrics або британська компанія Propshop Modelmakers пропонують рішення для цього. Зроблені таким чином моделі дуже підходять для фільмів зі спецефектами. Наприклад, баварська компанія Voxeljet39 створила три моделі спортивного автомобіля для фільму про Джеймса Бонда «Skyfall» [1,6].

### 1.1.8 Текстильна та швейна промисловість

У цивільному секторі текстилю та одягу можливе використання аддитивного виробництва зараз більше зосереджено на експериментальних та художніх застосуваннях. У військовій сфері розробляється одяг та захисне спорядження для солдатів для підвищення комфорту та безпеки.

Є такі компанії, як feetZ або Three Over Seven, які виготовляють взуття за допомогою адитивних процесів виробництва. Іншим прикладом є стартап-компанія Joufit, яка має намір друкувати індивідуальні бюстгальтери з вбудованими біосенсорами як пристрої для відстеження здоров'я або фітнесу [8]. Оскільки бюстгальтери носяться близько до тіла, вони добре підходять для розміщення біосенсорів.

Наприклад, початкові підходи досліджують ідею друку текстилю на основі волокна. Британська компанія Tamicare, наприклад, експериментує з різними типами рідких полімерів (латекс, силіцій, поліуретан, тефлон) і змішує їх з текстильними волокнами з бавовни, віскози та поліаміду в процесі друку. Вже розроблена дихаюча тканина під назвою Cosyflex, яка складається з суміші бавовняних волокон і латексу. Матеріал є розтяжним і біологічно розкладним і призначений для використання, наприклад, у виробництві одноразових трусів.

У проєкті «Втрачений багаж» фінський дизайнер Янне Кіттанен експериментує з ідеєю роздрукувати шафи в готелях, наприклад, якщо мандрівник втратив свою валізу або хоче подорожувати лише на легкій. Промисловий дизайнер Джошуа Харріс використовує подібний підхід із «Принтером для одягу», який, як кажуть, може роздрукувати одяг вдома на основі «викрійок» з інтернет-магазину. Потрібний для цього текстиль має бути доставлений додому в картриджах для принтерів, а також може складатися з волокон старого одягу [1,8]. Наприклад, старий одяг можна переробити екологічно чистим способом, використовуючи процеси адитивного виробництва.

Голландський модельєр Іріс ван Херпен пробує нові дизайни у вигляді одягу з принтом, який, однак, є більше художнім, ніж практичним. Художниця Анна Вільгемі надрукувала модні аксесуари на основі танків, які носять американські регбісти.

### **1.1.9 Промисловість спортивного обладнання**

Використання адитивних виробничих процесів у спортивному секторі в першу чергу спрямоване на виготовлення спортивного обладнання та аксесуарів, які служать для запобігання травмам і мають сприяти підвищенню комфорту носіння за рахунок індивідуалізації продукції. Типовими сферами застосування є індивідуальне спортивне та тренувальне взуття, лижні кріплення, шоломи та протектори.

У пресі є численні повідомлення про конкретні приклади використання: клюшки для гольфу, дошки для серфінгу, рами велосипедів, лижні сани, титанові підкови для скакових коней, футбольні сумки, підошви для взуття тощо. Лижні сани, згадані в списку, були розроблені Інститутом механіки матеріалів Фраунгофера IWM44 для біатлоністки Мартіна Фейга, який виступав з ними на Паралімпіаді [9].

### **1.1.10 Харчова промисловість**

Наразі у всьому світі розробляються близько одинадцяти різних пристроїв для «друку» продуктів, таких як макарони, м'ясо, шоколад, печиво, хлібобулочні вироби або цілі страви, такі як піца, більшість з яких все ще знаходяться на стадії прототипу. Згідно з Technology Review, харчовий принтер від стартап-компанії Natural Machines, що базується в Барселоні, був єдиним продуктом, який повинен був з'явитися на ринку в 2014 році за ціною 1000 євро. , але вихід на ринок все ще відкладено [7,11]. Сировиною є тісто або овочеve пюре з картриджів з нержавіючої сталі. Вони знаходяться під тиском і можуть окремо нагріватися, щоб їжа виходила з принтера, готова до подачі.

У дослідницькому проєкті, наділеному 125 000 доларів США, NASA розробляє харчовий принтер разом з компанією Systems and Materials Research Corporation в Техасі. Принтер має дванадцять змінних картриджів, які містять порошкоподібну їжу.

### **1.1.11 Наука**

Цікава область застосування адитивних виробничих процесів з'являється в найширшому сенсі в області навчання та навчання, в якій реалістичні 3D-моделі створюються для практичних цілей, наприклад, для студентів-медиків, які навчаються, або для навчальних цілей перед майбутні операції [1,10]. Таким чином можна створити прозорі моделі тіла, які реалістично імітують різну силу тканин і органів. Також можна було б перевірити операції на «роздрукованих» реалістичних органах. Таким чином, хірургічні кроки, які раніше планувалися лише практично, можна було б зрозуміти легше та краще. Армія США, наприклад, планує виготовити моделі типових ран, щоб лікарі могли тренуватися на них.

Симуляція хірургічних процедур на моделях з 3D-принтера не нова. З 2008 року складні хірургічні операції на черепі чи вусі можна реально перевірити.



Компанія Phacon і Karl Storz продає навчальний набір з кількох компонентів: моделлю черепа, програмного забезпечення для моделювання та п'яти різних модулів кам'янистої кістки, які представляють індивідуальні анатомії людської кістки [8]. Ці модулі також містять ряд оптико-електричних датчиків, які реєструють, сигналізують і документують травми під час навчання.

Наприклад, адитивне виробництво також знаходить свій шлях у палеонтології. Скам'янілості з відбитками кісток динозаврів скануються за допомогою комп'ютерної томографії, щоб створити моделі з даних за допомогою 3D-принтерів. Дослідники припускають, що 3D-друк стане стандартним інструментом у палеонтології через кілька років [11].

У галузі історії мистецтва статуї, наприклад, для церков, можна реконструювати та виготовляти за допомогою адитивних процесів виробництва. Музеї також використовують ці можливості для відтворення таких артефактів, як рельєфи.

### **1.1.12 Бачення майбутнього в медицині**

Бачення майбутнього в медицині стосуються можливості «роздрукувати» функціональні органи. Так звані «біопринтери» повинні дозволити в майбутньому пошарово наносити живі клітини в процесі друку для виробництва функціональних органів. Для цього окремі клітини накладаються на гелеподібний каркас або інші допоміжні речовини, що призводить до грубих клітинних агрегацій, які мають розвинути в органи через додавання факторів росту та через власні біологічні процеси. Інтеграція кровоносних судин організму в клітинну мережу, яка постачає тканину, що розвивається, все ще має серйозні проблеми [11-13]. Крім того, для виробництва більш складних органів, дуже різні типи клітин мають бути попередньо культивовані в культурах клітин у дуже тривалому процесі, перш ніж вони можуть бути використані для «друку». Оскільки для цього потрібне дуже дороге обладнання (приблизно 0,5 мільйона євро), дослідження наразі обмежені кількома інститутами.

Перші спроби створити серце вже почалися. Однак, ймовірно, знадобляться десятиліття досліджень, перш ніж таке серце можна буде пересадити.

Навіть штучно виготовлена шкіра далека від функціональності справжнього органу, як показали експерименти на мишах у Ганноверському лазерному центрі. Однак експерименти на свинях в Інституті регенеративної медицини Уейк-Форест вже вдалися до пальпації ран за допомогою лазерного сканера, щоб потім нанести клітини шкіри безпосередньо на пошкодження за допомогою 3D-друку [6,11-13].

Однак деякі дослідники критично ставляться до того, чи можна взагалі коли-небудь штучно виробляти складні органи. Поки що з органічного матеріалу виготовляли лише прості органи та структури, такі як серцеві клапани, ніс і вуха.

## **1.2 Огляд особливостей технічних рішень за даними літературних джерел та патентної інформації**

Проведення аналізу відомих патентів на технічну модель, як базовий та відомий усім інженерам обов'язковий процес при бажанні модернізувати існуючу, або створити принципово нову автоматизовану систему для створення з пластику об'ємної моделі будь-якої складності та з наявного матеріалу для цього [1,3]. Пошуковці патентів на корисну модель, знайшовши патенти конкретної тематики можуть виділити конкурентні переваги кожної задекларованої системи для 3D друку, та ознайомитися з тим, як саме інші (попередні) покоління інженерів вирішували загальновідомі проблеми, при здійсненні друку моделей, а також проаналізувати тенденції поступового розвитку адитивних технологій в цілому.

Проведення патентного пошуку дозволяє досягти головної мети, а саме провести модернізацію роботизованої системи для друку об'ємних моделей, а в кращому випадку провести розробку командою винахідників автоматизованої системи, для швидкого друку моделей різного розміру, точність друку, яких вразить всіх технічних спеціалістів.

3D-принтер здійснює друк самотвердіючими матеріалами (смоли, віск,

розплавлені метали, розплавлені пластики, скло)

Відомий 3D-принтер для пошарового створення (виготовлення) об'ємних моделей з самостверджуючих матеріалів (деталей), який в своїй конструкції має:

- рухливу друкуючу головку – зафіксовану (закріплену) саме на кронштейні з передбаченою можливістю зміни положення (переміщення) виключно (тільки) у вертикальному напрямі, а саме вздовж осі Z (поступове переміщення виключно по осі Z);

- каретку – яка забезпечена модулем переміщення її виключно у визначеній площині, а конкретніше по осі X;

- робоча область або робочий стіл принтера – закріплений разом з автономним модулем, який проводить рух столу (переміщення), що визначається розрахунками у площині Y (переміщення здійснюється вздовж осі Y);

- контролер – обраний послідовно виконувати керування (управління) процесом поступового нашарування матеріалу (пошарового виготовлення) на робочу область, нанесення шарів матеріалу призводить до вирощування (формування) об'ємних моделей (деталей) з самозатверджуючого матеріалу;

- ємність з (витратним) матеріалом для формування деталей – інтегровано (містить) для подачі матеріалу друку – компресор, що поступово проводить послідовну подачу витратного матеріалу принтера напряму у друкуючу головку пристрою для об'ємного друку.

Матеріал друку, або витратний матеріал для пристрою, що друкує 3D моделі має бути (використовується) визначеного виду, а саме відбувається активне залучення самотвердіючих матеріалів, наприклад: віск, епоксидні смоли, термопластичні смоли, розплавлені метали, пластики, включаючи пластики, що спінюються, крім цього можливий друк зі скла, та спорідненими за властивостями матеріалами (подібні переліченим вище матеріалам) [16].

### **3D принтер з взаємозалежними контурами переміщення**

3D-принтер призначений поступово наносити шар за шаром матеріал після

застигання, якого виходить 3D модель. Об'ємні деталі (моделі) реалізується шляхом сукупної роботи всіх блоків, роботизованого пристрою для пошарового друку об'ємних моделей, перелік яких наведено нижче:

- корпус пристрою для друку об'ємних моделей;
- друкуюча головка – знаходиться (розташована) в корпусі, та зафіксована (закріплена) на спеціально інтегрованій каретці, яка наділена модулем для здійснення переміщення у визначеній площині, а саме осі – ХУ;
- робочий стіл, або робоча область (робоча поверхня) пристрою – проводить стабільний підігрів робочої області (поверхні), та зафіксований (закріплений) безпосередньо на основі, що включає модуль для здійснення обертання відносно визначеної для цього осі – Z принтера;
- контролер – здійснює керування (управління) процесом поступового нашарування (пошарового створення) матеріалу з якого виходить (вирощування) необхідна 3D деталь (модель);
- катушка (картридж) з дратовим витратним матеріалом, з проєктовано таким чином, що зберігається можливістю проштовхування матеріалу, для друку (витратного матеріалу моделі) до головки, що здійснює вирощування потрібної моделі.

Конструктивно модуль переміщення каретки, яка забезпечує потрібний рух за траєкторією саме друкуючій головці включає дві напрямні. Напрямні каретки на якій закріплено головку для друку закріплені (розташовані) паралельно відносно одна одної. За конструкцією блоку, що відповідає за поступовий рух друкуючої головки, саме напрямні визначають першу вісь переміщення для здійснення поступового нашарування моделей друкуючою головою. Поперечину, що була додана в конструкцію, і яка реалізує (визначає) другу з трьох можливих осей, саме завдяки, якій здійснюється переміщення за визначеною траєкторією модулю друкуючої головки, та перший кінець, якої рухомо з'єднаний з першою (з двох можливих) напрямною, а другий кінець – з другою напрямною принтера.

Прораховуючи траєкторію руху свого поступового переміщення вздовж другої (з двох можливих) осі, каретка з закріпленою на ній друкуючою головкою здійснює рух, саме вздовж поперечині принтера.

Принтер для об'ємного друку моделей містить привідну систему, яка має в своєму складі перший привідний ремінь, що базується на Н-подібній геометрії розташування. Та крім цього система враховує (містить) утворюючий однойменний – перший контур за яким модуль переміщення (динамічного руху) каретки з закріпленою друкуючою головкою здійснює рух по осях  $X$  та  $Y$ , а також принтер має другу та третю привідні системи. Друга та третя привідні системи принтера можуть функціонувати, тільки завдяки передбаченим для роботи третім привідним ременям, які породжують (утворюють, створюють) другий та третій контури задля здійснення динамічного руху (переміщення). Треба зазначити, що описані вище провідні системи (друга, та третя) мають особливості, а саме:

- другий привідний ремінь принтера базується на Р-подібній геометрії розташування;

- третій ремінь має симетричне розташування відносно другого ремені.

Ремені провідних систем принтера інтегрують вздовж (поздовж) поперечини, потім проводять вздовж (поздовж) однієї з наявних напрямних кінематики принтера, а також частково ремінь проходять вздовж (поздовж) другої напрямної принтера для друку 3D деталей з пластику. Розподіл зобов'язань, якими наділені впровадженні два контури ременів розподіляється наступним чином:

- другий контур системи (привідної системи) – реалізує (забезпечує) поступальний рух друкуючої головки принтера по осі  $X$ ;

- третій контур системи здійснює (реалізує, забезпечує) обертання (поворот) друкуючої головки навколо власної осі.

Комплексна система, що складається з вказаних вище компонентів (ремені, напрямні, друкуюча головка, тощо) реалізує динамічний рух (переміщення) завдяки використанню в системі, саме додаткових ременів [17].

### 3D принтера з незалежними трьома контурами переміщення

Обрані технічні рішення, що передбачають (включають) позиціонування друкуючої головки принтеру шляхом впровадження, та використання трьох контурів динамічного руху головки, які працюють незалежно (під час роботи три контури не пов'язані ніяк між собою), але при цьому головка принтера здійснює пошарове нанесення матеріалу, створюючи поступово об'ємну модель. Функціонування принтера передбачає використання наступних компонентів та підсистем:

- Н – подібний контур використовується у площині X-Y;
- двигуни – кількість застосованих двигунів – два штуки, які закріплені на шасі,
- Р – подібні ремені – кількість застосованих контурів: два контури.

Постійну роботу друкуючої головки, а саме зміну її положення згідно траєкторії руху по осям X та Y можна гарантувати шляхом інтегрованого в систему Н-подібного контуру, принципи роботи, якого активуються (забезпечується) поступовим обертанням двигунів (вмонтовані на шасі пристрою для друку об'ємних моделей), які працюють одночасно в одному чи протилежному напрямку. Загальновідомі варіанти при проектуванні, та реалізації роботизованого пристрою, для створення об'ємних моделей прибавляють 3D принтеру здатність (потенцію) керування (управління) друкуючою головою (включаючи можливості: обертання друкуючої головки, переміщення за третьою координатою головки) враховуючи важливу роботу інтегрованих (впроваджених) контурів переміщення. До переваг першого Н-подібного контуру, принципи, якого задіяні під час функціонування принтеру треба віднести зібраний нижче перелік:

- контур забезпечує мінімальну масу рухомою частини системи переміщення друкуючої головки;
- контур гарантує зберігати впродовж роботи свою геометричну перпендикулярність осей X – Y принтера;
- контур виключає зменшення своєї максимальної корисної робочої

площі (площі робочої області автоматизованої системи для друку);

Крім переваг Н-подібний контур має недоліки, а саме:

- факт розташування інтегрованих в систему трьох контурів ременів, що працюють у різних площинах (осях), у динаміці роботи породжують паразитні сили, наприклад вібрацію;
- породжені паразитні сили (вібрація) підвищують (збільшують) степінь навантаження на рухоме з'єднання осей  $X - Y$ ;
- збільшена степінь навантаження, що зношує рухоме з'єднання осей принтера (саме осі –  $X - Y$ ) скорочує (зменшує) ресурс системи переміщення в цілому;
- поступова просадка ресурсу Н-подібного контуру значно скорочує надійність системи в цілому.

Недоліками автоматизованого пристрою з незалежними трьома контурами переміщення являються:

- не велика (мала) швидкість руху вздовж визначених осей принтера;
- друкуюча головка з'єднана напрямними принтера з каретками, сполучення реалізується шарнірними з'єднаннями, які заїдають;
- заїдання в місцях шарнірних з'єднань при суттєвому збільшенні швидкості руху друкуючого блоку – приводить до неточності позиціонування;
- породження люфту безпосередньо в шарнірах, знижує надійність роботи в цілому;
- неточність позиціонування, та виявленні люфти при швидкісному друці сукупно призводять до: виникнення дефектів на моделі, а також до зниження (погіршення) якості друку [17].

Зважаючи на проведений аналіз відомих патентних рішень та вказані недоліки споріднених роботизованих (автоматизованих) систем, у магістерській роботі поставлено за мету провести комплексний аналіз відомих роботизованих систем для пошарового друку об'ємних моделей, з подальшою розробкою

роботизованої системи, що здійснює рух у просторі задля пошарового нарощування моделі з пластику.

### 1.3 Класифікація принтерів за кінематичною схемою будови

Проаналізовані принципи роботи найвідоміших кінематичних схем з урахуванням конструктивних особливостей, кожної з згаданих кінематик, що дозволяє провести виявлення та гарантувати доцільне використання автоматизованої системи, для друку об'ємних моделей. Крім того, виявлені та враховані ключові переваги та недоліки, які необхідні під час впровадження (застосування) найновіших принтерів FDM технології, в найрізноманітніших сферах діяльності людини, наприклад: машинобудування, космічна галузь, медицина, літакобудування, тощо [4].

Необхідно пам'ятати, що існує всього чотири популярні кінематичні (основні) схеми 3D принтерів, саме FDM – технології, які перелічені нижче:

- картезіанська кінематична схема;
- дельта кінематична схема для пошарового друку;
- полярна кінематична схема для пошарового друку;
- схема роботизованого маніпулятора для пошарового друку [2].

Кожна з перелічених вище кінематичних схем представлена у вигляді моделей від різних виробників роботизованих систем, для друку об'ємних моделей. Кількість виробників принтерів важко порахувати, бо адитивна індустрія світу налічує десятки, а може вже і сотні унікальних виробників 3D принтерів, що базуються на одній з перелічених кінематик пристроїв, і призначені для просторового друку моделей з пластику [7].

Світове лідерство серед схем принтерів очолює кінематична схема – картезіан.

Найрозповсюдженіша кінематична схема картезіан, має свої підвиди, такі, як:



- 3D принтер Prusa;
- 3D принтер Core – XY;
- 3D принтер H – Bot.

Розповсюдженість продукції, навіть такої специфічної продукції (не дуже популярної серед людей не інженерських або технічних спеціальностей), як автоматизована система для пошарового друку – 3D принтер, завжди вимірюється загальною світовою часткою, яка складає не менше ніж 80% серед відомої загальної кількості функціонуючих 3D принтерів саме FDM – технології. Роботизовані системи для пошарового друку пластиком, які базуються на принципах кінематики картезіан визнані серед інженерів у всьому світі високоякісними, та високо-ефективними, тому часто інтегровані (впроваджені, застосовуються), як у промисловому секторі (інженерному проектуванні, авіа- та автомобілебудуванні, електроніці, медицині, будівництві, космічна галузь тощо), дизайні меблі, дизайн одягу (обслуговування машин для шиття) та мистецтві, так і розповсюджені серед інженерів любителів, які мають приватні замовлення від замовників, що до них звертаються. Друкувати на принтерах кінематики картезіан дозволяється моделі різноманітних габаритів (типорозмірів моделі), і при цьому обираючи серед переліку (спектру) відомих пластиків підходящий матеріал [11].

На противагу картезіанській кінематиці, наприклад дельта кінематика вважається напрочуд популярною серед інженерів, але наразі інтегрована усього в 5–7% світового ринку [12].

Інтегрованість технології – FDM серед промислового сектору та популярність технології серед інженерів любителів, не заважає невпинно оптимізувати відомі, та розробляти принципово нові типи та види 3D принтерів для пошарового нарощування моделей з пластику. Невпинна модернізація існуючих та конструювання нових кінематичних схем, обумовлена виявленням доцільних засобів 3D – друку в залежності від пред'явлених (поставлених) конструкторсько – технологічних завдань, та сфери використання автоматизованої системи для просторового

друку. Виявленні визначальні (важливі, принципові) параметри 3D принтерів, зважаючи на які можна зробити доцільний вибір серед відомих кінематичних систем для друку об'ємних моделей технологією – FDM [15].

Дослідження основних кінематичних схем та урахування конструктивних особливостей, на яких базуються кожна з перелічених вище систем автоматизованого друку дозволяє констатувати, те що ключовими (основними) параметрами, які напряму впливають на якість створеної моделі та ефективність роботи пристрою для друку об'ємних моделей, (вибір обладнання в залежності від отримуваних виробів), є:

- точність друку (впливає позиціонування друкувальної головки);
- рухомість (переміщення) робочої області (робочої платформи, робочий стіл) в площині пошарового нанесення (нашарування) витратного полімерного матеріалу;
- габарити робочої області принтера (зони формування виробів);
- швидкість переміщення (зміни положення) друкувальної головки (екструдера);
- складність конструкції роботизованого пристрою для друку 3D моделей;
- технічне обслуговування роботизованого пристрою для друку 3D моделей;
- вартість роботизованого пристрою для друку об'ємних моделей з урахуванням постійної оптимізації всіх процесів [12].

Для наглядного представлення проведеного дослідження була створена таблиця завдяки, якій можна провести оцінювання та порівняння важливих (наявних) характеристик основних моделей FDM 3D принтерів кожної з відомих кінематичних схем. Оцінювання проводиться шляхом вибору з трьох наявних діапазонів значень відповідної характеристики, яка характеризує 3D принтери, робота яких базуються на принципах своїх кінематик [10].

Оцінювання кінематик відбувається вказанням в таблиці одного з трьох діапазонів значень конкретної характеристики. Серед діапазонів значень наявні такі:

- Н – низький діапазон значень конкретної (відповідної) характеристики;
- С – середній діапазон значень конкретної (відповідної) характеристики;
- В – високий діапазон значень конкретної (відповідної) характеристики [4].

Таблиця 1.1 – Оцінювання та порівняння важливих характеристик основних моделей FDM 3D принтерів

Параметри друку	Prusa i3	Maker-bot	Ultim-aker	H-Bot Cust	PP3DP	AM1	Tekma 3D	Anet A4	Polar 3D
Точність позиціонування	С	С	С	В	С	В	Н	В	С
Переміщення стола по Х та Y	+	–	–	–	+	–	+	–	–
Розмір робочої області	Н	С	С	В	Н	В	Н	С	Н
Швидкість друку	С	С	С	С	С	В	Н	В	С
Складність конструкції	Н	С	С	С	Н	В	С	В	С
Технічне обслуговування	Н	С	С	С	Н	В	С	В	С
Вартість	Н	С	С	С	Н	В	Н	С	Н

#### **1.4 Завдання на проектування**

1. Провести аналіз тенденцій розвитку сучасних типів конструкцій устаткування, кінематичних схем, моделей і методів синтезу нових елементів.
2. Сформувати критерії вибору раціональних компонок малогабаритного технологічного устаткування на рівні синтезу схем і конструкцій.
3. З використанням багаторівневого морфологічного підходу синтезувати нові конструкції малогабаритних верстатів на основі обмеженої кількості модулів із застосуванням концепції каркасних несучих систем, МПС і модульного принципу.
4. Встановити математичні залежності розрахунку позиціонування виконавчого органу устаткування з МПС каркасної будови від кутових положень приводів.
5. Дослідити та розробити методику, конструкції для автоматизованого калібрування, оцінки похибки та підвищення точності МПС.
6. Запропонувати вузли та пристрої, що здатні підвищити жорсткість модуля паралельних переміщень.
7. Теоретично дослідити статистичними методами та експериментально підтвердити працездатність і ефективність синтезованих конструкцій верстатів, для переліку обґрунтованих технологічних параметрів, що залежать від геометрії компоновки та інерційних навантажень.
8. Сформувати пропозиції по практичному впровадженню вузлів точного переміщення та удосконалення малогабаритних автоматизованих верстатів у виробництво і навчальний процес.

#### **Висновки до першого розділу**

1. Аналіз адитивних виробничих процесів в житті та промисловості сприяє швидкому створенню перших, і треба визнати недосконалих прототипів

різноманітних проектів, винахідники стартапів завжди сфокусовані на результат. Також треба визнати стрімке зростання інтеграції адитивних технологій в промисловості, а саме застосування 3D-принтерів в ключових галузях промисловості, наприклад таких як: аерокосмічна промисловість, автомобільна промисловість, харчова промисловість, електроніка, медицина тощо.

2. Огляд особливостей технічних рішень за даними літературних джерел та патентної інформації покликаний, як мінімум модернізувати існуючу, а як максимум розробити (створити, реалізувати) принципово нову автоматизовану систему для створення з пластику об'ємної моделі, будь-якої складності, та з наявного матеріалу, для цього. Проаналізувати тенденції поступового розвитку адитивних технологій в цілому, дозволило ознайомлення з трьома кінематичними схемами, а саме з: 3D-принтером, що здійснює друк самотвердіючими матеріалами, також було проаналізовано принцип роботи 3D принтера з взаємозалежними контурами переміщення, крім цього можемо констатувати, що тепер знаємо, про принципові відмінності у 3D принтера з незалежними трьома контурами переміщення.

3. Класифікація принтерів за кінематичною схемою будови починається з здатності виявити (визначити) відмінності, які притаманні відомим кінематичним схемам, саме FDM – технології, крім цього треба враховувати частку залученості обраної кінематики у світовий ринок, це може бути впровадження кінематики в промисловість, медицину, машинобудування, авіабудування, тощо. Впровадження кінематики в сфери життя не можливе без виявленням доцільних засобів 3D – друку, які змінюються в залежності від пред'явлених (поставлених) конструкторсько – технологічних завдань, та сфери в яку інтегрують (використовують) автоматизовану систему для просторового друку об'ємної моделі шляхом вирошування важливої моделі з пластику.

## 2 РОЗВИТОК СТРУКТУРИ, ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ АСК

### 2.1 Сутність будови 3D-принтера та інноваційні особливості для удосконалення

#### Опис 3D принтера

Принтер базується на кінематиці (конфігурації) – CoreXY [13], в якій передбачено пересування робочого столу вздовж саме Z осі. Принтер має малу область друку для об'ємних моделей, а саме  $120 \text{ мм}^3$ .

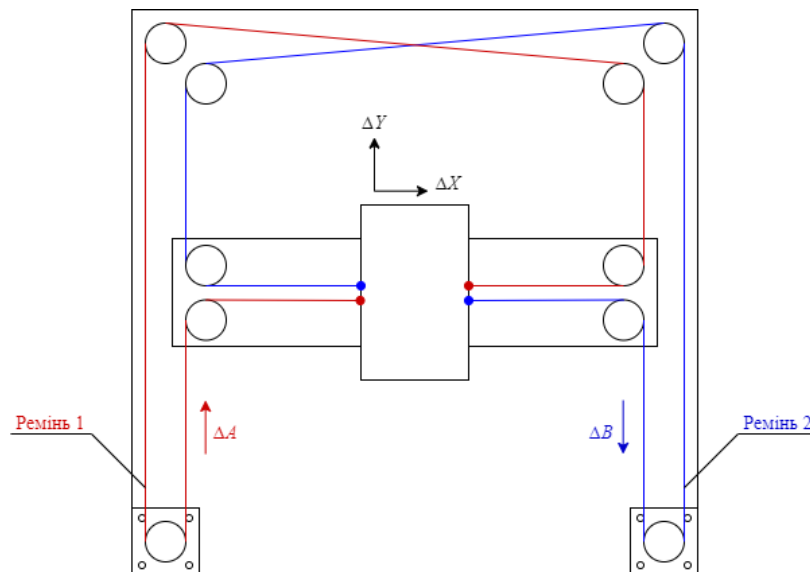


Рисунок 2.1 – Кінематична схема CoreXY

Робоча область компактного пристрою для об'ємного друку для збереження температури, як основної умови друку моделей з ABS пластику має функціональну можливість в закритті області друку – для цього передбачено корпус, який слугує водночас захистом від протягів, та збереженням потрібного мікроклімату всередині робочої області принтера.

У принтера передбачений повністю закритий корпус для пошарового друку моделей з пластику ABS, а крім того без проблем та додатково створених умов пристрій готовий друкувати об'ємні моделі пластиками типу: PLA, PETG або

навіть врахувавши властивості матеріалу – моделі з нейлону [14].

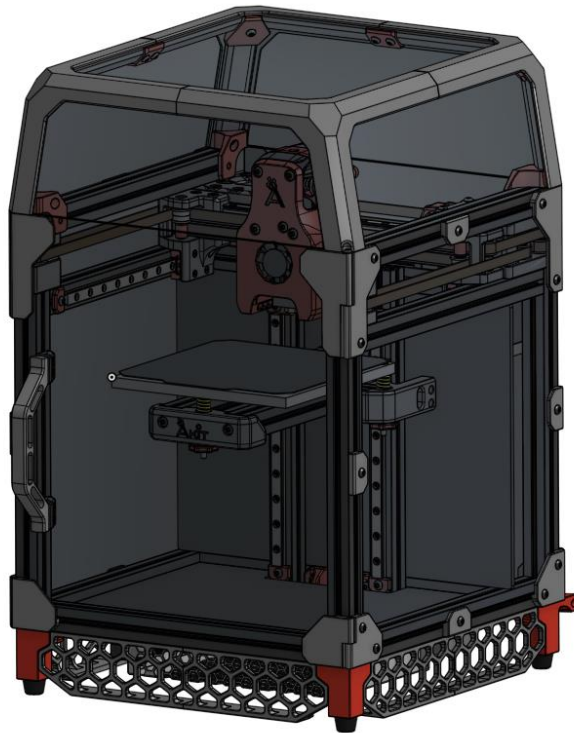


Рисунок 2.2 – Закритий корпус принтера

Види друкуючих головок принтера (екструдерів)

1. Друкуюча головка (екструдер) типу – Mobius (M4)

Mobius – високоякісний екструдер типу боуден, що встановлюється на направляючу вздовж, якої відбувається постійне переміщення друкуючої головки, що внаслідок точних обчислень принтера об'ємного друку, поступово нарощує 3D модель на робочій області пристрою [16].

