

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНИ

КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему Використання 3D-принтеру у виробництві будівельної
продукції

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1922-пцб-дн
спеціальності 192 Будівництво та цивільна
інженерія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Промислове і цивільне
будівництво

(назва освітньої програми)

Мекауі Ільясс

(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н. Банах В. А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н. Самченко Р.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
імені Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра промислового та цивільного будівництва
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва)
Освітня програма Промислове і цивільне будівництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« » 20 року

І.А. Ашурков

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Мекауї Ільясеу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Використання 3D-принтеру у виробництві будівельної продукції

керівник роботи проф., д.т.н. Банах В. А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від « 09 » 10 2023 року № 1578-с .

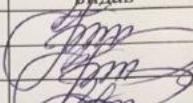
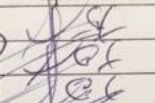
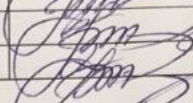
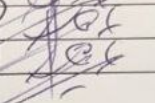
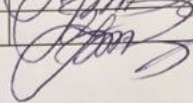
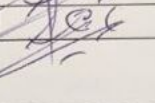
1 Строк подання студентом роботи 01.03.2024

2 Вихідні дані до роботи Актуальність обраного напрямку досліджень, значимість у сучасному житті, можливість розв'язання проблематики, перспективи впровадження майбутніх досягнень, мета роботи, завдання до виконання обраних досліджень, об'єкт досліджень, предмет досліджень, передбачувані методи виконання досліджень

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд. Аналіз 3D-друку, адитивних технологій, різновидів будівельних принтерів, роботизації та автоматизації будівництва, перспективних напрямів у будівництві. розроблено імітаційну модель будівельного 3D принтера у програмному комплексі MATLAB/Simulink.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація із результатами аналітичних обґрунтувань наукового напрямку досліджень, результатами експериментальних досліджень, результати розрахунків із застосуванням сучасних інформаційних методів досліджень

5 Консультанти розділів роботи

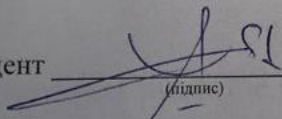
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Банах В. А.		
2	Банах В. А.		
3	Банах В. А.		

6 Дата видачі завдання 01.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	01.01	
2	Розділ 1	15.01	
3	Розділ 2	01.02	
4	Розділ 3	15.02	
5	Розробка графічної частини	20.02	
6	Оформлення роботи	25.02	
7	Попередній захист	01.03	

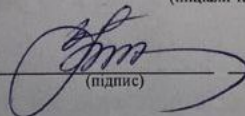
Студент


(підпис)

Мекауї Ільясс

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)

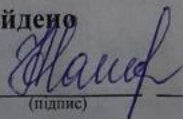

(підпис)

Банах В. А.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

Данкевич Н.О.

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Мекауї Ільясс. Використання 3D-принтеру у виробництві будівельної продукції.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 - Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник В.А. Банах. Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні ЗНУ, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

Виконано аналіз 3D-друку, адитивних технологій, різновидів будівельних принтерів, роботизації та автоматизації будівництва, перспективних напрямів у будівництві з можливістю вдосконалення процесів за допомогою принтерів, а також моделювання технологій, що застосовуються в даній галузі.

Ключові слова: ТРИВИМІРНИЙ ДРУК У БУДІВНИЦТВІ, РОБОЧИЙ ПРОЦЕС, МОДЕЛЮВАННЯ, ДВИГУН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ARDUINO, SIMULINK, НЕПРЕРИВНИЙ КОНТРОЛЬ ПОДАЧІ БЕТОНУ.

ABSTRACT

Meikai Ilyass. The use of a 3D printer in the production of construction products.

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 192 - Construction and Civil Engineering, supervisor V.A. Banach. Engineering Educational and Scientific Institute Yu.M. Potebny ZNU, Department of Industrial and Civil Engineering, 2024.

An analysis of 3D printing, additive technologies, types of construction printers, robotics and automation of construction, promising directions in construction with the possibility of improving processes with the help of printers, as well as modeling of technologies used in this field was performed.

Keywords: 3D PRINTING IN CONSTRUCTION, WORK PROCESS, SIMULATION, DC MOTOR, ARDUINO, SIMULINK, CONTINUOUS CONCRETE FEED CONTROL.

ЗМІСТ

	Вступ.....	7
Розділ 1	АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ГАЛУЗІ 3D ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ.....	10
1.1	Перспективи тривимірного друку у будівництві та її переваги.....	10
1.2	Засоби 3D-друку у будівництві.....	16
1.3	Аналіз попередніх досліджень.....	22
1.4	Робоча гіпотеза.....	36
Розділ 2	МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ	38
2.1	Опис об'єкта дослідження.....	38
2.2	Розробка розрахункової схеми.....	44
2.3	Математичний опис моделі серводвигуна.....	48
2.4	Створення імітаційної моделі у програмі MATLAB/SIMULINK	53
Розділ 3	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	61
3.1	Розробка експериментальної бази на платформі Arduino.....	61
3.2	Програмування та проведення досліджень.....	66
3.3	Результати експериментальних досліджень.....	73
3.4	Методи контролю якості 3D друкування будівельних виробів...	74
3.5	Економічна ефективність тривимірного друку у будівництві.....	81
	ОСНОВНІ ВИСНОВКИ.....	85
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

ВСТУП

Актуальність вибраної теми. Будівництво - це найдавніше ремесло, яке крок за кроком йде поряд з людством, розвиток одного без іншого просто неможливий. Соціалізація, індустріалізація і навіть глобалізація так чи інакше всі пов'язані з будівництвом, починаючи від приватного будинку для невеликої родини, закінчуючи містами з мільйонним населенням, останні у свою чергу вражають інфраструктурою і є відображенням еволюції галузі будівництва. Але за всіх нововведень, сама галузь будівництва дуже консервативна, деякі технології, чи не забуті цивілізації, використовуються досі, змінюється лише підхід і покращуються матеріали.

Будівельний майданчик є зоною підвищеної небезпеки, а виконання робіт відрізняється складністю та монотонністю, все це служить якорем для всієї галузі. Але якщо вже є технологія, яка, якщо не позбавлена недоліків, то дуже і дуже сильно мінімізує їх, а її переваги вже на порядок вищі. У будь-якому будівельному проекті успіх складається з усього трьох факторів, а саме вартість, терміни і результат якості. 3D-друк у будівництві - це недооцінена технологія на даний момент, саме в ній складаються ці фактори і розчиняються недоліки звичних нам способів будівництва.

Роботизація не просто вдосконалює будівельне виробництво, це своєрідний промисловий переворот. Виразно проявляють себе її переваги, терміни будівництва значно скорочуються, а людська праця не просто зменшується, замість ручної праці потрібна розумова, а майданчик стає суттєво безпечнішим. Роль людини залишається лише у роботі з електронікою, алгоритмами робіт, вихідними даними, результатом та його аналізом.

У цій роботі досліджуються існуючі технології 3D-друку у будівництві, різновиди роботів-принтерів, досвід застосування подібних технологій.

Найбільш новаторські дослідження та розробки в технології будівельного 3D-друку докладно описані в наукових публікаціях багатьох

авторів, таких як: Андрошук Г.О., Даттон Р., Ванглер Т., Вегер Д., Гелен К., Дилленбургер Б., Лоук Д., Мюллер Ф., Перро А., Хаберт Г., Хак Н., Хошневис Б., Davidla Delgado J. M., Ajayi A.O., Akinade O.O. Але, досі, за всіх наукових розробок, практичних проектів та досліджень, рівень автоматизації та масштабованого застосування залишається на низькому. Потрібно вирішити завдання подачі суміші 3D-принтером, контролю якості екструзії та стану конструкції до набору первинної міцності або затвердіння. Необхідно розробити алгоритми роботи техніки у випадках непередбачених, блокування систем або виконання встановлених дій щодо ситуації.

Моделювання будівельних принтерів та здійснюваних ними процесів зовсім не просте завдання. Для її вирішення потрібне складання диференціальних рівнянь, що описують процес, а також інтегрування. Сучасні комп'ютерні комплекси значно спрощують завдання, серед них MathCAD, MATLAB, Simulink. З їх допомогою процес стає набагато доступнішим, швидшим і практичнішим, таким чином розробки у сфері з'являються частіше.

Ця робота присвячена дослідженню та розробці нових технологій зведення будівельних конструкцій адитивними методами будівельного виробництва. Вони підходять під будь-яку складність обстановки будівельного майданчика, будь то стислість або клімат.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є моделювання та вдосконалення робочих процесів засобів 3D-друку у будівництві.

Об'єкт дослідження. Будівельний 3D принтер маніпуляторного типу.

Предмет дослідження. Механіка переміщення, подачі та екструзії розчину принтером маніпулятором.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися узагальнення та аналіз теоретичних та практичних досліджень на тему роботи та обробка отриманих експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає у підходах до вивчення, з використанням актуальних методів та програмних комплексів.

Практичне значення одержаних результатів. Виконано аналіз

3D-друку, адитивних технологій, різновидів будівельних принтерів, роботизації та автоматизації будівництва, перспективних напрямів у будівництві з можливістю вдосконалення процесів за допомогою принтерів, а також моделювання технологій, що застосовуються в даній галузі.

Особистий вклад дослідника. Постановка мети і завдання дослідження. Збір і аналіз даних для проведення дослідження.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел містить 91 сторінок, 42 рисунка, 6 таблиць, 45 список використаних джерел.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ 3D ДРУКУ В БУДІВНИЦТВІ

1.1 Перспективи тривимірного друку у будівництві та її переваги

За допомогою 3D-принтерів сьогодні можна друкувати як житлові, так і нежитлові будинки, приміщення та будівлі складних архітектурних форм. Можливості даного комплексу не обмежуються скромними будовами, а поширюються на багатоповерхові конструкції та не обмежують їх сезонною експлуатацією, такі будинки придатні для життя цілий рік. Основний матеріал таких виробів – це армований бетон, при чому застосовують композитні матеріали. Несуча здатність таких конструкцій не поступається звичайним, а технічні характеристики ідентичні до звичного житла. Технологія будівельного друку дозволяє втілювати в життя найнеймовірніші дизайнерські проекти та зводити незвичайну форму споруди. Як показала практика застосування будівельних принтерів, це в рази менш трудомістко і набагато дешевше за традиційні альтернативи.

Економічно раціональне створення унікальних проектів та забезпечення незаможних верств населення це два основні перспективні напрямки 3D-друку в будівництві. Причому житло має бути довговічним, екологічним, комфортним та доступним фінансово для реалізації. Фактором стримування повсюдного застосування є відсутність законодавчої бази для 3D-друку в будівництві. Проте, застосовуючи виключно цю технологію будівництва, будівельники з абсолютно різних куточків світу будували об'єкти, які впевнено стоять і вже досить довго експлуатуються. Прикладом таких робіт буде будинок Yhova.

Будинок Yhova був розроблений Нантським університетом у співпраці з Nantes Digital Sciences Laboratory (LS2N) у рамках Нантського тижня дизайну у 2017 році. Він був побудований за допомогою власної запатентованої технології університету, відомої як Vatiprint3D, яка також

включає традиційні методи будівництва.. Будинок площею 95 м² зображено на рисунку 1.1



Рисунок 1.1 - Будинок Уннова

Великий інтерес виявляють в ОАЕ, там навіть існує конкуренція між такими компаніями як Голландська CyBe Construction, Американська Contour Crafting або Італійська WASP. Так першою з них уже запропонували контракт на зведення 20 відсотків усіх нових будівель Дубая, так у 2019 році там за допомогою принтера компанії APIS COR звели будівлю площею 640 м² вона зображена на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Результат будівельного 3D друку в ОАЕ

Але, як і у всьому, існують свої переваги і свої недоліки. Ґрунтуючись на їх аналізі і варто робити висновок про перспективи даної технології для майбутнього. Для виявлення плюсів та мінусів необхідно розібратися з технологією та особливостями будівельного друку.

Будівельні 3D-принтери оснащуються друкуючими головками, так званими екструдерами, через них видавлюється та укладається бетон, пошарово формуючи конструкції внутрішніх та зовнішніх стін майбутньої будівлі. Попередньо має бути розроблений проект тривимірної моделі об'єкта на комп'ютері у CAD-програмі. Розчин для друку повинен мати чіткі характеристики консистенції, для цього застосовують пластифікатори та добавки, але в цілому процес змішування компонентів подібний до приготування звичайного бетону. По готовності розчин нагнітається тиском шланг, що веде до головки принтера. Екструзія відбувається з фіксованою швидкістю на підготовлений майданчик. Насправді принтер окреслює периметр проекту пошарово наносячи матеріал.

У порівнянні зі звичайним будівельним бетоном, розчин для 3D-друку за своїми характеристиками найбільше нагадує багатокомпонентний високомарочний розчин з відсутністю великого заповнювача. Щоб надати йому додаткову міцність, додають до розчину добавки на кшталт фіброволокна, а стіни будівлі армують скловолокном прямо під час друку.

3D-друк однаково зручний для створення як невеликих, так і великорозмірних конструкцій. Тим не менш, її застосування великими міськими забудовниками для серйозних об'єктів та потокової забудови сильно обмежене через відсутність регламентуючих баз і законодавства. У такому разі зараз вона актуальна лише для середнього та малого підприємництва.

Типи будівельних 3D-принтерів:

- XYZ-принтери.
- Дельта
- Роботи
- D-Shape

Портальні моделі відомі всім як XYZ-принтери. По суті це рами, друкована головка яких переміщається по осях X, Y. Установка головки і її переміщення забезпечується напрямними опорами, що утворюють рами. Переміщення порталу напрямними різних координат здійснюється високоточними кроковими двигунами.

Існують три способи їх експлуатації:

- При відносно скромних габаритах будівлі друк проводиться повністю.
- Великі розміри об'єкта змушують друкувати його складові окремо з наступним монтажем і зв'язкою.
- Також принтер можна розташувати всередині існуючих конструкцій для друку внутрішніх стін.

У порівнянні з XYZ-пристроями, дельта-принтери краще підходять для створення більш витончених конструкцій, завдяки своєму каркасу вони не прив'язані до тривимірних напрямних. Товсті, жорсткі рами в цьому випадку замінені на тонкі важелі, що переміщаються похилими напрямними, а на важелях кріплять голови друку пристроїв.

Роботизовані пристрої являють собою прості будівельні маніпулятори промислового типу. Для забезпечення подібного роду робіт останні оснащують та обладнують системами змішування компонентів, подачі розчину, а також системами комп'ютерного контролю та управління.

Апарати під назвою D-Shape виділяються не просто, їх філамент являє собою не розчин, а порошковий, сухий матеріал. Філамент формують і ущільнюють шар за шаром відповідно до бажаної товщини, після чого він просочується сполучною речовиною знову за допомогою принтера. Готовий елемент піддається фінішній обробці для позбавлення від надлишків.

Матеріальною основою друку є бетон. Основні труднощі виникають як у процесі подачі суміші від бункера до екструдера, так і укладності. Так як матеріал не повинен розтікатися і наноситься рівномірно, його склад ретельно опрацьовано і конфігурація співвідношення пропорцій формує консистенцію.

Важливо врахувати, що тимчасові рамки схоплювання повинні відповідати проміжку між збереженням форми при екструзії і однорідному з'єднанні шарів, що накладаються в місці зіткнення, для чого розраховується хімічна активність. Також надто швидке схоплювання може пошкодити конструкції принтера та заблокувати процес екструзії. Рухливість розчину забезпечують добавки у вигляді речовин, що пластифікують, а співвідношення кількості води до цементу зменшується.

Пора розглянути плюси та мінуси технології будівельного тривимірного друку.

Тривимірне адитивне будівництво втілює в реальність усі фізично можливі архітектурні та конструктивні фантазії.

Проекти нехарактерного, складного дизайну зводяться принтером набагато дешевше та простіше, ніж традиційними методами. Технологія передбачила це в собі і цю перевагу не спростувати.

Процеси даного виробництва налагоджені та налаштовані на машинні точність та швидкість. Друк об'єкта проводиться чітко відповідно до програми проекту та матеріалізується з моделі. Для виключення неякісної продукції проект опрацьовується досконало.

Фізична праця людини сходить нанівець, замість неї виникає необхідність у висококваліфікованих кадрах, що у свою чергу не зовсім позбавляє людину робочого місця, а дає їй перспективу розвитку.

У процесі будівництва у зв'язку з його особливістю залишається менше сміття. Використання компонентів відбувається без необхідності додаткових процесів, таких як очищення, підготовка, а виробництво виходить майже безвідходним.

Завдяки цьому процес будівництва несе набагато менше ризиків і не так загрожує навколишньому середовищу.

До недоліків технології віднесемо вузький спектр високоякісних розчинів, що застосовуються, що в рамках масштабного використання ускладнюється дефіцитом.

Дефіцит кваліфікованих кадрів для використання та ремонту техніки, проектування конструкцій з урахуванням нюансів та особливостей нової технології.

Деякі застосовувані технології варто виключити за неліквідністю, наприклад складання готових, заздалегідь надрукованих компонентів на місці виявляється такою ж довгою і трудомісткою, як і традиційні методи зведення.

Відкрито питання нормування та юридичного регулювання застосування потокового виробництва за допомогою даних технологій.

Новизну технології можна віднести до недоліків тільки тому, що споживачам потрібен час, щоб звикнути до нового, до її переваг і полюбити її. Вибір житла є дуже відповідальним і дорогим моментом у житті багатьох, тому потрібно дати час технології виправдати себе.

Лише завдяки темпам розвитку та міжнародного застосування 3D-технологій можна припустити, що існуючі мінуси технології долаються в даний момент і питання незабаром буде закрито.

Тривимірний друк у будівництві вже давно дозволяє зводити чудові будинки для постійного, цілорічного проживання. Габарити об'єкта не відіграють ніякої ролі, будь то приміщення мінімальної площі або будівлі з просторими залами, технологія навіть дерзит на багатоповерхові та багатоквартирні будинки. За міцністю та довговічністю такі будівлі не поступаються своїм традиційним аналогам, а технологічно випереджають у всіх напрямках.