Ключовими перевагами вибраного екструдера (друкуючої головки) вважають:

- включає двоступінчасту систему подачі потрібного пластику;
- розробниками досягнуто високу ефективність в роботі, як для екструдера типу боуден.

Здійснення руху вздовж головної направляючої екструдера реалізується

повно-розмірним та водночас компактним кроковим двигуном типу – NEMA17.



Рисунок 2.3 – Друкуюча головка (екструдер) типу – Mobius (M4)

## 2. Друкуюча головка (екструдер) типу – Jetrack

Jetrack – це модифікована друкуюча головка, в якій враховані всі переваги в конструкції екструдера типу Mobius. Друкуюча головка закріплюється на вісь X принтера для пошарового друку моделей [16]. Врахування всіх недоліків, попередніх типів екструдерів, підштовхнуло розробників розробити друкуючу головку, в якій значно скоротилася довжина трубки, яка захищає філамент (нитку пластика) від забруднення, та направляє матеріал до нагрівального елемента. Прощо-вхування нитки пластику здійснюється кроковим двигуном – NEMA17.

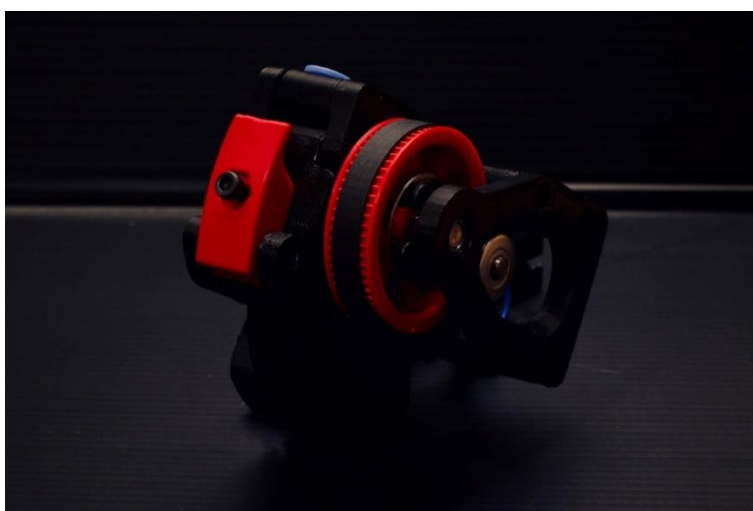


Рисунок 2.4 – Друкуюча головка (екструдер) типу – Jetrack



### 3. Друкуюча головка (екструдер) типу – Afterburner

Afterburner – це друкуюча головка, яка являє собою конструкцію в якій поєднані і злагоджено працюють три компонента, які виконують свою певну функцію, а саме:

- система проштовхування нитки пластику до нагрівального елемента;
- нагрівальний елемент, що забезпечує розплавлення матеріалу друку;
- система охолодження (вузол охолодження) моделі, та нагрівального елемента;

Конструкційною перевагою та особливістю друкуючої головки типу – Afterburner [16] є те що кожен ключовий компонент за потреби можна замінити задіявши найменшої шкоди, ні окремим компонентам екструдера, ні пристрою в цілому. Заміна будь-якого компонента (окремої системи) друкуючої головки не призведе до погіршення (зменшення якості моделі) якості друку об'ємних моделей принтером.

Провівши аналіз існуючих екструдерів, і враховуючи всі переваги та недоліки друкуючих головок (екструдерів) в процесі розробки принтера для друку об'ємних моделей було обрано екструдер типу – Afterburner. Вибір можна аргументувати наступними фактами:

- інтуїтивно зрозуміла та швидка заміна ключових компонентів екструдера;
- ключовий компонент системи на практиці можна замінити задіявши найменшої шкоди друкуючому пристрою;
- блоковий принцип при створенні конструкції сприяє оперативній модернізації будь – якого ключового компонента екструдера.

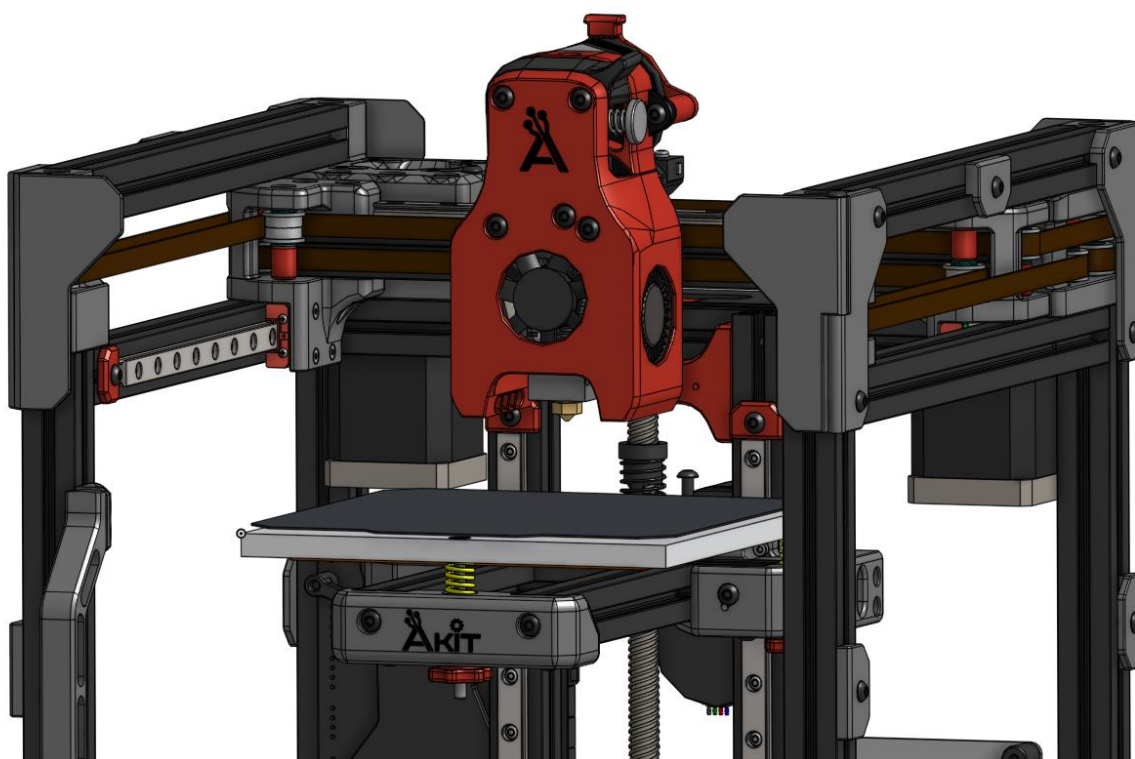


Рисунок 2.5 – Робоча область та друкуюча головка

### Система руху 3D принтера

Принтер створювався на базі принципів кінематики (конфігурації) CoreXY або CoreXZ, які між собою схожі. Дана конфігурація дозволяє компенсувати вібрації під час роботи пристрою, а крім того прискорити процес друку об'ємних моделей (швидкість друку завжди є критичним показником пристрою).

Кінематика CoreXY (CoreXY kinematics) – це складна система руху, що включає в себе унікальний рух двигуна, де двигун X або Y рухається разом або навпроти один одного, щоб перемістити каретку зліва направо до або від нього [15]. Якби ви рухали тільки один двигун, ви б побачили, що друкуюча головка рухається по діагоналі. Якщо два двигуни рухаються один навпроти одного, друкуюча головка буде рухатися по осі X, якщо два двигуни рухаються в одному напрямку, карета буде рухатися по осі Y.

Конструкція 3D-принтера CoreXY сильно відрізняється від більшості

поширених систем руху 3D-принтерів [12], які мають спеціальний кроковий двигун для кожної осі. Система руху CoreXY призначена для мінімізації крутного моменту при переміщенні каретки.

CoreXY паралельної кінематики означає, що двигуни є найбільшим джерелом інерції в системі, та є нерухомими. Це означає швидке прискорення, оскільки два крокових двигуна забезпечують засіб переміщення обох осей самостійно або одночасно [15]. Основною перевагою конструкції є те, що мотори залишаються в статичному положенні.

Таблиця 2.1 – Рух двигуна CoreXY

Рух двигуна	Переміщення каретки
Обидва двигуни рухаються за годинниковою стрілкою	каретка рухається вліво
Обидва двигуни рухаються проти годинникової стрілки	каретка рухається вправо
Обидва двигуни рухаються один навпроти одного	каретка рухається в сторону і в сторону
Один двигун рухається	каретка рухається по діагоналі

За останні кілька років популярність кінематики CoreXY стала улюбленою спільнотою серед користувачів 3D-друку. Нові конструкції, розробки та проекти з відкритими джерелами нашою хвилювали багатьох стверджувати, що це найкраща система руху для 3D-друку, але це дійсно залежить від користувача та програми.

### Плюси

– Більш високі швидкості друку: стаціонарні двигуни X і Y зменшують механічну вагу і імпульс, надаючи системі руху механічну перевагу в порівнянні з іншими конфігураціями розміщення двигуна.

– **Якість:** зі зниженою вагою та імпульсом налаштування також призводить до зниження вібрацій та збільшення повторюваності на більш високих швидкостях.

– **Механічна оптимізація:** розмір друку з двигунами X і Y в порівнянні з фактичним співвідношенням обсягу збірки дає вам більше місця для друку з меншим слідом. На відміну від Nbot, карета Corexy не є проблематичною для скручування або пристібання, коли двигуни x і y обертаються в одному напрямку.

### **Мінуси**

– **Технічне обслуговування:** довші пояси X і Y вводять проблеми натягання ремня (розтяжка ремня). Збільшення кількості заміни ременів збільшує зносостійкість.

– **Масштабованість:** проблеми з розтяжкою ремня та натяганням вводять обмеження дизайну, оскільки розмір машини збільшується.

Залежно від обраної кінематики, уздовж осей X, Y та /або Z вирішено використовувати лінійні рейки марки: MGN7, MGN9, MGN12 або у якості альтернативи лінійні стрижні визначеної довжини та діаметру.

Для переміщення вздовж визначених для цього осей обрано ремені шириною 6 мм або 9 мм. Саме використання ременів вказаної ширини сприяє підвищенню надійності роботи 3D принтера та дозволяє констатувати підвищення продуктивності впродовж тривалого друку моделей.

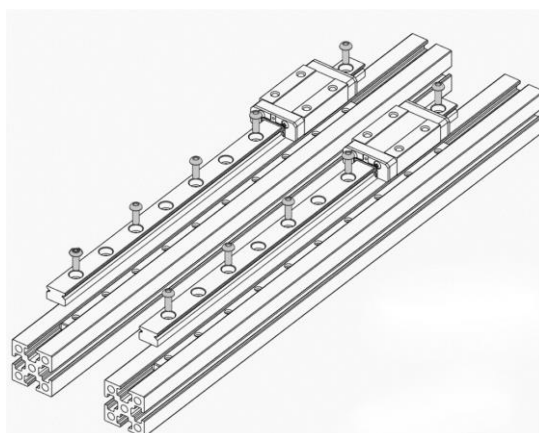


Рисунок 2.6 – Лінійні рейки марки: MGN7

Фланцеві підшипники марки: F695 використовуються, як натяжні ролики для гладких ременів принтера. Використання саме цих підшипників сприяє приросту показника терміну служби, бо у разі застосування звичайних натяжних роликів GT2 значно скорочується термін їх роботи, а значить і системи руху пристрою.

### Натягання ременів

При розробці принтер було використано шлях ременів на основі популярного шаблону CoreXY.

Горизонтальна смуга являє собою прямий край, який може бути переміщений вгору і вниз користувачем. Хрестоподібна схема ліній руху стабілізує планку і зберігає її горизонтальною (рис. 2.7).

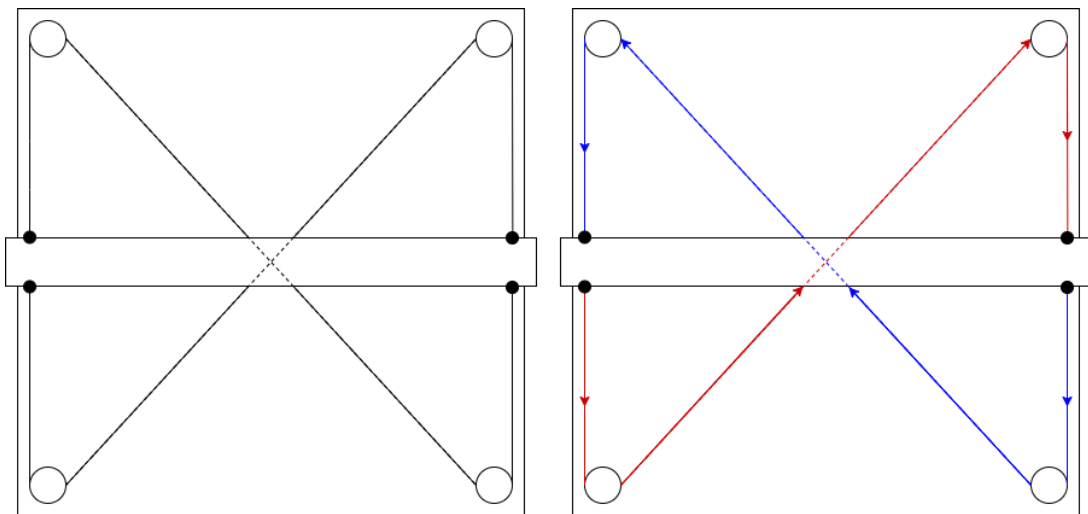


Рисунок 2.7 – Схема напрямку руху ліній кінематики CoreXY

Цей ефект можна побачити, слідуючи за напрямком руху двох ліній, які складають механізм. Зверніть увагу, що всі вертикальні стрілки вказують в одному напрямку (рис. 2.7).

Коли прикріпити кроковий двигун до одного з шківів – горизонтальну смугу можна переміщати вгору і вниз під управлінням комп'ютера. Це можна назвати одновісним етапом з ЧПУ (рис. 2.8).

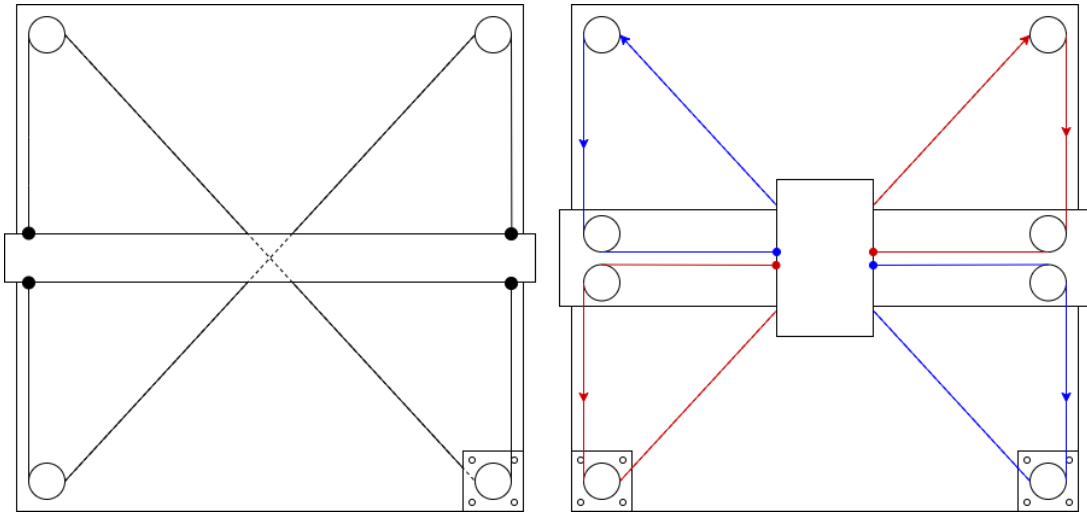


Рисунок 2.8 – Схема напрямку руху ліній кінематики CoreXY

Як ми можемо змінити цей механізм, щоб перетворити його в двовісний етап з ЧПУ. Ілюстрований вище механізм (рис. 2.9) є одним з рішень. Обертання обох двигунів в одному напрямку призводить до горизонтального руху. Обертання обох двигунів у протилежних напрямках призводить до вертикального руху.

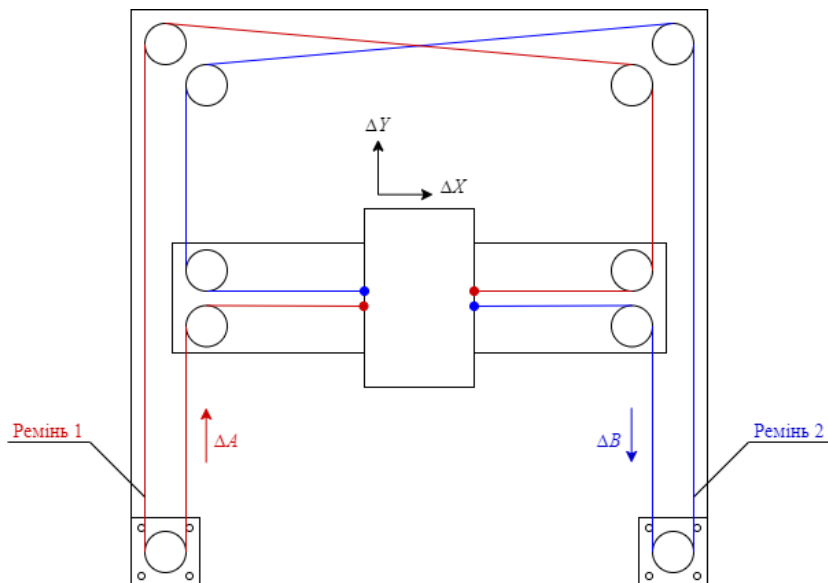


Рисунок 2.9 – Схема напрямку руху ліній кінематики CoreXY

Цей референтний механізм (рис. 2.9) функціонально ідентичний останньому рисунку в попередньому розділі. Два додаткових шківів були додані для

переміщення ременя перехрестя за межі робочої оболонки.

Окремі шляхи стрічки накладаються один на одного, а перетин, який часто зустрічається в дизайнах CoreXY – пропущено. У порівнянні з багатьма іншими реалізаціями, двигуни переміщуються в менш нав'язливе положення. Рівний натяг ременя важливий для правильної роботи системи руху CoreXY [15]. Оскільки обидва шляхи ременя мають однакову довжину, це простий спосіб домогтися рівномірного натягу.

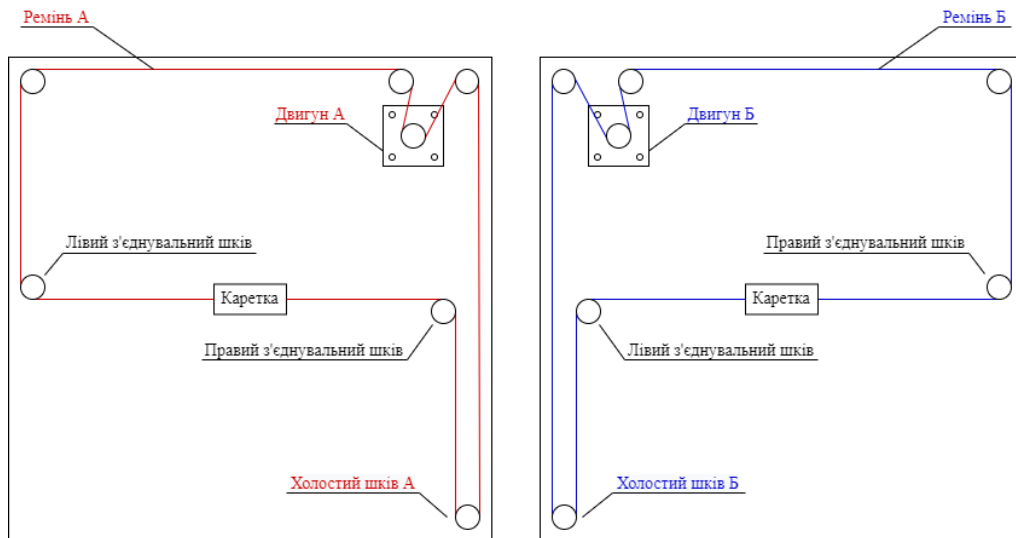


Рисунок 2.10 – Схема шляху ременів

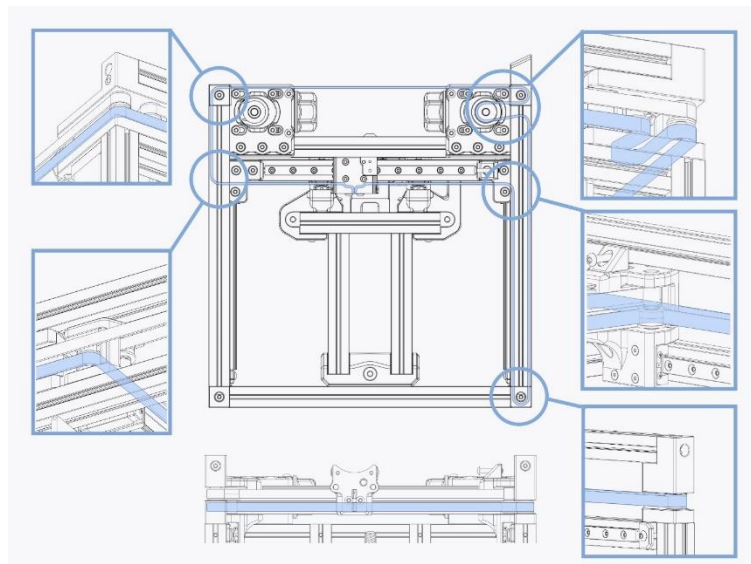


Рисунок 2.11.1 – Натяг правого ременя

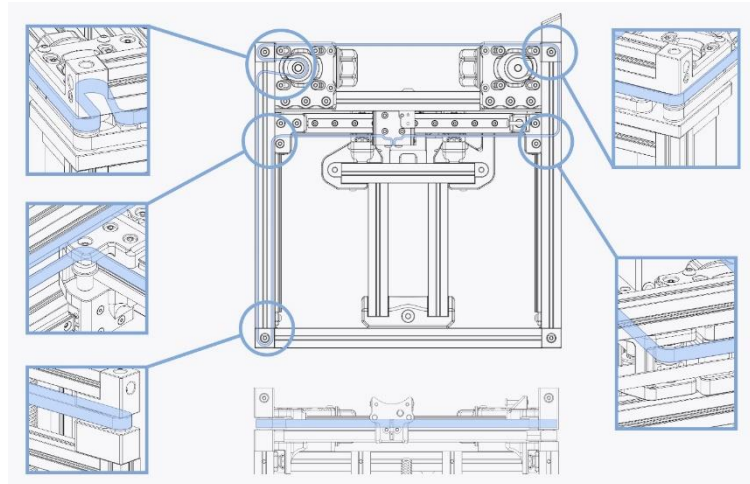


Рисунок 2.11.2 – Натяг лівого ремня

## 2.2 Обґрунтування та вибір блоків 3D-принтера

### Різьбова друкуюча головка v6 HotEnd 12В/24В

В комплектацию пристрою входять:

- пульт дистанційного керування Bowen з J-головкою Hotend
- кріплення для вентилятора (кронштейн), що призначений охолоджувати екструдер V6 HOTEND для PT100.

Основні технічні характеристики друкуючої головки принтера зібрані в таблиці 2.2 [4].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики різьбової друкуючої головки v6 HotEnd 12В/24В [14]

<b>Різьбова друкуюча головка v6 HotEnd 12В/24В</b>	
Характеристики	
Високоякісна насадка, мм	0,4 мм (1,75 мм для v6 HotEnd 12В/24В)
Термістор	NTC100К, з чорним терміналом ХН2.54, діапазон температур: -50°С ~ +350°С, довжина :100 см
Алюмінієвий нагрівальний блок	для сенсорних картриджів



Сумісний датчик для різбового радіатора	pt100
Насадка	0,4 мм/1,75 мм, латунний матеріал
Вентилятор охолодження	12В/24В, 30 мм*30 мм*10 мм, довжина кабелю 30 см
Нагрівальний блок	23 мм*16 мм*12 мм, матеріал алюмінієвий
Пневматичні роз'єми	PC4-01, 2 мм*4 мм
Теплова труби	нитка М7

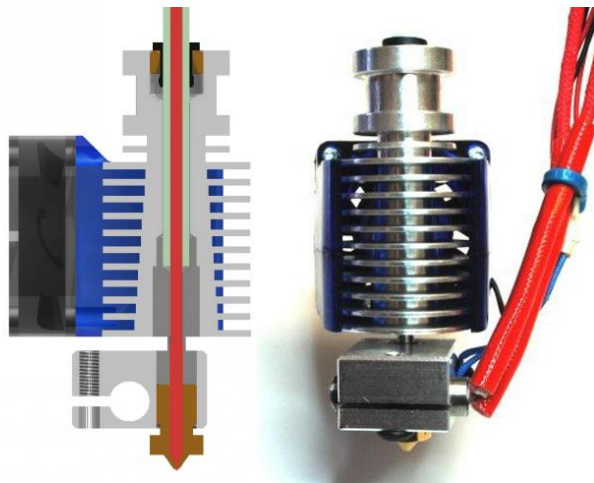


Рисунок 2.12 – Різбова друкуюча головка v6 HotEnd 12В/24В [14]

### Плата Raspberry Pi 3

Raspberry Pi 3 – відрізняється потужнішим процесором і можливістю бездротового підключення. Завдяки швидкій обробці даних різного формату таким, як: електронні таблиці, обробка текстів, відтворення відео високої чіткості та ігри, новий Raspberry Pi 3 працює значно швидше, ніж його попередники. Raspberri PI 3 може працювати з операційними системами Windows та Linux [19,20].

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики плати Raspberry Pi 3 [19,20]

<b>Плата Raspberry Pi 3</b>	
Характеристики	
Процесор	64-розрядний чотири-ядерний ARM Cortex-A53 з тактовою частотою 1,2 ГГц на однокристалльному чіпі Broadcom BCM2837
Технологія підключення	Bluetooth
Оперативна пам'ять, Гб	1 Гб LPDDR2 SDRAM
Цифровий відеовихід	HDMI
USB-порти	чотири USB 2.0
Мережа	Wi-Fi 802.11n, 10/100MB RJ45 Ethernet
Bluetooth	Bluetooth 4.1, Bluetooth низької енергії
Роз'єм дисплея	дисплейний послідовний інтерфейс (DSI)
Роз'єм відеокамери	послідовний інтерфейс камери MIPI (CSI-2)
Карта пам'яті	MicroSD
Порти вводу-виводу, шт	40

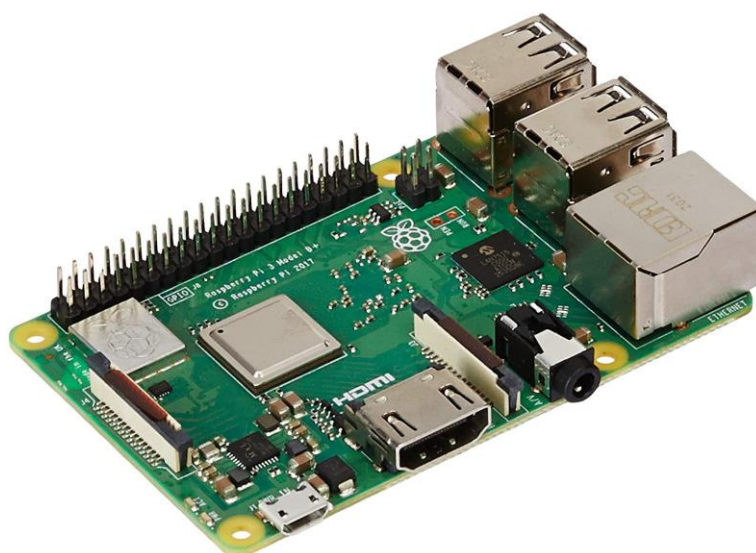


Рисунок 2.13 – Плата Raspberry Pi 3 [20]

### **Мікроперемикач Omron**

Вирішено використовувати базові мікроперемикачі, що мають мікроконтактний зазор і працюють із заданим рухом і силою (за принципом механізму швидкої дії). Перевагами мікроперемикача Omron є:

- безперервна робота;
- стійка робота при підвищенні вологості (крапель води);
- висока ємність.

Зовнішній вид мікроперемикачів [21], які виконують свою функцію під час роботи принтера для об'ємного друку представлено на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 – Мікроперемикач Omron [21]

### **Кроковий двигун (КД) – NEMA14 (14HS17-0504S)**

Серед відомих видів двигунів, при проектуванні принтера було обрано кроковий двигун: NEMA14 (14HS17-0504S), основні технічні характеристики якого зібрані в Таблиці 2.4 [22,23].

Представлена нижче таблиця 2. КД включає основні параметри КД беручи до уваги, які було обрано саме двигун специфікації 14HS17-0504S.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики крокового двигуна NEMA14 [22,23]

<b>Кроковий двигун – NEMA14 (14HS17-0504S)</b>	
Характеристики	
Біполярний/Однополярний	Біполярний
Кут кроку, °	1,80
Утримуючий момент, Нм (lb-in)	0,23
Індуктивність / фаза мГн 1 кГц, %	26 ± 20
Стійкість до фаз	15
Номінальний струм (А)	0,5
Точність кроку (NON-ACCUM), %	±5
Інерція ротора (гр. –см <sup>2</sup> )	18
Підвищення температури: МАКС. 80 °С	(двигун зупинився; для 2-фазної напруги)
Температура навколишнього середовища, °С та °F	– 10 °С ~ 50 °С (14 °F ~ 122 °F)
Опір ізоляції, МОм	100 (при нормальній температурі та вологості)
Клас ізоляції	В 130 °С (266 °F)
Діелектрична міцність змінного струму протягом 1 хв, В	500 (між моторною паличкою і корпусом двигуна)
Вологість перед народженням МАКС.	85% (без конденсату)

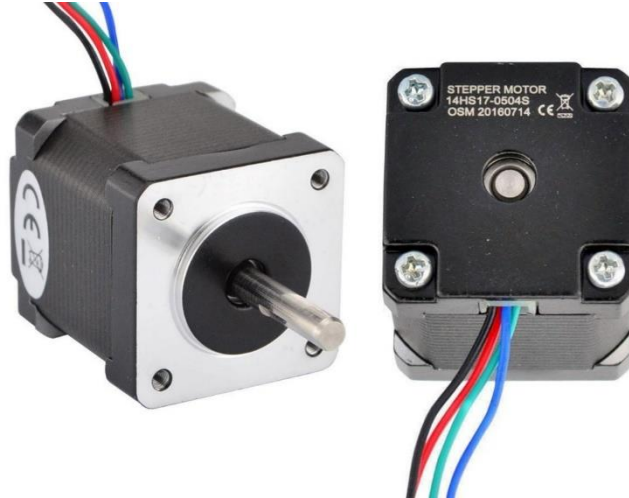


Рисунок 2.14 – Кроковий двигун NEMA14 (14HS17-0504S) [22,23]

### Блок живлення (БЖ) – LRS-100-24 (24В, 4.5А, 108Вт)

LRS – це серія джерел живлення, що має низько профільний корпус і вважається одним з фінансово доступних блоків живлення, популярний серед малих виробництв, та інженерів різного рівня.

Перетворювачі можуть застосовуватись у наступному переліку пристроїв:

- пристрої промислової автоматизації та керування (управління);
- побутові пристрої визначеного функціоналу;
- електромеханічних пристроях та установках різної степені навантаження.

Вибір описаного блоку живлення крім переліку, який вказаний вище аргументовано допустимими характеристиками блоку живлення (БЖ), що зібрані нижче в табл. 2.5 [24].

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики блока живлення LRS-100-24 [24]

<b>Блок живлення – LRS-100-24 (24В, 4.5А, 108Вт)</b>	
Характеристики	
Діапазон вхідної напруги, В	85...264
Діапазон робочої температури, °С	– 30...+70

Висота корпусу, мм	30
Особливості блоку живлення: – стійкість до підвищеної вхідної напруги, В (до 5 секунд) – стійкість до підвищеної вібрації, G – захист від короткого замикання, перевантаження, перенапруг	до 300  до 5  всіх моделі
ККД, %.	87.5-91.5



Рисунок 2.15 – Блок живлення (БЖ) – LRS-100-24 [24]

### Перетворювач постійного струму – DC/DC Converter 24V to 5V

Перетворювач постійного струму – DC/DC Converter 24V to 5V – це пристрій, що зменшує або збільшує напругу, яка подається, наприклад з 24 V до 5V та навпаки [26].

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики DC/DC Converter 24V to 5V [25,26]

Регулятор напруги живлення – DC/DC PSU/buck converter - 24V to 5V	
Характеристики	
Модель	B05-1224-05
Режим випрямлення	синхронний випрямляч

Вхідна напруга, В	10-30
Вихідна напруга, В	5
Вхідний струм, А	5
Максимальна потужність, Вт	75
Розмір, мм	63*53*20мм
Вага, г	70
Хвильовий І тип шуму, MVp-p	50
Тип ефективності, %	95



Рисунок 2.16 – Перетворювач постійного струму – Converter 24V to 5V [26]

### Реле в твердому корпусі – Crydom ED24D3 SSR

Реле в твердому корпусі – Crydom ED24D3 SSR має ряд переваг серед, яких пристрій можна закріпити на DIN-рейку, та друковану електричну плату. Пристрій відповідає всім ключовим вимогам – CE та RoHS [27].

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики реле в твердому корпусі – Crydom ED24D3 SSR [27,28]

Реле в твердому корпусі – Crydom ED24D3 SSR	
Характеристики	
Вхідний струм, мА	від 3,8 мА до 33,8

Номинальний струм, А	1, 3 та 5
Діапазон напруги навантаження (змінного струму), В	24 – 280
Діапазон керуючої напруги (постійного струму), В	від 3 до 15
Серія	ED
Торгова марка	Crydom
Тип виходу	MOSFET
Контактна форма	SPST (1 форма А)
Спосіб кріплення	підходить до стандартних розеток для монтажу (закріплення) на DIN-рейку та друковану електричну плату
Світлодіодний індикатор стану входу	сигналізую при роботі
Керування змінним або постійним струмом	передбачено
Корпус пристрою	стандартний промисловий корпус EMR



Рисунок 2.17 – Реле в твердому корпусі: Crydom ED24D3 SSR [28]



### Плата керування принтера – Bigtreetech SKR mini E3

У порівнянні з оригінальною 8-розрядною системною платою, потужніша 32-розрядна материнська плата SKR MINI E3 V3.0 має значно (набагато) вищу продуктивність роботи і більше наявних інтерфейсів для модифікацій. Пристрій розроблено задля безпроблемної заміни при нагальній необхідності. На відміну від попередньої версії, SKR MINI E3 V3.0 пройшов оновлення з точки зору апаратного забезпечення і більше не сумісний з такими 3D принтерами: Ender 3, а й з Ender 5, Ender 5 Pro, CR-10S/S4/S5 [29].

Плата керування має високу продуктивність роботи, достатній обдув для коректної роботи, та багато інших переваг, які зібрані в Таблиці 2.8 технічних характеристик [29].

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики плати керування принтера – Bigtreetech SKR mini E3 [29]

<b>Плата керування принтера – Bigtreetech SKR mini E3</b>	
Характеристики	
Тип плати	SKR MINI E3 V3.0
Розрядність материнської плати	32
Сенсорні екрани ВТТ TFT, дюйми	2,4/3,5 LCD12864 (оригінальний РК-екран Creality)
Керовані вентилятори, шт.	3
Пристрій не сумісний з такими 3D принтерами	– Ender 3 – Ender 5 – Ender 5 Pro – CR-10S/S4/S5
Інтерфейс живлення, В	5

Модель кольору	RGB
Автоматичне вимикання пристрою після друку (завершення роботи)	передбачено
Модуль виявлення збою живлення	спрацьовує при некоректній роботі
Порт	Micro USB
Драйвер двигуна	режим UART на платі TMC2209
Розсіювання тепла	дуже потужний MOSFET для кращого розсіювання тепла
Теплові характеристики плати керування	покращені теплові характеристики
Точкові з'єднання на платі	захищені з'єднання термісторів



Рисунок 2.18– Зовнішній вид плати керування 3D принтера [29]

### **Мікро пристрій для зниження температури марки 3010, на 24В з подвійним кульковим підшипником**

Мінімальні розміри та невимушений дизайн пристрою сприяє поширенню його серед пристроїв для об'ємного друку, а також часто інженери впроваджують вентилятор для охолодження повітрям – Raspberry PI [30].

Інтегровані в систему подвійні кулькові підшипники, які сприяють дотриманню балансу між високим обсягом (об'ємом) повітря, та низьким рівнем шуму, що виникає впродовж всієї роботи пристроїв для охолодження електроніки [30].

Пристрій зберігає здатність безперервної роботи, може працювати буквально 24 години на добу, а загальний термін служби можна переглянути в таблиці 2.Кзт.

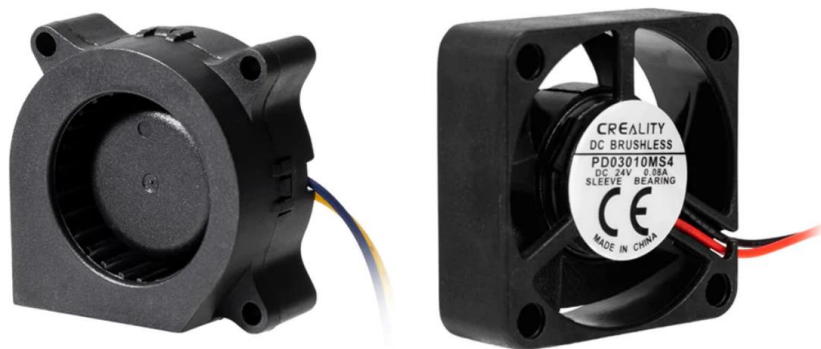


Рисунок 2.19–Мікро пристрій для зниження температури марки 3010 [30]

Ключові технічні характеристики мікро пристрою призначеного для обдуву електроніки, задля запобігання перегріву сформовані в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики мікро пристрою для зниження температури марки 3010 [30]

<b>Мікро пристрій для зниження температури марки 3010, на 24В з подвійним кульковим підшипником</b>	
<b>Характеристики</b>	
Номінальний струм, А	0,06
Напруга, В	24
Потужність, Вт	1,44
Матеріал корпусу	пластик
Колір	чорний

Максимальна швидкість обертання, об/хв	7000,00
Рівень шуму, децибел	22,50
Тип роз'єму живлення	2-контактний
Спосіб охолодження	повітря
Широко використовується для вентиляції	<ul style="list-style-type: none"> <li>– корпусу невеликого ПК</li> <li>– маршрутизатора</li> <li>– Raspberry PI</li> <li>– TV box</li> <li>– VR окулярів</li> <li>– компактні електронні при- строї</li> </ul>
Тривалий термін служби, годин	50 000
Довжина роз'єму та лінії, дюйми / мм	XH2,54 - 11,8 / 300
Розміри пристрою Д × Ш × В, дюйма	1,18*1,18,0,391
Розміри пристрою Д × Ш × В, мм	30*30*10

Підтвердити маленький розмір, що являється безумовно перевагою пристрою призначеного для зниження температури електроніки, можна включивши в магістерську роботу креслення, що демонструє основні механічні характеристики пристрою для охолодження повітрям.

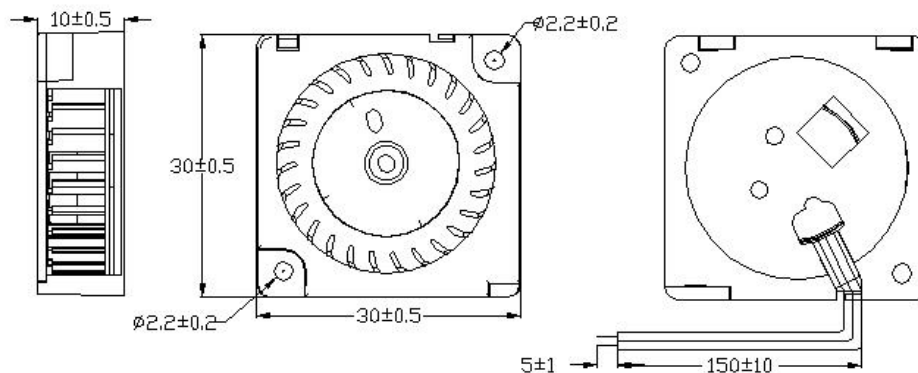


Рисунок 2.20 – Креслення пристрою для обдуву марки 3010 [30]

Кращий показник продуктивності, це не єдиний, але важливий фактор при виборі пристрою для охолодження компонентів, що того потребують. Наведений графік, на якому зображені криві продуктивності пристрою, це ще один наглядний аргумент, що дозволив обрати мікро пристрій для обдуву.

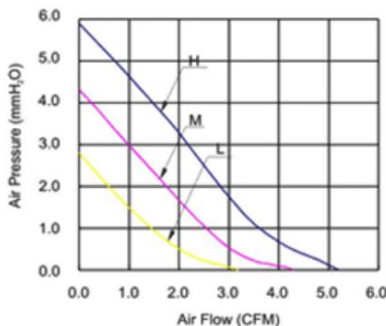


Рисунок 2.21 – Криві продуктивності пристрою для обдуву марки 3010 [30]

### Осьовий мікро пристрій для зниження температури 3010 на 24 В

Ключові технічні характеристики осьового мікро – пристрою призначеного для охолодження, задля запобіганню перегріву наведені в таблиці 2.10 [31].

Таблиця 2.10 – Технічні характеристики осьового мікро – пристрою для охолодження марки 3010 [31]

<b>Осьовий мікро – пристрій для зниження температури 3010 на 24 В</b>	
Характеристики	
Тип двигуна	без щітковий двигун вентилятора постійного струму
Вид струму	DC – постійний струм
Види підшипників мікро – пристрою	кульковий, втулковий або гідравлічний
Корпус	Термопласт PBT, UL94V – 0
Кількість магнітних полюсів	4
Напрямок обертання ротора мікро – пристрою	проти годинникової стрілки

Крильчатка	термопластичний PBT, UL94V-0
Основний провід	UL 1007 AWG#24 «+» червоний, та «-» чорний
Додатковий провід	«Сенсор» – жовтий «ШИМ» – синій
Захисні функції:	– захист від блокування – захист від полярності. – водонепроникний рівень
Робоча температура:	– від -10 °C до +70 °C, 35% – 85% RH для рукавного типу – від -20 °C до +80 °C, 35% – 85% RH для кулькового типу
Розміри пристрою Д × Ш × В, мм	30*30*10
Вага, г	9

Зовнішній вид осьового мікро – пристрою для зниження температури 3010 представлено на рисунку 2.22.



Рисунок 2.22 – Зовнішній вид осьового мікро – пристрою для зниження температури 3010 [31]

Наглядна демонстрація у вигляді креслення, де вказані основні механічні характеристики осьового мікро – пристрою для охолодження повітрям температури навколишнього середовища, представлена рисунком 2.23 [31].

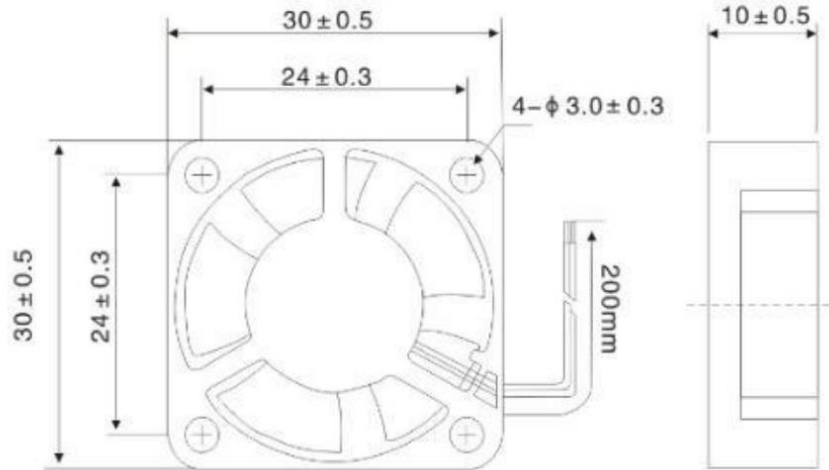


Рисунок 2.23 – Механічні характеристики осьового мікро – пристрою для зниження температури 3010 [31]

Серед наявних на ринку систем для охолодження потоком повітря електричних компонентів автоматизованої системи для друку об'ємних моделей обрано, саме осьовий мікро – пристрій 3010, криві продуктивності якого наведено нижче [31].

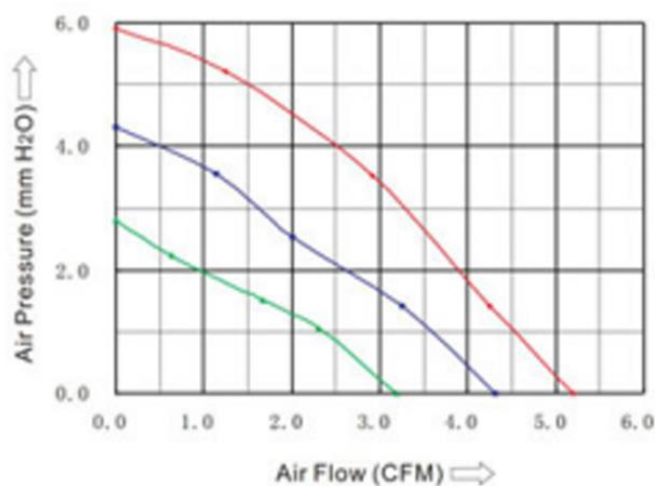


Рисунок 2.24 – Криві продуктивності осьового мікро – пристрою для зниження температури 3010 [31]

### **Електричний нагрівач друкуючої головки (екструдера) на 24 В, 60 Вт**

Електричний нагрівач виготовлений з порошку MgO і трубки MgO, зазвичай має форму трубки. В структуру нагрівача для друкуючої головки входить наступний перелік компонентів:

- керамічний ковпачок;
- резистентний провід (дріт) – NiCr2080;
- високотемпературні дроти;
- безшовна оболонка з нержавіючої сталі: 304, 321, 316, 800, 840.

Нагрівач монтується в систему друкуючої головки шляхом вкладання в металевий блок системи циліндричної форми нагрівального елемента, який можна вмонтувати, через серію просвердлених отворів металевого блоку.

Електричний нагрівач створюються виробником у двох модифікаціях, а саме:

- електричний нагрівач високої щільності;
- електричний нагрівач низької щільності.

Нагрівачі високої щільності зазвичай інтегруються в системи для нагрівання:

- прес-форм;
- лиття пластмас;
- штампів, та плит тощо.

Нагрівачі низької щільності більше підходять для наступного переліку обладнання:

- пакувального обладнання
- таропакувального обладнання;
- машин для етикетувальних процесів, та гарячого тиснення.

Основні технічні характеристики електричного нагрівача друкуючої головки (екструдера) зібрані в таблиці в таблиці 2.11 [32].



Таблиця 2.11 – Технічні характеристики електричного нагрівача друкуючої головки [33]

<b>Електричний нагрівач друкуючої головки (екструдера) на 24 В, 60 Вт</b>	
Характеристики	
Виготовлено нагрівач	з порошку MgO і трубки MgO
Форма електричного нагрівача	форму трубки (циліндрична форма)
Перелік конструктивних елементів	– керамічний ковпачок; – резистентний провід (дріт) – NiCr2080; – високотемпературні дроти; – безшовна оболонка з нержавіючої сталі: 304, 321, 316, 800, 840;
Нагрівальний дріт опору	дріт NiCr 80/20
Допуск на потужність, %	+5; – 10;
Допуск до опору, %	+5; – 10;
Допуск до довжини, мм	±1
Стандартна холодна зона, мм	5-10
Опір ізоляції, МОм	≥ 500
Максимальний струм витоку, МА	≤ 0,5
Розташування термопари	тип J / K / провід (дріт) заземлення
Створюються виробником у двох модифікаціях	електричний нагрівач високої щільності, та електричний нагрівач низької щільності.
Нагрівачі високої щільності зазвичай інтегруються в системи для	прес-форм, лиття пластмас, штампів, та плит тощо.

нагрівання	
Нагрівачі низької щільності більше підходять для наступного переліку обладнання	пакувального обладнання, таропакувального обладнання, машин для етикетувальних процесів, та гарячого тиснення.
Переваги електричного нагрівача	<ul style="list-style-type: none"> <li>– висока термостійкість;</li> <li>– рівномірний нагрів;</li> <li>– висока теплопровідність;</li> </ul>

Зовнішній вид електричного нагрівача друкуючої головки (екструдера) зображено на рисунку 2.25.



Рисунок 2.25 – Зовнішній вид електричного нагрівача друкуючої головки (екструдера) [32]

Розібратися з конструкційними особливостями електричного нагрівача друкуючої головки (екструдера) допоможе наведений нижче Рисунок 2.26.

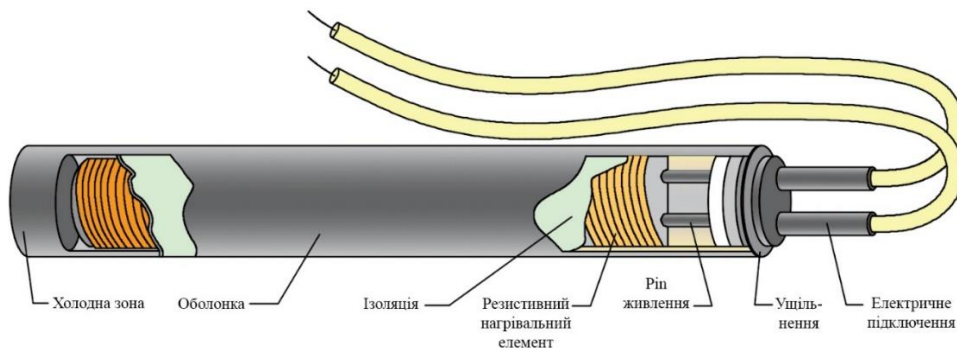


Рисунок 2.26 – Внутрішня будова електричного нагрівача друкуючої головки (екструдера)

### 2.3 Розвиток функціональної блок - схеми 3D-принтера, як основи адитивних технологій

Взаємозалежність наявних блоків роботизованої системи для пошарового друку пластиком потребує детального опису, який в свою чергу може бути сформульований після того, як принцип роботи автоматизованої системи для пошарового друку моделі з пластику буде зафіксовано графічно у вигляді блок – схеми. Представлена нижче функціональна блок-схема 3D-принтера Рисунок 2.27– це фактична демонстрація результату клопіткого проектування роботизованої системи для друку об'ємних моделей (об'єктів, деталей) з пластику, що дозволить наглядно продемонструвати взаємозалежність блоків та детально розібратися в принципі роботи.

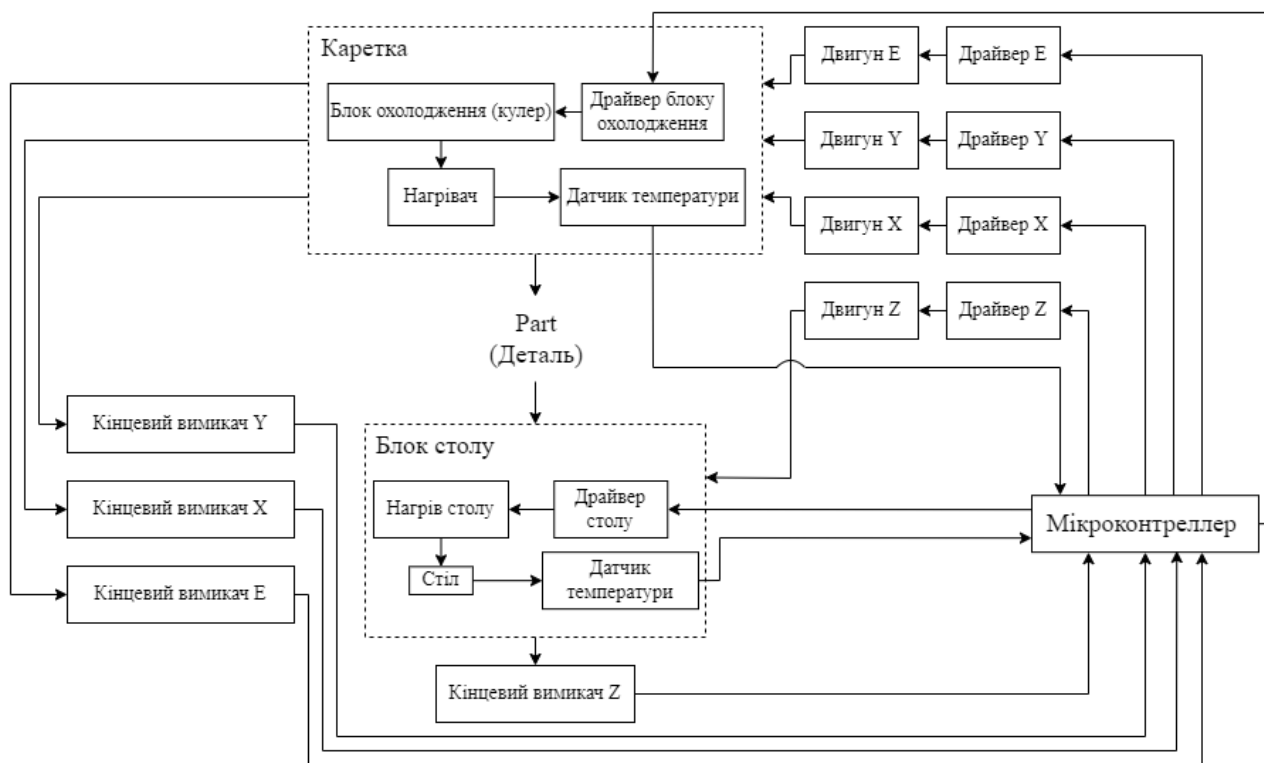


Рисунок 2.27 – Функціональної блок-схеми 3D принтера

Функціональну блок-схему 3D принтера краще розглядати фокусуючись на ключових взаємозалежних блоках, які продемонстровані на вище вказаній схемі.

Умовно кожен 3D принтер, який базується на кінематиці (конфігурації) CoreXY поділяється на два блоки, а саме:

- робочий орган: друкуюча головка, або каретка автоматизованої системи для друку 3D моделей;
- система підтримки умов (вимог) для друку: робоча область, або робочий стіл.

Треба визнати, що нарощування об'ємних моделей здійснюється (реалізується), саме друкуючою головкою (екструдером). Процес роботи екструдера завжди на виду, і попри те не треба забувати, що будь – яке формування моделі на робочій області не можливе без урахування та забезпечення обов'язкових (визначених) вимог, (важливо забезпечити впродовж всього процесу друку моделі), які сприяють:

- адгезії моделі з робочою областю (простіше прилипання першого шару моделі до робочого столу);
- злипанню дотичних шарів впродовж всього процесу друку (злипання попереднього та наступного шару, наприклад першого та другого шару);
- зберігання оригінальних (визначених, сталих) розмірів моделі, тощо.

Перелічені вище вимоги, треба дотримуватися (забезпечувати), бо це сукупно призводить до успішного завершення друку об'ємної моделі з пластику, у випадку ігнорування базових вимог з моделями відбуваються:

- деформації, а саме зменшення об'ємів моделі під час нашарування (призводить до зіпсування моделі);
- виникнення дефектів на моделі;
- відклеювання першого шару моделі від робочої області (брак);
- брак моделі, тощо.

Отже описані вище явища, які проявляться на 3D моделях тільки від ігнорування вимог, які треба дотримуватися під час друку, яскраво демонструють, що критично важливо зберігати взаємозалежність двох блоків автоматизованої

системи призначеної для друку 3D моделей.

Підготовчим етапом в процесі друку завжди виступає етап нагріву робочої області до вказаної завчасно температури, та поступове переміщення області друку вгору до точки «нуль». Підготовка до друку задіє три електричних компонента, а саме: драйвер двигуна, двигун, та кінцевий вимикач трьох осей принтера вісь X, Y, Z. Запускає весь процес керування над переміщенням робочої області – мікроконтролер роботизованої системи для друку 3D деталей.

Коли всі прапорці досягають кінцевих вимикачів, це означає, що робоча область принтера прибуває до точки «нуль», і автоматизована система починає нагрівати область друку, щоб перший шар зафіксувався на робочій області принтера і друк пройшов успішно. Нагрів робочої області – це ключова складова системи підтримки вимог для успішного друку моделі, функціональні особливості, якої опишемо нижче.

Система підтримки умов (вимог) для друку реалізується першим, з двох блоків, який включає в свою будову: драйвер, нагрів робочої області (стіл), робоча область для друку (стіл для друку), та датчик контролю температури робочої області. Всі перелічені компоненти першого блоку в комплексі забезпечують контрольований нагрів робочої області, та унеможливають деформацію моделі, що безпосередньо друкується, з подальшим безпечним демонтажем вже готової об'ємної моделі. Закінчивши підготовку, та розігрівши робочу область принтера починається безпосередній друк моделі з пластику, функціональні аспекти цього процесу опишемо нижче.

Друкуюча головка, або каретка – це другий блок роботизованої системи (автоматизованої) для друку 3D моделей, яка включає в свою будову: блок охолодження (кулер), нагрівач пластику, датчик температури. Рух друкуючої головки реалізує (забезпечує) система крокових двигунів, а прощтовхування нитки пластику призначений, саме для цього двигун, керування якого відбувається мікроконтролером, через драйвер двигуна екструдера.

Зберігаючи взаємозалежність всі блоки 3D принтера стабільно виконуючи свою роботу (за описаною вище логікою), сприяють дуже швидкому друку моделей будь – якої складності.

## 2.4 Особливості реалізації електричної – принципової схеми 3D принтера

Для того щоб зрозуміти краще принцип роботи автоматизованої системи для друку моделей зроблено опис принципу роботи ключових електричних компонентів роботизованої системи для об'ємного друку.

Взаємозалежність електричних компонентів системи зазначимо під час опису основних принципів, та переваг роботи окремо кожного компонента.

### Плата керування 3D принтера

Розташування електричних елементів на платі керування, та основні розміри вказані на рисунку 2.28.

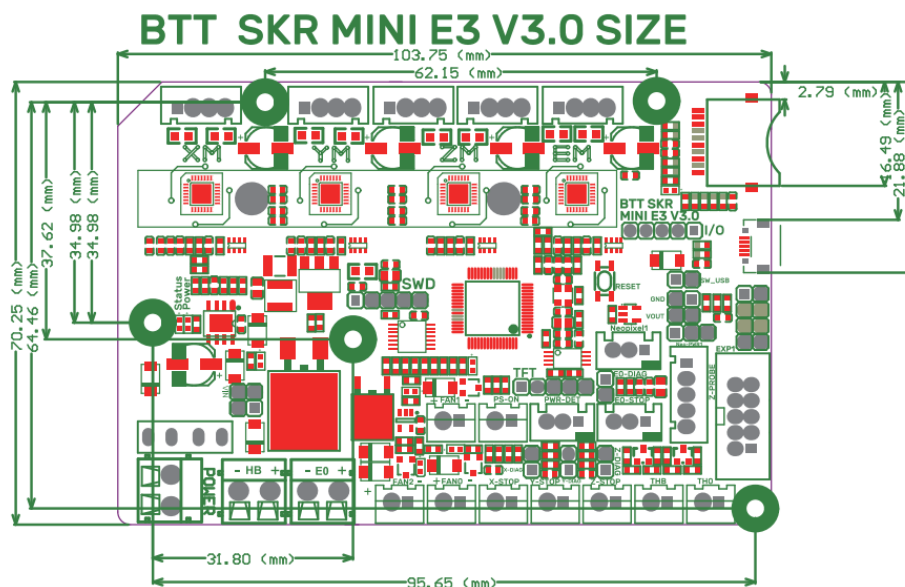


Рисунок 2.28 – Розміщення електричних елементів на платі керування

### Блок живлення 3D принтера DC12V/360W

Обраний блок живлення складається з п'яти підсистем, а саме: мережа

електромагнітних перешкод, випрямний фільтр, вбудований блок широтно-імпульсної модуляції, перемикач для перетворення енергії, вихідні пристрої з широтно-імпульсною модуляцією низької ШОЕ [14], Рисунок 2.29 електричної – принципової схеми наведено нижче.

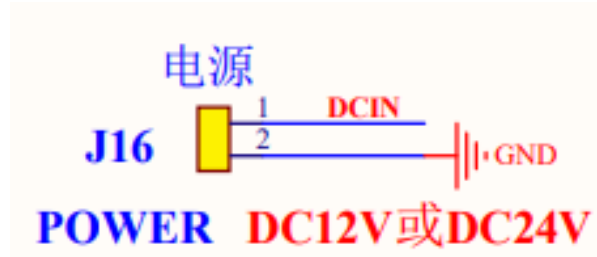


Рисунок 2.29 – Електрична принципова схема блоку живлення принтера DC12V/360W

Перевагами високоефективного світлодіодного блоку живлення являються: стабільна вихідна потужність зі стабільним струмом, захист від імовірності горіння електро – пристрою, та запобіжник від дії вхідного струму, всі ці, та менш значущі наявні переваги забезпечують гарантовано довготривалий термін служби сукупно всього пристрою. Саме описаним блоком живлення відбувається підключення наприклад робочої області принтера, а також перед інтегруванням крокових двигунів в систему, окремо інженерами підключаються кожен з обраних крокових двигунів принтера задля перевірки, та налаштування обертальних властивостей. Електричні принципові схеми драйверів крокових двигунів роботизованої системи для пошарового друку з пластику наведено на Рисунках 2.30 – 2.32.