Мало того, що йдеться про підвищення екологічності та енергоефективності, так і процес виробництва менш трудомісткий, суттєво знижено витрату матеріалів, час скорочується в рази і трудомісткість на порядок менша. Знову ж таки все впирається в питання законодавчої бази даних технології.

З огляду на це застосування обмежене локальними проектами середнього та малого бізнесу. У перспективі ця технологія має величезне завдання вирішення проблеми житла та житлових умов мільйонів людей по

всьому світу, без необхідності непомірних, неповоротних інвестицій. До того ж, технологія дозволить кожному проекту підкреслити свою індивідуальність.

У сухому залишку, аналіз переваг та недоліків адитивних технологій відбив що найбільш затребувані методи виробництва охоче піддаються коригування. Архітектурні проекти обмежені лише фізичними можливостями, при цьому розробка дизайну та його виконання залишаються на колишньому рівні. Впровадження будь-яких технологічних отворів, каналів та отворів легко адаптується в конструкцію в міру необхідності, що особливо ефективно для промислових підприємств різноманітних напрямків, таких як авіабудування, медицини та енергетики. Застосування в різних галузях виробництва забезпечується різноманітністю процесів, у чому полягає основна перевага таких технологій.

У свою чергу, економіка на даний момент чинить опір повсюдному впровадженню виробництва, але, як відомо ринок одночасно непередбачуваний і циклічний, що повноправно вказує на великі перспективи у разі високої якості продукту. Але на даний момент, навіть опустивши факт міжнародної зацікавленості, існує низка природних причин, повільного впровадження, серед них і відсутність маркетингу, суспільної обізнаності та інтересу до технології, брак кадрів складання, експлуатації, обслуговування та ремонту техніки, відсутність стандартизації техпроцесів, регламентів, САПР моделей та матеріалів.

Основні проблеми вирішуються з часом, фахівці залучаються з багатьох близьких галузей, наприклад машинобудування, зацікавленість приходить у міру впровадження та охоплення. Швидко і рішуче все це усувається завдяки держпідтримці, що позначиться на пристосуванні до мінливих умов застосування.

1.2 Засоби 3D-друку у будівництві

3D технології широко застосовуються у всіх сферах виробничої

діяльності людини, від мікрохірургії для виробництва серцевих клапанів і навіть друку живої тканини на підставі генного коду, до менш точного, але більш об'ємного будівництва, в якому вже давно час позбудеться неефективного, за мірками існуючих технологій, , ручної праці. Будівельні принтери існують у множині вигляді, наприклад принтер порталного типу зображений рисунок 1.3.

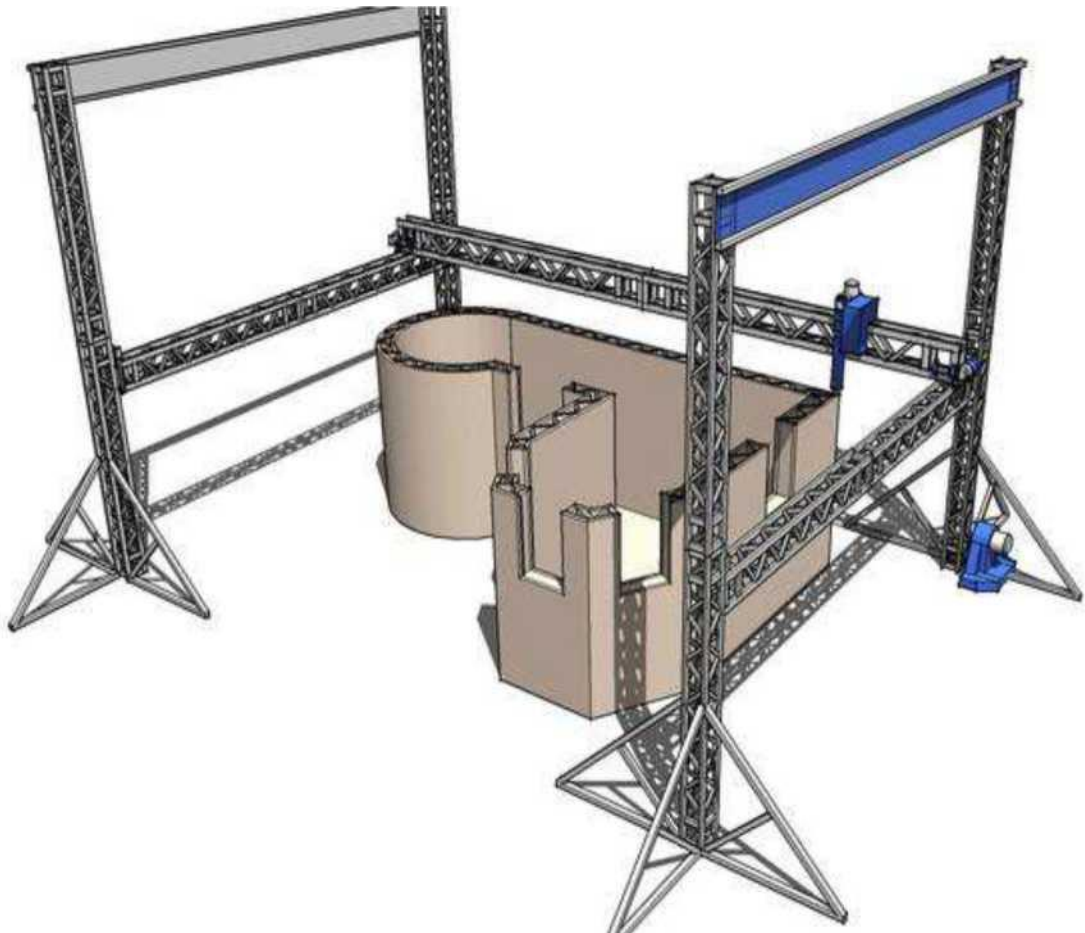


Рисунок 1.3 – Будівельний 3D принтер порталного типу

Технологія екструзії серед усіх будівельних принтерів дуже схожа, але конструктивні особливості порталного типу принтера, це його основні недоліки перед конкурентом у вигляді принтера-маніпулятора. Навіть обиватель побачить, що порталний принтер обмежений у просторі, ускладнений збиранням та розбиранням усієї конструкції, та її габаритами при транспортуванні, а також вимагає жорсткої основи під усім периметром каркасу обладнання.

У разі сучасного будівництва дуже великий вплив економічного чинника, що у своє чергу залежить від термінів будівництва та трудомісткості виконуваних робіт. Саме на скорочення термінів, трудомісткості робіт спрямовані новітні дослідження будівельних технологій. Для збереження конкурентної спроможності компанії у всьому світі застосовують усіляку автоматизацію. Найкращим її виявом стали маніпулятори.

Функції таких механізмів не обмежені, основою звичайно є багатозадачність маніпулятора, шляхом дооснащення робота і застосування необхідного програмного забезпечення він виконує найнепередбачуваніші завдання. Таким чином, робота маніпулятора, системи подачі бетону, бункера для бетонної суміші і комплексу автоматизації управління і подачі був сконструйований перший будівельний 3D-принтер маніпуляторного типу, який зображений на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Будівельний 3D принтер маніпуляторного типу компанії Apiscor

Така конструкція робота надала технології 3D друку особливих переваг. По-перше, мобільність у використанні, установці, роботі на ділянці забудови при зміні місця і звичайно ж транспортуванні. Сама конструкція потребує жорсткому підставі невеликого розміру, а пристрою у вихідне положення не вимагає складання, вона не організована в просторовому переміщенні, і вимагає лише візуального, або програмного контролю.

Метод пошарової екструзії - це основний спосіб, який використовується в адитивних технологіях. Даний метод полягає в тому, що за допомогою екструдера або робочого сопла машина видавлює швидкотвердіючу робочу суміш, до складу якої включені різні добавки, пластифікатори, мікрофібри тощо, які формують необхідну пластичність та консистенцію суміші.

Адитивними технологіями називають формування об'єктів за допомогою тривимірного друку. Для автоматичного використання принтера потрібно створити комп'ютерну модель майбутнього об'єкта. Робиться це у звичних інженерам, тривимірних графічних редакторах, таких як REVIT, SolidWorks, 3D StudioMax. Тривимірна модель об'єкта розбивається на шари та алгоритм їхньої послідовності. Таким чином принтер друкує об'єкт шар за шаром відповідно до програмної моделі, видавлюючи кожен рівень у площині, а потім переміщаючись по вертикальній осі для друку нового рівня.

Безпосередній друк будівельних конструкцій 3D принтером можна розділити на такі етапи:

- 1) В першу чергу підключаються всі системи принтера, електроживлення, комплекси автоматизації, силос і бункер із сумішшю, перевіряється наявність компонентів, потрібен візуальний огляд рухомих механізмів як самого принтера, так і механізмів, після чого перевіряється їхня функціональність і працездатність системи в цілому.

- 2) Здійснюємо подачу всіх необхідних компонентів до дозаторів для рівномірного розподілу складу.

- 3) Дозування відбувається в бетонозмішувальній пристрій, який подається вода і протягом 10 хвилин відбувається перемішування.

4) З бетонозмішувальної установки розчин або робочу суміш подають до бункеру шнекового насоса, звідки вона надходить на друкувальну головку або екструдер. Для забезпечення безперебійності роботи можуть використовуватись проміжні бункери, у кожному обов'язково постійне перемішування суміші.

5) За допомогою комп'ютера та спеціального програмного комплексу MACH 3 відкривається тривимірна модель конструкції.

6) Друкувальна голівка встає у початкову позначку, згідно програмі та моделі об'єкта. Цей комплекс готовий до роботи.

7) Початок екструзії або друку об'єкта, суміш рівномірно видавлюється на поверхню, а маніпулятор пересуває екструдер згідно з архітектурою об'єкта, зображеною у вигляді 3D моделі.

8) Для управління та супроводу процесів роботи достатньо 1-2 осіб, оператор-фахівець, завдання якого стежити за коректною роботою техніки та встановлювати елементи армування в конструкцію, через певні рівні.

Будівельні 3D принтери бувають трьох видів конструкцій, порталного типу, у вигляді козлового крана, нас цікавить найновіший, але найперспективніший з них, 3D принтер маніпуляторного типу. Перші два обмежені в робочому просторі, ускладнені власною вагою, розмірами, складанням, а значить і термінами встановлення. Маніпулятор у свою чергу дуже мобільний, для його транспортування та експлуатації потрібно кілька людей. Для його встановлення потрібен невеликий кран, на відміну від бригади з великою технікою для складання порталного принтера.

Основними засобами автоматизації адитивних технологій у будівництві були і залишаються комплекси та програмне забезпечення робота. Кожен механізм повинен чітко виконувати свої завдання, але інша річ, це спільна робота всіх механізмів, датчиків, реле регулювань і систем разом. Їх координація та послідовність роботи має бути чітко налаштована. Під час друку датчики відстежують не тільки роботу механізмів, але й результативність по об'єкту, що зводиться, у разі несправності системи або

конструктивної невідповідності об'єкта, будь-якої неполадки повинен бути запущений алгоритм оповіщення оператора, для подальшого його втручання. Система повинна працювати коректно в такій ситуації, можливо змінивши такт роботи, уповільнивши друк або призупинивши її до моменту втручання фахівця.

Але, як і все створене людиною, конструктив робота маніпулятора має недоліки, застаріває та потребує модернізації, або доопрацювання на момент проектування. Принтер-маніпулятор включає безліч датчиків, систем і механізмів, таких як електро або гідроприводи просторового переміщення стріли, бетоновода та систем подачі бетону, екструдера, комплексів зберігання, змішування та розподілу розчину. Всі вони не досконалі та зазнають змін як з технічного боку, так і модернізуються програмно. Модель експериментального будівельного маніпулятора представлена на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - Будівельний маніпулятор на гусеничному ході

Завдяки своїм характеристикам та особливостям принтер маніпулятор може доукомплектовуватись майже будь-яким засобом автоматизації процесів у будівництві: системами автономного живлення, з впровадженням сонячних батарей, системи формуючих розчин виробу, системами забезпечення жорсткості та стійкості маніпулятора. Так в якості експерименту одну з невеликих моделей маніпулятора оснастили системою гусеничного ходу, завдяки чому він придбав повну просторову свободу і габарити конструкції, що зводиться їм абсолютно не обмежені, потрібно лише враховувати властивості самої суміші і більш точно прописувати програму друку.

1.3 Аналіз попередніх досліджень

У роботі [1] розглянуто "Застосування технології 3D-друку в будівництві. Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві". Автори цієї статті виділяють інтенсивний та невідворотний розвиток 3D-технологій, їх постійне впровадження в нові, часом несподівані сфери діяльності, такі як медицина, електроніка, а також у багатьох інших галузях. Перевагою використання цих технологій є сукупність швидкості та точності створення необхідних об'єктів із суттєвим скороченням ручної праці. Вкрай важливо згадати, що переважна більшість самих технологій безпосередньо відносяться до друку об'єктів 3D-принтером, за допомогою якого реалізується метод пошарового зведення фізичного об'єкта за його цифровою 3D-моделлю.

Пріоритетним предметом дослідження авторів стала сфера будівництва, а саме застосування технологій 3D-друку. Розглядаються всілякі технології, що використовуються в 3D-друку, їх плюси та мінуси, і звичайно ж перспективи їх застосування та вдосконалення у будівельній сфері, від малих об'єктів до великих споруд будь-яких архітектурних форм. Наведено опис пристрою та принцип роботи 3D-принтера. Визначено основні види матеріалів і їх комбінацій, що застосовуються, а також різновиди армування

конструкцій, що застосовуються при 3D-друку споруд і будівель. У статті відображені розробки іноземних компаній у будівництві будинків методом 3D-друку. Виявлено основні труднощі застосування 3D-друку практично.

У роботі [2] розглянуто "Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів". У цій роботі представлені матеріали міжнародного досвіду використання та реалізації технології 3D-друку у будівництві. Виконано аналіз існуючих технологічних рішень як українських, так і іноземних організацій, таких як ApisCor, CyBe Construction, Contour Crafting Corp., Loughborough University, WinSun, MIT Media Lab та DUS Architects, VatiprintSD, BetAbram, StroyBot. Відображено переваги та недоліки всіляких методів пошарового нарощування будівельних конструкцій.

Предметом дослідження цієї статті став аналіз конструкцій та виробів із цементобетонної суміші, вироблених методом пошарової екструзії.

Метою даних досліджень було виявити основні мінуси та плюси адитивних технологій у будівництві, ґрунтуючись на порівнянні особливостей друку виробів, конструкцій, а також властивостей матеріалів.

Авторами використовувався цілий комплекс загальнонаукових логічних методів вивчення та порівняння, заснованих на теоретичному та практичному аналізі технологічних рішень, відображених у науково-технічній літературі, інформаційних ресурсах та джерелах розробників, а також засобах масової інформації, у тому числі наукових звітах, наукових статтях та патентах.

В результаті було проаналізовано існуючі технологічні нововведення 3D-друку в будівництві, представлено їх переваги та відображено недоліки, чітко сформульовано проблеми розвитку цих технологій. Встановлено, що основним матеріалом для 3D-друку є важкий дрібнозернистий цементобетон, у складі якого входять такі компоненти: заповнювач фракцією не більше 4 мм в діаметрі, мікрофібра, мінеральні добавки, особливу роль мають хімічні добавки, пластифікуючі суміш, а також регулювання часу схоплювання. Середню щільність таких бетонів $2100...2200 \text{ кг/м}^3$, тоді як їхня міцність при стисканні становить $25...50 \text{ Мпа}$. Встановлено, що необхідно підбирати

оптимальні реологічні властивості сумішей, що застосовуються, а відсутність способів підвищення експлуатаційних властивостей цементобетону не дозволять розширити функціональне призначення зведених конструкцій або огорожувальної незнімної опалубки. Відповідно реалізація повною мірою потенціалу 3D-друку на даний момент утруднена. В якості модернізації та оптимізації технології потрібно сформулювати загальні вимоги і норми, що пред'являються до матеріалів для здійснення 3D-друку з цементобетону та розробки універсальних рецептурних рішень, які дозволять одночасно регулювати в'язкість і плинність суміші в процесі екструзії, а згодом також формувати необхідні конс- механічні та експлуатаційні властивості.

У роботі [5] розглянуто "Удосконалення обладнання 3D-друку об'єктів". У цій статті проведено дослідження та подальшу модернізацію існуючих 3D-технологій, що використовуються у будівництві. Виділено значення розвитку адитивних технологій у будівельній промисловості, перспективи їх застосування, а також вплив тенденції, що росте, на традиційні способи будівництва та зведення конструкцій, будівель і споруд. У статті відображено три основні конструкції 3D принтера, що використовується в будівництві: принтер порталного типу, кранового типу і маніпулятора. Принтери порталного типу маломобільні, важкі і громіздкі, для їх встановлення крім кваліфікованого персоналу потрібно багато часу і сил, як фізичних, так і механічних. У цьому плані випереджає конкурентів принтер маніпулятор, компактний та універсальний.

Метою дослідження стало відпрацювання робочих параметрів. Шляхом математичних розрахунків, підбором необхідних компонентів, вдосконалення їх параметрів і сукупної роботи всіх агрегатів, а також, підібравши відповідну компонентну суміш для екструзії, вдається привести коефіцієнт корисної дії агрегату до максимально можливого максимуму, що в свою чергу призводить до зниження експлуатаційних витрат на зведення питомої одиниці готової продукції. Дані дослідження ведуть до скорочення вартості 1 м³ споруд та вартості всієї споруди в цілому.

У роботі [20] розглянуто „Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку ”. У статті виконано наочний огляд існуючих будівельних 3D-принтерів. Автор надав короткий опис окремих моделей у процесі друку конкретних житлових об'єктів. Виділяється, що із застосуванням адитивних технологій індустріалізація будівельного виробництва перетворюється на нову епоху. Наведено традиційні характеристики та показники, які порівнюються для оцінки екологічності та ефективності адитивних будівельних технологій.

Передові технології компанії WinSun відчиняють двері в нову еру в галузі архітектурних проєктів, дизайну. Будівельна 3D-друк об'єднує воедино виробництво, системи інтелектуального обладнання та електроніку, новітні розробки, дозволяє інтегрувати додатки до системи інновацій. Конструкції, що зводяться 3D-принтером, відповідають існуючим стандартам при розробці та розрахунку конструктивної частини.

Крім Китаю, зведені будівельними 3D-принтерами об'єкти широко використовуються в США, ОАЕ, Філіппінах та Нідерландах, а розробкою новітніх адитивних систем зайняті в таких світових державах, як Великобританія, Іспанія, Франція, Словенія та багато інших країн. На Київщині будують перший в Україні будинок, надрукований на 3D-принтері. Для того, щоб створити бетонну коробку, знадобилося всього десять днів.

Однією з особливостей такого будинку стала кімната із підвищеним рівнем безпеки. Одна зі стін цієї кімнати створюється за допомогою 3D-принтера та здатна захистити сім'ю у разі повітряних тривог, як дві стіни без вікон у звичайному багатоповерховому будинку. Це рішення особливо актуальне з огляду на відсутність підвалу в нових будинках.

В даний час із застосуванням адитивної технології в основному будуються швидкозведені системи малої та середньої розмірності та поверховості. Однак, дана технологія має перевагу у швидкій адаптації до зведення багатоповерхових, висотних, складних конструкцій та будівель.

У роботі [6] розглянуто „3D-printing of build objects.”. У цій статті

авторами досліджено революційну технологію 3D-друку, а саме «Контурне будівництво» (англ. ContourCrafting). Технологія тривимірного друку є інноваційною в будівництві. Технологічні, конструктивні та експлуатаційні якості продукції, що реалізується, зберігаються, дозволяючи автоматизувати найважчий етап будівництва, а саме зведення огорожувальних і несучих конструкцій, влаштування інженерних мереж і, потенційно, ведення оздоблювальних робіт. Вперто розвиває цю технологію доктор Біхраз Хошнівес з Університету Північної Каліфорнії. Спочатку ідея Хошнівеса полягала в швидкому і дешевому будівництві житла в бідних районах, щоб ці будинки замінили руїни. Швидкість будівництва будинку, причому, без ручної праці, за допомогою цієї технології дорівнює 24 години. За своєю ідеєю, дана система працює за принципом масштабного застосування суті 3D-принтера.

Розробка Анроко Дано система контурного будівництва за назвою D-Share стала першою з найуспішніших. Ключовою особливістю стала можливість зводити будинки без участі людини. Матеріальна частина зазнала істотних змін, розроблено унікальну технологію перетворення піску в мінерал, з властивостями, що перевершують портландцемент. Кінцевий матеріал придбав мікрокристалічні сполуки та зв'язки.

Існує аргументована думка, що властивості матеріалу мають таку міцність, що він не вимагає армування. Будівництво із застосуванням цієї технології прискорює процес у кілька разів у порівнянні з поширеними методами.

Але, як і скрізь, є й недоліки, які потрібно доопрацювати, насамперед це проблема використання даної технології в багатоповерховому висотному будівництві, а саме, армування стін, а потім уже складнощі у зведенні перегородок та покрівель на горбистій ділянці землі.

У роботі [4] розглянуто „Аналіз існуючих технологій виготовлення будівель за допомогою 3D-принтерів і перспективи їх застосування в Україні”. У цій статті згадують щодо нової технології зведення будівель та споруд, а

саме будівництво за допомогою тривимірного друку. Метою даної роботи стало розповісти про принципи роботи існуючих 3D-принтерів, про зручність та можливості експлуатації такого роду техніки на робочому майданчику, а також про досягнуті вершини в цій галузі. Наведено інформацію про найбільш передові у світі організації, що займаються розробками у сфері будівельного тривимірного друку. Відображено основні фактори, що сприяють і гальмують інновації в індустрії тривимірного друку. Наприкінці зроблено висновок про перспективи розвитку цієї промисловості у майбутньому.

Адитивним називають принцип будівництва конструкції, форми або фігури за допомогою пошарового нарощування. Перед цим необхідно зобразити об'єкт у вигляді комп'ютерної моделі. Для проектування таких об'єктів існує безліч графічних редакторів та CAD-систем, наприклад, SolidWorks, 3D StudioMax, також існує прилад для сканування існуючих об'єктів та автоматичного створення проекту. Комплекс програм включає поділ моделі на шари та розраховує шлях принтера для послідовного нанесення шарів та формування конструкцій. Після встановлення принтера на робоче місце, його калібрування та підключення систем постачання принтер починає роботу і пошарово зводить об'єкт. Він переміщує екструдер у системі горизонтальних координат, видавлюючи шар за шаром відповідно до моделі. По завершенню шару, система піднімається вертикально осі на проектну позначку наступного шару.

На сьогодні галузь виробництва має найбільшу зацікавленість у подібних технологіях. Повсюдне застосування реалізовано у виготовленні простих виробів на полімерній основі, наприклад пластикового посуду, предметів інтер'єру, іграшок. Тим не менш, і в будівельній сфері зараз стоїть питання впровадження тривимірного друку в традиційні технології зведення будівель і споруд. Сприяють цьому низка таких причин:

- 1) По-перше, глобальне зростання та прискорення всіх людських сфер життєдіяльності попереджає будівельну галузь суттєво скоротити терміни зведення будівель та споруд;

- 2) По-друге, величезне зростання людства призводить до постійної потреби у збільшенні кількості житла;
- 3) По-третє, існуючі технології будівництва по ряду Причин вимагають великих витрат як фінансових, і ручної праці.

На закінчення автор доводить, що 3D друк вже зайняв певну нішу у будівельній галузі. Необхідно відзначити, що подальший розвиток ускладнюється цілою низкою факторів, основним є неспроможність 3D-технології для роботи в агресивному середовищі. Ця неспроможність проявляється у нездатності працювати за умов сильного перепаду температур, підвищеної вологості чи за великої швидкості вітру. Також на даний момент не вирішеною проблемою стали розміри можливих будівель, обмежених в силу розмірів самого принтера. Регулярно багато компаній по всьому світу ведуть роботи з вирішення цих проблем. Можливо, згодом станеться необхідна трансформація, і традиційні способи відійдуть на другий план, порівняно з новим технологічним рішенням.

У роботі [7] розглянуто "Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption". Авторами цієї статті ставиться питання труднощів впровадження автоматизованих та роботизованих технологій у будівництво.

Будівельна галузь одна із найважливіших галузей економіки в усьому світі. Витрати на будівництво становлять від 9% до 15% ВВП у більшості країн; і до половини національних інвестицій може бути спрямовано будівництво навколишнього середовища. Незважаючи на величезне економічне значення, будівельна галузь страждає на неефективність. Продуктивність праці в багатьох галузях неухильно зростала протягом останніх п'яти десятиліть, проте продуктивність праці в будівельній галузі практично не збільшилася, а можливо навіть знизилася.

Робототехніка та автоматизовані системи мають потенціал революціонізувати та забезпечити безліч переваг будівельної галузі та галузі архітектури, інжинірингу та будівництва в цілому. Будівництво – це

трудомісткий сектор. Роботизовані системи та автоматизація виявилися дуже ефективними в інших секторах для зниження витрат на робочу силу при одночасному підвищенні продуктивності та якості. Крім того, роботизовані системи можуть знизити травматизм та звільнити працівників від виконання небезпечних завдань. Багато хто стверджує, що традиційні методи будівництва досягли своїх меж і що технології автоматизації та робототехніки мають потенціал для вирішення проблем продуктивності будівельної галузі.

Це дослідження спрямоване на те, щоб покрити цю прогалину систематичним дослідженням галузевих проблем впровадження робототехніки у будівельній галузі. Цілями даного дослідження є:

- 1) Визначити, класифікувати та ранжувати найважливіші проблеми, що обмежують впровадження робототехніки у будівельній галузі.
- 2) Зрозуміти очікування зацікавлених сторін щодо запровадження робототехніки у будівельну галузь.

У роботі [8] розглянуто "Застосування 3D технологій у будівництві- статті компанії Нові Зодчі". Нові технології постійно впроваджуються буквально в кожен галузь життєдіяльності людини, проте галузь будівельного виробництва, на сьогоднішній день відрізняється високими матеріальними витратами та є найменш автоматизованою. "Поступова відмова від деяких класичних технологій зведення будівель до адитивних за допомогою будівельного 3D-друку може вирішити проблему". У наші часи повсюдно будівельні 3D-принтери впроваджуються в будівельне виробництво серед світових економічних та промислових лідерів Китаї, Нідерландах, США. «На тлі країн, що стрімко розвиваються в цій сфері, Росія не відстає і на сьогоднішній день має цілий спектр організацій, які розробляють і випускають свою продукцію 3D-принтерів». Дано короткий опис існуючих огорожувальних конструкцій та матеріалів. Висновки. «Переваги для будівельної галузі відображені в аналізі переваг та недоліків адитивної технології зведення будівель та споруд, а також виявлення можливостей технологій у майбутньому».

У роботі [41] розглянуто "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution". Автори розробили математичну модель динаміки будівельного робота із прямокутною системою координат у режимі роботи з вантажем. Було складено диференціальні рівняння, де застосували принцип Лагранжа-Даламбера. Шляхом розрахунку динамічної моделі принтера здійснили обчислення зусилля, що прикладається підйомним механізмом, залежності переміщення, швидкості та прискорення елементів конструкції робота на час. Усі отримані параметри відображені графічно. Складено імітаційну модель у програмному комплексі MATLAB/Simulink. Наведено результати та висновки моделювання динаміки для конкретного пристрою. Відображено докладну розрахункову схему з виділенням усіх залежних елементів. Результати роботи є етапом наукових досліджень у галузі автоматизації та роботизації будівельних процесів, вони дозволили механізувати та цифровізувати управління технологічними процесами та машинами у будівництві.

У роботі [15] розглянуто "Застосування 3D-технологій у будівництві". Автори статті виділяють, що в даний час актуальною темою є застосування у будівництві сучасних технологій, з можливістю енергозбереження, підвищеною надійністю, економічно вигідних. У будівництві вони відкривають можливість забезпечувати усі сучасні вимоги. Одна з новоспечених і недооцінених нині технологій - це 3D-друк.

Сучасні технології у сфері будівництва активно зростають. Колаборація будівельної промисловості з комп'ютерними технологіями формується досить давно та дуже тісно. Користь від неї очевидна для фахівців усіляких областей. У всьому світі давно застосовуються комплекси засобів віртуального моделювання та проектування об'єктів, за допомогою яких можна з високою точністю розробляти архітектурні проекти та дизайнерські будь-якої складності. Можливості нових технологій на цьому не зупиняються.

Навіть за очевидних недоліків цієї технології будівництва, досвідчені фахівці відзначають потенціал цього напрямку. Як правило, при порівнянні з

традиційною ручною силою можливості такого обладнання виявляються на порядок краще. Величезна кількість позитивних якостей пропонує ця технологія своєму власнику. А завдяки технічній складовій з'являється величезне поле для досліджень із доопрацювання. Таким чином, економічність, екологічна складова, підсумкова швидкість побудови об'єктів, надійність та довговічність, а також багато інших факторів, що закладають якість нерухомості, що реалізується за допомогою 3D-друку, відіграють на користь подальшого розвитку даної технологічної новації у сфері будівництва.

У роботі [12] розглянуто "Розробка 3D-моделі архітектурних споруд ". Автор цієї статті ставить питання різноманітності способів побудови малоповерхових будівель, ефективності застосування будівельного принтера з економічної точки зору, проводить порівняння та аналіз згаданої та близьких до неї технологій для підбиття підсумків, що стосуються раціональності використання. Для наочного порівняння було розраховано вартість трьох способів будівництва. Порівнювалися монолітне зведення, заливка незнімної опалубки фірми «Velox» і метод застосування незнімної опалубки з використанням будівельного і цікавий для нас метод застосування незнімної опалубки з використанням будівельного 3D принтера. Для достовірності підсумків всім технологіям застосовувалися рівні вимоги і задані однакові параметри. Порівняння проводилося за вихідними даними трудовитрат і загальної вартості будівництва. У статті використано аналітичні розрахунки з урахуванням необхідних коефіцієнтів та графічні матеріали оброблених даних, наприкінці за допомогою таблиці відображено результати порівняльного аналізу. Виходячи з порівняння обсягу трудовитрат і вартості лідером за раціональністю використання, ефективності та економічності стала технологія 3D-друку, на другому місці впевнено тримається монолітне будівництво, а технологія зведення будівель із застосуванням незнімної опалубки від однойменної фірми, в рамках даного будівництва, стала найнеефективнішою. та економічно не вигідною, при найбільшій величині

трудовитрат.

У роботі [21] розглянуто „Аналіз параметрів, що впливають на якість 3D друку”. Довгоочікувані інновації в галузі технології будівельного виробництва вже чекають на своє застосування, а на практиці можуть кардинально змінити погляди фахівців на традиційні методи будівництва конструкцій та будівлі. Застосування даних технологій позбавляє безліч проблем у будівельному виробництві. Використання 3D-технології на основі 3D-принтера лідирує на ринку серед подібних технологій. Найефективнішими є пристрої маніпуляторного типу, завдяки своїй мобільності та компактності, відповідно вони набагато універсальніші. Друкувати всередині та зовні об'єкта не зіграє суттєво різниці, варто лише враховувати параметри та умови роботи. Апарати здатні складати комбінації та працювати спільно у вигляді бригад із загарбок. У процесі дослідження автори використовували динамічну модель 3D принтера для моделювання процесів віброформування будівельних виробів, а процеси описали системою диференціальних рівнянь. Оброблено дані моделювання процесу досягнення сумішшю максимальної щільності. Удосконалення системи бункера полягало в мінімізації коливань, зменшення амплітуди коливань системи за допомогою елементів, що демпфують і амортизують, також шляхом регулювання всіх можливих параметрів, що впливають на динамічну навантаженість, таких як маси, частоти, жорсткість, час роботи.

За підсумками робіт моделювання віброформувальних процесів амплітуда коливань суттєво знизилася до величин у межах від 0,9 до 3,0 мм, а щільність суміші стабілізувалася до значень від 1800 до 3000 кг/м³ та в'язкості суміші 200 Па/с. В результаті не виявлено значних відмінностей величини амплітуди коливань у вертикальній та горизонтальній площинах немає. Прискорення елементів системи відбувається у діапазоні від 0,2 до 3,0 м/с². Прискорення у вертикальній площині перевищують прискорення, що діють у горизонтальній.

У роботі [13] розглянуто "Підготовка моделей архітектурних споруд для

3D-друку". У цій статті розглядається ІТ-складова адитивних технологій у будівництві. За останні кілька років адитивна технологія вирвалася в лідери серед галузей, що найбільш стрімко розвиваються. Унікальність її полягає в тому, що використання 3D принтера дозволяє друкувати об'єкт майже будь-якого розміру в багатьох галузях промисловості. Незалежно від віку та зрілості даної технології, стає все більше бажаючих застосувати таку сучасну технологію у будівництві. Зрештою 3D друк створює готові вироби різних геометричних форм із мінімальними матеріальними та тимчасовими витратами. Навіть зараз 3D моделювання вже актуальною є новинкою, яка з кожним днем набирає популярності у різних сферах діяльності. На даний момент ставлять завдання підбору відповідних за властивостями складів для будівельного 3D друку при використанні техногенної сировини та здійснення контролю якості під час будівництва будівель, споруд та великих транспортних комунікацій. Моделювання конструкції для подальшого друку на будівельному 3D принтері полягає у відображенні правильної тривимірної моделі у відповідній графічній системі, наприклад Компас 3D та зберегти його у спеціальному файлі формату STL. Ця система забезпечена достатнім функціоналом для виконання робіт будь-якої складності в різних напрямках. Для наочності варто розглянути принтер 3D будівельних виробів S-6045. Даний агрегат забезпечує можливості для розвитку безлічі актуальних напрямків у технології будматеріалів, архітектурі конструкцій. Тривимірний друк дозволяє створювати вироби, які раніше вважалися надмірно важкими з економічної точки зору, просто нерентабельними. Принтер дозволяє варіювати за складом бетон, у тому числі використовуються стандартні склади, в основі яких звичайнісінький цемент марки 500, такий є у вільному доступі будь-якого будівельного магазину, а також використовувати мінеральні добавки та можливе армуюче волокно. Висновок тут лише один, незважаючи на всі множинні переваги у адитивних технологій є суттєві недоробки, які можна усунути з часом проведення додаткових досліджень, впровадженням доробок на підставі випробувань, для масового

використання адитивних технологій у будівництві.

У роботі [14] розглянуто "Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього". На даний час будівництво є єдиною повністю неавтоматизованою галуззю. Залучення людини дуже велика у всіх етапах будівельного процесу, це призводить до низького показника продуктивності праці, збільшення можливих помилок, трудовитрат, вартості будівництва проекту та ймовірних ризиків. 3D-друк можна віднести до лідерів найбільш розвиваються та перспективних технологій на сьогоднішній день. Вона нещодавно почала використовуватись для друку будівельних конструкцій, квартир та будинків. Актуальність цього дослідження полягає в тому, що використання даної технології дозволить забезпечити високу оптимізацію робочих процесів, знизити собівартість будівництва та ризики, пов'язані з виробничим травматизмом.

Основними перевагами є скорочення термінів будівництва та вищий рівень оптимізації робіт. З іншого боку, неможливість використання вертикальних арматурних стрижнів може розглядатися як недолік, оскільки це призводить до зниження міцності таких конструкцій. 3D-принтери вимагають спеціальної бетонної суміші, придатної для пошарового нанесення, розробки нормативної документації та вирішення проблем з армуванням конструкцій.

Вигода у часі та витратах, без урахування вартості оренди чи обладнання для будівництва, може становити не більше 25%. Якщо ж розраховувати лише фундамент, це буде близько 20%. Виробники принтерів заявляють про економію загальної собівартості 15% за рахунок фундаментних робіт. За розрахунками, економія від цього виду робіт становила 5%. Найбільша економія досягається при зведенні стін – 18% від загальної вартості будинку, тоді як виробники інноваційного принтера Apis-Cor стверджують, що на каркасній конструкції можна заощадити до 25%.