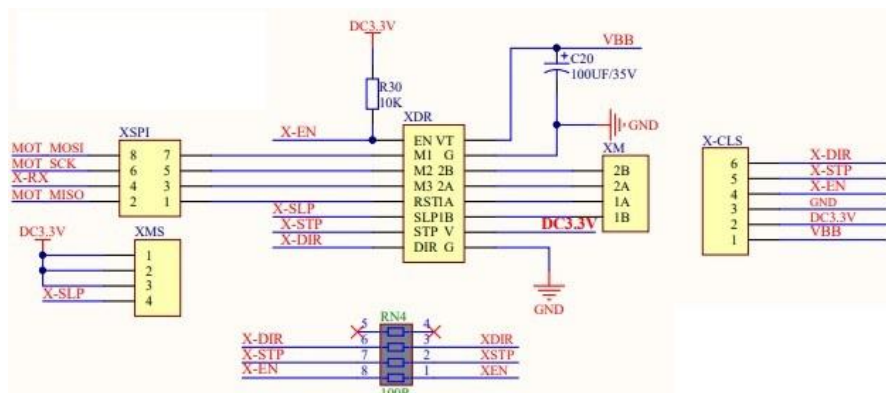


Рисунок 2.30 – Електрична принципова схема драйверу крокового двигуна вісь X

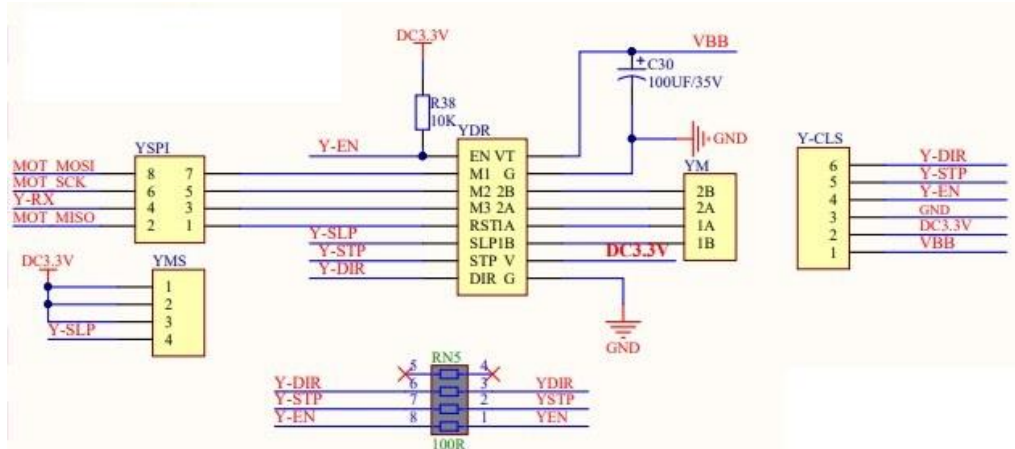


Рисунок 2.31 – Електрична принципова схема драйверу крокового двигуна вісь Y

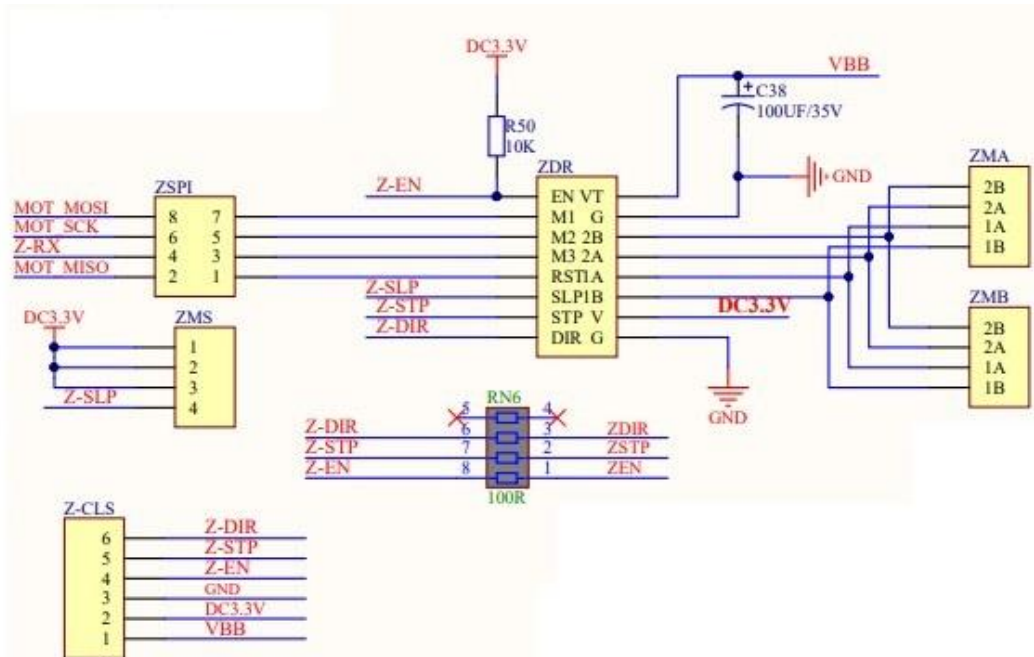


Рисунок 2.32 – Електрична принципова схема драйверу крокового двигуна вісь Z

### Мікроконтролер для 3D принтера – LPC1768/LPC1769

Мікроконтролери LPC1768/LPC1769 — це різновид електричних плат створених задля швидкої реалізації простих та складних проєктів, прототипів, автоматизованих систем для дослідження певних процесів в різних галузях людини, тощо. Електрична – принципова схема мікроконтролерів LPC1768/LPC1769 вказана нижче, Рисунок 2.33.



151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

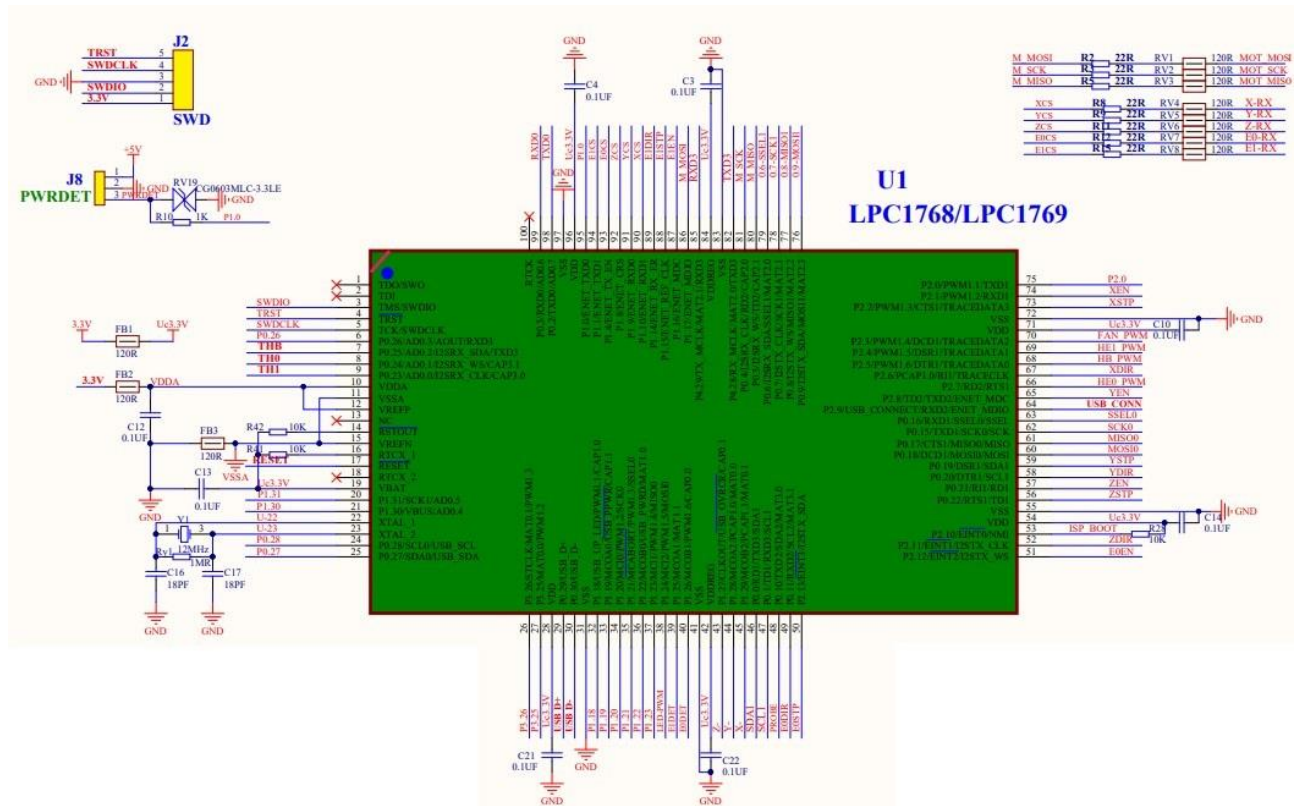


Рисунок 2.33 – Електрична – принципова схема мікроконтролерів  
LPC1768/LPC1769

Особливістю мікроконтролера NXP LPC1768, є доступність в створенні прототипів різнорівневого штибу. Виробник особливо акцентує, що саме ця серія контролера допомагає реалізовувати різні проєкти, де треба задіяти: Ethernet (пекетна передача даних між важливими для проєкту пристроями), USB, а також пристрій зберігає гнучкість при використанні певної кількості периферійних інтерфейсів і FLASH-пам'яті.

Конструктивними особливостями є враховане виробником потреби у підключенні до електричного пристрою різноманітних електричних компонентів, для цього створені наскрізні отвори, а також передбачено використання вбудованого програматора USB FLASH в проєктах, які цього потребують.

Універсальність мікроконтролера підтверджується передбаченням наступних факторів, а саме досвідченим розробникам мікроконтролер подобається тим

що дає реалізувати проєкт в тому числі за рахунок вбудованих систем, які сприяють створенню продуктивної платформи для створення proof-of-concepts. А для інженерів – розробників, початківців, що почали працювати з 32-розрядними мікроконтролерами, мікроконтролер підкупає саме інтуїтивно зрозумілим (доступним) рішенням що дозволяє проводити створення проєктів базуючись на бібліотеках, відомих серед інженерів ресурсів і підтримки спільноти в якій багато ентузіастів, що з радістю допоможуть. Завдяки використанню подібних мікроконтролерів, можна для зручності згрупувати принципово різні блоки, наприклад: драйвери крокових двигунів, кінцеві вимикачі, та датчики температури, які з'єднуються та функціонують завдяки саме платі керування пристроєм для пошарового друкування бажаної моделі з пластику.

Електричні принципові схеми: кінцеві вимикачі, WiFi датчику, крім цього датчиків температури робочої області, та температури нагрівального елемента в друкуючій головці (ефектор) автоматизованої системи для друку деталі з пластику послідовно розташовані нижче рисунки 2.34 – 2.36.

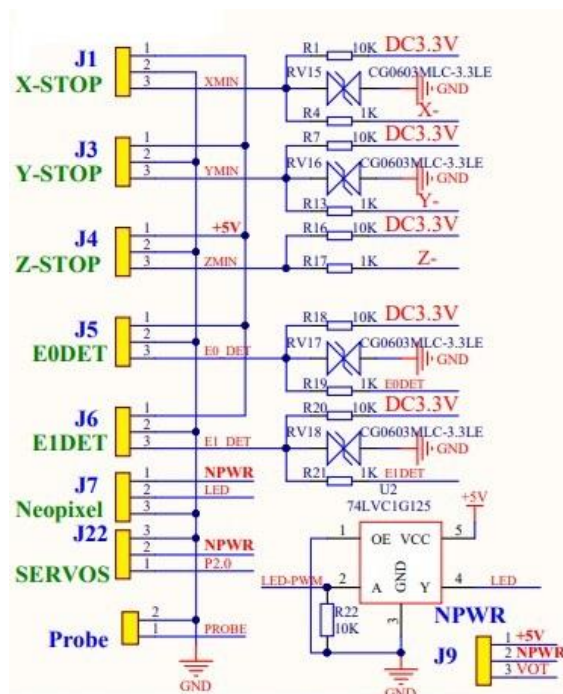


Рисунок 2.34 – Електрична – принципова схема кінцевих вимикачів пристрою

Кінцеві вимикачі групою можуть бути підключені до мікроконтролера типу LPC1768, та під'єднані до плати керування пристрою для об'ємних моделей з пластику. Нижче наведена електрична – принципова схема WiFi датчику розробленого принтера (рис. 2.35).

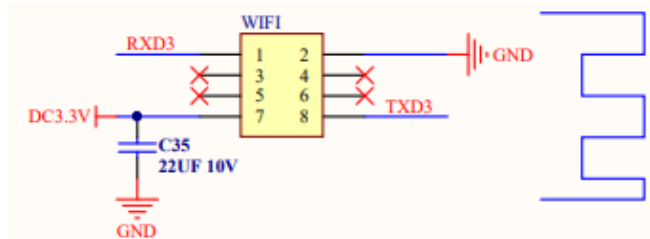


Рисунок 2.35 – Електрична – принципова схема WiFi датчику принтера

Електроніку робочої області можна підключити напряму до плати керування пристрою, а можна для запобігання впливу на компоненти системи (небажаного) високого струму, або стрибків напруги живлення до мікроконтролера, це безпечніше.

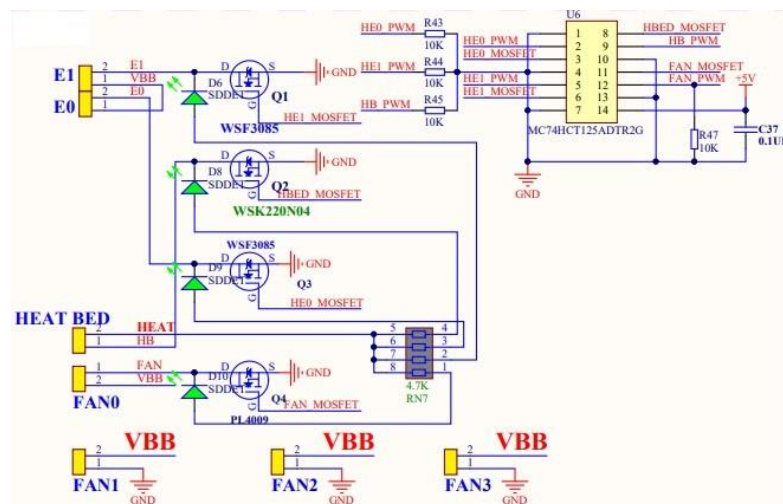


Рисунок 2.36 – Електрична – принципова схема робочої області (столу) принтера

Лінійний регулятор з низьким випаданням частоти (понижувач напруги живлення) – AMS1117-3.3 [15].

Лінійний регулятор з низьким випаданням частоти був обраний серед багатьох аналогічних електричних компонентів бо мав ряд переваг, серед яких

обов'язково треба зазначити: низьку напругу пристрою, здатність проводити регуляцію навантаження у вигляді (значення, показник) 0,2% (типова), крім цього розробники електричного компонента потурбувалися і забезпечили оптимізацію, для низької напруги, і не менш важливо, що впровадили обмеження температури на мікросхемі. Електрична – принципова схема лінійного регулятора з низьким випаданням частоти (понижувач напруги живлення) додана до роботи, і розміщена нижче, рисунок 2.37.

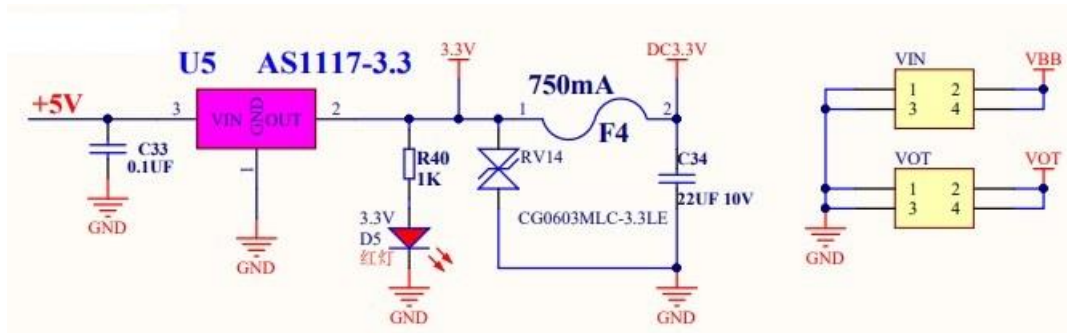


Рисунок 2.37 – Електрична – принципова схема лінійного регулятора з низьким випаданням частоти (понижувач напруги живлення) AMS1117-3.3

Понижувач напруги іншого зразка, також інтегровано в систему для друку моделей шляхом нашарування пластику за чіткими координатами. Електричний компонент призначений для регулювання, а саме: пониження або збільшення напруги живлення додано до роботи у вигляді електричної – принципової схеми, (рис. 2.38).

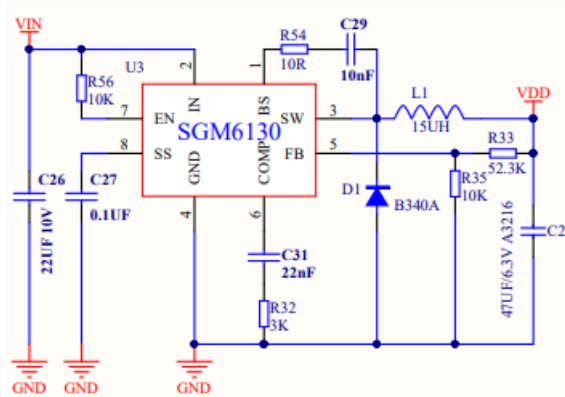


Рисунок 2.38 – Електрична – принципова схема регулювання напруги живлення

Показники за якими обов'язково потрібно здійснювати контроль процесу друку, до них відносять: температуру робочої області (столу принтера), та сопла принтера, сила обдуву для охолодження електроніки нагрівальних елементів, та моделі, яку друкують, а також важливим є показник тривалості друку моделі. Саме перелічені показники напряму впливають на результат роботи автоматизованої системи, того і передбачено трансляцію на рідкокристалічному сенсорному дисплеї (екрані), рисунок 2.39 – зазначених вище показників: температура, сила обдуву, тривалість друку моделі.

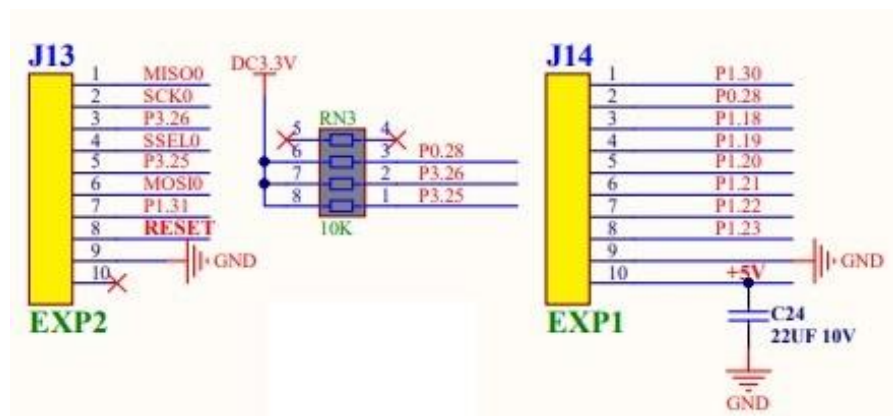


Рисунок 2.39 – Електрична – принципова схема рідкокристалічного сенсорного дисплея (екрану)

### Обґрунтування вибору та встановлення прошивки для роботизованої системи для друку моделей з пластику

Наведені електричні принципові схеми найважливіших електричних компонентів, які сукупно забезпечують стабільну роботу принтера, яка забезпечується в тому числі всіма налаштуваннями пристрою для об'ємного друку, реалізацією якого впродовж року плідно займалися. Налаштування системи для друку можливе після встановлення прошивки для принтера, для цього необхідно пройти визначений алгоритм завантаження обраної прошивки, який описаний нижче.

#### Прошивка Klipper

KlipperScreen - це графічний інтерфейс із сенсорним екраном, який

взаємодіє з Klipper через Moonraker. Конкурентною перевагою при використанні інженерами прошивки є унікальна здатність перемикатися між декількома 3D принтерами – це забезпечує доступ до них (з одного місця), а крім того навіть не обов'язково працювати на одному хості, користувачі можуть інсталиювати прошивку (встановити) на іншому пристрої, та налаштувати IP-адресу для того, щоб мати (зберігти) доступ до принтера [34].

Прошивка Klipper була інтегрована в проєкт враховуючи всі переваги, а саме: швидке налаштування, та інтуїтивно зрозуміле використання.

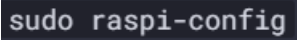
Алгоритм інсталяції (встановлення) прошивки Klipper:

1. Підключіть та закріпіть екран, дотримуючись інструкцій від виробника. Серед наявних на ринку електроніки екранів є ті, що не потребують додаткового програмного забезпечення (ПЗ), але є і ті, що потребують встановлення ПЗ, що робиться за допомогою скрипта. Обов'язково потрібно протестувати підключений екран для принтера, та наглядно переконатися, що екран працює.

2. Інсталяція для Raspberry Pi – процес встановлення призначений для не десктопної версії Raspbian, також відомої як Raspbian Lite, але він працює і на інших версіях.

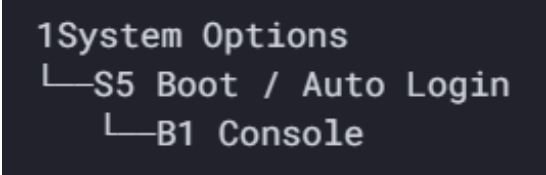
При використанні не десктопної версії Raspbian – це версія з графічним інтерфейсом, рекомендуємо застосувати команду, що вказана в табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Вхід в консоль

Вхід в консоль	
Скріншот	Текст
	sudo raspi-config

Команда призначена для входу в консоль, і використовується для того, щоб активізувалася можливість обирати послідовно наступні опції, які будуть доступні в порядку спадання (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Інсталяція Raspberry Pi

Інсталяція Raspberry Pi	
Скріншот	Текст
	<pre>1System Options └─S5 Boot / Auto Login   └─B1 Console</pre>

3. Автоматична інсталяція (установка) KIAUH – це інструмент, розроблений допомоги автоматизувати перше встановлення, або оновлення наявної версії на більш актуальну: Klipper, Moonraker, Mainsail та інші розширення.

```

===== [ KIAUH ] =====
Klipper Installation And Update Helper
=====

===== [ Main Menu ] =====

0) [Upload Log] | Klipper: Installed: 1
                | Branch: exclude

1) [Install]    |
2) [Update]    | Moonraker: Installed: 1
3) [Remove]    |
4) [Advanced]  | Mainsail: Installed!
5) [Backup]    | Fluid: Installed!
                | KlipperScreen: Installed!
6) [Settings]  | Telegram Bot: Not installed!
                |
                | DWC2: Not installed!
                | Octoprint: Not installed!

v3.1.0-103     |

                | Q) Quit

Perform action: █
  
```

Рисунок 2.40 – Автоматична інсталяція (установка) KIAUH

Активізувати автоматичну інсталяцію (встановлення) KIAUH можна поступово зробивши перелічені нижче кроки: завантаження готового скрипта можливе після, Таблиця 2.40, встановлення git. Необхідна для цього команда вказана в табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Застосування команди git

Застосування команди git	
Скріншот	Текст
	sudo apt-get install git -y

Після інсталяції git задійте наступні команди обов'язково зберігаючи порядок для завантаження, та функціонування вказаного в табл. 2.15 скрипту. Задіяння скрипту може визвати необхідність введення з клавіатури пароллю sudo (серед наявних функцій є декілька, які працюють тільки у разі активації пароллю: sudo).

Таблиця 2.15 – Застосування скрипту.

Застосування команди git	
Скріншот	Текст
	cd ~ git clone <a href="https://github.com/th33xitus/kiauh.git">https://github.com/th33xitus/kiauh.git</a> ./kiauh/kiauh.sh


Якщо по різних причинах, не вдалося встановити прошивку KIAUH автоматично, то використовуючи наступний алгоритм ручної інсталяції питання з прошивкою буде вирішено.

Встановлення прошивки Klipper в ручному форматі:

1. Встановіть Klipper та Moonraker.
2. Інсталяція (встановлення) KlipperScreen відбувається з використанням вказаного в таблиці 2.16 шматка скрипту програми.



Таблиця 2.16 – Застосування скрипту для встановлення KlipperScreen.

<b>Інсталяція KlipperScreen</b>	
Скріншот	Текст
 <pre>cd ~/ git clone https://github.com/jordanruthe/KlipperScreen.git cd ~/KlipperScreen ./scripts/KlipperScreen-install.sh</pre>	<pre>cd ~/ git clone https://github.com/jordanruthe/KlipperScreen. git cd ~/KlipperScreen ./scripts/KlipperScreen-install.sh</pre>

Наведений в таблиці 2.17 скрипт послідовно інсталує (встановить) пакети, що перелічені у розділі ручної установки (інсталяції), а крім того створить віртуальне середовище python за адресою ~/.KlipperScreen-env та встановить службовий файл systemd.

Таблиця 2.17 – Застосування скрипту для встановлення KlipperScreen.

<b>Інсталяція KlipperScreen</b>	
Скріншот	Текст
Віртуальне середовище	python
Адреса віртуального середовища	~/.KlipperScreen-env
Службовий файл	systemd

Якщо потрібне розташування файлу конфігурації, ви можете додати -с або -configfile до файлу systemd і вказати розташування вашого файлу конфігурації.

На цьому етапі KlipperScreen повинен працювати, якщо він не запускається, перейдіть на сторінку усунення несправностей

Алгоритм процесу налаштування мікропрограми безпосередньо перед (першим) друком 3D принтера:

1. Вкажіть необхідний (потрібний) параметр у файлі конфігурації

пристрою для об'ємного друку.

2. Почекайте поки змінений вами параметр – зчитується.
3. Зберігаємо внесені зміни.
4. Перезавантажуємо прошивку Klipper.
5. Вмикаємо готовий до роботи 3D принтер.

Klipper застосовує Raspberry Pi для проведення інтенсивних, і водночас не простих завдань для обчислювання, з подальшою відправкою (надсиланням) списку попередньо оброблених даних вочевидь саме на плату контролера. Оскільки саме обраний при розробці ряд плат керування (або комбінацій плат) миттєво можна налаштувати, це робить пристрій більш універсальним, та надає певну гнучкість при розробці автоматизованої системи об'ємного друку.

Крім того, треба підкреслити, що незалежно від того, яка плата керування використовується, можуть бути включені більш розширені та водночас складні функції, такі як наприклад формування входу – це оптимізує роботу системи.

## **2.5 Особливості узагальненого алгоритму роботи 3D принтера та його удосконалення**

Основою на принципах роботи обраної кінематичної схеми, та перелічених переваг розробленої автоматизованої системи, було створено алгоритм роботи роботизованого пристрою для друку 3D моделей (рис. 2.40).

Роботизована система руху в просторі, простіше 3D принтер, базується на принципах кінематики – CoreXY, в якій передбачено переміщення (пересування) робочого столу (робочої зони) вздовж саме осі Z, а технологією друку виступає розповсюджена FDM – технологія.

Після подачі живлення, виконується ініціалізація мікроконтролера та отримання даних від датчиків. Індикатор готовності роботи автоматизованої системи для друку – це екран, на якому відображаються всі важливі параметри, враховуючи: температуру робочої області (столу), температуру сопла друкуючої головки

(екструдера), обдуб електроніки або моделі, тривалість друку моделі, тощо.

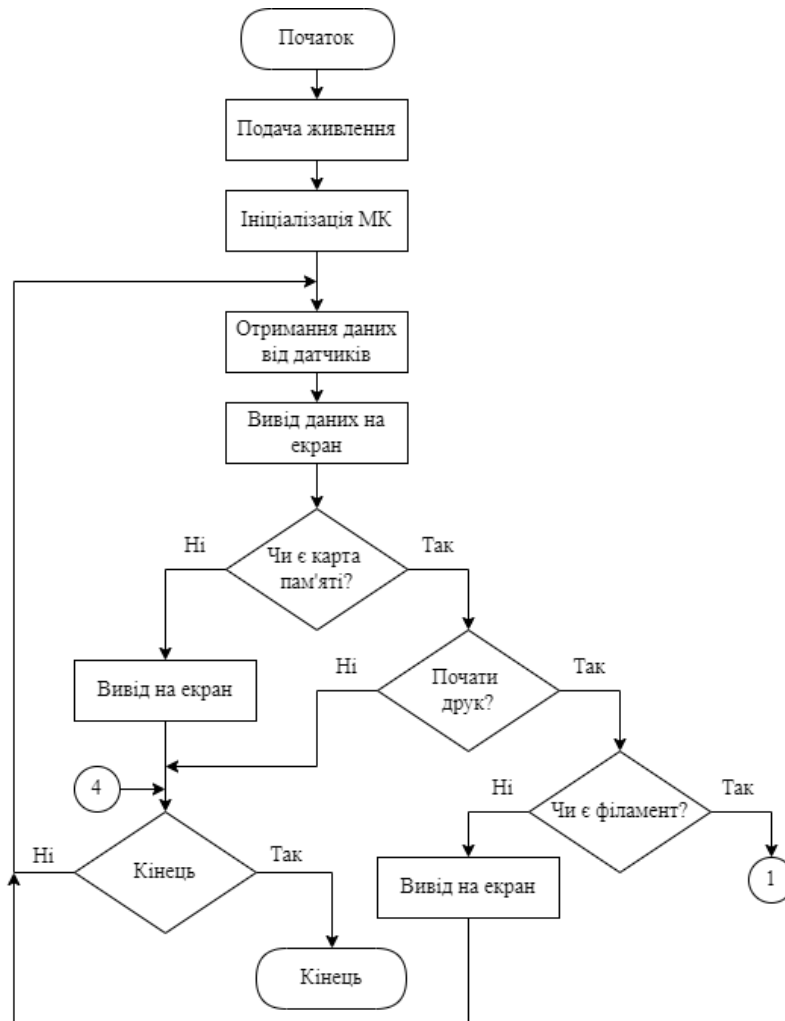


Рисунок 2.41.1 – Алгоритм роботи 3D принтера

Для запуску процесу друкування об'ємної моделі 3D – принтером використовують екран або персональний комп'ютер (ПК). Вибір способу керування (управління) автоматизованою системою відбувається одразу після відображення ключових параметрів на екрані 3D – принтера. Система чекає на команду від персонального комп'ютера (ПК), в тому випадку, якщо не керується оператором через екран пристрою для об'ємного друку. Запуск та керування (управління) процесом друку з персонального комп'ютера проходить вдало тільки після того, як з ПК оператор підтверджує запуск процесу друку, і діє команда – друкувати модель, в противному випадку система завершує підготовчий етап, це призводить до того,

що роботизований пристрій для друкування об'ємних моделей вимикається. Оперативне проходження підготовчого етапу і перехід до нашарування моделі можливе тільки після визначення способу керування процесом друку, а саме треба обрати один з наведених варіантів: запуск друку планується через ПК або через флешку.

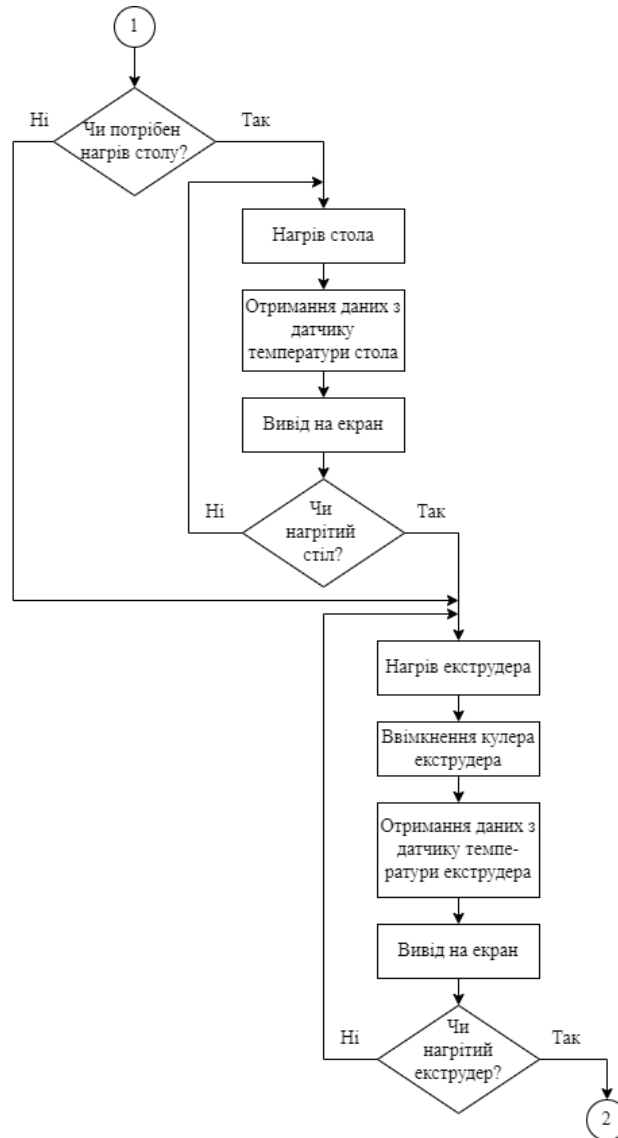


Рисунок 2.41.2 – Алгоритм роботи 3D принтера

При керуванні процесом друку моделі з ПК, саме з комп'ютера відправляється команда, яка підтверджує початок друку, а у відповідь ПК поступово передає інформацію про 3D-модель роботизованому пристрою просторового друку.

Після отримання команди, що породжує друкування 3D-моделі системою, що буде здійснювати друк оцінюється необхідність нагрівання робочої області (столу).

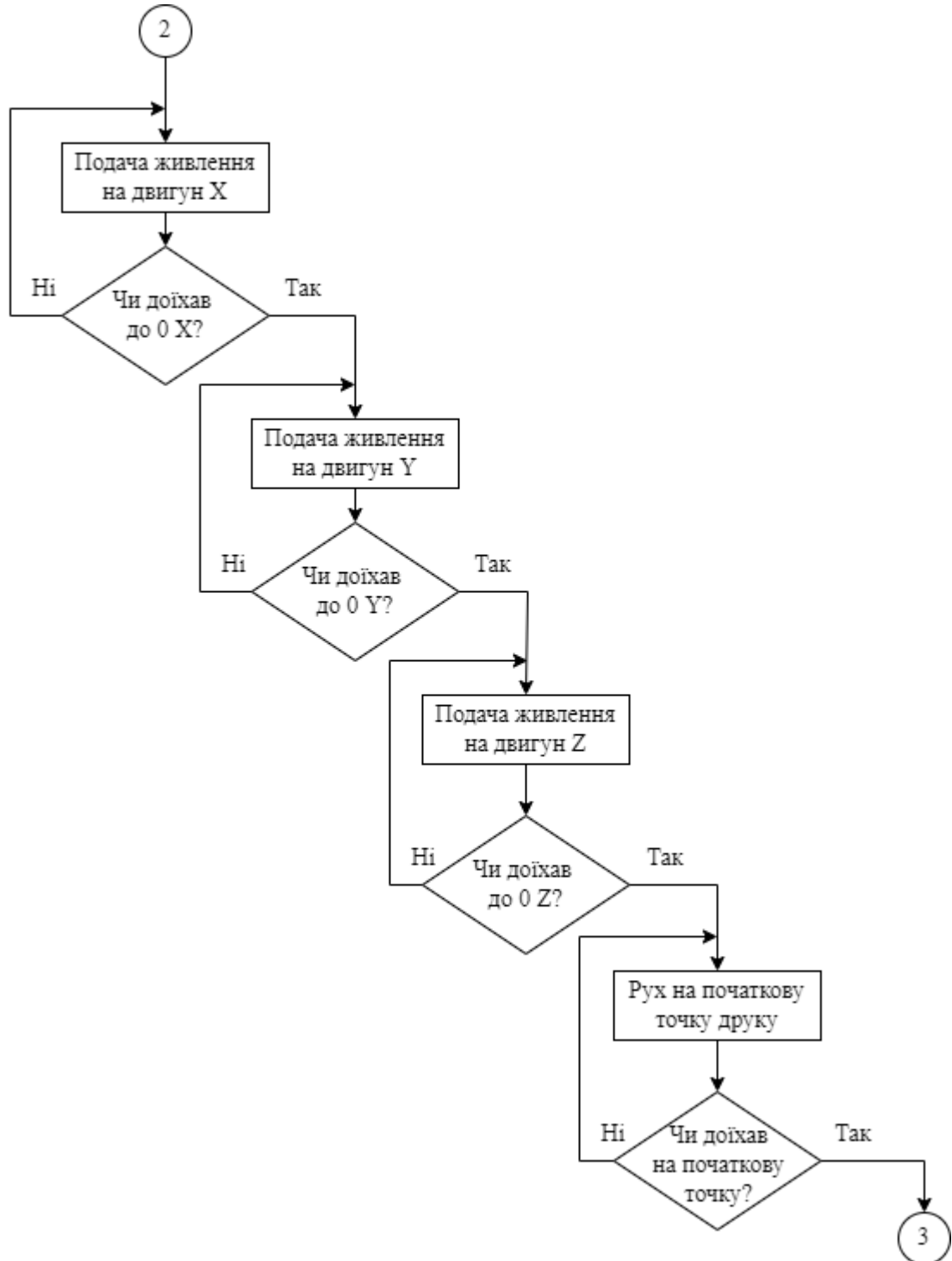


Рисунок 2.41.3 – Алгоритм роботи 3D принтера

Виходячи (основуючись, спираючись) з властивостей матеріалу (пластик) з якого буде створена об'ємна модель, і при необхідності, встановлюється температура нагрівання робочого столу (робочої області) з обов'язковою демонстрацією значення температури робочого столу (області) на сенсорному екрані. Показники за якими можна здійснювати контроль впродовж визначеної для кожної конкретної моделі тривалості друку трансляються саме на сенсорному екрані автоматизованої системи для пошарового друку 3D моделей.

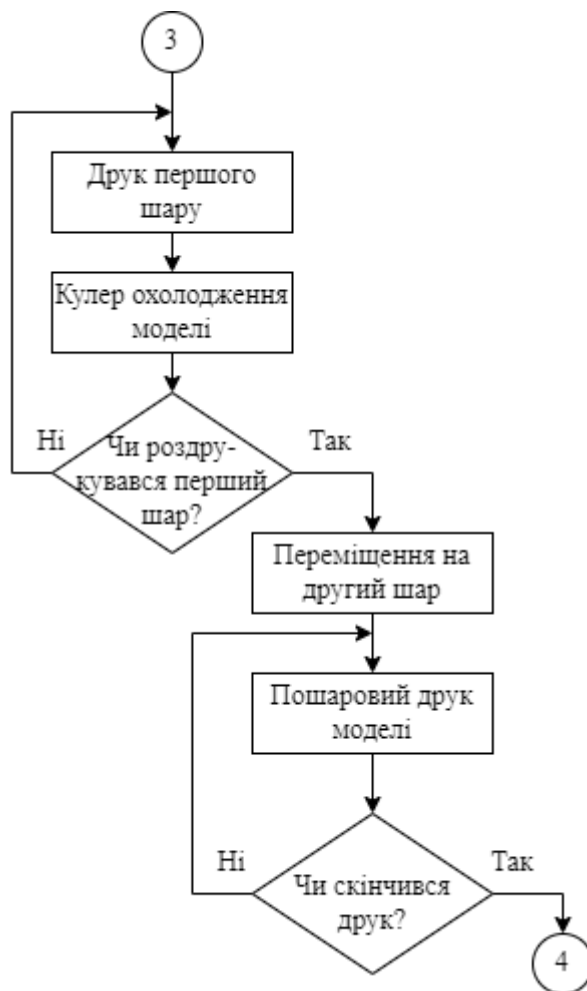


Рисунок 2.41.4 – Алгоритм роботи 3D принтера

На наступному етапі системою перевіряється, чи досягла температура робочої області (робочого столу) заданого (визначеного) значення, якщо ні, то за алгоритмом роботи система задіє всі необхідні електронні компоненти, для термінового

нагрівання робочої області (робочого столу) принтера. Якщо запуск процесу друку відбувся з сенсорного екрану принтера шляхом обрання з переліку збережених моделей потрібної моделі, система починає завантаження даних обраної 3D – моделі. Важливим пунктом в алгоритмі є факт перевірки системою, а чи вимагає друкування моделі нагріти робочий стіл (робочу область), і якщо це потрібно, то встановлює температуру нагрівання столу та виводить значення температури столу на екран. Після визначення температури столу система перевіряє, чи досягла температура потрібного (бажаного) рівня. Якщо результат є негативним, система визначає, чи потрібно підігрівати стіл.

Друк моделі з матеріалу, який не потребує нагрівання робочої області (робочого столу) дозволяє пропустити процес нагріву робочої області, і вимагає лише перехід до нагрівання сопла принтера, з обов'язковим вказанням значення температури на екрані принтера, яке свідчить про поступове зростання температури – нагрів сопла.

Перевірка наявної температури сопла реалізується датчиком температури, який подавши сигнал на мікроконтролер принтера дозволяє усунути можливу невідповідність між фактичним значенням температури сопла, і потрібною (встановленою) температурою. Контроль температури сопла – це процес, який може повторюватися, до того моменту поки сопло не буде нагріте до чітко визначеного значення, з подальшою трансляцією (виводом) цього значення на сенсорний екран пристрою для об'ємного друку.

Для початку друку моделі, ефектор принтера повинен зафіксуватися в положенні «НОМЕ». Положення «НОМЕ» називають початковим положенням, або нульовим положенням, і вважають умовно нульовою точкою, з якої стартує друкуюча головка кожен раз коли починає процес друкування об'ємної моделі від, якої прораховується подальше переміщення ефектора.

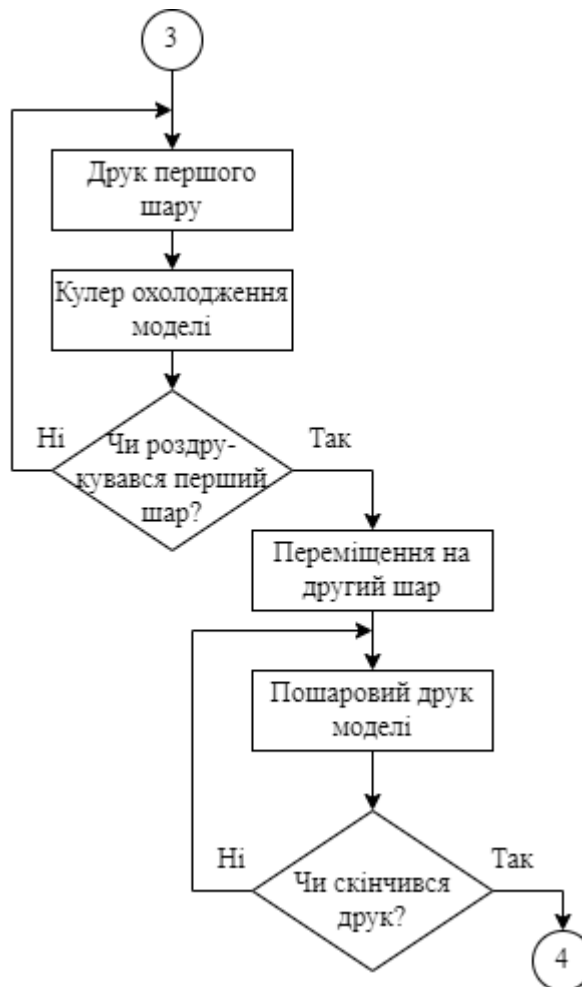


Рисунок 2.41.4 – Алгоритм роботи 3D принтера

Одразу після прибуття робочої області проводиться обов'язкова перевірка положення столу, шляхом перевірки саме наступних кінцевих вимикачів: Y, Z, тільки після безпомилкового розташування робочої області на критично важливій висоті система переходить до наступної задачі. Фіксація друкуючої головки в точці нуль принтера, а також прибуття з подальшим стабільним розташуванням робочої області принтера сприяє тому, що роботизована система запускає двигун, який проштовхує нитку пластику, яка саме в розплавленому вигляді поступово наноситься на робочу область автоматизованої системи для пошарового друку об'ємних моделей.

По завершенню процесу пошарового друку роботизована система дає



команду друкуючій головці повернутися в нульову точку – «НОМЕ». Слідом за переміщенням друкуючої головки роботизованої системи в початкове своє положення, системний нагрів сопла принтера, та підтримання критично важливої температури робочої області припиняється. Охолодження сопла, та новоствореної пластикової моделі залишається до повного їх охолодження.

## **2.6 Моделювання компонентів системи 3D принтера**

Після розгляду сфер реалізації адитивних виробничих процесів, слід розглянути можливості використання програмного забезпечення для подальшої реалізації 3D друку.

### **2.6.1 Створення моделі**

Є три способи отримати цифрову модель:

1. Сканування існуючого об'єкта. Для цього можна використовувати різні системи тактильних або оптичних вимірювальних технологій, але комп'ютерні томографи підходять і для так званої зворотної інженерії.

2. Завантаження файлу з онлайн-платформи. Кількість онлайн-платформ для друкованих 3D-моделей можна керувати. Їх можна розрізнити відповідно до типу пропонованих моделей, тому є моделі як для хобі, так і для професіоналів. Крім того, можна розрізнити платні та безкоштовні пропозиції. У таблиці нижче наведено відомі онлайн-бази даних для 3D-моделей.

Огляд онлайн-бази даних для 3D-моделей надано в Додатках Д.

Для спрощення пошуку потрібної моделі на різних платформах, можливо використання пошукової системи IFind3D для шаблонів 3D-друку, яка була представлена в травні 2017 року. Вона має доступ до 70% усіх онлайн-баз даних, що відповідає понад 700 000 шаблонів для 3D-друку і таким чином охоплює 90% шаблонів, доступних в мережі.

3. Створення власної моделі. Для цієї мети доступна незліченна

кількість платних, але також безкоштовних програм 3D CAD. У таблиці нижче наведено деякі програми, які широко використовуються в компаніях:

Таблиця 2.18 – Програми для 3D моделювання [35]

Назва	Використання	Ціна	Формати
AutoCAD	промисловість, навчання	1400 євро на рік	dwg, dxf, pdf
CATIA	промисловість	7 200 євро – базова ліцензія, доступна безкоштовна освітня ліцензія	3dxml, catpart, igs, pdf, stp, stl, vrm
Fusion 360	промисловість	500 євро на рік, доступна безкоштовна освітня ліцензія	catpart, dwg, dxf, f3d, igs, obj, pdf, sat, sldprt, stp
Onshape	промисловість, навчання	2100 – євро на рік для малого та середнього бізнесу, 1500 – євро на рік єдина ліцензія для користувачів, Безкоштовно – з відкритим доступом до створених моделей, доступна безкоштовна освітня ліцензія	parasolid, acis, step, iges, solidworks, pvz, jt, colladia, rhino, gltf, obj, 3mf, stl
Rhino3D	промисловість	1695 євро – базова ліцензія, 495 євро – ліцензія для навчання	3dm, 3ds, cd, dae, dgn, dwg, emf, fbx, gf, gdf, gts, igs, kmz, lwo, rws, obj, off, ply, pm, sat, scn, skp, slc,

			sldprt, stp, stl, x3dv, xaml, vda, vrml, x_t, x, xgl, zpr
Solidworks	промисловість, навчання	10 000 євро – базова ліцензія, доступна безкоштовна освітня ліцензія	3dxml, 3dm, 3ds, 3mf, amf, dwg, dxf, idf, ifc, obj, pdf, sldprt, stp, stl, vrm
3Ds Max	промисловість, навчання	2100 євро на рік, доступна безкоштовна освітня ліцензія	stl, 3ds, ai, abc, ase, asm, catproduct, catpart, dem, dwg, dxf, dwf, flt, iges, ipt, jt, nx, obj, prj, prt, rvt, sat, skp, sldprt, sldasm, stp, vrml, w3d xml

Подальші роботи 3D моделювання були виконані в програмному середовищі Onshape з використанням безкоштовної освітньої ліцензії.

Для створення друкованої моделі можна використовувати різне програмне забезпечення. На додаток до програми 3D CAD для моделювання об'єкта може бути корисно перевірити дані на можливість друку (Check & Repair). Інша програма (CAM4) тепер генерує інформацію, необхідну для відповідного 3D-принтера для готової до друку моделі та «перекладу» на машинну мову – так званий G-код. Деякі програми поєднують кілька з цих функцій, наприклад, Slic3r і Cura пропонують можливість відновити дані в останніх версіях.

Використовуючи безкоштовну ліцензію студента в середовищі для

моделювання Onshape, була розроблена модель 3D принтера.

### **2.6.2 Друк конструктивних компонентів (деталей) з пластику 3D принтера**

Задля визначення, який саме пластик буде використовуватися для друкування конструктивних компонентів 3D принтера, обов'язково треба врахувати ключові критерії, для запобігання будь-яких деформацій, або пошкоджень конструктивних компонентів безпосередньо під час роботи принтера. Врахування всіх нештатних ситуацій під час роботи принтера – це головна задача при проектуванні автоматизованої системи для друку об'ємних моделей. Нештатними ситуаціями, що виникають у наслідок неправильно підібраного типу пластику під час друку деталі принтера з пластику можна вважати:

- розплавлення під дією температури будь-якого компонента з пластику, який функціонує в системі;
- виникнення неприємного запаху під час друку (запах пластику, запах хімічних речовин, та інші запахи);

Під час друку моделі температура всередині камери, що відгороджує робочу область принтера від протягів, та навколишньої температури сягає діапазону в 55-60°C.

Матеріал з якого дозволяється друкувати пластикову деталь, яка зважаючи на конструкцію кріпиться всередині камери, де відбувається друк об'ємних моделей повинен витримувати температуру 80 °C. Задля запобігання термічної деформації бажано обирати пластик з якого будуть роздруковані конструктивні деталі для принтера, температура розплаву (головний показник серед критеріїв пластику), якого більше за 80 °C.

Температура робочої області принтера, для хорошої адгезії моделі (прилипання до робочого столу моделі), як правило досягає 80 °C.

Для того щоб серед найрозповсюдженіших видів пластику, обрати

підходящий матеріал з якого буде створено всі необхідні конструктивні деталі, було створено таблицю, в якій зібрані ключові переваги та недоліки, а крім того особливості наявних пластиків і враховано всі специфічні вимоги до деталей, що стануть основою пристрою для об'ємного друку.

Вимоги до конструктивних деталей з пластику 3D принтера додано в Додатках Д.

Серед представлених пластиків в Таблиці є ті, що виступають, як надійні матеріали, а є ті, що не бажано пускати в діло при конструюванні принтера для об'ємного друку.

Надійні пластики для друку конструктивних деталей принтера:

- PLA / HTPLA – друк затискачів робочої області;
- PETG – прийнятний друк деталей, що кріпляться в зоні де немає термічного впливу на матеріал (затискачі, зовнішні кріплення електроніки, кріплення для подачі пластику).

- ABS – ідеальний матеріал для друку майже всіх комплектуючих принтера. Під дією високих температур, пластик не деформується, хоча має необхідну (допустиму) пластичність, і витримує вигини без утворення на поверхні моделі тріщин.

- PA12 – нейлон – рекомендується використовувати матеріал для друку конструктивних деталей принтера, бо схильність пластику до повзучості мінімізована, саме під сталим тиском, що чиниться (спричиняється) болтами, які фіксують роздруковані з нейлону типу – PA12 конструктивні компоненти автоматизованої системи друку об'ємних моделей. Пластик відноситься до дорого вартісного матеріалу, і переважно використовується при друці моделей на принтерах, які базуються на SLS технології (якість моделі висока) друку, ніж на принтерах FDM технології (якість моделі поміркована).

Не рекомендовано друкувати конструктивні деталі з наступних видів пластику:

- PETG – у зв'язку з низькою термостійкістю;
- PA6 – нейлон – не рекомендується друкувати компоненти принтера саме цим видом нейлону, бо зберігається схильність матеріалу до повзучості (повільної деформації). Повзучість проявляється саме під сталим (постійним) тиском, що спричиняється (чиниться) болтами, які фіксують (затискають) роздруковані з нейлону типу – PA6 деталі.
  - Polycarbonate (PC) та суміші PC, такі як PC – ABS, PC – CF – не бажано друкувати компоненти принтера, бо зберігається висока імовірність раптового розтріскування конструктивних деталей принтера.
  - Resin (Смола) – швидка деформація і зношення моделей вимагає ввести заборону друкувати конструктивні деталі принтера.

### **Висновки до другого розділу**

1. Виявлення сутностей будови 3D – принтера та гостра потреба дізнатися, які саме інноваційні особливості для удосконалення варто застосувати, (здійяти) при проектуванні роботизованої системи, для друку об'ємних моделей дозволило враховуючи всі переваги та недоліки друкуючих головок (екструдерів) обрати друкуючу головку типу – Afterburner. Крім цього серед існуючих кінематик було вирішено зупинитися на конфігурації – CoreXY, а це означає, що процеси по переміщенню кареток, та органу для нанесення пластику задля нашарування деталі значно оптимізовані в тому числі натягуванням ременів системи.

2. Обґрунтування та вибір блоків 3D – принтера призвело до обрання серед відомих електричних компонентів тих, які є сумісними між собою, а крім цього було досягнуто допустиму взаємозалежність, яка зберігається між ключовими компонентами автоматизованої системи, наприклад між платою керування 3D принтера, та драйверами крокових двигунів, а також між електронікою друкуючої головки (екструдера), робочою областю та керуючою платою принтера, тощо.

3. Реалізація функціональної блок – схеми 3D – принтера, являється основою адитивних технологій бо є наглядною демонстрацією степені оптимізації процесів, які сукупно піддаються модернізації під час впровадження інноваційних ідей прогресивного світу.

4. Проаналізувати особливості реалізації електричної – принципової схеми 3D – принтера корисно для глибшого розуміння ключових принципів роботи роботизованої (автоматизованої) системи в цілому. Ця система покликана здійснювати поступове нарощування об'ємних моделей. Для глибшого розуміння процесів сформульовано опис принципу роботи кожного з ключових електричних компонентів роботизованої системи для об'ємного друку, а також зазначена взаємозалежність електричних компонентів в системі.

5. Проаналізувати особливості узагальненого алгоритму роботи 3D – принтера з метою провести комплексне удосконалення, можливо тільки базуючись на принципах роботи обраної кінематичної схеми, та перелічених переваг розробленої автоматизованої системи.

6. Моделювання компонентів системи 3D – принтера передбачає (включає) вибір: по–перше програмного забезпечення – інструментарій, доречно (правильно) обраного ПЗ посприяє стрімкому проектуванню роботизованої системи для друкування об'ємної моделі, по–друге здійснити друк конструктивних компонентів (деталей) 3D принтера з пластику, по–третє виокремити надійні пластики, з який критично важливо друкувати конструктивні компоненти, та сформувати список тих пластиків, якими ні в якому разі не можна друкувати компоненти для автоматизованої системи що здійснює поступове вирощування 3D моделей з пластику.

### **3 ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМІКИ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ АДИТИВНОГО 3D ПРИНТЕРА**

Ідея адитивності як основа реалізації технологій покрокового, порційного додавання часток, сукупність яких утворює готову деталь, обумовила революційний крок створення безвідходних виробництв. Пошарове розбиття просторових тіл та покрокове виготовлення просторових деталей шляхом виготовлення і з'єднання шарів є методологічною основою технологій 3D друку. Як засвідчує аналіз існуючих конструкцій та тенденцій розвитку 3D принтерів їх можливості і якість визначає як кінематична схема так і правильний вибір технологічних параметрів: температури і швидкості подачі робочого тіла, швидкості руху головки, висоти шару та діаметру сопла. Зазначене і виділяє коло задач які розв'язуються у даному розділі.

#### **3.1 Розвиток комплексної моделі 3D принтера узагальненої конструкції**

Відмінність технологій будови моделей як упорядкованої сукупності шарів та їх з'єднання за рахунок розливу плавлених шарів або контактного з'єднання розм'якшених ([SLS](#), [FDM](#)) або розливу взагалі м'яких матеріалів.

Не залежно від поділу адитивних технологій та обраних типів автоматизованого устаткування, що його реалізує далі будемо розрізняти за:

- методом фіксації шару: фотополімеризація, сплавлення, склеювання;
- типом конструктивних матеріалів (агрегатним станом та структурою): рідкі, сипучі, ниткоподібні, пруткові, листові або плівкові.

Крім того, також будемо класифікувати за видами впливу – підводу енергії як ключового фактору: лазерні та не лазерні.

Таким чином, обмежимо дослідження технологічного устаткування класом адитивних не лазерних технологій, які зорієнтовано на подачу проволоченого матеріалу у робочу зону, а далі перетворення його агрегатного стану і подальшої



дозованої подачі вже розплаву. Блок-схема такого узагальненого процесу представлена рис. 3.1.

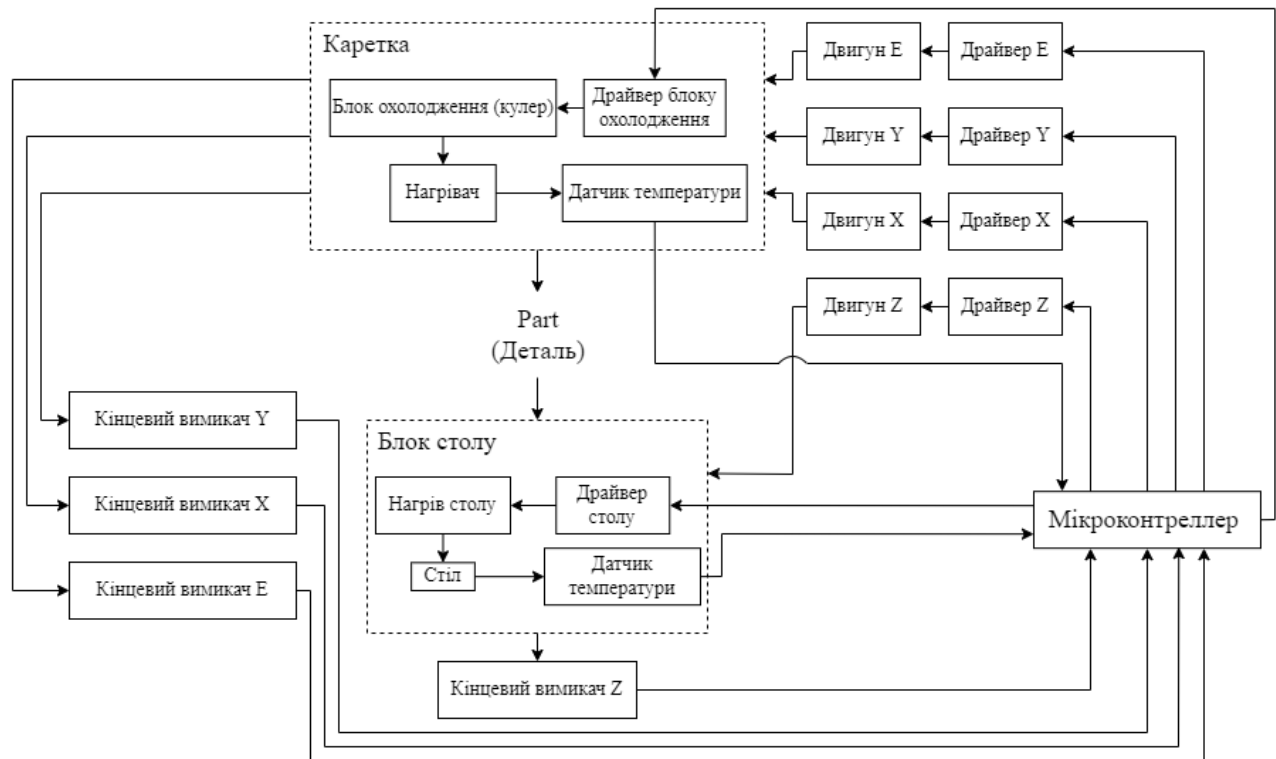


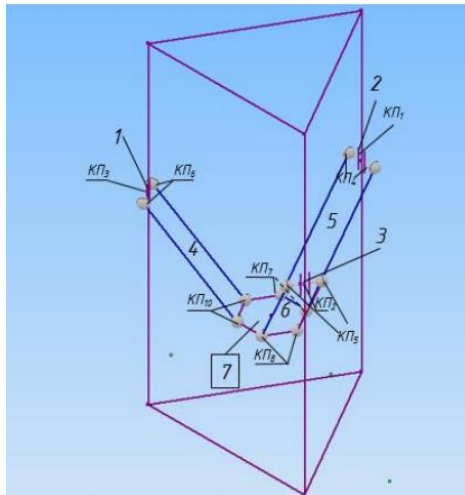
Рисунок 3.1 – Узагальнена блок-схема 3D принтера

У першому розділі досліджено особливості конструкцій реалізація яких описується узагальненою блок-схемою, Рисунок 3.1. У розділі 2 розглянуто особливості роботи у сукупності із механізмами відокремленого трьох координатного руху. Для забезпечення якісного функціонування систем механізми потребують високоточного механічного устаткування для переміщення робочої головки. Усунення недоліків, що пов'язані із початковою неточністю виготовлення та збору напрямних, а також подальші експлуатаційні зміни привабливими є механізми паралельної структури (МПС). За рахунок можливостей початкового та наступного калібрування такі механізми придатні компенсувати частку похибки при наявних моделях прогнозування відхилень. Таким чином, означені конструкції потребують подальшого додаткового моделювання та дослідження з метою формування моделей впливу кінематичних параметрів на технологічні характеристики

продукції. Поставимо задачу побудови кінематичної та динамічної моделі МПС.

В роботі було задано інерційну систему координат, яка жорстко зв'язана із станиною і у якій задано положення характерної точки вихідної ланки.