Якщо розглядати окремо економію на конкретних етапах будівництва, то на фундаментних роботах економія становить до 50% вартості та до 40% термінів. Друк стін на 3D-принтері заощаджує до 80% витрат на цей вид робіт,

при цьому виконуючи їх утричі швидше. У той же час творці 3D-принтерів розробляють свої технології та будівельні конструкції, максимально наближені до існуючих стандартів на залізобетонні вироби з погляду міцності, стійкості та якості.

Судячи з пропонованих цін на ринку будівельної техніки, середня вартість 3D-принтера може становити близько 5 мільйонів гривень. У разі його придбання будівельної компанії для будівництва котеджного селища або приватного малоповерхового будинку, враховуючи економію на кожному об'єкті, принтер окупає себе в строк від 8 до 10 об'єктів.

У роботі [26] розглянуто „Про сучасні методи та засоби моделювання”. У цій статті розглядаються методи автоматизації будівництва за допомогою 3D-друку. До сучасної індустріалізації насамперед веде автоматизація виробництва. Мабуть, будівництво, зараз - це не автоматизоване виробництво. Одним із найдієвіших способів вирішити це завдання - частіше впроваджувати 3D-друк у будівництво. Однак на цьому шляху стоять безліч складних питань, пов'язаних із самою технологією зведення будівель. Основними труднощами є застосування у ній арматури та устаткування інженерними системами. Навіть сам склад робочої суміші неоднозначний і постійно зазнає змін. У роботі відібрано великий обсяг даних про склади, що застосовуються в 3D-друку будівельних конструкцій. Виготовлено склад на основі гіпсоцементно-пуцоланового в'язучого, який унікальний за своїми властивостями водовідштовхувального матеріалу. Безліч випробувань проведено з придбання будівельної суміші необхідних їй властивостей для зручності друку. Результатами проведених досліджень стало те, що при додаванні в будівельну суміш водоредукувального складу і так званого полімерного порошку, що редиспергується, кінцева міцність бетону перевищує стандартну на 20%. Пористість будівельної суміші скорочується вдвічі, збільшення таких показників як корозійна стійкість та водостійкість близько 10%, а морозостійкість – близько 60%. Спочатку водоутримуюча добавка застосовувалася для регулювання пластичності та в'язкості суміші,

що необхідно їй для досягнення необхідної зручності при друку на принтері. В умовах подібних нарощування темпів розвитку адитивних технологій, за найзухвалішими заявками 3D-принтери дуже швидко, в найближчому майбутньому будуть використовуватися вже для зведення багатоповерхівок, великих об'єктів і хмарочосів, а подібна автоматизація процесів у будівництві скоротить пропорційно і трудовитрати, і витрати.

1.4 Робоча гіпотеза

Аналіз переваг та недоліків методів адитивних технологій виявив найбільш затребувані напрямки досліджень. Об'єктом дослідження прийнято будівельний принтер маніпуляторного типу, який зображено рисунку 1.6.

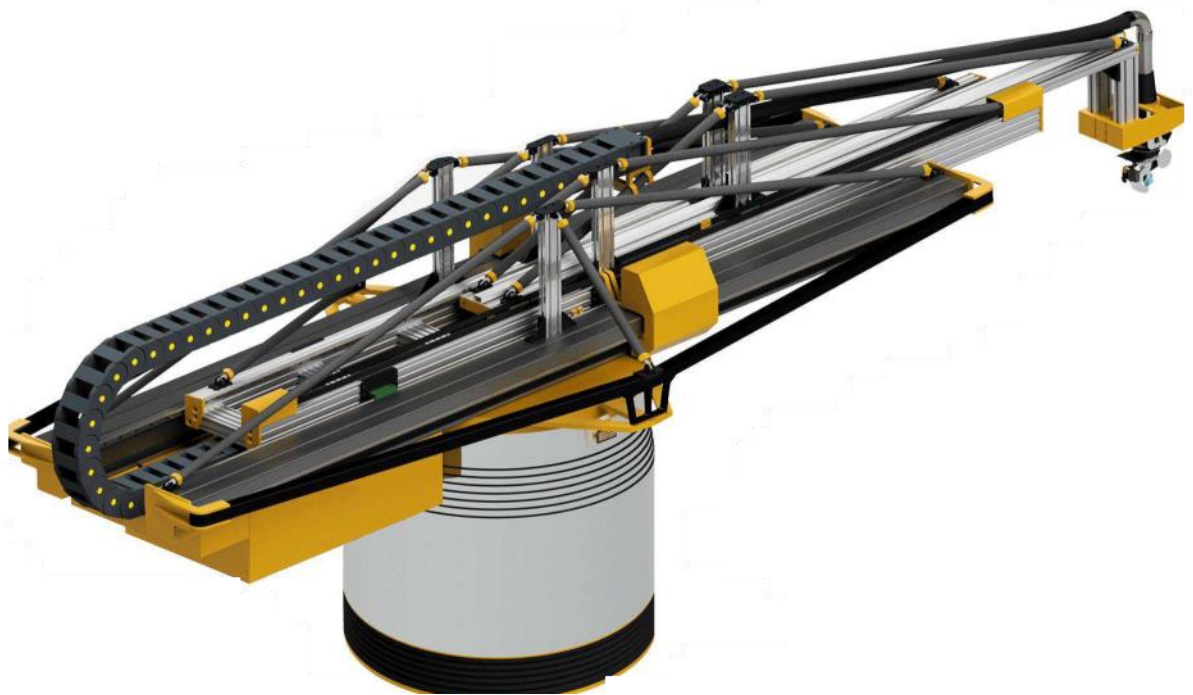


Рисунок 1.6 – Будівельний 3D принтер маніпуляторного типу

Наукова гіпотеза полягає в тому, що вдосконалення конструкції будівельного принтера шляхом впровадження модернізованих приводів, моделювання спільної роботи всіх систем, а також розширення робочих

параметрів екструзії, таких як швидкість друку, розмір перерізу шару приведуть до зменшення питомого обсягу дефектів конструкцій, скорочення термінів зведення об'єктів, збільшення економічної вигоди та загальної ефективності застосування адитивної технології у будівництві.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ

2.1 Опис об'єкта дослідження

Мобільний 3D-принтер - самостійна робоча одиниця. Розумна машина, не тільки із задоволенням відправить на вихідний цілу бригаду робітників, а й допоможе вам заощадити кошти, час на прибирання будівельного сміття, зникне необхідність закупівлі великої кількості інструментів та оздоблення. При цьому якість виконаної роботи влаштуватиме вас на 100%, творці APIS COR доклали максимум зусиль, щоб звести людський фактор і похибки, які він тягне за собою, до мінімуму. Деталізована схема 3D принтера маніпуляторного типу зображена на рисунку 2.1.

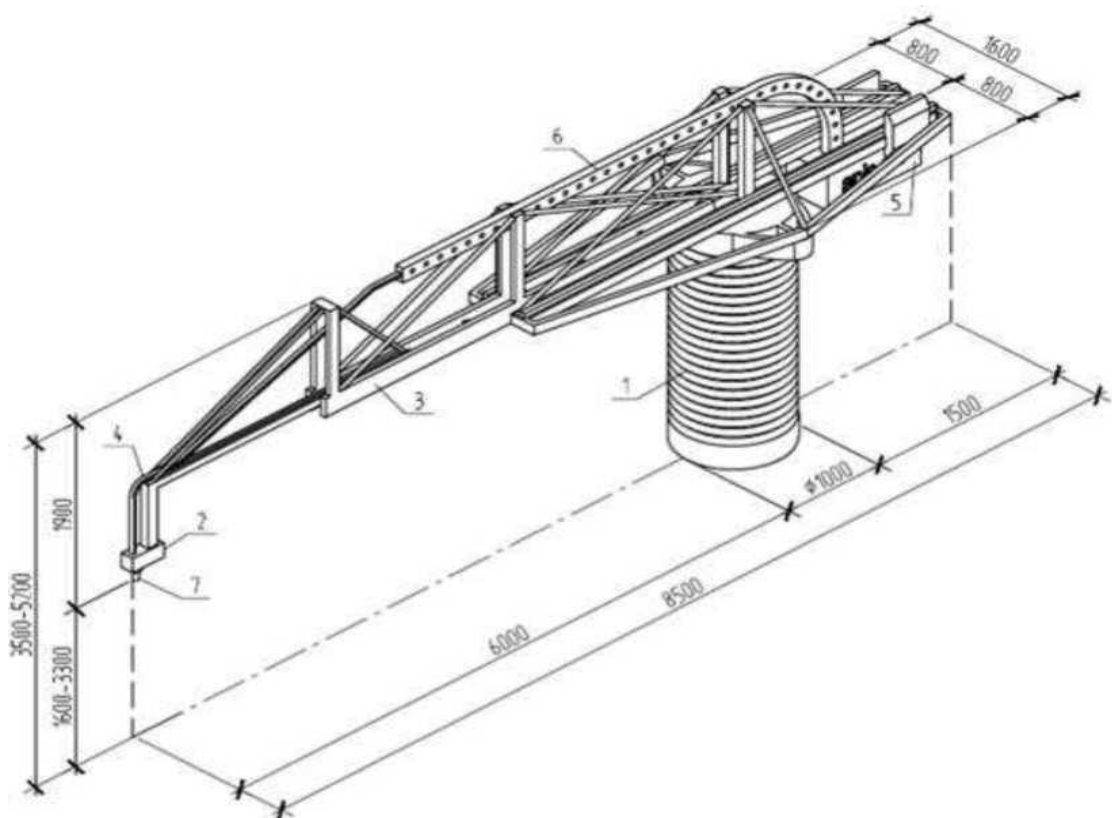


Рисунок 2.1 – Деталізована схема 3D принтера маніпуляторного типу

1 - підйомно-поворотна опорна частина; 2 – екструдер; 3 - маневрова стріла; 4 – бетоновод; 5 - противага; 6 – захисний кожух бетоновода; 7 - система ультразвукового контролю розчину

Конструкція будівельного принтера такого типу є механічною висувною стрілою на поворотному механізмі, закріпленою на опорі з функцією підйому. Для реалізації будівельного 3D друку на кінці стріли розташований екструдер із ультразвуковим датчиком. При спільній роботі поворотної частини та механізмів висування стріли забезпечується переміщення друкуючої головки в напрямках по паралельному горизонту, осям X і Y. У свою чергу, після завершення циклу на одній висотній відмітці, підйомно-опорна частина піднімає конструкцію на наступну, вздовж вертикальної осі Z .

У таблиці 2.11 наведено технічні характеристики будівельного принтера маніпуляторного типу.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики

Робоча зона MAX, м ²	132
Робоча швидкість руху, м/хв	1-11
Висота підйому MAX з однієї точки, мм	3100
Точність позиціонування, мм	±0,5
Продуктивність, м ² корисної площі на добу	100
Швидкість холостого ходу X/Y, мм/хв	19.000
Точність осі Z, мм	0,1-0,2
Точність другорядного позиціонування, мм	0,1-0,2
Привід по осях X/Y/Z	Сервопривід
Реверсні вимикачі	Безконтактні на всіх осях
Лінійні напрямні в осях X/Y	Прецизійні профільні
Автоматична горизонтальна стабілізація	Високоточний інклінометр з похибкою 0.001 градус
Координати положення друкуючої головки у просторі	Гіроскоп, лазерний далекомір
Стабілізація у просторі	ПІД регулятор

Структурно механізм поділено на кілька частин:

- 1) доріжка осі X;
- 2) доріжка осі Z;
- 3) друкуюча головка;
- 4) система верхньої стабілізації;
- 5) автобетононасос.

У зв'язку з особливістю своєї конструкції та механізму повороту, стріла переміщається радіально. Висунення стріли та підйом конструкції здійснюється строго прямолінійно вздовж осей X та Z відповідно. Лінійне переміщення друкувальної головки вздовж осі Y здійснюється спільною роботою механізмів висування стріли та повороту. Точність положення екструдера визначають гіроскоп та лазерний далекомір. Завдяки цьому споруджувані конструкції можуть мати як круглі та овальні, так і прямокутні форми.

Важливим фактором є положення датчика контролю розчину. Він повинен бути розташований в безпосередній близькості до сопла, що екструдує, і, незалежно від рухів маніпулятора, перебувати в слідкувальному положенні. Для цього він закріплений до сопла через підшипник, а параметри, що зчитуються, можуть передаватися дистанційно через компактну плату ардуїно на головний пункт управління.

Процес друку будівельних конструкцій таким пристроєм зображено на рисунку 2.2.

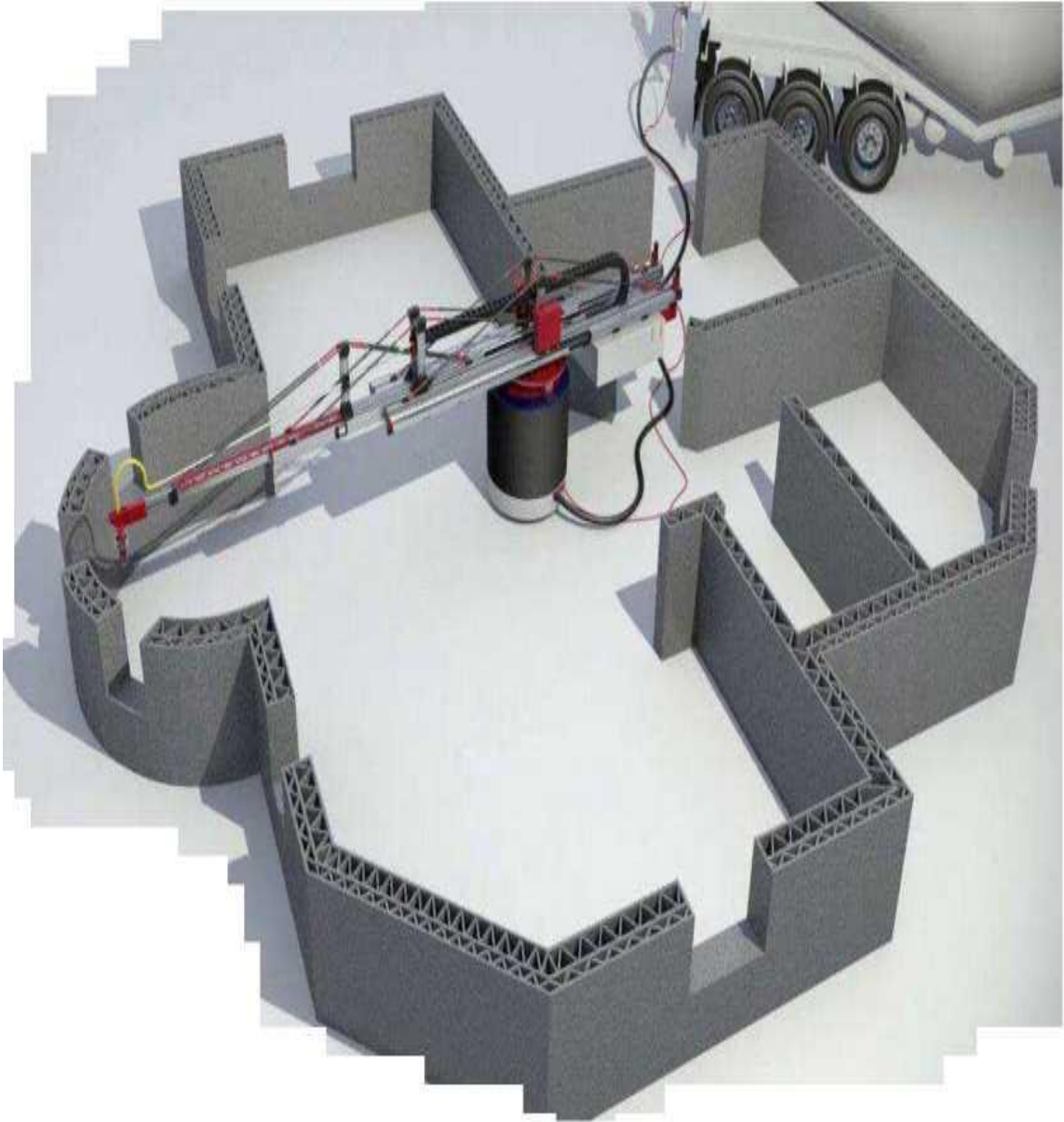


Рисунок 2.2 - Будівельний 3D друк

Пристрій будівельного тривимірного друку має висувну стрілу загальною довжиною 8,5 метрів та вильотом 6 метрів від опори. При встановленні противаги стріла висувається на додаткові 2,5 метри, що збільшує максимальну робочу зону до 227 м^2 . Варто враховувати, що робоча зона має форму кола і проєктовані конструкції повинні бути вписані в це коло. Максимальна висота підйому опорної платформи становить 3,1 м. Для продовження будівництва конструкцій для принтера влаштовується будь-яка жорстка основа, підходить як жорстко закріплений каркас, так і конструкції

перекриття.

Таким чином, будівельний тривимірний принтер-маніпулятор є простим у встановленні пристроєм, здатним створювати бетонні конструкції необмеженої висоти при врахуванні їхньої несучої здатності. Незалежні роботи та приведення в рух будівельної друкуючої головки та важеля автобетононасосу.

Усі механізми оснащені датчиками положень, які визначають взаємне розташування головки та важеля. Поки в бункері система автоматично регулює позиціонування та подачу, бетонна суміш безперервно надходить за системою подачі до екструдера.

Алгоритми процесу запуску програмної системи принтера та система зворотного зв'язку сервоприводу, адаптовані до програмного управління, розглянуті пунктами А та В відповідно на рисунку 2.3.