А



Б

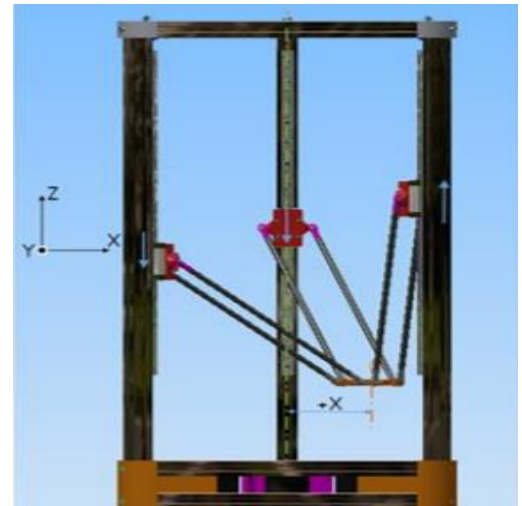


Рисунок. 3.2. – Узагальнена кінематична схема А та Б модель технологічного устаткування паралельного плоского руху тягової структури.

Між собою станина та вихідна ланка містить  $n$  кінематичних ланок, що забезпечують її відносно встановленої плоскої поверхні. В кожній кінематичній парі встановлюються приводи, що дозволяє реалізовувати до шости ступенів вільності вихідної ланки. Робочий орган жорстко зв'язано з вихідною ланкою відповідно до технологічних вимог. Така постановка задачі: зводить опис руху до прямої та зворотної задачі кінематики та динаміки. Для їх розв'язку визначимо узагальнену кінематичну схему та модель паралельного плоского руху тягової структури рис.3.2 [40].

Введемо у якості системи параметрів для кінематичного аналізу та керуванням 3D-принтером, що будемо далі застосовувати як позначення та розміри на схемах та у моделях. Координати положення вихідної ланки  $x, y, z$ ; умовні позначення напрямних стоек принтера  $A, B, C$ ; базові точки, що обрано на основі робочого органу  $A1, B1, C1$ ; базові точки, розташовані на напрямних каретках

принтера  $A_2, B_2, C_2$ ; висота робочого простору вздовж координати  $Z$   $z_{max}$  ( $Z\_MAX\_LENT$  Н прийнято 251мм); точка відліку, що розташована на робочому органі  $t$ ; довжина штанги (DIAGONAL ROD LENGTH 217 86)  $l=217$ мм ; відстань від центра шарніра штанги до осі робочого органу (ефектора, DELTA\_EFFECTOR\_OFFSET)  $p_0=50$ мм; відстань від умовної вертикалі, яка проходить через шарнір штанги з'єднаного з кареткою до HORIZONTAL\_RADIUS\_WHEN\_CENTERED  $96^*$   $a_0=96$ ; відстань до кінцевого вимикача до каретки у «домашньому положенні» TOWER\_CARRIAGE\_POSITION\_OFFSETS (по замовченню 0). Також зазначимо, далі індексом  $i$ , позначатимемо параметри, які змінюються у наслідок калібрування.

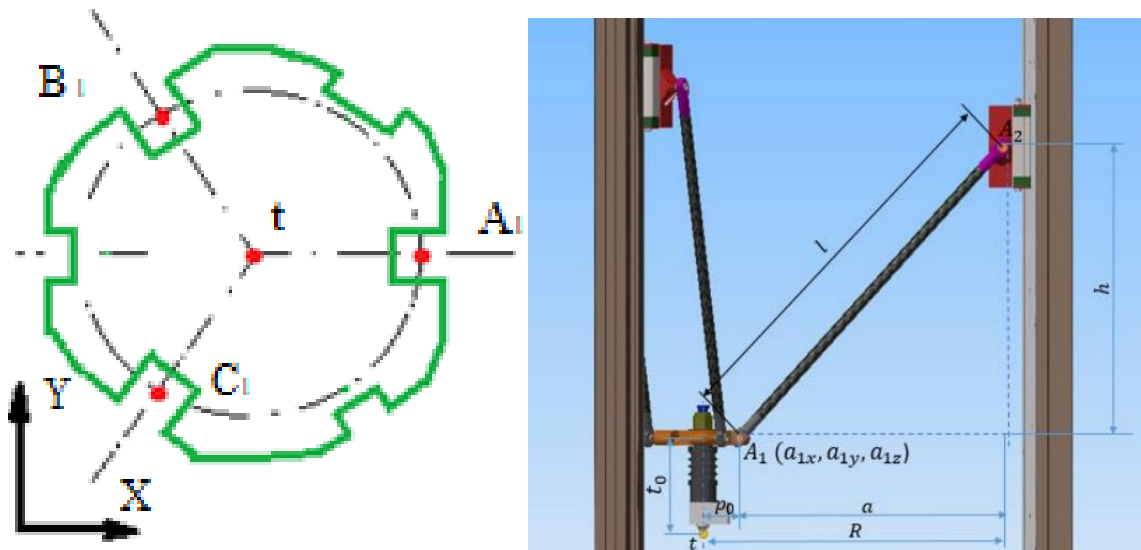


Рисунок 3.3 – Позначення розрахункових точок на узагальненій кінематичній схемі. А - основа робочого органу, Б - вид з боку стійок та тяг конструкції

Визначимо положення точок, скориставшись розташуванням вісей на основі робочого органу та проекціями векторів модулем  $p_0$ , що задають положення точок відносно центральної точки  $t$ . Так відповідні координати базових точок, що обрано на основі робочого органу  $A_1, B_1, C_1$ , а саме їх три координати, як проекції на відповідні вісі:

$$\begin{cases} A_{1x} = t_x + p_0; A_{1y} = t_y; A_{1z} = t_z + t_0; \\ B_{1x} = t_x + p_0 \cos \frac{2}{3} \pi; B_{1y} = t_y + p_0 \sin \frac{2}{3} \pi; B_{1z} = t_z + t_0; \\ C_{1x} = t_x + p_0 \cos \frac{4}{3} \pi; C_{1y} = t_y + p_0 \sin \frac{4}{3} \pi; C_{1z} = t_z + t_0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Аналогічно знайдемо координати базових точок, що розташовані на напрямних каретках принтера  $A2, B2, C2$ , (рис. 3.4).

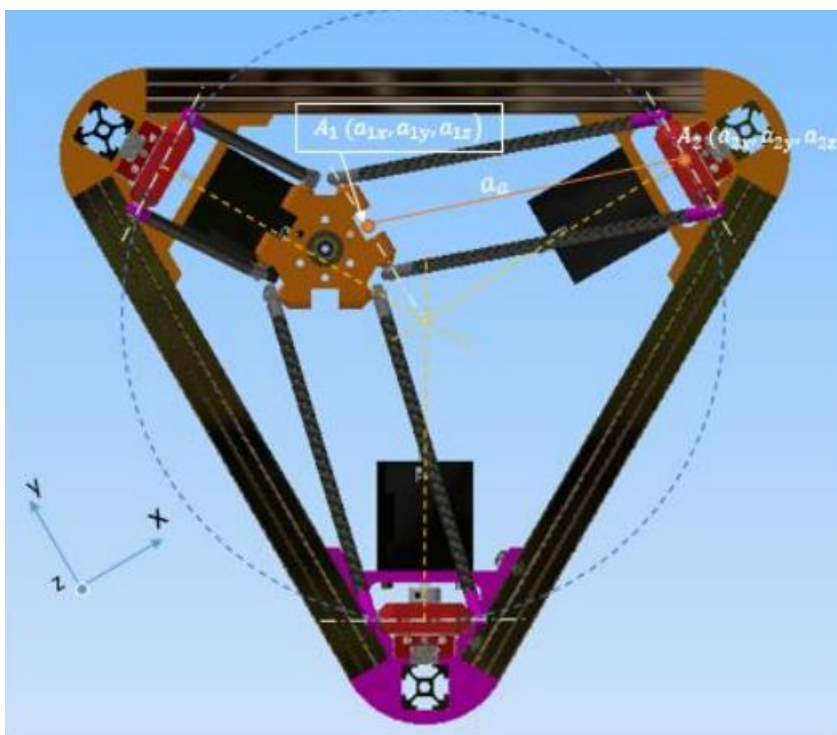


Рисунок 3.4 – Схема розташування точок на виді зверху

Так на виді зверху позначаємо точки на каретках проти годинникової стрілки і на перетині прямих, які зорієнтовано під кутом у 120 градусів одна до одної, та які вийшли із центральної точки  $O$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{2x} = R_0 ; A_{2y} = 0 ; A_{2z} = f_4(t) ; \\ B_{2x} = R_0 \cos \frac{2}{3} \pi ; B_{2y} = R_0 \sin \frac{2}{3} \pi ; B_{2z} = f_5(t) ; \\ C_{2x} = R_0 \cos \frac{4}{3} \pi ; C_{2y} = R_0 \sin \frac{4}{3} \pi ; C_{2z} = f_6(t) . \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Таким чином, координати точки  $t$  як функція часу та три невідомих функціях  $f_4(t)$ ,  $f_5(t)$  і  $f_6(t)$  задаватимуть рух ефектора у системі координат принтера. Тепер знайдемо зв'язок відстанні між проекціями точок на напрямних каретках принтера  $A2, B2, C2$  на робочого органу та точками  $A1, B1, C1$  у цій же площині основи. Так, поступово знайдемо:

$$\left. \begin{array}{l} l_a = \sqrt{(A_{2x} - A_{1x})^2 + (A_{2y} - A_{1y})^2} ; \\ l_b = \sqrt{(B_{2x} - B_{1x})^2 + (B_{2y} - B_{1y})^2} ; \\ l_c = \sqrt{(C_{2x} - C_{1x})^2 + (C_{2y} - C_{1y})^2} . \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

Тепер представимо миттєве значення проекції відстані між точками  $A2, B2, C2$  та  $A1, B1, C1$  за напрямом вісі  $z$ , що означено вертикальну вісь:

$$\left. \begin{array}{l} l_{za} = \sqrt{l^2 - l_a^2} ; \\ l_{zb} = \sqrt{l^2 - l_b^2} ; \\ l_{zc} = \sqrt{l^2 - l_c^2} . \end{array} \right\} \quad (3.4)$$

Таким чином, невідомі функції  $f_4(t)$ ,  $f_5(t)$  і  $f_6(t)$  визначимо як рішення зворотної задачі кінематики у вигляді:

$$\left. \begin{array}{l} A_{2z} = t_z + t_0 + l_{za} ; \\ B_{2z} = t_z + t_0 + l_{zb} ; \\ C_{2z} = t_z + t_0 + l_{zc} . \end{array} \right\} \quad (3.5)$$

Як показує аналіз означена система (3.5) складається із диференційованих

функцій аналіз яких допускає застосування добре розробленого апарату аналітичного моделювання та оптимізації.

Визначимо кінематичні параметри для точок  $A2$ ,  $B2$ ,  $C2$ , як проекції на вісі напрямних стійок:

$$\left. \begin{aligned} v_{a2z} &= \frac{dA_{2z}}{dt} = \frac{dt_z}{dt} + \frac{dl_{za}}{dt}; \\ v_{b2z} &= \frac{dB_{2z}}{dt} = \frac{dt_z}{dt} + \frac{dl_{zb}}{dt}; \\ v_{c2z} &= \frac{dC_{2z}}{dt} = \frac{dt_z}{dt} + \frac{dl_{zc}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Проекція прискорення на ту ж вертикальну вісь для означеної групи точок  $A2$ ,  $B2$ ,  $C2$ , що є нерухомі відносно кареток представиться:

$$\left. \begin{aligned} a_{a2z} &= \frac{dv_{a2z}}{dt} = \frac{d^2t_z}{dt^2} + \frac{d^2l_{za}}{dt^2}; \\ a_{b2z} &= \frac{dv_{b2z}}{dt} = \frac{d^2t_z}{dt^2} + \frac{d^2l_{zb}}{dt^2}; \\ a_{c2z} &= \frac{dv_{c2z}}{dt} = \frac{d^2t_z}{dt^2} + \frac{d^2l_{zc}}{dt^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

На підставі того факту, що точки  $A2$ ,  $B2$ ,  $C2$  лежать на вісях каретки, а сама каретка рухається по прямій відповідно для рівнянь кожної з точок за рівняннями системи (1.7).

Далі покладемо, що шестерні пасової передачі з зубцями на внутрішній стороні ременя у силу припущення про не розтяжність ременя мають однакові лінійні швидкості та при скорення у точках дотику. Таке твердження дозволить розривати зв'язки та сформувані моделі обертального руху валу крокового двигуна (КД), на валу якого закріплено зубчасте колесо. Позначено загальний момент інерції валу  $J_n$ , модель приводу представимо як систему диференціальних рівнянь, що складемо на основі головного закону динаміки абсолютно твердого тіла, другого

закону Кірхгофа для миттєвих значень спаду напруг і електрорушійних сил змінного струму:

$$\begin{aligned}
 a_{a2z} &= r_{uu} \frac{d^2\varphi}{dt^2}; \\
 J_r \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= M_{sm} - k_{fr} \frac{d\varphi}{dt} - M_{em}; \\
 V_{gA} - r \cdot i_A - L \cdot \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] &= 0, \\
 V_{gB} - r \cdot i_B - L \cdot \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p(\theta - \lambda))] &= 0, \\
 M_{em} &= -pnN_r\Phi_M \cdot [i_A \cdot \sin(N_r \cdot \varphi) + i_B \cdot \cos(N_r \cdot \varphi)],
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

де позначено

$L$  – власна індуктивність кожної фази;

$M$  – взаємна індуктивність;

$r$  – активний опір кола обмотки статора;

$V_{gA}, V_{gB}$  – напруга живлення, фази  $A$  та  $B$ ;

$i_A, i_B$  – струм в обмотках фаз, відповідно  $A$  та  $B$ ;

$p$  – число пар полюсів;

$n$  – кількість витків обмоток;

$\Phi_m$  – коефіцієнт взаємоіндукції;

$N_r$  – кількість зубців ротора;

$\lambda$  – крок зубців статора крокового двигуна;

$J_r$  – момент інерції ротору у зборі із шестернею;

$k_{fr}$  – коефіцієнт в'язкого тертя;

$\varphi$  – кут повороту ротора КД відносно статора;

$r_{uu}$  – радіус шестерні.

На підставі записаних виразів рівнянь системи (1.5)-(1.7) та моделі приводу (1.8) поставимо задачу оцінки максимально можливої похибки позиціювання. Оцінку можна здійснити декількома способами.

Припустимо, що при обраній кінематичній схемі механізму та приводу головним фактором, як причини похибки, є величина протяжності часу опорного сигналу. Застосувавши метод диференціювання приймаючи, що максимальна можлива похибка виникає одночасно в кожній із точок  $A2$ ,  $B2$ ,  $C2$ , площини контролю плоского руху вихідної ланки похибку оцінимо:

$$\Delta = \frac{\Delta t}{3} \sqrt{v_{a2z}^2 + v_{b2z}^2 + v_{c2z}^2} = \frac{\Delta t^2}{6} \sqrt{a_{a2z}^2 + a_{b2z}^2 + a_{c2z}^2}. \quad (3.9)$$

Відповідно до моделі (3.7) тангенціальне прискорення центрального радіуса вихідної приводної шестерні крокового двигуна або лінійне прискорення нерозтяжного зубчастого пасу зв'язує оцінку максимально можливої похибки та похибку відпрацювання кута (див. перше рівняння моделі (3.7)).

Останнє приводить до заключення, про необхідність моделювання приводу для визначення кутового прискорення як результат похибки поданої напруги від драйвера приводу. Для оцінки границь величин цієї похибки для пошарових законів, що визначено 3D моделлю деталі необхідно проводити моделювання. Для проведення аналітичного моделювання необхідно представити розв'язок системи (3.8) у аналітичному вигляді для довільної 3D моделі, що у силу нелінійності ускладнюється пошуком розв'язків у квадратурах. У зв'язку з такими ускладненнями альтернативою такому моделюванню є моделювання приводу у середовищі Matlab.

### **3.2 Розвиток електромеханічної моделі 3D принтера та моделювання у середовищі Matlab**

Для проведення моделювання приводу альтернативне до математичного було обрано базову схему керування гібридним кроковим двигуном (рис.3.5.). До її складу включено блок живлення максимальна напруга на виході якого 28 Вольт, формувач сигналу, драйвер, гібридний кроковий двигун, з моделлю моменту



навантаження та канали даних, що виводяться на осцилограф.

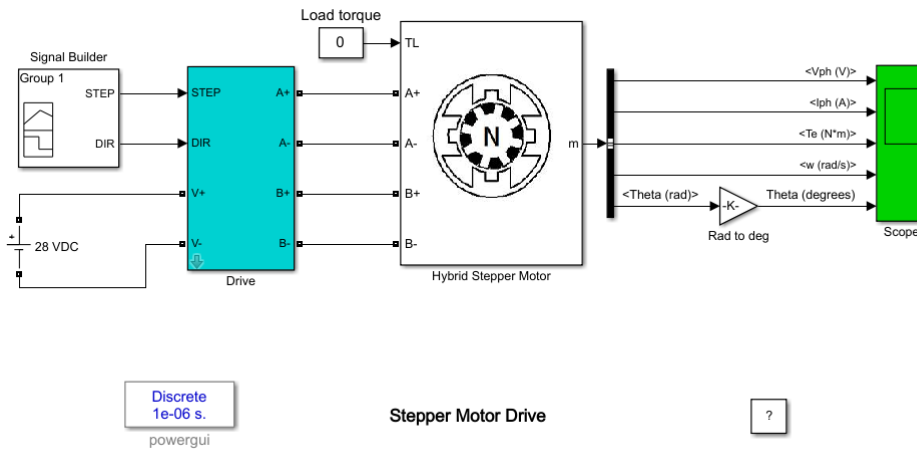


Рисунок 3.5 – Блок-схема двигуна, що представлена інструментами середовища Matlab

В блоці Signal Builder (формував сигналів), передбачено інструменти для формування сигналів для керування двигуном. Для керування кроковим двигуном застосовано два сигнали. Перший сигнал Крок (Step). Другий напрям (Dir- скорочення від напрям). Сукупність двох сигналів забезпечує обертання ротору крокового двигуна як за часовою так і проти часовою стрілки, при чому напрям кроку обертання загадає другий сигнал Dir, а перший сигнал задає кількість обертів повороту валу двигуна. Для обертання двигуна на визначений кут використовуються ділення кроку (наприклад 1/32). Кількість дискрет ділення кожного кроку задає драйвер крокового двигуна. Драйвер A4988, що обрано дозволяє використовувати режим мікро кроку. Це досягається за рахунок подачі живлення на котушки з проміжними рівнями струму.

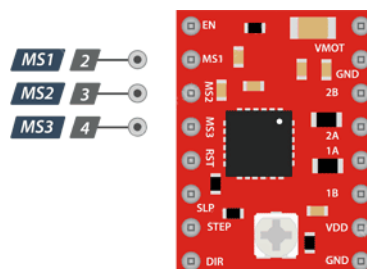


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд драйверу крокового двигуна

За попереднім аналізом розділу 2 було обрано для моделювання кроковий двигун NEMA 17 з кроком 1,8 градуса (200 кроків на оборот) в режимі 1/4 кроку. У режимі мікро-кроків на оберт двигун буде формувати сигнал 800, тобто 0,45 градусів на крок.

Створення двох сигналів керування кроковим двигуном в конструкторі сигналів представлено на рис. 3.7

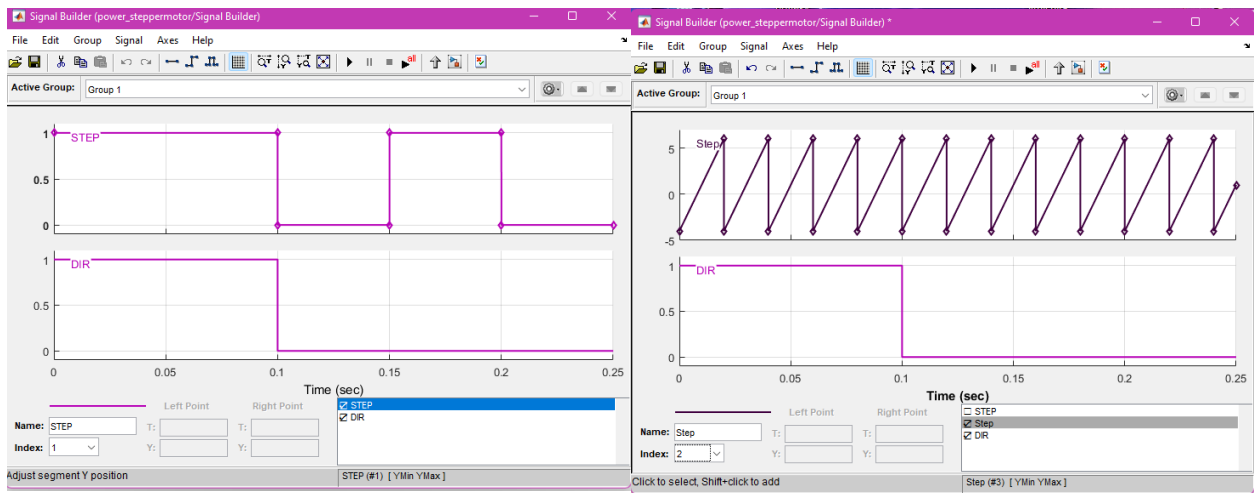


Рисунок 3.7 – Блок конструктора сигналів

Інструмент формування сигналів має більш широкі можливості та допускає формування нових форм та типів сигналів, що відмінні і утворенні від цих двох вже створених, а також дозволяє регулювати їх параметри: період, шаруватість та проміжок часу дії.

Особливості блоку живлення постійного струму DC voltage source (блок акумулятора), полягають у тому, що цей блок подає напругу на кроковий двигун через драйвер двигуна, значення напруги вводяться як амплітудне значення у ітераційному вікні інтерфейсу моделювання в вольтах.

Блок драйвера двигуна (Driver motor), забезпечує керування кроковим двигуном, за двома вхідними сигналами та напругою живлення для керування двигуна. Зображення блоків драйверу представлено на рис. 3.8.

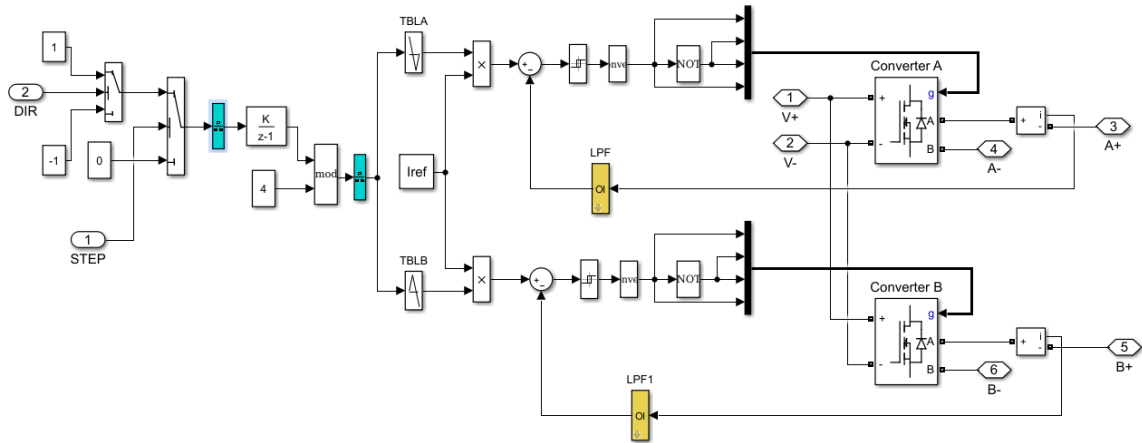


Рисунок 3.8 – Блок-схема драйвера керування кроковим двигуном

Наступний блок Hybrid Stepper motor виконує віртуальну емуляцію двигуна.

В цьому блоці можна налаштувати такі паспортні параметри як:

1. Індуктивність обмотки;
2. Опір обмотки;
3. Кут кроку;
4. Мах момент фіксації;
5. Повна інерція;
6. Коефіцієнт в'язкого тертя (двигуна і навантаження);
7. Навчальна швидкість обертання;
8. Вихідне положення ротора.

Блок Load torque (Крутний момент навантаження), використовується для вибору роботи двигуна якщо блок Load torque має позитивне значення то модель двигуна працює як двигун, а якщо Load torque має негативне значення то модель двигуна працює в режимі генератора.

З блоку двигуна виходить вектор  $m$  що містить п'ять сигналів. А блок Bus Selector розділяє цей вектор  $m$  на вихідні сигнали які передаються потім на блок осцилографа.

Сигнали які можна отримати з Bus Selector представлені нижче:

1. Фазова напруга;

Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

2. Фазовий струм;
3. Електромагнітний момент;
4. Швидкість ротора;
5. Положення ротора.

Блок Score відтворює модель віртуального осцилографа за допомогою якого можна переглядати вихідні сигнали які на нього подаються.

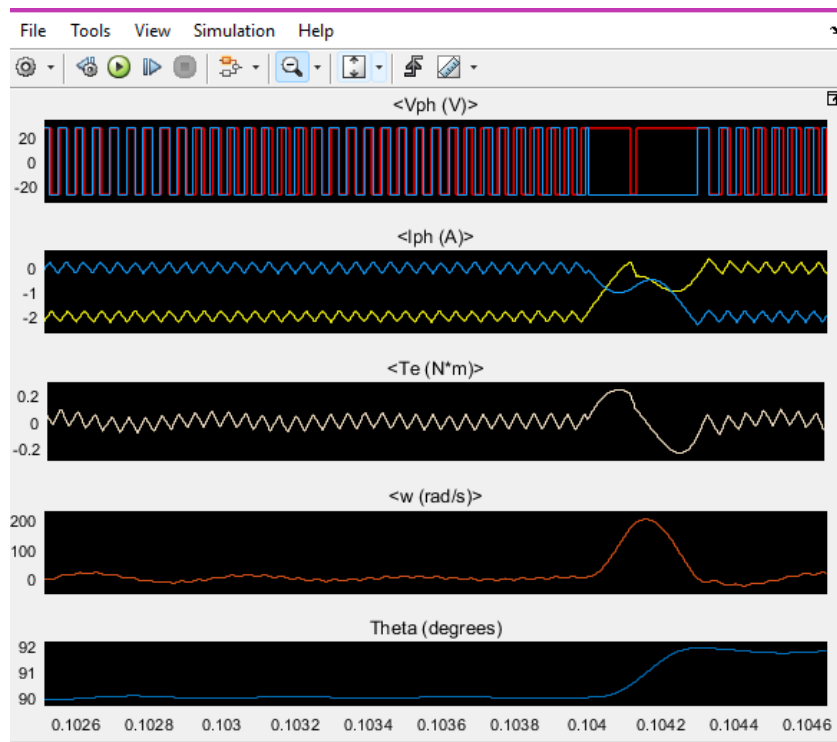


Рисунок 3.9 – Результат моделювання при подачі пило-образного сигналу

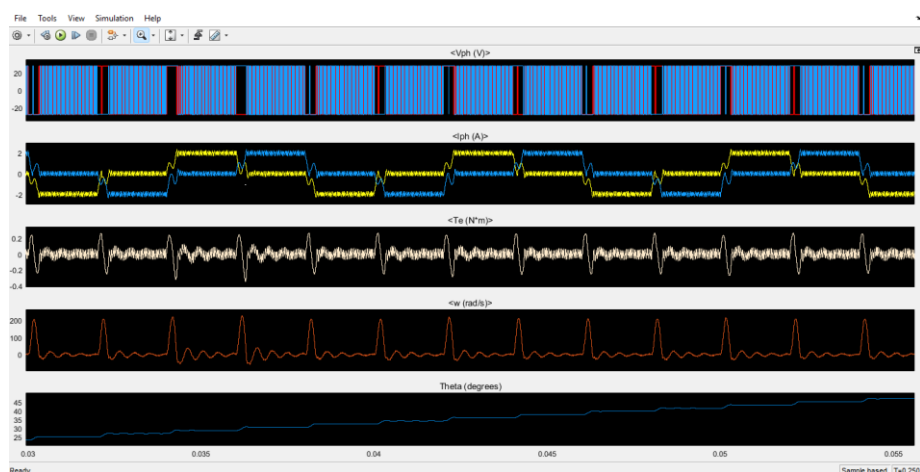


Рисунок 3.10 – Результат при подачі П образного сигналу

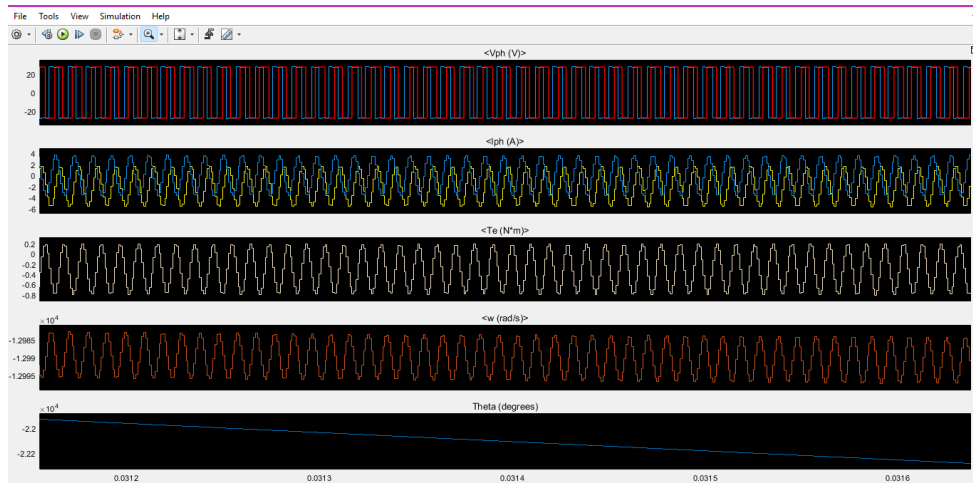


Рисунок 3.11– Результат якщо встановити крутний момент на 1

Можливості моделювання продемонстровано на осцилограмах рис. 3.9-3.11. Так на рис. 3.9 подано результати моделювання при подачі пило- та на рис. 3.10. П образного сигналу і на рис. 3.11 при подачі крутного моменту, що встановлено на 1. Дані рисунки несуть широкі обсяги візуальної інформації про перебіг процесів, дозволяють отримувати і кількісну інформацію у часових перерізах. Якщо оцінювати криві осцилограм за результатами моделювання і особливо стрибки кутової швидкості, то за результатами часових зрізів оцінюється кутове прискорення і величина похибки координати за (3.9).

### 3.3 Розробка методики оцінки альтернативних механізмів за оцінкою достовірності різниць між групами експериментальних вибірок

Досліджуючи властивості двох принципово відмінних типів механізмів, які придатні реалізовувати адитивні технології XYZ та МПС механізми руху робочого органу не можливо одночасно встановити вплив на один окремий тип складової похибки факторів які притаманні тільки одному принципу. Причиною тому є не можливість досягти порівнювальних умов. У зв'язку з цим було розглянуто можливості застосування статистичних методів аналізу та порівняння декількох альтернатив.

Розглянемо два типи механізмів, що широко розповсюджені у адитивних технологіях XYZ та МПС механізми. Для порівняння їх характеристик сформуємо методику порівняння за результатами аналізу характеристик виготовлених зразків. Припустимо, що встановлено у наслідок застосування двох технологій дві вибірки окремого параметру  $Y$ , на який впливають сукупність ознак, що задано  $n$  мірним вектором  $X$ . Оцінку достовірності різниць між групами проведемо за двома етапами. Перший етап - визначення помилки репрезентативності. Другий етап - оцінка достовірності різниць між групами за критерієм Стюдента.

Вивчаючи одну з таких ознак як висота бугорків, відхилення розмірів та маси у виготовлених деталях досліджуємо елементи сукупності. Однак, неможливо дослідити усі об'єкти генеральної сукупності тому, оскільки вона є дуже великою. Кількість членів, навіть для обмеженої кількості деталей, сягає великої кількості, що потребує у подальшому великих часових витрат. У зв'язку з цим вибірку об'єктів обмежимо. При цьому постає таке питання: чи можливо за результатами, отриманими при вивченні тільки вибірки, робити висновки про всю генеральну сукупність? Характеризуючи цілу сукупність лише за її частиною, неможливо уникнути помилок, які називаються помилками репрезентативності. Навіть за ідеальної організації дослідницької роботи з'являються помилки такого типу як помилка репрезентативності.

Помилка репрезентативності середньої арифметичної залежить від двох величин: від різноманітності ознаки у генеральній сукупності і від величини (чисельності) вибірки. Чим менша степінь різноманітності (на її величину вказує середнє квадратичне відхилення) і чим більша кількість вибраних для дослідження.

Для розрахунку величини похибки використовується формула:

$$\Delta = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.10)$$

де позначено  $Y_i$  - значення елемента вибірки,  $\bar{Y}$  - середнє арифметичне,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (3.11)$$

середнє квадратичне відхилення величина вибірки та  $n$  об'єм вибірки. За цих умов тепер характеристикою ознаки  $Y$  стає величина:

$$Y = \bar{Y} \pm \Delta \quad (3.12)$$

### Оцінка достовірності різниць між групами за критерієм Стьюдента

У зв'язку з тим, що аналізу піддаються технології з двома альтернативними ХУЗ та МПС механізмами переміщення робочого органу то доцільно для аналізу утворювати дві групи вибірок. За цих умов постає питання оцінки різниці між групами за показником. Наприклад, у першому варіанті обраному експертами за еталон обрано масу корпусу осцилографу  $115,7 \pm 1,2$  г, а в другому варіанті контролю на лінії  $125,5 \pm 2,5$  г. Порівняємо середні значення в групах, визначивши цю різницю у відсотках. Ми виявляємо, що у другому прикладі маса на 8,5% більша, ніж у першому (якщо показник першого еталонного зразку взяти за 100%). Однак, залишається питання, чи є ця різниця статистично достовірною, тобто є не випадковою, а закономірною за виявлених характеристик груп за критерієм маси готової продукції. Найбільш поширеною є оцінка достовірності різниць між групами за методом Стьюдента. Для цього визначається критерій достовірності різниці за формулою:

$$t = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}} \quad (3.13)$$

У останьому позначено середньо-арифметичні величини значень ознак  $\bar{Y}_1$  - першої та  $\bar{Y}_2$  - другої вибірки та їх  $\Delta_1$  - перша і  $\Delta_2$  - друга похибки. Порівняння обчисленого критерія Стьюдента  $t$  із табличним  $t_{st}$  для приведенного значення величини вибірки  $n=n_1+n_2-2$ , де  $n_1$  та  $n_2$  величини вибірок у групах, що

порівнюються.

Таблиця 3.3.1 Стандартні значення критерію Стьюдента

t	Рівень значущості $p$		t	Рівень значущості $p$	
	5%	1%		5%	1%
1	12,71	63,66	20	2,086	2,845
2	4,303	9,925	21	2,080	2,831
3	3,182	5,841	22	2,074	2,819
4	2,776	4,604	23	2,069	2,807
5	2,571	4,032	24	2,064	2,797
6	2,447	3,707	25	2,060	2,787
7	2,365	3,449	26	2,056	2,779
8	2,306	3,355	27	2,052	2,771
9	2,268	3,250	28	2,048	2,763
10	2,228	3,169	29	2,045	2,756
11	2,201	3,106	30	2,042	2,750
12	2,179	3,055	40	2,021	2,704
13	2,106	3,012	50	2,009	2,678
14	2,145	2,977	60	2,000	2,660
15	2,131	2,947	80	1,990	2,639
16	2,120	2,921	100	1,984	2,626
17	2,110	2,898	200	1,972	2,601
18	2,101	2,878	500	1,965	2,586
19	2,093	2,861	$\infty$	1,960	2,576

Якщо розрахований критерій  $t$  більше за стандартний критерій Стьюдента  $t_{st}$  для  $p=0,01$ , то це означає, що різниця між групами є достовірною з надійністю 99% або відмінності є статистично значущими. Якщо емпіричне значення критерію  $t$  менше за стандартний критерій Стьюдента  $t_{st}$  для  $p=0,05$ , то відмінності не є статистично значущими.

За означеною методикою було проаналізовано наявні зразки корпусів деталей що виготовлялись на 3D принтерах, що містять механізми з двома альтернативними XYZ та МПС принципами переміщення робочого органу. Дані вибірок подано у таблицях 3.3.2 та 3.3.3. Вимірювання здійснювалось мікрометром через проміжне тіло - калібровочний сталевий дріт діаметром 0,5 мм.



151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі



А

Б

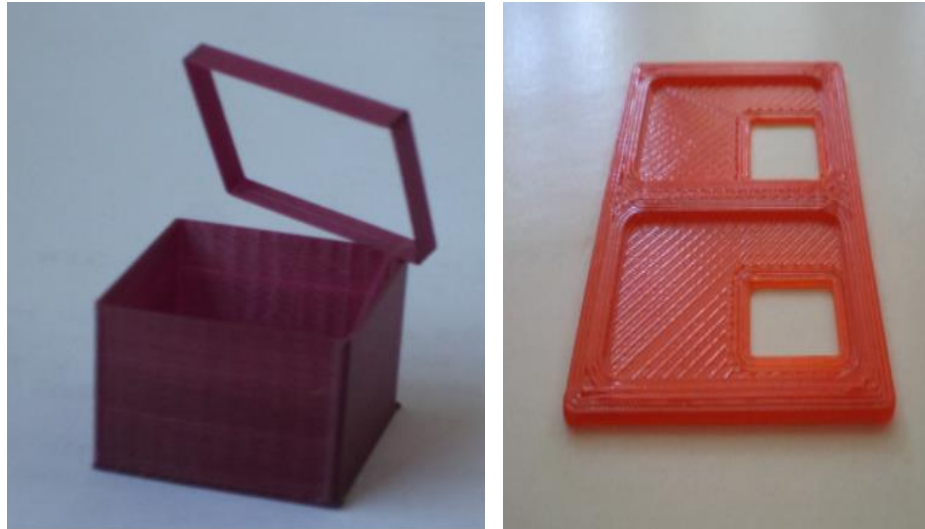
Рисунок 3.12 – Корпус осцилографа, що надруковано 3D принтером. А - XYZ та Б - МПС принципами переміщення робочого органу.



А

Б

Рисунок 3.13 – Деталі корпусу, що надруковано 3D принтером. А - XYZ та Б - МПС принципами переміщення робочого органу.



А

Б

Рисунок 3.14 – Площадка, ваг, що надруковано 3D принтером для різних прис-корень. А - XYZ та Б - МПС принципами переміщення робочого органу.

У Таблиці 3.3.2 представлено дані вибірки маси для двох елементів корпусної конструкції осцилографа.

Таблиці 3.3.2 Вибірки мас для 3D друку на принтерах за двома технологі-ями

№	Деталь 1, (Рисунок 3.12)		Деталь 2, (Рисунок 3.12)	
	Маса, г Механізм XYZ	Маса, г Механізм МПС	Маса, г Механізм XYZ	Маса, г Механізм МПС
1	21,497	21,841	28,051	29,567
2	21,479	21,845	28,050	29,557
3	21,469	21,847	28,045	29,565
4	21,477	21,849	28,052	29,559
5	21,488	21,838	28,053	29,564
6	21,493	21,842	28,050	29,563

7	21,495	21,840	28,049	29,557
---	--------	--------	--------	--------

Таблиці 3.3.3 Вибірki висот бугорків для 3D друку на принтерах за двома технологіями

№	Деталь 1 (Рисунок 3.13)		Деталь 2 (Рисунок 3.14)	
	висота, мм Механізм XYZ	висота, мм Ме- ханізм МПС	висота, мм Ме- ханізм XYZ	висота, мм Ме- ханізм МПС
1	0,33	0,56	0,31	0,76
2	0,38	0,59	0,32	0,72
3	0,34	0,53	0,30	0,75
4	0,35	0,58	0,33	0,73

Таблиці 3.3.4 Вибірki висот бугорків для 3D друку на принтері для різних прискорень

№	Деталь 1,		Деталь 2,	
	висота, мм $a= 0,05\text{m}/\text{c}$	висота, мм $a=$ $0,5\text{m}/\text{c}$	висота, мм $a= 0,05\text{m} /\text{c}$	висота, мм $a=$ $0,5\text{m} /\text{c}$
1	0.47	0,33	0,53	0,42
2	0.47	0,33	0,53	0,42
3	0.47	0,33	0,53	0,42
4	0.47	0,33	0,53	0,42

Розрахунки середніх значень та порівняння таких параметрів вибірок як середні квадратичні  $\sigma$  і величин похибок  $\Delta$  та розрахунок критерію Стюдента  $t$  дозволяє стверджувати про значущість відмінності або відсутність статистичної

значущості відмінності (розбіжності).

Безумовно, що формування таких висновків по відношенню до якості і спроможності технології 3D друку, що містять механізми з двома альтернативними XYZ та МПС принципами переміщення робочого органу потребує суттєвого збільшення величини вибірок. Однак, вона демонструє, що калібрування суттєво впливає на якість продукції адитивних технологій.

### **Висновки до третього розділу**

1. Утворена комплексна модель динаміки механізму з урахуванням властивостей приводу 3D принтера узагальненої конструкції дозволяє моделювати вплив динаміки приводу та конструктивних особливостей механізму переміщення на похибку.

2. Сумісне застосування моделі крокового двигуна, що виконане у середовищі Matlab дозволяє визначати оцінки прискорень ротора при переході з одного режиму руху на інший.

3. Статистична оцінка параметрів вибірок результатів роботи принтера демонструє, що калібрування механізмів з урахуванням величини оцінки похибки за розробленою моделлю покращує технологічні показники продукції адитивних технологій.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Чорноморський національний університет імені Петра Могили**

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ**

г. в. о завідувача кафедри АКІТ  
кандидат технічних наук, доцент

\_\_\_\_\_ М. І. Сіделєв

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р

**МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ РУХУ В ПРОСТОРИ**

Спеціальна частина з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях

151 – МНР – 671.21617104

**Студентка**

\_\_\_\_\_ Т.В. Гекова  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Керівник** кандидат техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ О.Є. Беліков  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Консультант** кандидат техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Ю. Г. Щербак  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Миколаїв – 2022**

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Основні проектно-конструкторські та експериментальні складові кваліфікаційної роботи виконані автором під час дослідницької роботи протягом всього терміну навчання за магістерської програми в лабораторії адитивних технологій та 3D друку кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Тому є доцільним оцінити умови праці (навчання) саме в умовах зазначеної лабораторії.

Враховуючи, що лабораторія оснащена значною кількістю обладнання з електроживленням (комп'ютери, паяльні станції тощо), розглянуто загальні питання забезпечення безпеки персоналу лабораторії під час надзвичайної ситуації внаслідок порушень вимог пожежної безпеки.

Також у даному розділі роботи розглянуто загальні питання забезпечення безпеки персоналу лабораторії під час надзвичайної ситуації внаслідок порушень вимог пожежної безпеки, а також в умовах воєнного стану.

### **4.1 Оцінка умов праці в лабораторії адитивних технологій та 3D друку**

#### **4.1.1 Загальний опис лабораторії, її обладнання та умов праці**

Приміщення лабораторії адитивних технологій та 3D друку розташовано у II корпусі університету і початково згідно з будівельною документацією значилось як одне із допоміжних приміщень. При створенні лабораторії виконана робота з його адаптації під характер запланованих науково-дослідних робіт за участі фахівців кафедри та студентів.

Лабораторія адитивних технологій та 3D друку в розпорядженні має: п'ять столів, та дев'ять стільців – забезпечуючи дев'ять робочих місць. Крім столів для роботи на стіні – з ліва (при вході) встановлені три полиці для зберігання інструменту та необхідного матеріалу, який буде використано в подальшому в роботі.

Дотримання порядку в приміщенні досягається встановленням, наприклад: трьох дошок, для зручного розташування інструменту, це дисциплінує студентів та підвищує ефективність праці.

Основні геометричні характеристики приміщення наведено в табл. 4.1, а її загальний вигляд зображено на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики приміщення

<b>Лабораторії адитивних технологій та 3D друку</b>	
Характеристики	
Довжина приміщення, м	7,5
Ширина приміщення, м	2,7
Висота приміщення, м	3,5
Висота робочої поверхні, м	0,76



Рисунок 4.1 – Фото лабораторії адитивних технологій та 3D друку

Лабораторія на своєму балансі має один ноутбук, три 3D принтера. Приміщення оснащено трьома розетками, встановлених з дотриманням вимог електробезпеки. В ряді випадків, для зручності підключення електричного обладнання, використовуються подовжувачі відповідного амперажу.

Природного освітлення в лабораторії не достатньо через те, що розташований в ньому світловий отвір пов'язаний з коридором приміщення. В приміщенні багато матеріальних цінностей, по цій причині вікно постійно закрито шторою.

Освітлення приміщення забезпечують п'ять світильників, кожен з яких включає дві люмінесцентні лампи.

Світильники в лабораторії закріплені на бокових стінах (рис. 4.2), а не на стелі, як це робиться зазвичай. Причиною кріплення світильників на бокових стінах пояснюється тим, що труби для опалення розташовані вздовж всієї лабораторії приблизно 40 – 45 сантиметрів від стелі. Однак, після модернізації в лабораторії системи опалення, все-таки можливо забезпечити відповідний рівень загального рівномірного освітлення, шляхом встановлення на стелі необхідної кількості світильників, у тому числі компактного виконання.

У п. 4.2 наведено необхідні розрахунки можливого варіанту виконання загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами.



Рисунок 4.2 – Фрагмент розташування світильників у приміщенні лабораторії адитивних технологій та 3D друку

Опалення лабораторії в холодну погоду (осінню та зимову) проводиться завдяки трубам, які проходять вздовж стелі по всій довжині лабораторії.





Рисунок 4.3 – Труби опалення в приміщенні в приміщенні лабораторії адитивних технологій та 3D друку

Згідно нормам техніки безпеки та пожежної безпеки лабораторія оснащена системою витяжної вентиляції (рис. 4.4 а, б), та на виході з приміщення на стіні закріплено – вогнегасник (рис. 4.4 в).

Стіни приміщення зашпакльовані, та пофарбовані в однотонний білий колір. Підлога, основа бетон – вкрита лінолеумом. Вхід в лабораторію можливий відкривши – білі двері. Стенди, електричні прилади, плакати, електричні елементи розфасовані в коробки складені в шафи, всього в лабораторії – 4 шафи.

У наступному підрозділі наведено розрахунок загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами, яке бажано передбачити в лабораторії адитивних технологій та 3D друку при запланованому її ремонту та модернізації.



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 – Фрагменти систем вентиляції та пожежогасіння: а), б) – елементи системи вентиляції; в) – вуглекислотний вогнегасник

Слід відзначити, що за результатами контрольних спостережень (вимірів), більшість факторів виробничого середовища (у першу чергу, температура та відносна вологість повітряного середовища у теплий і холодний період року, забрудненість повітря, рівень шуму та вібрації, освітленість на робочих поверхнях) відповідають вимогам нормативних документів.

Враховуючи, що значна частина робіт пов'язана з використанням комп'ютерного обладнання, його користувачі дотримуються вимог зазначених нормативних документів, зокрема, правил [36].

## **4.2 Розрахунок загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами**

Як було зазначено в п. 4.1 у розглянутому виробничому приміщенні відсутнє

загальне рівномірне штучне освітлення, тому виконаємо розрахунки одного із можливих варіантів його реалізації.

В якості розрахункового методу приймемо метод коефіцієнта використання світлового потоку. Послідовність розрахунку з необхідними довідковими даними приведено у методичних вказівках [37].

Для виконання розрахунків використовуються такі характеристики виробничого приміщення: довжина  $a = 7,5$  м, ширина  $b = 2,7$  м, висота  $H = 3,5$  м. Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття стелі дорівнює  $\rho_{стін} = 70\%$ , а відповідно стелі  $\rho_{стелі} = 50\%$ . Висота робочих поверхонь (столів)  $h_p = 0,76$  м (табл. 4.1).

Схему для виконання розрахунку загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами наведено на рис. 4.5.

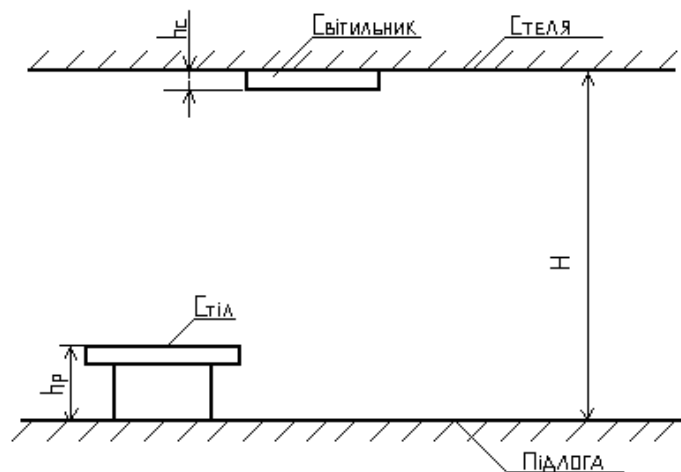


Рисунок 4.5 – Схема для розрахунку штучного освітлення

Розрахунок загального рівномірного освітлення виробничого приміщення люмінесцентними лампами виконується у такій послідовності:

1. Висота світильника над підлогою  $h_0$ , м.

$$h_0 = H - h_c \quad 4.1$$

Слід зауважити, що в обраному виробничому приміщенні планується обладнання підвісної стелі. В такому випадку майже завжди зовнішня площина світильника співпадає з площиною стелі, тобто  $h_c = 0$ .

Тоді  $h_0 = 3.5 - 0 = 3.5$  м.

3. Висота світильника над робочою поверхнею  $h$ , м.

$$h = h_0 - h_p \quad 4.2$$

При  $h_p = 0,76$  м величина  $h = 3,2 - 0,76 = 2,44$  м.

4. Показник приміщення  $i$ .

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{7,5 \cdot 2,7}{2,44 \cdot (7,5 + 2,7)} = 0,82 \quad 4.3$$

4. Осереднене значення коефіцієнтів відбиття стелі та стін  $\bar{\rho}$ , %.

$$\bar{\rho} = 0,5 \cdot (\rho_{стелі} + \rho_{стін}) = 0,5 (70 + 50) = 60 \% \quad 4.4$$

5. Коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta$ , %.

Значення коефіцієнта використання світлового потоку можна оцінити за допомогою залежності  $\eta = f(i, \bar{\rho})$ , представленої на рис. 4.6 [37].

При  $i = 0,82$  та  $\bar{\rho} = 50\%$  коефіцієнта використання світлового потоку дорівнює  $\eta = 45\%$ .

6. Нормоване значення освітленості  $E_n$ , лк.

Для зорових робіт середньої та малої точності може прийматися

$$E_n = 200 \text{ лк.}$$

7. Коефіцієнт запасу, що використовується при розрахунку штучного освітлення  $\kappa_z$ .

Визначається в залежності від призначення приміщення, режиму чистоти в ньому та кількості чищень світильників протягом року  $n_q$ .

Для приміщень з нормальними умовами праці (кабінети та робочі приміщення, лабораторії, навчальні приміщення і т. ін.) при рекомендованій кількості чищень  $n_q = 1-2$  коефіцієнт запасу складає  $\kappa_z = 1,4$  [37].

8. Коефіцієнт нерівномірності світлового потоку  $Z$ .

Згідно з рекомендаціями [2] при освітленні люмінесцентними лампами

$$Z = 1,1 \quad 4.5$$

9. Площа підлоги виробничого приміщення  $S_{\text{підл}}$ , м<sup>2</sup>.

$$S_{\text{підл}} = a \cdot b = 7,5 \cdot 2,7 = 20,3 \text{ м}^2 \quad 4.6$$

10. Світловий потік однієї лампи  $\Phi_l$ , лм.

Визначається за технічними даними деяких люмінесцентних ламп [37].

Для люмінесцентних ламп типу ЛБ20 потужністю 20 Вт  $\Phi_l = 1200$  лм.

10. Необхідна кількість світильників у виробничому приміщенні при кількості  $n$  (шт.) ламп в кожному  $N$ , шт.

$$N = \frac{E \cdot k_z \cdot S_{\text{підл}} \cdot Z \cdot 100}{n \cdot \Phi_l \cdot \eta} \quad 4.7$$

Тоді при кількості ламп у світильнику  $n = 4$  шт.

$$N = \frac{200 \cdot 1,4 \cdot 20,3 \cdot 1,1 \cdot 100}{4 \cdot 1200 \cdot 45} = 2,8 \quad 4.8$$

Зазвичай отриманий результат слід округлити до більшого парного значення. У даному випадку, враховуючи значну відносну протяжність приміщення, буде логічним однорядне розташування світильників у кількості  $N = 3$  шт.

11. Потужність загального штучного освітлення люмінесцентними лампами у виробничому приміщенні  $P_{\text{заг}}$ , Вт.

$$P_{\text{заг}} = P_l \cdot N \cdot n = 20 \cdot 3 \cdot 4 = 240 \text{ Вт} \quad 4.9$$

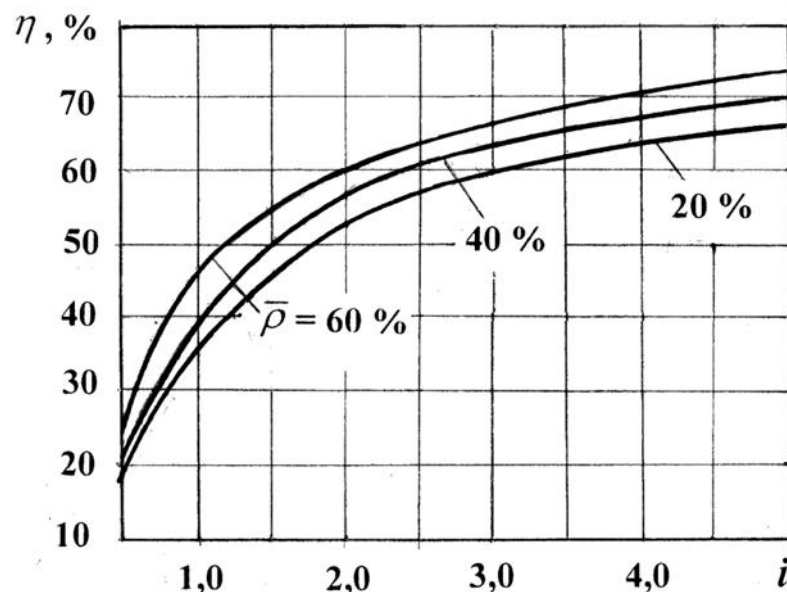


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнта використання світлового потоку  $\eta$  від

показника приміщення  $i$  та осередненого значення коефіцієнтів відбиття стелі та стін  $\bar{\rho}$

### 4.3 Заходи безпека у надзвичайних ситуаціях

#### 4.3.1 Пожежна безпека

У сучасних комп'ютерах дуже висока щільність розміщення елементів електронних систем, в безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, комунікаційні кабелі, що може посприяти небезпеці різного роду загорянь. При цьому можливі оплавлення ізоляції сполучних проводів, їх оголення і, як наслідок, коротке замикання, яке супроводжується іскрінням, яке веде до неприпустимих перевантажень елементів електронних схем. При перенагріванні, вони згорають з розбризкуванням іскор.

Системи вентиляції служать для відводу надлишкового тепла від ЕОМ]. Однак ці системи також представляють додаткову пожежну небезпеку для машинного залу та інших приміщень, так як, з одного боку, вентиляція забезпечує подачу кисню, що є окислювачем, в усі приміщення, а з іншого – при виникненні пожежі швидко поширюють вогонь і продукти горіння по всіх приміщеннях і пристроїв, з якими вони пов'язані. Струм до електроустановок подається по кабельних лініях, які становлять особливу пожежну небезпеку. Наявність пального ізоляційного матеріалу, ймовірних джерел запалювання в вигляді електричних іскор і дуг, розгалуженість і важко доступність роблять кабельні лінії місцями найбільш ймовірного виникнення і розвитку пожежі.

У разі пожежі спрацьовує знаходиться в приміщеннях автоматична установка пожежогасіння (АУП). Найчастіше застосовуються газові АУП вони забезпечені світловою та звуковою сигналізацією. Для запобігання поширенню вогню під час пожежі з однієї частини будівлі на іншу влаштовують протипожежні перепони у вигляді протипожежних стін, перегородок, перекриттів, зон, тамбурів-шлюзів, дверей, вікон, люків, клапанів. У будівлі на випадок виникнення пожежі

передбачається не менше двох евакуаційних виходів; але через машинний зал, який має теж менше двох виходів, не повинні проходити шляхи евакуації співробітників, працюючих в інших підрозділах.

Проходи, коридори і робочі місця не слід захарашувати архівними матеріалами, папером. На евакуаційних шляхах встановлюють як природне, так і штучне аварійне освітлення. В інших виробничих приміщеннях допускається проектувати один вихід, якщо відстань від найбільш віддаленого місця до виходу не перевищує 25 м, а кількість працюючих в зміні не більше 25 осіб. Для зберігання носіїв інформації використовуються вогнетривкі металеві шафи, двері в сховище також повинні бути вогнетривкими. Комплекс організаційних і технічних заходів пожежної профілактики дозволяє запобігти пожежі, а в разі його виникнення забезпечити безпеку людей, обмежити поширення вогню, а також створити умови для успішного гасіння пожежі.

#### **4.3.2 Дії в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру**

У зв'язку з реалізацією загрози військового вторгнення Росії в Україну [38] актуальним стає безпека людей в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру.

Воєнний час характеризується використанням великої кількості звичайної зброї, можливістю застосування зброї масового знищення та впливом, що дорівнює розмірам стихійних лих або й перевищує їх.

При першій можливості необхідно покинути разом із сім'єю небезпечну зону. У разі неможливості виїхати особисто, відправити дітей і родичів похилого віку до родичів, знайомих. Необхідно взяти із собою всі документи, коштовні речі і цінні папери.

Підготовку до можливого перебування у зоні надзвичайної ситуації доцільно починати завчасно. Необхідно підготувати "екстрену валізку" з речами, які можуть знадобитись при знаходженні у зоні НС або при евакуації у безпечні райони.

Важливо зберігати особистий спокій, не реагувати на провокації. Неможна

сповіщати про свої майбутні дії (плани) малознайомих людей, а також знайомих з ненадійною репутацією.

Рекомендується вживати наступних заходів [39]:

- 1) завжди мати при собі документ (паспорт), що засвідчує особу, відомості про групу крові свою та близьких родичів, можливі проблеми зі здоров'ям (алергію на медичні препарати тощо);
- 2) знати місце розташування захисних споруд цивільної оборони поблизу місця проживання, роботи, у місцях частого відвідування (магазини, базар, дорога до роботи, медичні заклади тощо);
- 3) при виході із приміщень, пересуванні сходами багатоповерхівок або до споруди цивільної оборони (сховища) дотримуватись правила правої руки (як при русі автомобільного транспорту) з метою уникнення тисняви;
- 4) уникати місць скупчення людей;
- 5) не вступати у суперечки з незнайомими людьми, уникати можливих провокацій;
- 6) у разі отримання будь-якої інформації від органів державної влади про можливу небезпеку або заходи щодо підвищення безпеки передати її іншим людям (за місцем проживання, роботи тощо);
- 7) при появі озброєних людей, військової техніки, заворушень негайно покинути цей район;
- 8) посилити увагу і за можливості також залишити цей район у разі появи засобів масової інформації сторони-агресора;
- 9) про людей, які не орієнтуються на місцевості, розмовляють з акцентом, мають нехарактерну зовнішність, здійснюють протиправні і провокативні дії, здійснюють незрозумілу роботу, тощо, – негайно поінформувати органи правопорядку, місцеву владу, військових;
- 10) у разі потрапляння у район обстрілу – сховатись у найближчу захисну споруду цивільної оборони, сховище (укриття). У разі відсутності пристосованих сховищ, для укриття використовувати нерівності рельєфу (канави, окопи,



заглиблення від вибухів тощо). У разі раптового обстрілу та відсутності поблизу споруд цивільного захисту, сховища і укриття – ляжте на землю головою в бік, протилежний вибухам. Голову слід прикрити руками (за наявності для прикриття голови використовувати валізу або інші речі). Не виходьте з укриття до кінця обстрілу;

11) надавати першу допомогу іншим людям у разі їх поранення. Визвати швидку допомогу, представників ДСНС України, органів правопорядку, за необхідності – військових;

12) у разі, якщо ви стали свідком поранення або смерті людей, протиправних до них дій (арешт, викрадення, побиття тощо), слід постаратися з'ясувати та зберегти якнайбільше інформації про них та обставини події для надання допомоги, пошуку, встановлення особи тощо.

### **Висновки до четвертого розділу**

1. Виконано аналіз факторів виробничого середовища в лабораторії адитивних технологій та 3D друку. Встановлено, що більшість з них відповідають санітарно-гігієнічним вимогам. Існують деякі зауваження щодо природного та штучного освітлення.

2. Слід констатувати, що покращити рівень природного освітлення без суттєвого перепланування блоку аудиторій неможливо. Наявний світловий отвір в лабораторії межує з коридором навчального корпусу. Враховуючи наявність в лабораторії значних матеріальних цінностей дане приміщення зазначений отвір майже постійно прикритий ширмою.

3. Виконано проектування системи штучного загального рівномірного освітлення люмінесцентними лампами методом коефіцієнта використання світлового потоку. Нормоване освітлення забезпечується трьома люмінесцентними світильниками типу ЛПО з чотирма лампами типу ЛБ20 у кожному. При цьому загальна потужність освітлювальної установки в лабораторії складає 240 Вт.

Також у даному розділі кваліфікаційної роботи розглянуто загальні питання

забезпечення безпеки персоналу лабораторії під час надзвичайної ситуації внаслідок порушень вимог пожежної безпеки, а також в умовах воєнного стану.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи:

1. На основі проведеного аналізу адитивних виробничих процесів в житті та промисловості, виявлення особливостей технічних рішень за даними літературних джерел та патентної інформації, а також проведення класифікації принтерів за кінематичною схемою залученості обраної кінематики у світовий ринок констатуємо, що зберігається нагальна потреба в модернізації відомих та проектуванні принципово нових роботизованих систем для пошарового друку, шляхом втілення сформульованих в роботі задач.