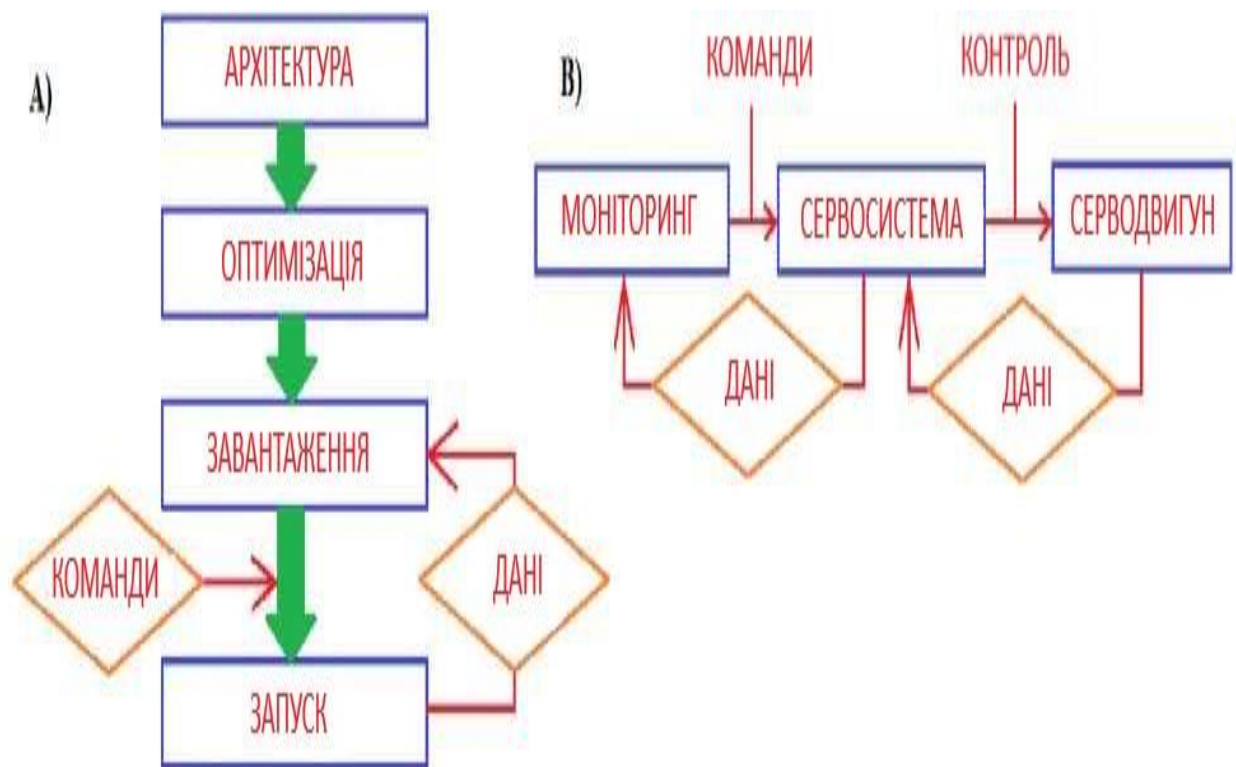


Рисунок 2.3 - Алгоритми процесу

А) процес запуску; В) зворотний зв'язок

Алгоритм процесу запуску включає розробку архітектурного проекту, після чого комп'ютер пошарово нарізає, а також оптимізує шлях, завантажує файл в систему контролю, потім йде проміжний етап створення команд, запуск тривимірного друку і зворотного зв'язку в режимі реального часу.

Система зворотного зв'язку, складається з комп'ютерного моніторингу, системи контролю сервоприводів та безпосередньо самих сервоприводів, а також циклу обміну даних та проміжних етапів створення команд та контролю.

Ця програмна система має такі характеристики:

1) Зі надходженням інформації про координати, в режимі реального часу, зворотний зв'язок усуває явище відключення, чим допомагає всій системі працювати точно. Таке явище викликане зупинкою двигуна та частим високошвидкісним запуском.

2) Дані таких параметрів як швидкість друку, температура двигуна, навантаження двигуна відстежуються завдяки системі зворотного зв'язку. Як тільки система виявляє загрозу навантаження двигуна або збільшується температура, виявляється ймовірність короткого замикання, система зупиняє друк негайно. Обов'язково відключається джерело живлення для безпеки.

3) Вручну встановлюються такі параметри роботи будівельного друку як прискорення, швидкість голівки, максимальна швидкість роботи і так далі. Максимальна можлива швидкість системи становить близько 0,5 м/с, а оптимальний діапазон прискорення знаходиться в межах 0,05 – 0,2 м/с.

Обов'язково зберігаються координати крайнього стану на момент зупинки. У разі виникнення непередбачуваної ситуації, наприклад, збою живлення, системою контролю сервоприводів негайно зберігається поточні координати становища. Після усунення будь-яких проблем техніка сама виставить положення екструдера для продовження друку.

Конфігурація робочих органів на електронній панелі управління для роботи з описуваною будівельною установкою тривимірного друку бетоном представлена на рисунку 2.4.

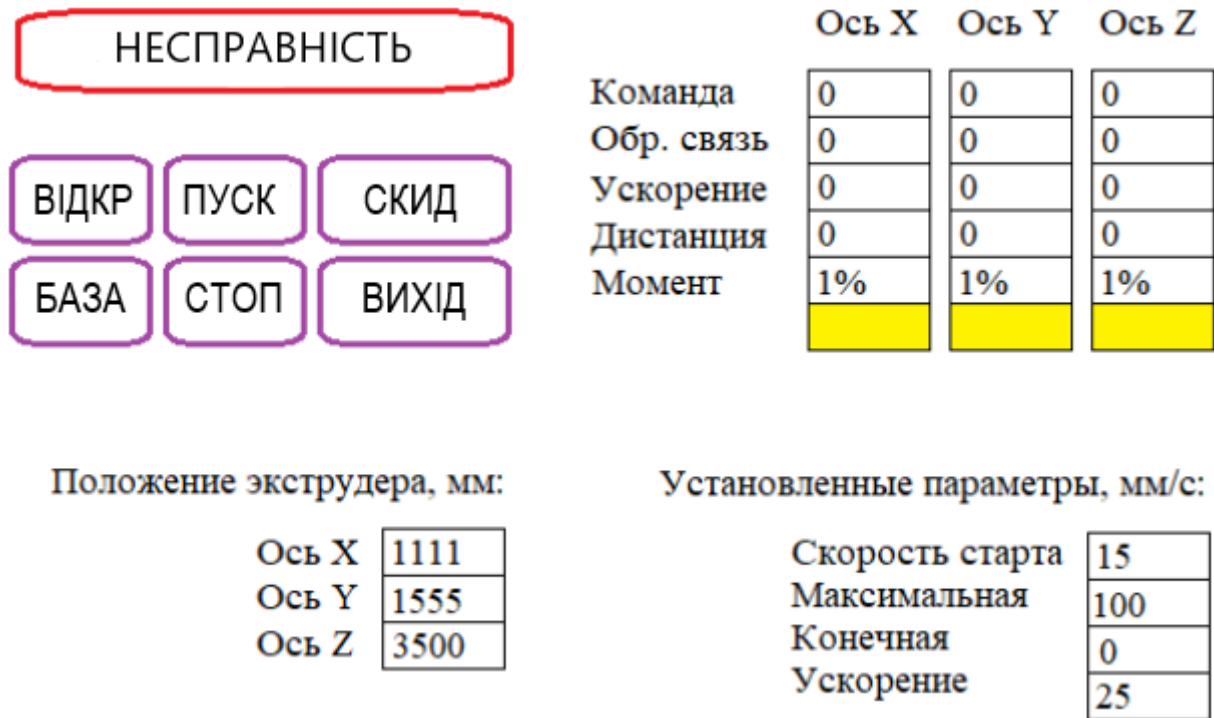


Рисунок 2.4 – Конфігурація робочих органів на електронній панелі управління

2.2 Розробка розрахункової схеми

Для розробки моделі 3D будівельного принтера потрібне проведення теоретичних досліджень на основі математичних моделей.

Моделювання - це процес дослідження властивостей об'єкта шляхом побудови його моделі та її дослідження. У разі математичного моделювання аналіз реальних процесів проводять математичними розрахунками та методами. І тому необхідно формалізувати математичний процес, отже замінити реальний об'єкт чи процес, підлягає дослідженню його формальним описом, у разі математично.

Математична модель зрештою повинна являти собою алгебраїчне вираз, а складові компоненти системи в ньому виражені змінними з поведінкою, аналогічною реальному.

Модель може бути математичним виразом, що містить змінні, поведінка яких аналогічна поведінці реальної системи. Під моделлю розуміється фізичний чи абстрактний об'єкт, властивості якого у сенсі подібні до

властивостей досліджуваного об'єкта. «При імітаційному моделюванні алгоритм, що реалізує модель, відтворює процес функціонування системи в часі. Імітуються елементарні явища, що становлять процес, зі збереженням їхньої логічної структури та послідовності перебігу в часі.» [20].

Вимоги до складання моделей залежать від визначення цілей, завдань дослідження та застосовуваних засобів, але існують і загальні вимоги до моделей, такі як:

- Адекватність – візуалізація властивостей об'єкта з високою точністю;
- Повнота – зміст достовірних складових у повному обсязі;
- Гнучкість, вона повинна забезпечувати можливість роботи в різних ситуаціях, при зміні умов та параметрів у заданому діапазоні;
- Трудомісткість розробки має бути забезпечена ефективністю, суттєвим результатом, а також часом та програмними засобами.

Математичне моделювання виявляє закономірності поведінки різноманітних явищ, процесів роботи пристроїв та систем, за допомогою алгебраїчного опису цих процесів та моделювання, позбавляючись потреби в натурних дослідженнях. Математичні закони та положення описують модульовані явища або процеси механізмів і систем на свого роду ідеалізуючому рівні.

«Основною перевагою імітаційних моделей порівняно з аналітичними є можливість вирішення складніших завдань.»

Реалізація подальшого моделювання здійснюється у програмному середовищі MATLAB-Simulink за допомогою блоків різних бібліотек.

MATLAB - це інтерактивне середовище для програмування високорівневою мовою, візуалізація результатів та проведення чисельних розрахунків. За допомогою MATLAB послідовно аналізують дані, розробляють алгоритми, а потім створюють моделі та програми.

Середовище MATLAB включає інтерпретатор команд мовою високого рівня, графічну систему, пакети розширень та реалізовано мовою С.

Такі інструменти середовища, як мова, впроваджені в систему

математичні функції проводять дослідження і вирішують завдання швидше в порівнянні з розробкою електронних таблиць або програмування традиційними мовами.

Крім всіх вищезгаданих плюсів програмного середовища MATLAB, мабуть, головним є комплекс візуального програмного моделювання Simulink. З його допомогою моделювання реалізується наочно, здебільшого це свідчить про більшу ефективність.

Пакет програми Simulink здійснює моделювання в часі, досліджує поведінку нелінійних динамічних систем, характеристики досліджуваних систем вводять у режимі діалогового вікна, шляхом побудови графічної схеми з'єднаних елементарних, користувацьких або стандартних ланок. Результатом з'єднань таких елементів у єдину робочу систему стає модель, що досліджується.

Для дослідження впливу основних параметрів на сервопривід тривимірного будівельного принтера, з урахуванням впливу вібраційних навантажень використовуємо розрахункову модель конструкції принтера 3D, яка представлена на рисунку 2.5 у вигляді окремих блоків і зв'язків.

осліджувана система є рамою, на якій розміщені екструдер; сталевий трапецієподібний бункер; мотор - який надає руху рухомі органи обладнання, фіксатори - датчики положення, переміщення, температури і тиску; пересувний пристрій та сама система управління 3D принтером. Найбільш важливими елементами принтера є екструдер та бункер. Екструдер 3D принтера - це вузол, який забезпечує подачу робочої суміші з бункера до робочої зони апарата.

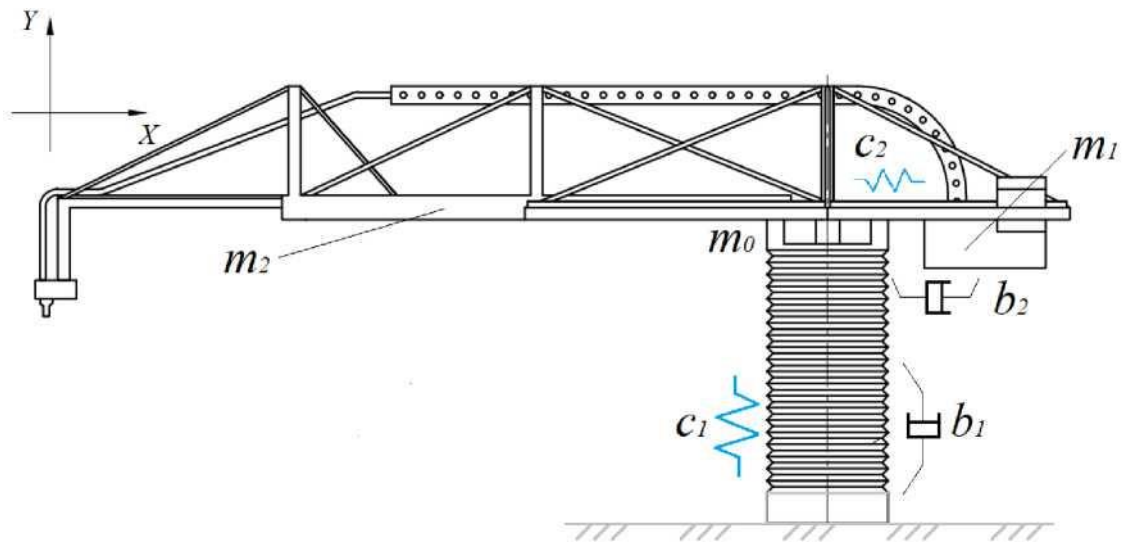


Рисунок 2.5 – Динамічна модель підвіски будівельного 3D принтера

m_0 – маса системи; m_1 – маса повного бункера; m_2 – маса рами 3D принтера; y, x – переміщення системи; c_2 – жорсткість бункера; c_1 – жорсткість опору, що амортизує; b_1, b_2 – демпфери приводів

Головна перевага 3D-принтера полягає у його маневреності. Машина такого роду переміщає екструдер по картезіанських координатах осей X, Y і Z . Для цього конструкцію машини оснащують високоточними електричними приводами, які швидко рухають друкувальну голівку згідно з програмою. Управління подібними пристроями здійснюють за допомогою контролера. Завдяки цьому у всіх автоматизованих системах забезпечується переміщення екструдера, а конструкції нарощуються шар за шаром. Обмеження рухів забезпечені оптичним або механічним фіксаторами. Це так звані обмежувальні датчики, які по досягненню краю робочої поверхні їм подають сигнал, тим самим запобігаючи виходу за межі, передбачені проектом. Створюється діапазон руху приводів. За допомогою цих же пристроїв здійснюється налаштування та калібрування положення принтера та його робочих органів безпосередньо перед процесом друку, таким способом досягається точність та акуратність.

2.3 Математичний опис моделі серводвигуна

У приводних системах роботів досить поширені як магнітоелектричні двигуни, так і моделі постійного струму з незалежним збудженням. Управління даними двигунами реалізовано за допомогою якірного ланцюга. Описуються електромеханічні та електромагнітні процеси у двигуні постійного струму з незалежним збудженням наступними рівняннями:

$$u_{я} = R_{я} \left(T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} \right) + e_{я}, \quad (2.1)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_h, \quad (2.2)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (2.3)$$

$$e_{я} = k_E \omega_m, \quad (2.4)$$

$$M = k_M i_{я} \quad (2.5)$$

де $u_{я}, i_{я}, e_{я}$ - напруга, струм та проти-ЕРС якоря;

$L_{я}, K_{я}, T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ - індуктивність, опір та електромагнітна постійна часу якоря;

$\omega_m, M, M_h, \theta_m$ - механічна кутова швидкість, електромагнітний момент, момент навантаження та механічний кут повороту валу;

J - момент інерції ротора;

коефіцієнти k_E, k_M конструктивними постійними.

На основі паспортних та технічних даних з довідкової документації розраховуються параметри двигуна, що входять до рівнянь.

Параметри двигунів постійного струму, малоінерційних з електромагнітним збудженням, розроблених спеціально для робототехнічних комплексів, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри малоінерційних двигунів постійного струму з електромагнітним збудженням

P_H , кВт	$U_{Я} = U_B$, В	n_H , 1/хв	$I_{Я}$, А	$R_{Я}$, Ом	R_B , Ом	J , кгм ²
0.11	110	3000	1.52	1.47	642	0.06
0.21	110	3000	2.45	0.763	560	0.08
0.26	110	3000	3.06	0.946	826	0.15
0.38	110	3000	4.41	0.547	935	0.17
0.46	110	3000	5.61	0.586	400	0.37
1.00	110	3000	9.97	0.562	500	0.80

У таблиці 2.2 використані такі позначення:

P_H , кВт - номінальна потужність двигуна, кВт;

$U_{Я}$, В - номінальна напруга живлення якоря, В;

U_B , В - номінальна напруга збудження, В;

n_H , 1/хв - номінальна швидкість обертання якоря, 1/хв;

$I_{Я}$, А - номінальний струм якоря, А;

$R_{Я}$, Ом - опір обмотки якоря, Ом;

R_B , Ом - опір обмотки збудження, Ом.

З наступних рівнянь розраховуємо індуктивність якоря, конструктивні постійні номінальний струм збудження та номінальний момент двигуна.

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H}, \quad (2.6)$$

$$I_B = \frac{U_B}{R_B}, \quad (2.7)$$

$$k_M = \frac{M_H}{I_{Я}}, \quad (2.8)$$

$$k_E = \frac{(U_{Я} - R_{Я}I_{Я})}{\pi n_H}, \quad (2.9)$$

$$L_{Я} = \frac{30}{\pi} \times \frac{U_{Я} c_x}{n_H I_{Я}}, \quad (2.10)$$

де $c_x = 0,3 \sim 0,4$ - емпіричний коефіцієнт.

З отриманих значень швидкісної частини ДПТ виражаємо передавальні функції з керуючого та обурювального впливу:

$$W_{(s)} = \frac{\omega_m(s)}{u_{я}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}, \quad (2.11)$$

$$W_{(s)} = \frac{\omega_m(s)}{u_{я}(s)} = \frac{\frac{(T_{я}s+1)}{k_E}}{\frac{T_{я}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}, \quad (2.12)$$

У виразах (2.11), (2.12) введено позначення:

$$K_1 = \frac{1}{R_{я}}, K_2 = \frac{k_M}{J}, \quad (2.13)$$

Коріння характеристичного рівняння визначається виразом:

$$S_{1,2} = -\frac{1}{2T_{я}} \pm \frac{1}{2T_{я}} \sqrt{1 - 4T_{я}K_1K_2k_E}, \quad (2.14)$$

Коріння характеристичного рівняння може бути або комплексно-спряженими, або речовими, залежно від співвідношення параметрів $T_{я}K_1K_2$ і k_E . Коріння характеристичного рівняння є речовими при виконанні умови $4T_{я}K_1K_2k_E < 1$, у такому разі передавальна еквівалентна функція двигуна постійного струму по керуючому впливу представляється у вигляді двох, послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку з коефіцієнтом передачі $1/k_E$ і постійними T_1T_2 .

$$W_{(s)} = \frac{x(s)}{u_{я}(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad (2.15)$$

де $T_1 = -1/s_1, T_2 = -1/s_2$.

Для визначення вихідних даних до розгляду прийнятий двигун з потужністю 0,45 кВт. У таблиці 3 за виразом вище розраховані параметри структурної схеми.

Таблиця 2.3 – Параметри системи електричного приводу робота

$K_{1,1}/ Ом$	$K_{2,1}/ Амс^2$	$k_m, Нм / А$	$k_E, Вс$	$T_я, с$	$T1, с$	$T2, с$
1.72	0.72	0.26	0.34	0.043	0.044	2.15

З застосуванням програми Simulink отримано імітаційну модель електричного двигуна, рисунок 2/6.

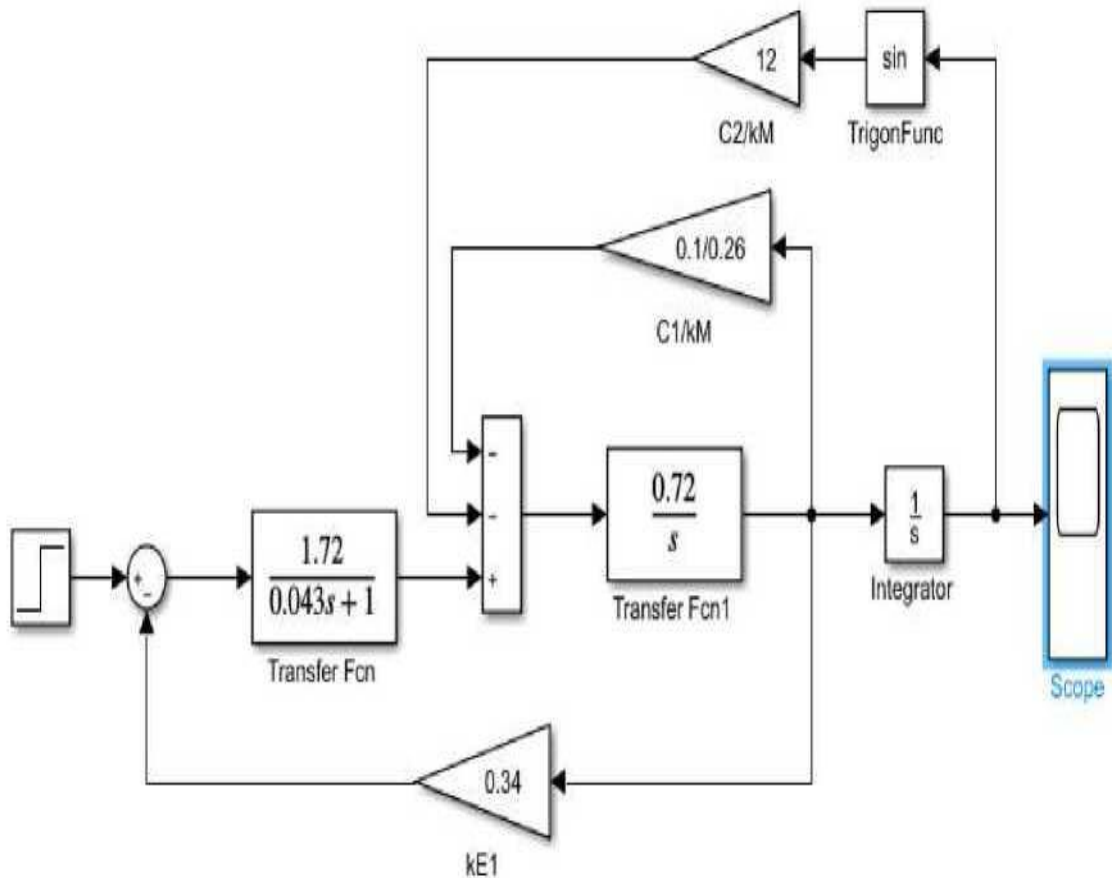


Рисунок 2.6 - Імітаційна модель електричного двигуна

На рисунку 2.7 наведено графік осцилографа імітаційної моделі електричного двигуна.

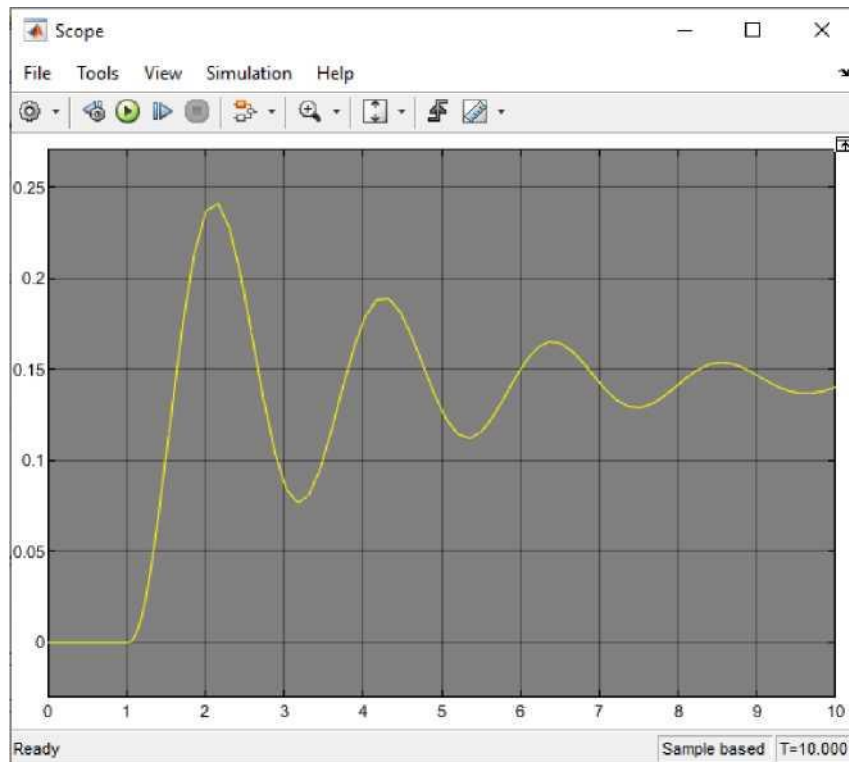


Рисунок 2.7 - Осцилограма моделі двигуна Simulink

Пакет розширення Control System програми Simulink застосовувався для отримання динамічних характеристик. Динаміка з управління зображено на рисунку 2.8.

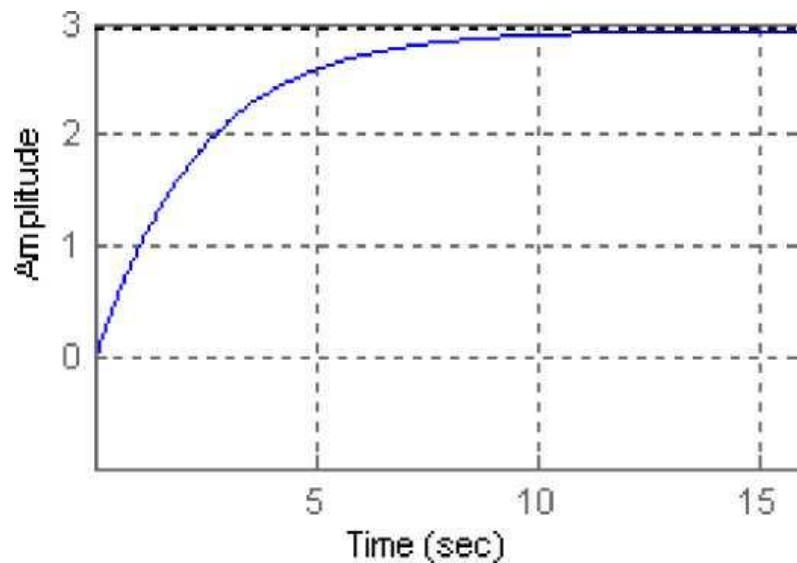


Рисунок 2.8 - Динамічна характеристика ДПТ з управління

Вхідним сигналом стала напруга 1В, що є еталонним. На рисунку 2.9 зображено динамічну характеристику з обурення.

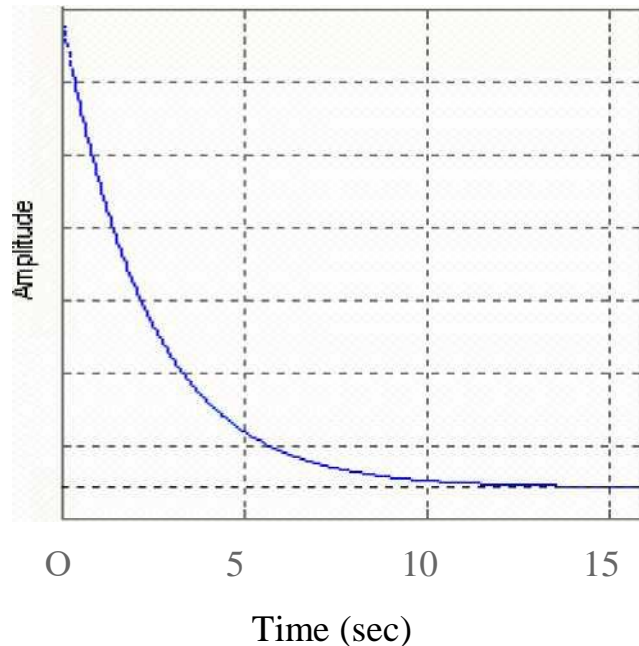


Рисунок 2.9 - Динамічна характеристика ДПТ з обурення

Даними графіками наочно відбивається, що з управління та обуренню ДПТ з цими параметрами системи є аперіодична ланка. Коефіцієнт передачі з управління менше, ніж у 2 рази, проти обуренням.

Для забезпечення системи необхідними властивостями необхідно спроектувати використання або синтезувати регулятор в динамічну систему. Структура регулятора залежить від вимог до контуру швидкості та параметрів двигуна постійного струму.

2.4 Створення імітаційної моделі у програмі MATLAB/SIMULINK

Simulink-модель поведінки підвіски приводу 3D будівельного принтера при впливі вібраційних навантажень його програмна реалізація виконана у середовищі MATLAB&Simulink за допомогою блоків стандартної бібліотеки та бібліотек SimMechanics, Simulink 3D-Animation. Зв'язок імітаційної та віртуальної моделей, а також поживавлення віртуальної моделі реалізується за допомогою блоків бібліотеки Simulink 3D-Animation, що відображено на

рисунку 2.10. Прийняті позначення відповідають змінним, які використовуються для опису математичної моделі 3D принтера.

Спочатку сформуємо підсистеми визначення індивідуальних властивостей обладнання та робочої суміші. Підсистема для визначення OutZ1:

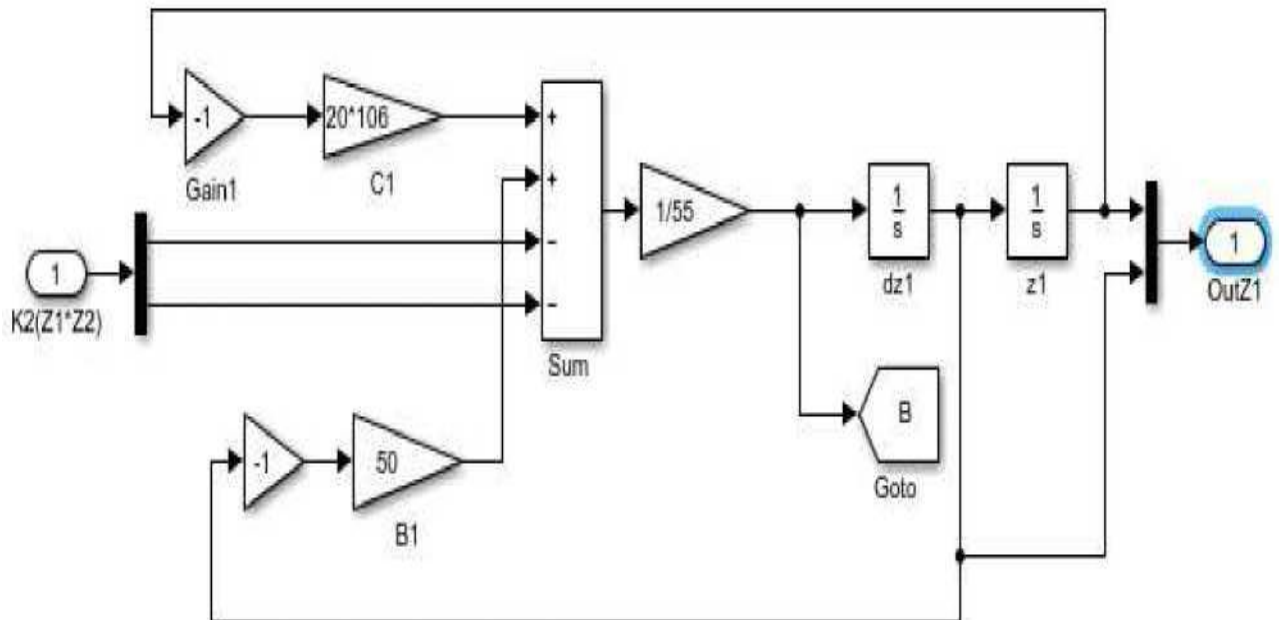


Рисунок 2.10 - Підсистема, що описує коливання робочої суміші в бункері

OutZ1 має один вхід, один вихід і містить такі блоки:

1) 5 блоків Gain. Gain – це блок підсилювача, який множить постійний коефіцієнт на вхідний сигнал. Спосіб виконання операції визначається параметрами блоків, значення параметра вибирається із запропонованого списку, у нашому випадку це поелементний Element-wise $K \cdot u$. Маса робочої суміші (B1) становить 50 Нс/м. Коефіцієнт жорсткості суміші (C1) становить $20 \cdot 10^6$ н/м та $60 \cdot 10^6$ Н/м для кожної суміші відповідно.

2) 1 блок Sum. Sum - блок суматора, що обчислює суми алгебри поточних значень вхідних сигналів. Блок має 4 входи та один вихід, який підсумовує вхідні значення жорсткості та демпфування робочої суміші.

3) 2 блоки Integrator. Integrator – призначений для інтегрування

вхідного сигналу. Для блоків було вибрано такі параметри:

- зовнішнє скидання не виконується;
- джерело початкового значення вихідного сигналу внутрішній.

4) 1 блок Outport. Outport – вихідний порт, який створює порт для підсистеми.

5) 1 блок Import. Import - вхідний порт, що створює вхід для підсистеми.

б) 1 блок Mux. Mux – мультиплексор, що поєднує вхідні сигнали у вектор.

1 блок Demux. Demux - демультиплексор, що дозволяє «розбити» векторний сигнал на кілька скалярних, у параметрах задаємо число виходів рівне 1.

Відповідне значення функції $Z1$ є виходом підсистеми OutZ1.

Підсистема визначення $K2(Z1*Z2)$ і OutZ2 представлена рисунку 2.11.

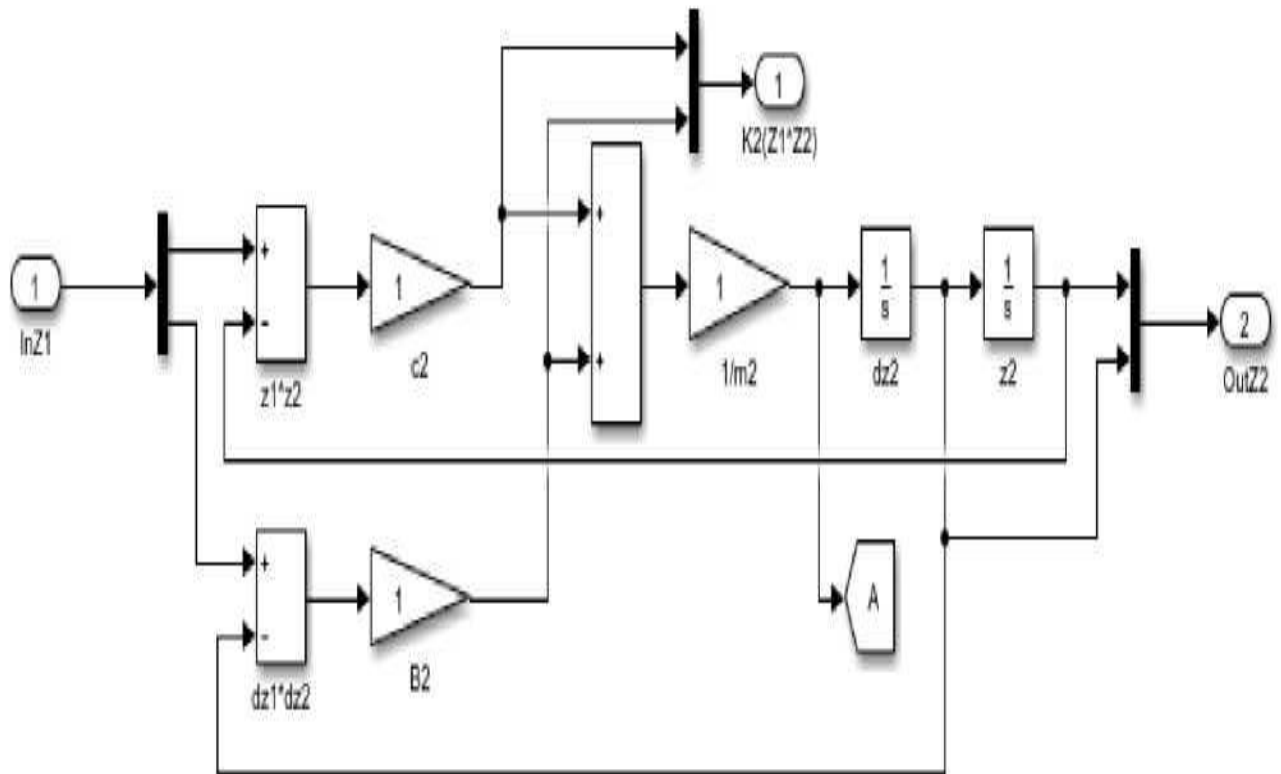


Рисунок 2.11 - Підсистема, що описує коливання рами 3D принтера

Підсистема має один вхід, два виходи та містить наступні блоки:

1) 3 блоки Gain. У параметрах блоків визначено спосіб виконання операції, значення параметра якого вибрано із запропонованого списку: Element-wise $K*u$ – поелементний. Маса принтера (m_2) становить 300 кг. Демпфування обладнання (B_2) складає 90 Нс/м. Коефіцієнт жорсткості підвіски (C_2) становить 200 Н/м.