2. На основі виявлених сутностей будови 3D – принтера та враховуючи переваги та недоліки друкуючих головок (екструдерів) було обрано: друкуючу головку, та конфігурацію – CoreXY, а це означає, що процеси по переміщенню кареток, та органу для нанесення пластику задля нашарування деталі суттєво модернізовані (оптимізовані) в тому числі способом натягування ременів механічної частини принтера.

3. На основі утвореної комплексної моделі динаміки механізму з урахуванням властивостей приводу 3D принтера узагальненої конструкції, це дозволяє моделювати вплив динаміки приводу та конструктивних особливостей механізму переміщення на похибку. Крім цього задля збереження можливість визначати оцінки прискорень ротора при переході з одного режиму руху на інший, було проведено сумісне застосування моделі крокового двигуна (виконане у програмному середовищі Matlab). Також було доведено, що калібрування механізмів з урахуванням величини оцінки похибки за розробленою моделлю, покращує технологічні показники продукції адитивних технологій, а довести це вдалося завдяки здійсненій статистичній оцінці параметрів вибірок результатів роботи принтера.

4. Вказавши важливі для розрахунків характеристики приміщення, враховуючи специфіку робіт, які стабільно в ньому проводяться, та проаналізувавши умови праці робимо висновок: кількість наявних світильників, в лабораторії адитивних технологій та 3D друку є допустимою. Зараз лабораторія адитивних

технологій та 3D друку оснащена трьома люмінесцентними світильниками типу ЛПО з чотирма лампами типу ЛБ20.

### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Орлик О. В. Принципи роботи та області застосування 3D-принтерів / О. В. Орлик, Н. В. Батурицька, // Інформатика та інформаційні технології: студ. наук. конф., 20 квітня 2015 р. : матер. конф. – Одеса: ОНЕУ, 2015. - С. 80-83.
2. Назаровець С. А. 3D-принтер в академічній бібліотеці : з досвіду роботи Наукової бібліотеки Національного університету "Києво-Могилянська академія" / Сергій Назаровець // Вісник Книжкової палати : науково-практичний журнал. - 2016. - № 11. - С. 12-13..
3. Aguilera D.G. Learning from educational software in 3D cartography: Colloquium / D.G. Aguilera, J.G. Lahoz // British Journal of Educational Technology. – 2008. - № 39 (4).- P. 726-731.
4. Corney J. The Next and Last Industrial Revolution? / J. Corney // Assembly Automation. – 2005. - Vol.25, No.4. - P. 257.
5. Дробін А. А. Запровадження у навчальний матеріал курсу фізики поняття адитивних технологій. /А. А. Дробін. Наукові записки. – Випуск 11. – Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. Частина 3. – Кропивницький : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2017. – С. 66-71.
6. Radyk D., Dharan S. Investigation of 3D-technologies in casting technology manufacturing / Book of abstract of the IV International scientific and technical student's conference "Fundamental and applied sciences. Actual questions" 28th-29th of April 2021. – Ternopil: TNTU, 2021. – P. 119-120.
7. Мартинюк О. С. Тривимірне моделювання: крок у майбутнє науки, технологій, освіти / О. С. Мартинюк // Моделювання в навчальному процесі : матеріали. Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (3-4 бер. 2017 р.) / уклад. Н. А. Головіна. – Луцьк : Вежа-Друк, 2017. – С. 7-10.
8. Сальніков О. В. Технології виготовлення та використання 3D принтера / О. В. Сальніков, О. С. Мартинюк, П. С. Шолом // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2016. – № 23. – С. 37- 43.
9. Пасічник В.А. адитивне виробництво. Сучасний стан і перспективи /

В.А. Пасічник, Єнтін О., Кудін С.М. // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта», Том 2, м. Київ, 19 – 22 червня 2018 р.: Матеріали конференції – Київ: 2018. – 252 с., С.28-31.

10. Чернишов С. І. Підвищення ефективності інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів на основі статистичного прогнозування: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Чернишов Сергій Іванович; Національний технічний ун-т «Харківський політехнічний ін-т». – Х., 2006. – 20 с.

11. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. Science, technologies, innovations. 2017. №1. С. 68–77

12. Ізонін І. В., Лотошинська Н. Д. Дослідження технології побудови тривимірних моделей. Інформаційні технології: проблеми та перспективи: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. Харків: Вид. Рожко С. Г., 2017. С. 402– 417

13. Danylchenko L., Shadrack O. Investigation of modern additive technologies of foundry equipment manufacturing / Book of abstract of the IV International scientific and technical student's conference "Fundamental and applied sciences. Actual questions" 28th-29th of April 2021. – Ternopil: TNTU, 2021. – P. 107-108.

14. Fan, Zhiqiang and Liou, Frank, «Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM)», ed. A. K. M. Nurul Amin, Rijeka, Croatia, InTech, 2012, p. 3–28.

15. Олексишен В. О. Аналіз конструктивних особливостей та ефективності застосування сучасних FDM принтерів для просторового друку полімерними термопластичним матеріалами / В. О. Олексишен // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : New solutions in modern technology : coll. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – № 1 (3). – С. 25-34.

16. Ultimaker BV. Available at: <https://ultimaker.com/> (дата звернення: 05.02.2022).

17. Пристрій для об'ємного друку з магнітними шарнірними з'єднаннями: пат. 142629 Україна: МПК В41F17/00, F16C11/06. № 201910167; заявл. 03.10.2019; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 7 с.

18. Установка для лазерної різки і гравірування із системою автоматичного фокусування лазерного променя на поверхні оброблюваного матеріалу: пат. 138634 Україна: МПК В23К 26/046. № 201904584; заявл. 26.04.2019; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23. 8 с.
19. Плата міні-комп'ютера Raspberry Pi 3 Model B – <https://arduino.ua/prod1449-raspberry-pi-3-b> (дата звернення: 20.05.2022).
20. Raspberry Pi – <https://www.raspberrypi.com/documentation/> (дата звернення: 20.05.2022).
21. Microswitch Omron – <https://www.datasheetarchive.com/OMRON%20microswitch-datasheet.html> (дата звернення: 20.05.2022).
22. 14HS17-0504S Full Datasheet Nema 14 Bipolar 1.8deg 23Ncm (32.6oz.in) 0.5A 7.5V 35 – <https://www.omc-stepperonline.com> (дата звернення: 20.05.2022).
23. NEMA14 Datasheet – [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=NEMA14&sField=2&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjUvKaJtnMTUOBf1YVDEsUDtzO8K6S4EuQGRN7J7-1AT\\_yvVo\\_TfGA4aAi7ZEALw\\_wcB](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=NEMA14&sField=2&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjUvKaJtnMTUOBf1YVDEsUDtzO8K6S4EuQGRN7J7-1AT_yvVo_TfGA4aAi7ZEALw_wcB) (дата звернення: 20.05.2022).
24. 100W Single Output Switching Power Supply – <https://static.chipdip.ru/lib/408/DOC016408767.pdf> (дата звернення: 20.05.2022).
25. 24V to 5V DC to DC conversion – <https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?t=94083> (дата звернення: 20.05.2022).
26. DC-DC Converter Tutorial – [https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/DCDC\\_Converter\\_Tutorial.pdf](https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/DCDC_Converter_Tutorial.pdf) (дата звернення: 20.05.2022).
27. ED24D3 – <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Crydom/ED24D3?qs=C7H2C2ytqFX%2Fs1r7lyp2Iw%3D%3D> (дата звернення: 20.05.2022).
28. ED SERIES | AC OUTPUT. PLUG-IN SOLID STATE RELAYS – [https://eu.mouser.com/datasheet/2/657/sensata\\_ed\\_series\\_ac\\_output\\_plug\\_in\\_ssr\\_datas](https://eu.mouser.com/datasheet/2/657/sensata_ed_series_ac_output_plug_in_ssr_datas)

[heet-2933700.pdf](#) (дата звернення: 20.05.2022).

29. BIGTREETECH SKR MINI E3 V3.0 User Manual –

<https://grobotronics.com/images/companies/1/BTT%20SKR%20MINI%20E3%20V3.0%20user%20manual.pdf?1643638412984> (дата звернення: 20.05.2022).

30. 3010H05B-CoolCox-datasheet –

<https://datasheet.octopart.com/3010H05B-CoolCox-datasheet-27624423.pdf> (дата звернення: 20.05.2022).

31. Zhengzhou Airmoving Technology Co., Ltd. Powered by Sinoart –

[http://www.am-fan.com/DC3010-4.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pImQ85Hda3QI6RX\\_XOx71rK7POyQRVv3Ne887DM4LEv1f\\_yBMy5CwRoCQswQAvD\\_BwE](http://www.am-fan.com/DC3010-4.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pImQ85Hda3QI6RX_XOx71rK7POyQRVv3Ne887DM4LEv1f_yBMy5CwRoCQswQAvD_BwE) (дата звернення: 20.05.2022).

32. 24v 60w 3d Printer Heater Cartridge – [https://www.basstor.com/heating-](https://www.basstor.com/heating-elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD_BwE)

[elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD\\_BwE](https://www.basstor.com/heating-elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD_BwE) (дата звернення: 20.05.2022).

33. 24v 60w 3d Printer Heater Cartridge – [https://www.basstor.com/heating-](https://www.basstor.com/heating-elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD_BwE)

[elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD\\_BwE](https://www.basstor.com/heating-elements/24v-60w-3d-printer-heater-cartridge.html?gclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiwAEdu2pP9RqoUF0BoBWNGVCh-l-aRpBnAonwqwgGdZq3UfU58Yws0Zn-1kVRoC5r8QAvD_BwE) (дата звернення: 20.05.2022).

34. KlipperScreen – <https://klipperscreen.readthedocs.io/en/latest/Installation/>

(дата звернення: 20.05.2022).

35. Additive Fertigungsverfahren/3D-Druck – [https://vdivde-](https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/additive-fertigungsverfahren-3d-druck-2017.pdf)

[it.de/sites/default/files/document/additive-fertigungsverfahren-3d-druck-2017.pdf](https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/additive-fertigungsverfahren-3d-druck-2017.pdf) (дата звернення: 20.05.2022).

36. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин : затв. наказом Держгірпромнагляду України від 26.03.2010 № 65. URL



: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0293-1> (дата звернення: 20.05.2022).

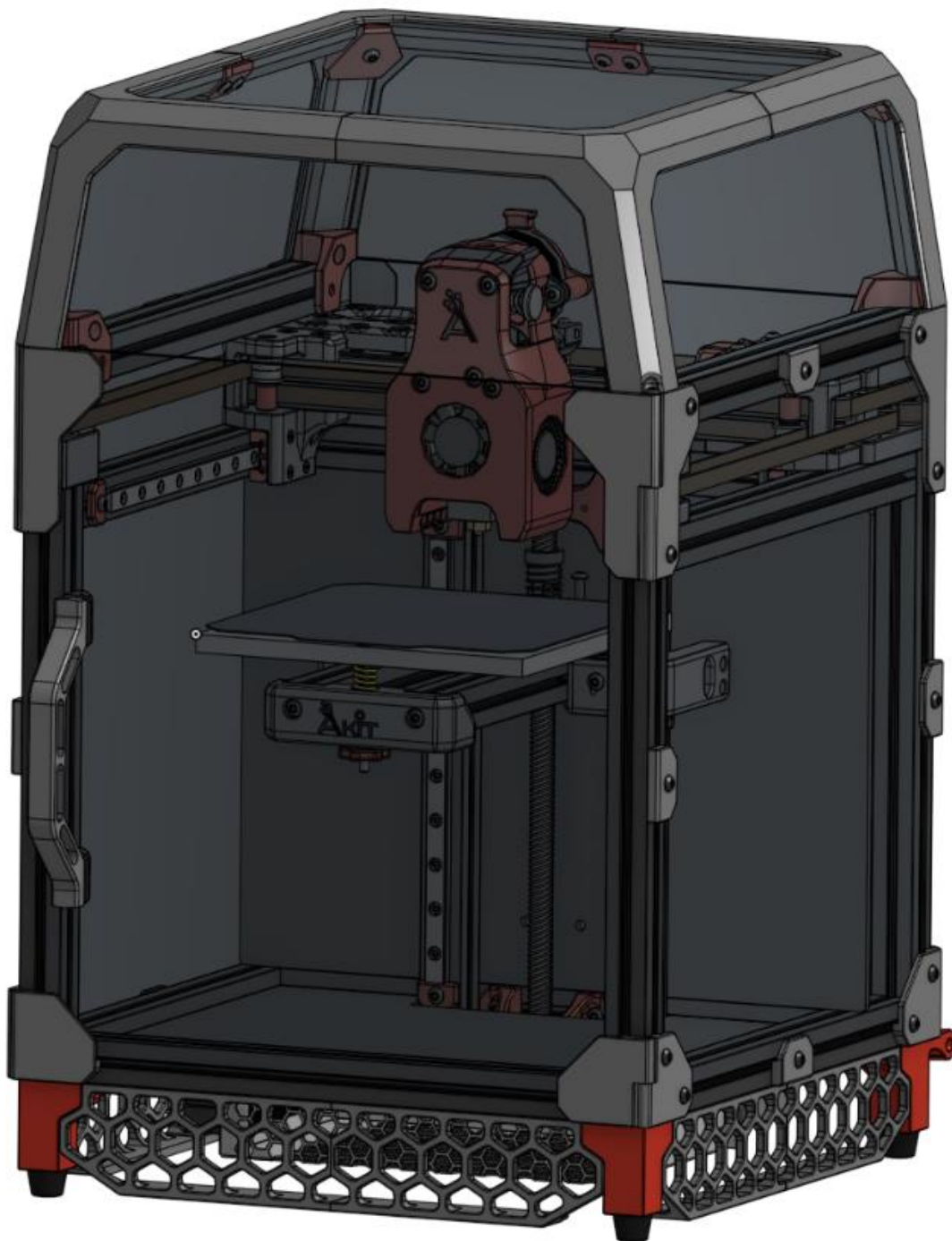
37. Щербак Ю. Г. Методичні рекомендації до практичних (семінарських) занять з дисципліни «Цивільний захист та охорона праці в галузі» / Ю. Г. Щербак, А. О. Алексеєва, О. В. Макарова, А.Л. Боженко. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ імені Петра Могили, 2019.– 98 с.

38. Загроза військового вторгнення Росії в Україну. Вебсайт URL: <http://www.eco-live.com.ua> (дата звернення: 01.02.2022).

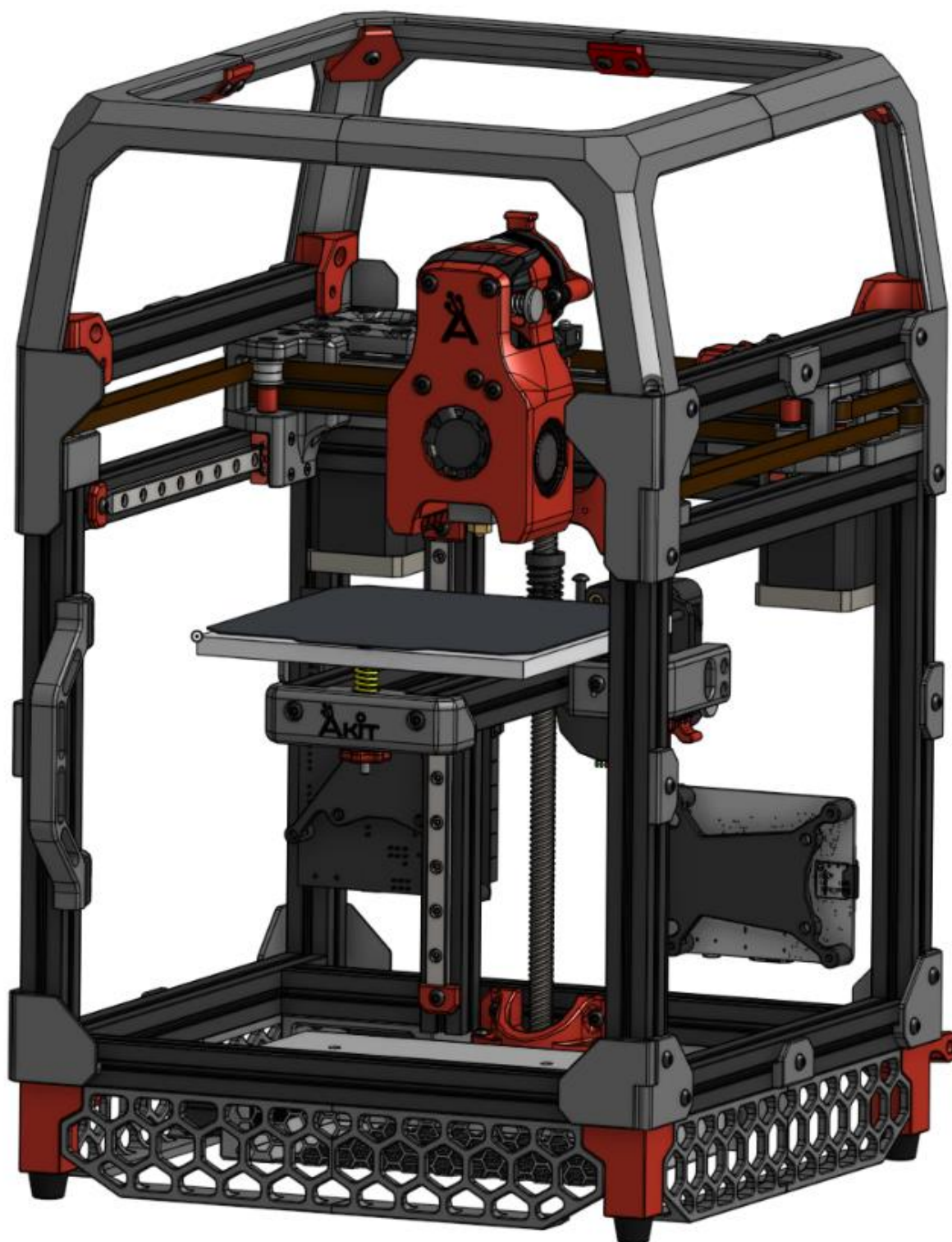
39. Дії населення в умовах надзвичайних ситуацій воєнного характеру. *Державна служба України з надзвичайних ситуацій* вебсайт. URL: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Diyi-naseleण्या-v-umovah-nadzvichaynih-situaciy-viyskovogo-harakteru.html> (дата звернення: 02.02.2022).

40. Solntsev O., Demyanenko A. Die Umsetzung der PID-Optimierungsalgorithmen in der Verwaltung von Manipulationsantriebe in einer Umgebung von LabView // Stoffen von allukrainischen wissenschaft-praktischen Konferenz " Moderne Technologien der industriellen Komplex ", Ausgabe 2. Cherson: HNTU (Fakultät für Maschinenbau), 2015.

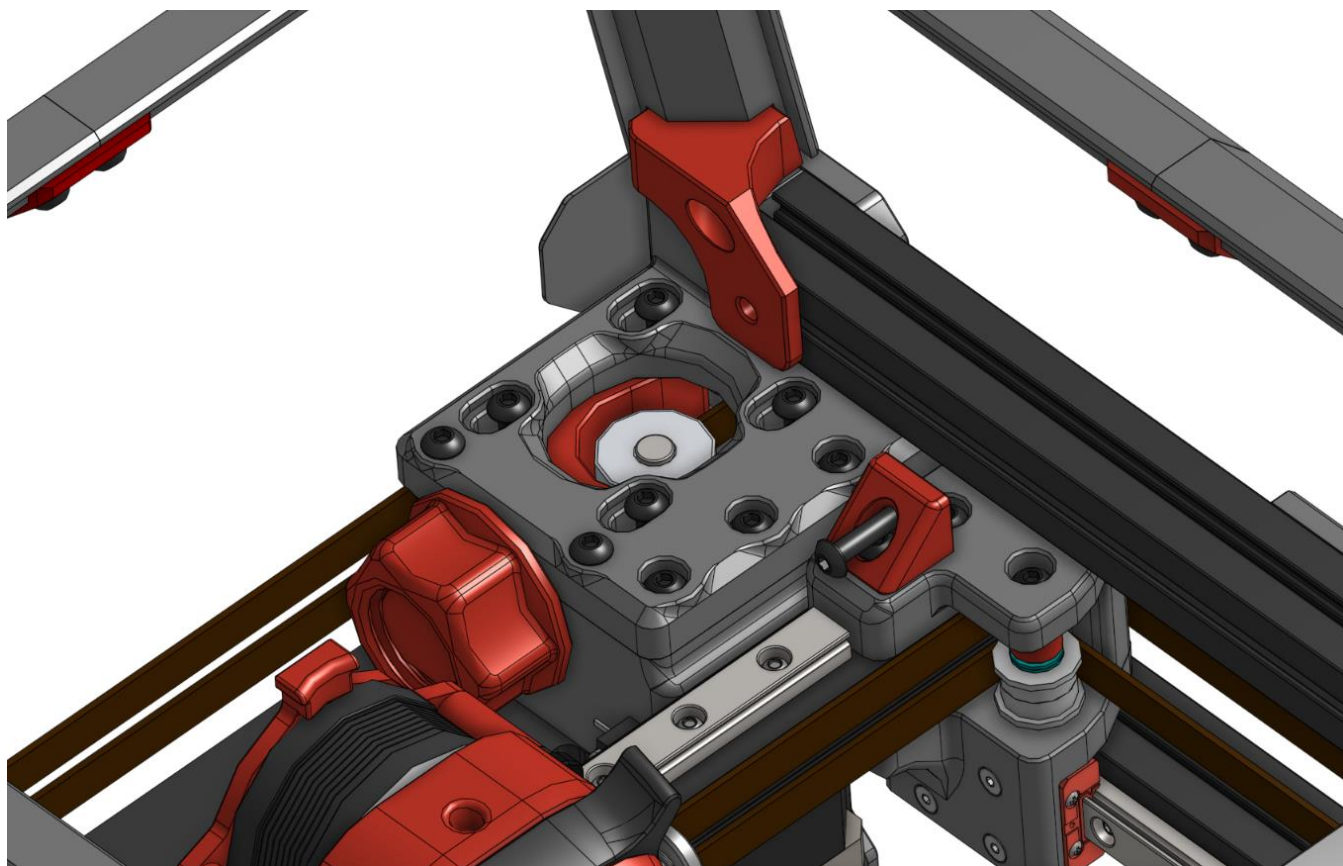
## Додаток А



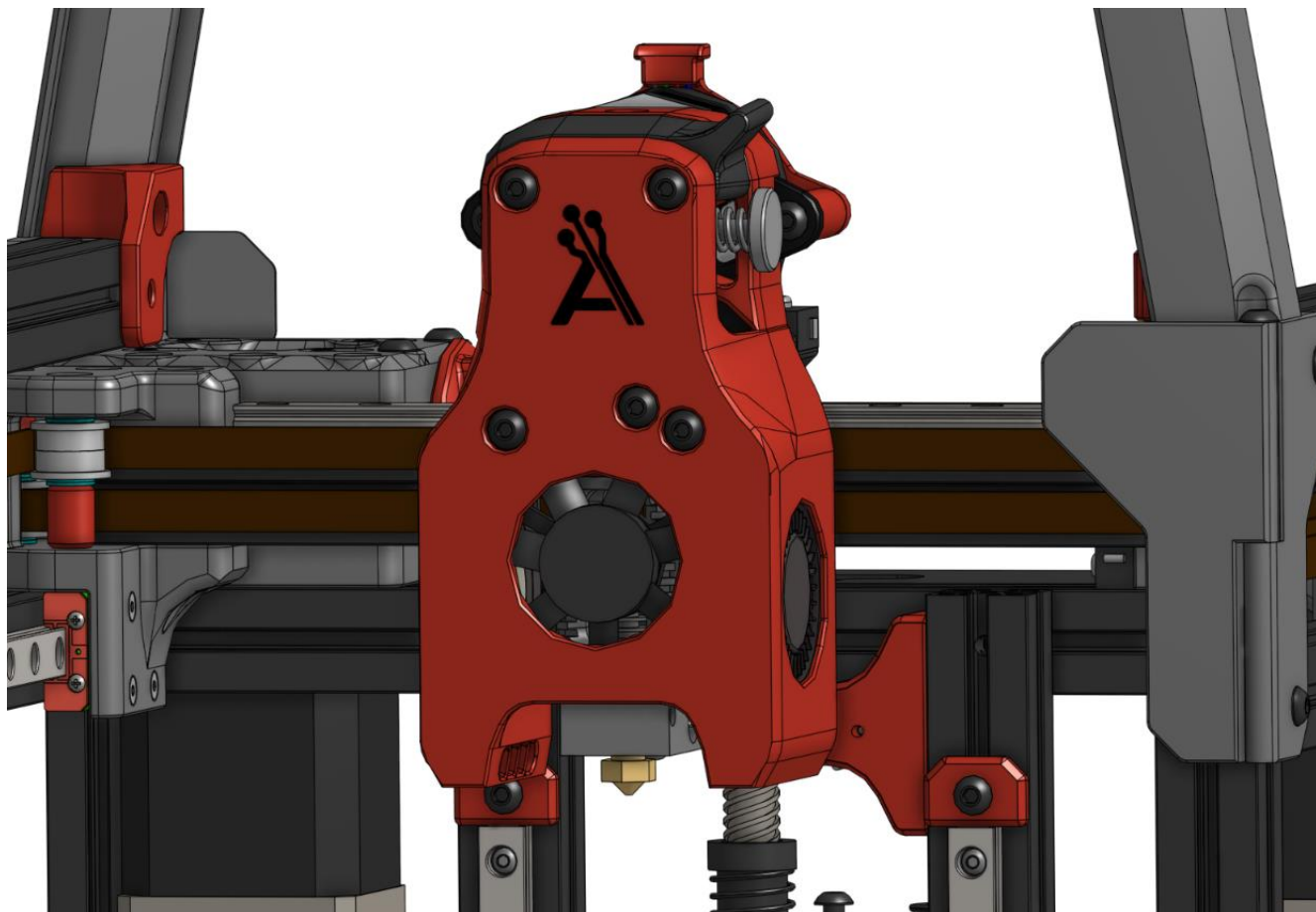
## Додаток Б



## Додаток В



### Додаток Г



### Додаток Г

Відомі онлайн-бази даних для 3D-моделей [35]

Оферент	Вартість моделі	Галузь	Коментар
3D Warehouse	безкоштовно	хобі	містить 3D-моделі, створені за допомогою «SketchUp Make» (раніше «Google SketchUp»), БД інтегрована в програму
GrabCAD	безкоштовно	хобі, наука і освіта, мистецтво, промисловість і ремесло	належить виробнику 3D-принтерів Stratasys, пропонує командам можливість організувати проекти та обмінюватися файлами CAD
Hum 3D	платно	хобі, наука і освіта, мистецтво, промисловість і ремесло	професійно створені моделі, спеціаліст з військової техніки, техніки
NASA 3D	безкоштовно	ентузіаста космосу	3D-моделі, пов'язані з космосом, деякі вже підлягають 3D-друку
NIH 3D Print Exchange	безкоштовно	наук (медицина, біологія)	керується Національним інститутом здоров'я, анатомічні 3D-моделі, лабораторне обладнання, молекули, бактерії та багато іншого
Pinshape	платно / безкоштовно	хобі	на основі виробника 3D-принтерів Formlabs, багато моделей, оптимізованих для стереолітографії
Thingiverse	безкоштовно	хобі, наука і освіта, мистецтво, промисловість і ремесло	керується виробником 3D-принтерів MakerBot; наукова, розробницька, дизайнерська спільнота для виявлення, створення

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
 Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

			та обміну 3D-матеріалами для друку, найбільша в світі спільнота 3D-друку (>750 000)
TraceParts	безкоштовно	машинобудування	об'єднує онлайн-каталоги постачальників комплектуючих і є правильною адресою, якщо вам потрібні 3D-моделі технічних компонентів.
TurboSquid	платно / безкоштовно	хобі, наука і освіта, мистецтво, промисловість і ремесло	велика база даних (>500 000) з якісними моделями високої якості
Yeggi	безкоштовно	хобі	пошукова система, яка шукає на платформах і спільнотах тривимірні моделі для друку
YouMagine	безкоштовно	хобі	на основі виробника 3D-принтерів Ultimaker, складні моделі спеціально для друку з водорозчинним допоміжним матеріалом

### Додаток Д

#### Вимоги до конструктивних деталей з пластику 3D принтера

Назва пластику	Температура адгезії	Переваги	Надоліки
PLA	~55 – 60 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– стійкість пластику до впливу низьких температур;</li> <li>– витримує вплив високих температур;</li> <li>– зносостійкий.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– жорсткий;</li> <li>– низька пластичність (спроможність пластику змінювати свою форму без втрати міцності або розриву);</li> <li>– виникають несподівані тріщини на моделі (тріщини викликані низькою пластичністю пластику).</li> </ul>
HTPLA	~55 – 60 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– витримує високу температуру;</li> <li>– зносостійкий матеріал, витримує суттєві навантаження.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– дорогий пластик;</li> <li>– низька пластичність матеріалу;</li> <li>– висока ймовірність виникнення тріщини на моделі.</li> </ul>
PETG	~50 – 60 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– середня (помірна) жорсткість (залежно від добавок, які містить пластик);</li> <li>– висока пластичність.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низька термостійкість;</li> </ul>
ABS	90 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>– середня (помірна) жорсткість;</li> <li>– середня (помірна)</li> </ul>	



151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
 Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

		<p>пластичність;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– витримує певні вигини;</li> <li>– витримує вплив високих температур.</li> </ul>	
<p>Nylon –          PA6          (нейлон)</p>	<p>180 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– середня (помірна) жорсткість;</li> <li>– середня (помірна) пластичність;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– схильність матеріалу до повзучості (повільної деформації);</li> <li>– швидке поглинання вологи, що призводить до утворення в матеріалі бульбашок.</li> </ul>
<p>Nylon –          PA12          (нейлон)</p>	<p>180 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– середня (помірна) жорсткість;</li> <li>– середня (помірна) пластичність;</li> <li>– схильність до повзучості (повільної деформації) мінімізована;</li> <li>– можливий друк принтерами двох технологій друку : SLS та FDM (має помірковану якість).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– дорого вартісний пластик;</li> <li>– частіше друкується на принтерах з технологією друку – SLS, друк на FDM принтері не забезпечує високу якість (має помірковану якість).</li> </ul>
<p>Polycarbonate (Полікарбонат) та суміші PC: PC-ABS, PC-</p>	<p>~150 °C</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– висока жорсткість;</li> <li>– витримує високу температуру;</li> <li>– витримує помірні навантаження.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– низьку пластичність;</li> <li>– висока ймовірність раптового розтріскування моделі;</li> <li>– не витримує значні навантаження.</li> </ul>

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі

CF			
Resin (Смола)		<ul style="list-style-type: none"><li>– моделі стискаються з часом, нівелюючи цим допуски на розміри роздрукованого об'єкта (модель зменшується);</li><li>– ущільнювачі зі смоли завжди поступово деформуються під тиском болтів, та гайок;</li><li>– швидке зношення під натиском.</li></ul>	