2) 3 блоки Sum. Кожен блок має по 2 входи та по одному виходу.

3) 2 блоки integrator. Блоки вибрали такі параметри:

- зовнішнє скидання не виконується;

-джерело початкового значення вихідного сигналу внутрішній.

4) 2 блоки Outport.

5) 1 блок Import.

6) 1 блок Mux.

7) 2 блоки Demux.

Відповідне значення функції Z_1 є виходом $OutZ_2$.

Сформуємо остаточний вигляд моделі поведінки приводу тривимірного будівельного принтера під час дії вібраційних навантажень. Simulink-модель 3D будівельного принтера представлена на рисунку 2.12.

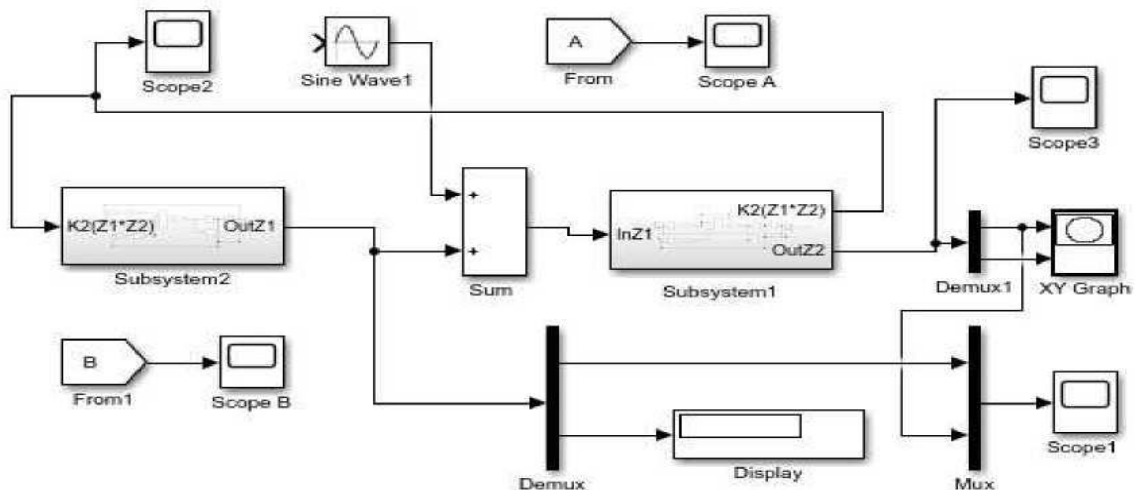


Рисунок 2.12 - Simulink-модель 3D будівельного принтера

Система складається з наступних блоків:

1) блоки підсистем. Subsystem – це фрагмент Simulink-моделі, який оформляється в окремий блок. Підсистеми необхідні та використовуються для

вирішення наступних завдань:

- полегшує сприйняття моделі, зменшуючи кількість блоків, що одночасно відображаються на екрані;
- з їх допомогою великі, окремі фрагменти моделі оформлюються у єдиний блок, що підвищує ефективність роботи з моделлю;
- можливість створення власних бібліотек та архівів;
- синхронізація паралельно працюючих підсистем;
- включення в модель власних довідкових засобів;
- забезпечення зв'язку підсистеми та M-файлу, таким чином запуск цього файлу відбувається при відкритті підсистеми.

Subsystem1 – підсистема OutZ1, Subsystem2 – підсистема OutZ2.

2) 1 блок Sine Wave. Їм формується синусоїдальний сигнал заданої амплітуди, частоти, зміщення та фази, пов'язаний із суматором та стандартним блоком виходу Scope, на який він подає вектор вихідних величин. Амплітуда задана формулою $m_0 * r_0 * (2 * \pi * f_0) A_2$, а частота дії (рад/сек) задана виразом $2 * \pi * f_0$. Спосіб формування сигналу обраний за поточним часом.

3) 1 блок Mux. Об'єднує у вектор вихідні значення підсистем і подає блок виходу Scope.

4) 2 блоки Demux.

5) 1 блок Display. На цифровому дисплеї відображається сигнал у вигляді числового значення. Відображення даних набуває багатозначного формату, включаючи десяткову точку. Для створення XYplot було встановлено значення діапазонів $x_{min}=0$, $x_{max}=0,1$, $y_{min}=-0,5$, $y_{max}=0,5$. Час обробки заданий 0,01.

5 стандартних блоків Scope. Scope – блок осцилографа. Будує графіки досліджуваних сигналів як функції часу. Кожна з побудованих характеристик повністю однозначно визначає розглянуту систему.

Жодна реальна система автоматичного управління не є строго лінійною, а лінійні рівняння САУ одержують на підставі спеціальної процедури – лінеаризації.

Графіки з осцилографів 1, 2, 3, А і зображені на рисунках 2.13-2.17
ВІДПОВІДНО.

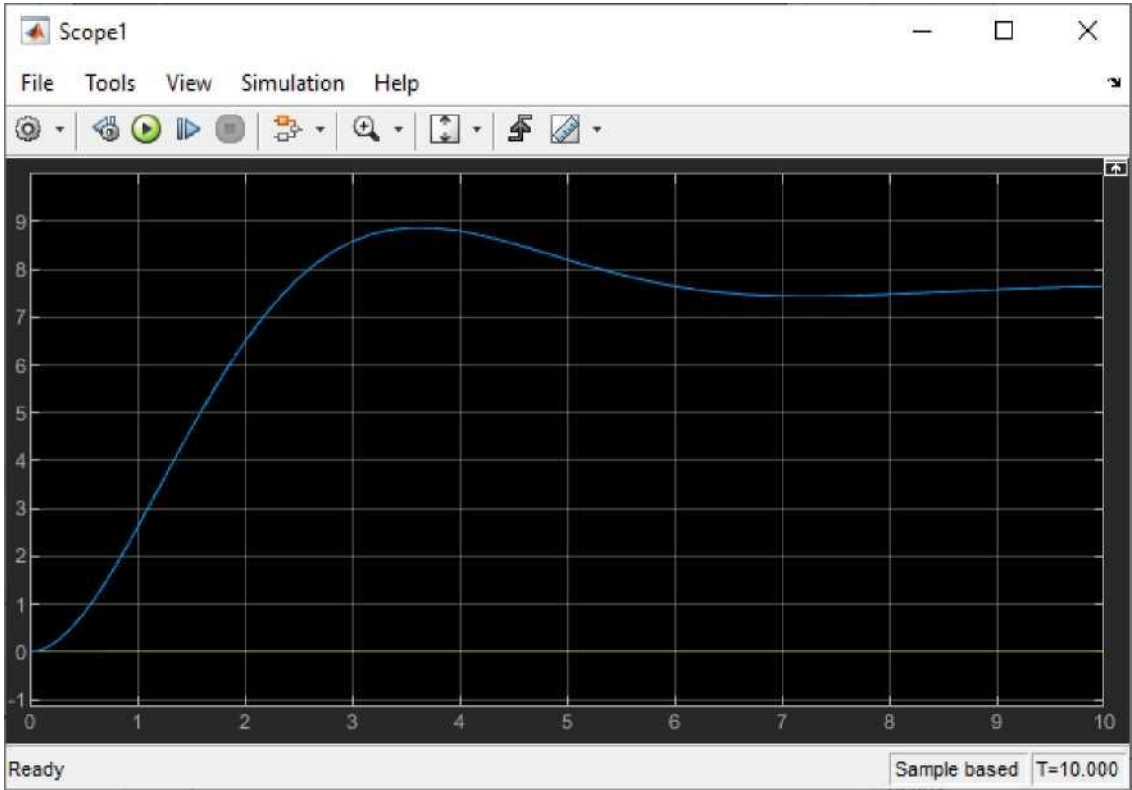


Рисунок 2.13 - Графік функції Score 1

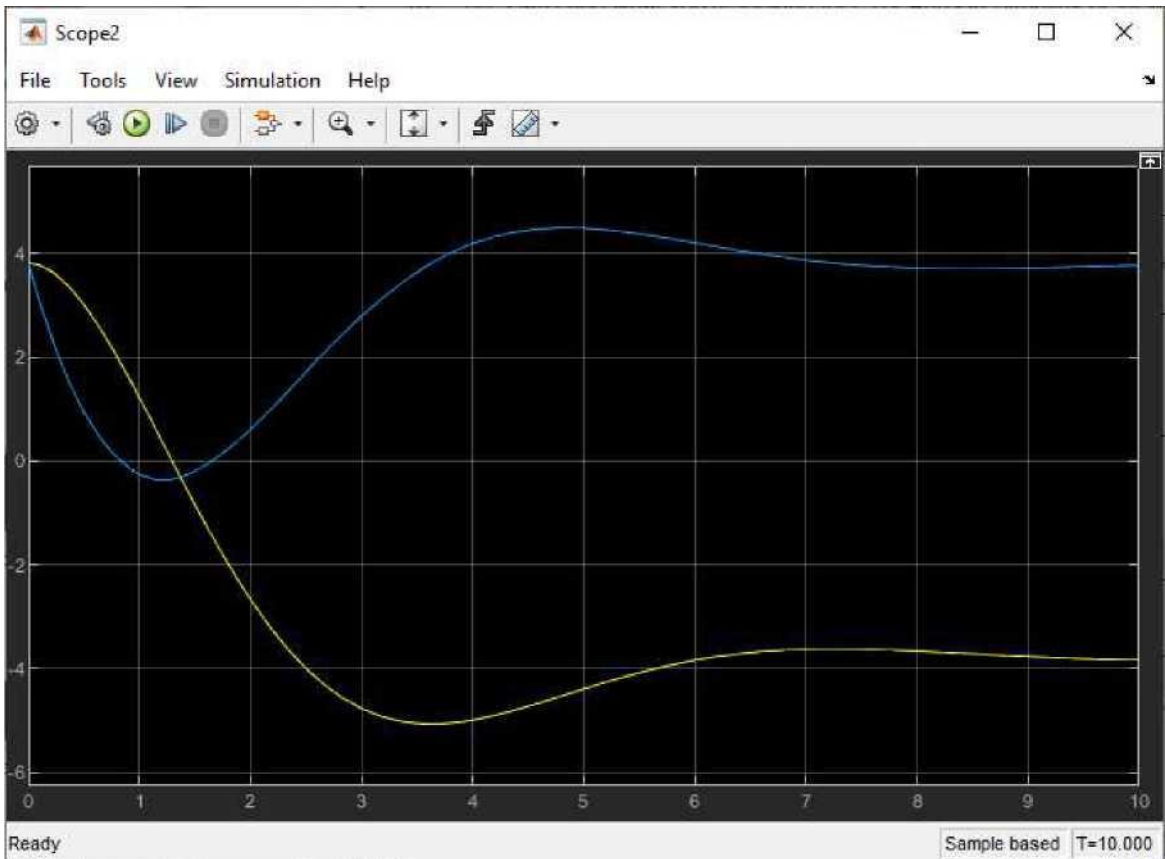


Рисунок 2.14 - Графік функції Score 2

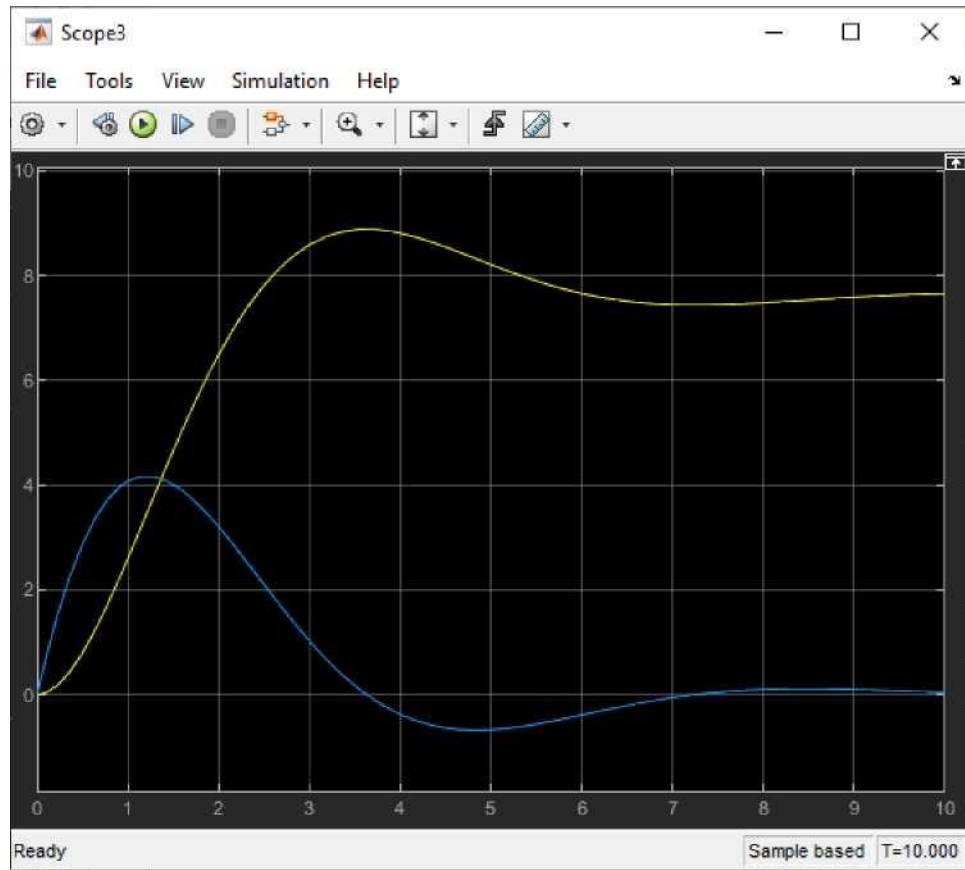


Рисунок 2.15 - Графік функції Score 3

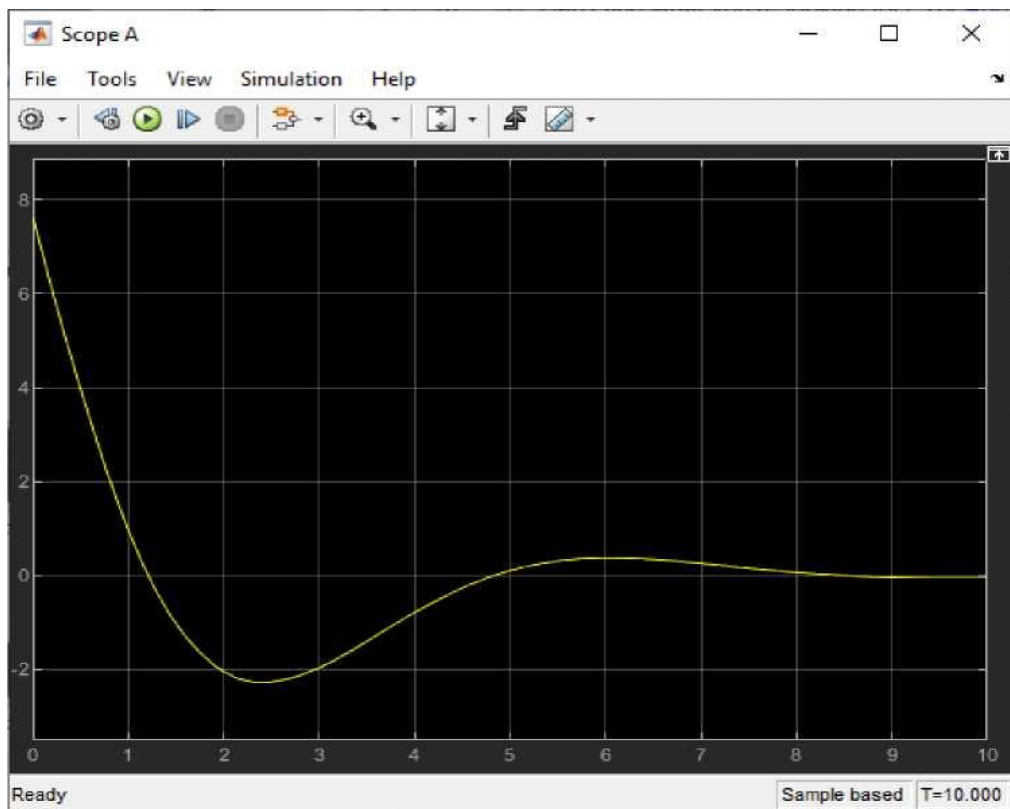


Рисунок 2.16 - Графік функції Score A

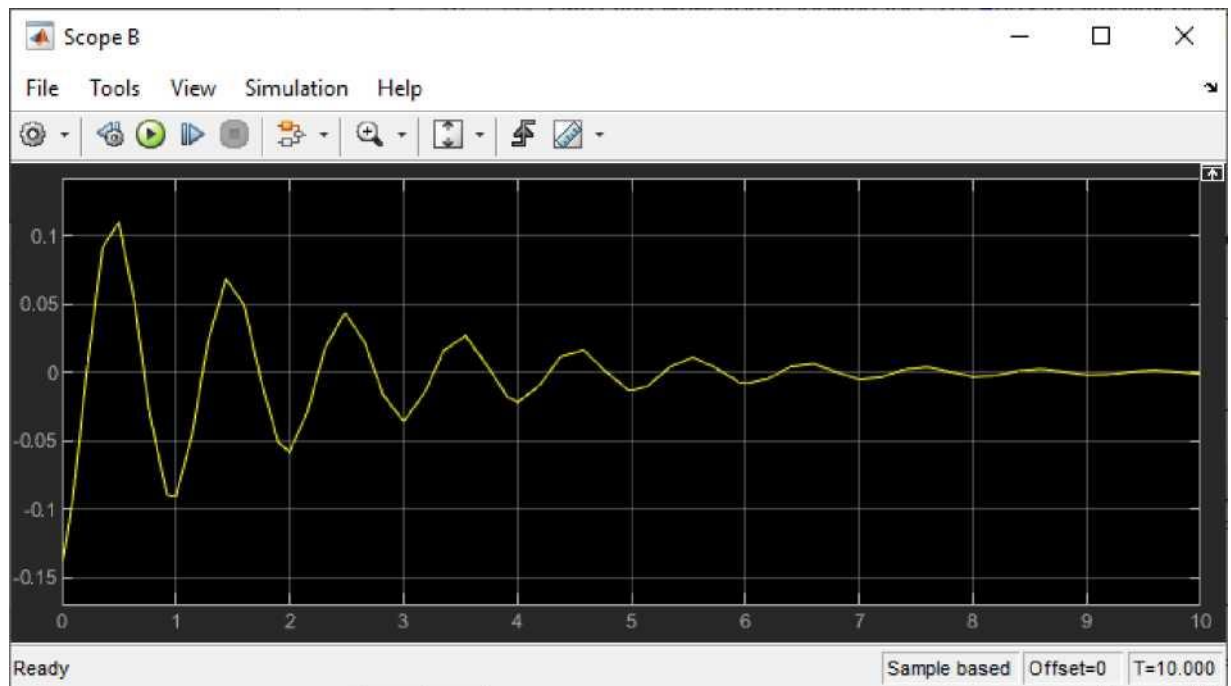


Рисунок 2.17 - Графік функції Scope B

Графіки з осцилографами системи наочно демонструють її стійкість. Поняття стійкості системи управління пов'язане із здатністю системи повертатися у стан рівноваги після зникнення зовнішніх сил, які вивели її із цього стану. Комп'ютерним моделюванням системи отримано графіки перехідних процесів. Оскільки процеси коливальні, загасають, система стійка.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Розробка експериментальної бази на платформі Arduino

Розглядається реалізація системи управління приводами пристрою з урахуванням апаратно-програмного комплексу Arduino.

До складу експериментального стенду входять:

- пристрій, рисунок 3.1;
- серводвигун, рисунок 3.2;
- контролер Arduino Uno.
-

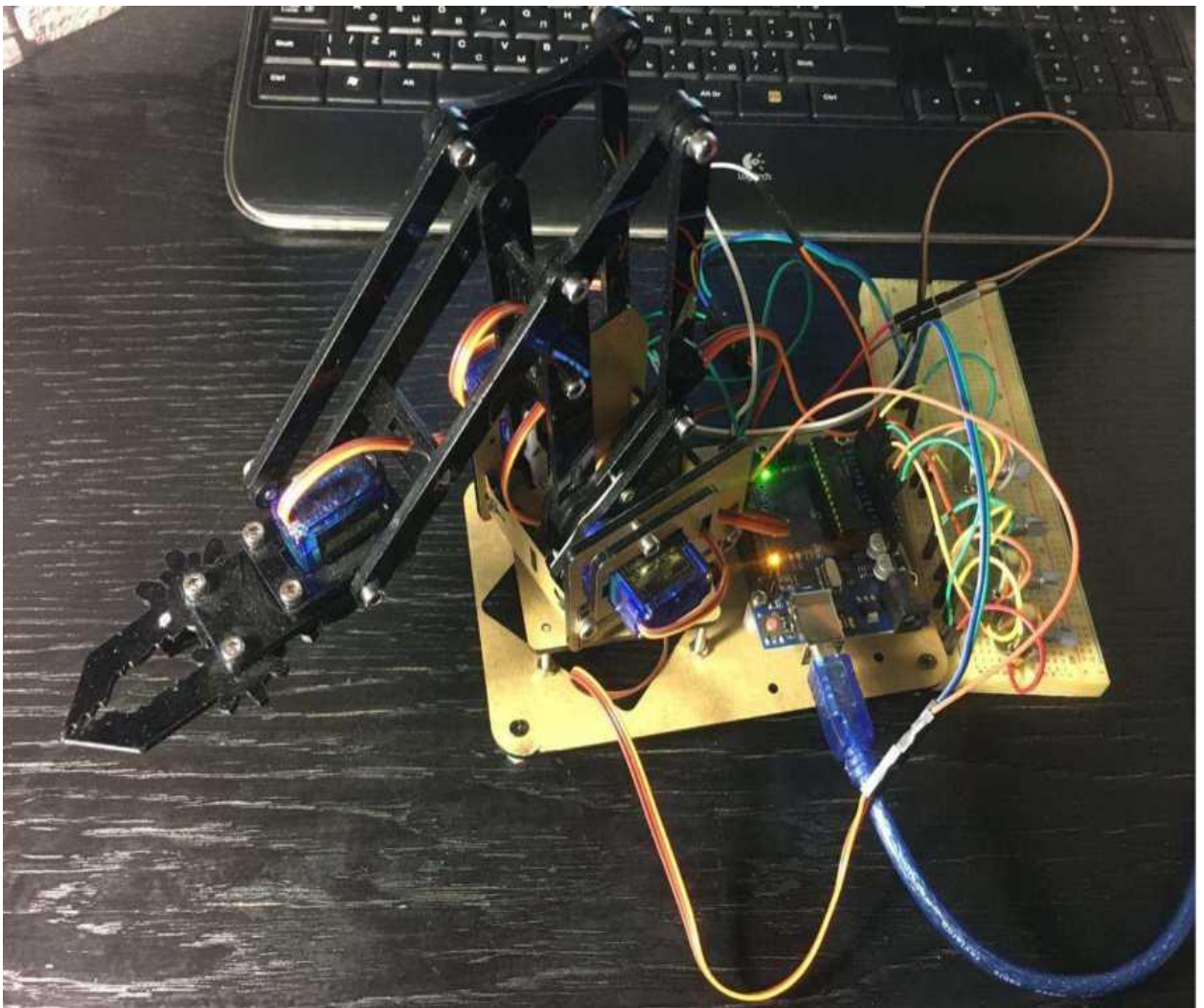


Рисунок 3.1 - Модель пристрою з 4 серводвигунами



Рисунок 3.2 - Модель використовуваного серводвигуна SG90

На рисунку 3.3 зображено схему підключення сервоприводу та елемента управління до контролера ардуїно через макетну керування до контролера ардуїно через макетну плату.

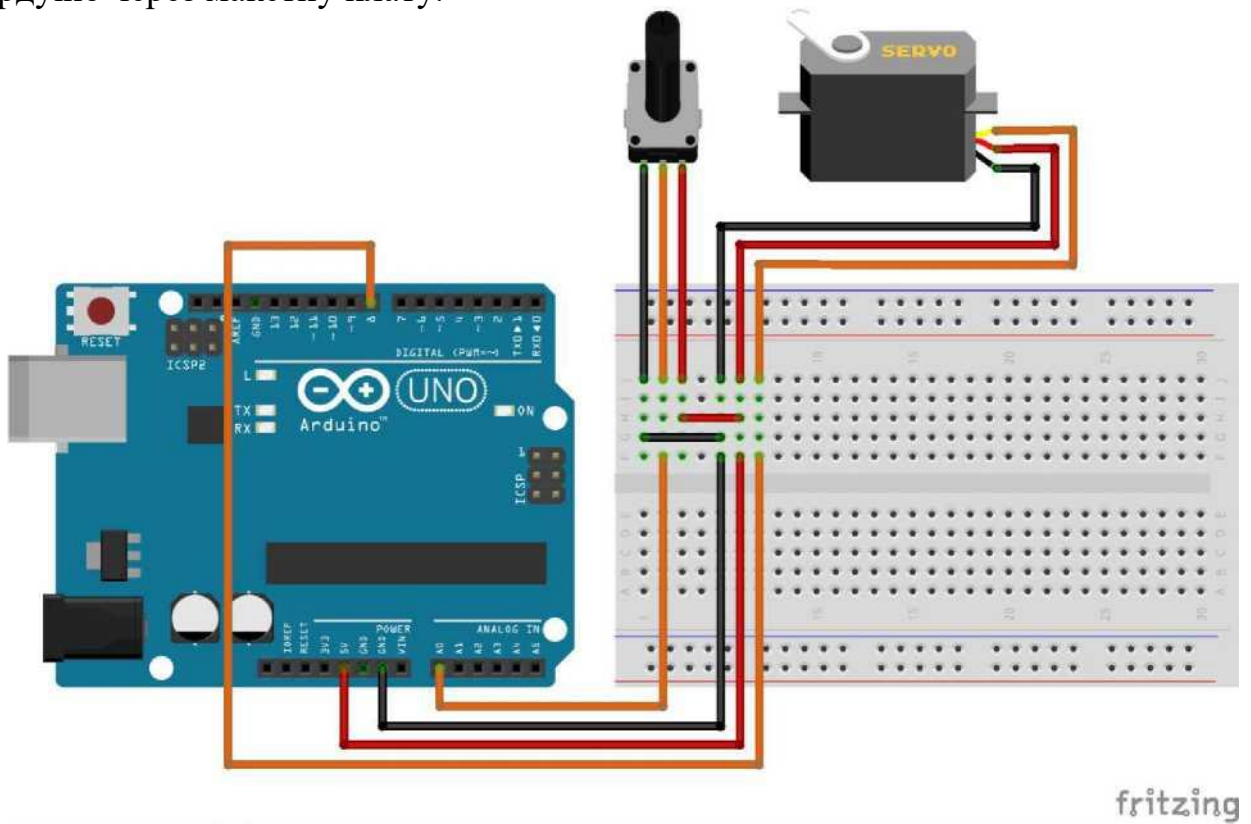


Рисунок 3.3 - Схема підключення приводу до Ардуїно

Сервопривід Arduino це двигун з електромотором, вал якого повертається відповідно до певного або заданого кута, крім того він підтримує безперервне обертання з точним періодом, або фіксується в позначці.

Завдяки своїм властивостям сервомотор Arduino є пристроями, які можуть застосовуватися в різних технічних пристроях. Масово застосовуються у робототехніці. Існують сервоприводи безперервного обертання, а також із фіксованою величиною градуса повороту. Відмінність у них лише в елементах блокування руху, щоб уникнути прокручування.

Конструкція серводвигуна представлена на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 - Пристрій сервоприводу

Сервопривід складається з електронної схеми, механічної системи, блоку управління приводом і датчика швидкості чи положення, а нашому випадку кута повороту. Шестерні, редуктори та основні механізми можуть бути виконані із пластику, карбону або металу. Потенціометр з'єднують з вихідним валом і вбудовують у сервомотор. Значення напруги на потенціометр змінюється з поворотом валу. Порівнюючи напругу на потенціометрі і напругу вхідного сигналу, плата аналізує різницю і, виходячи

з отриманого значення, мотор повертає в положення, в якому вирівнюються обидва напруги на виході та на потенціометрі.

Сервоприводи Arduino можна назвати мехатронними пристроями. За допомогою мікроконтролера та одного вхідного піна, вони отримують значення для позиціонування та здійснюють поворот у це положення. На рисунку 3.4 зображено сервопривід з електричним двигуном та ланцюгом зворотного зв'язку, який забезпечує контроль положення валу сервоприводу.

На вхід серводвигуна надходить сигнал у вигляді прямокутної хвилі. Сигнал ділиться на цикли з тривалістю 25 мс, проводячи більшість часу у значенні LOW. На початку кожного циклу на часовий проміжок від 1 до 2 мс значення сигналу стає HIGH. При 0,5 мс становить 0 градусів, а за 2,5 мс - 180 градусів, а проміжку значення від 0 до 180.

Графік відповідності довжини сигналу та кута повороту приводу зображено на рисунку 3.5.

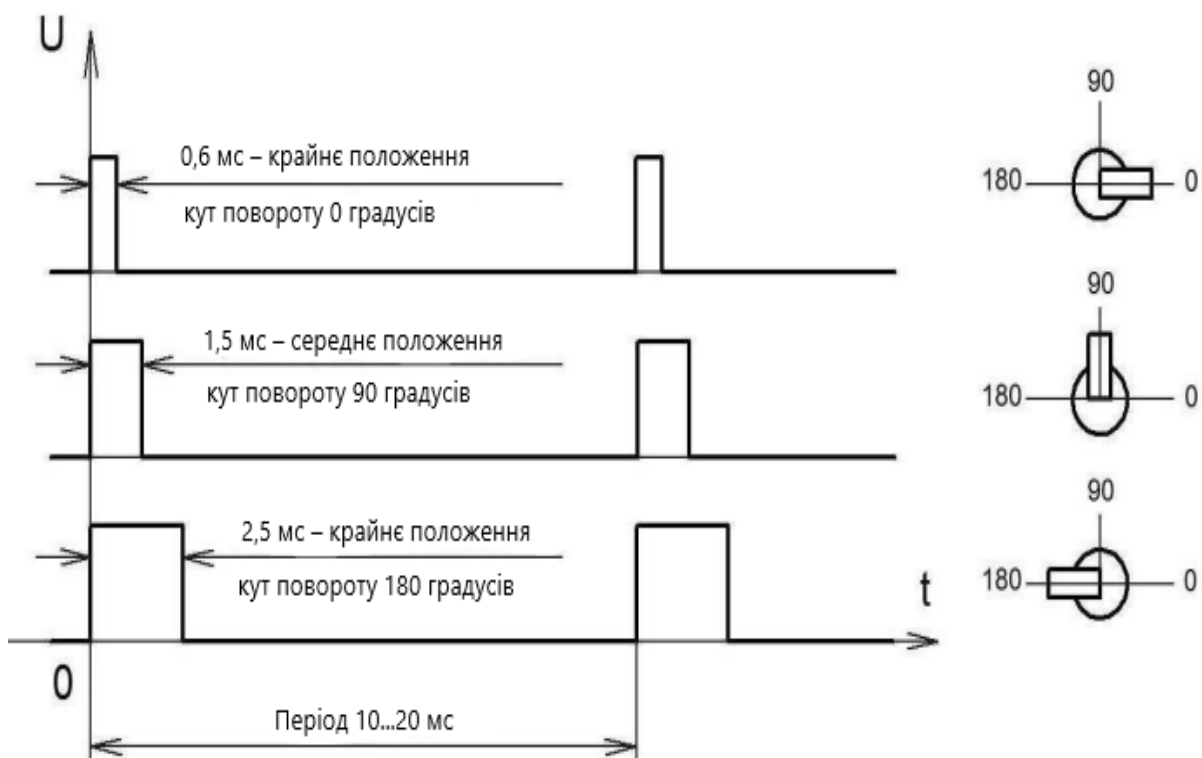


Рисунок 3.5 - Керуючі імпульси сервоприводу

Arduino - це марка апаратно-програмних рішень та засобів для побудови

нескладних систем автоматичного керування та робототехніки. У роботі використовується модель сучасної плати Arduino UNO R3, виконана на базі мікроконтролера ATmega328. Зовнішній вигляд контролера наведено на рисунку 3.3.

Окрім цієї плати, Arduino випускає кілька різновидів плат для конкретних проектів автоматизації. Вибір конкретної моделі контролера виконується з урахуванням розв'язуваних завдань, доступності, вартості. На підставі цих та інших критеріїв, обрана плата Arduino UNO R3 перевершує всі інші варіанти.

Контролер Arduino Uno розроблено на основі ATmega328. Платформа має кварцовий генератор частотою 16 МГц, 6 аналогових входів, 14 цифрових входів/виходів, включаючи 6, які можуть використовуватися як виходи ШІМ, USB-роз'єм, роз'єм ICSP, силовий порт і кнопку перезавантаження. Для використання платформи вона підключається до комп'ютера за допомогою USB-кабелю, а також подається живлення від батареї, або за допомогою адаптера AC/DC. Загальні характеристики контролера зібрані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Характеристики Arduino Uno

Показник	Характеристика
Найменування мікроконтролера	ATmega328
Напруга робоча	5
Рекомендована вхідна напруга, В	7-12
Гранична вхідна напруга, В	6-20
Цифрові входи/виходи	14 (включаючи 6 ШІМ виходів)
Аналогові входи	6
Постійний струм на вході/виході, мА	40
Постійний струм для виведення 3.3, мА	50
Флеш-пам'ять, включаючи пам'ять для завантажувача, Кб	32
ОЗУ, Кб	2
EEPROM, Кб	1
Частота тактів, МГц	16

Живлення пристрою та вибір джерела відбувається автоматично при підключенні зовнішнього джерела, акумулятора або іншого пристрою за

допомогою USB-порту. У разі підключення зовнішнього живлення системи або акумуляторної батареї робити це варто через перетворювач. Для підключення перетворювача в платі передбачено роз'єм 2.1 мм із центральним позитивним полюсом. Батарею можна підключити до висновків Gnd та Vin роз'єму живлення.

Нормальна робота платформи забезпечується при значеннях напруги від 6 до 20 В. При менших значеннях виведення 5V видає менше 5 В, при цьому в роботі платформи можуть бути труднощі. У разі перевищення напругою позначки 12 В з'являється ризик перегріву регулятора напруги та пошкодження плати. Рекомендований діапазон становить від 7 до 12 В.

У разі якщо від роз'єму USB або будь-якого іншого регульованого джерела живлення напруга становить менше 5 В застосовують вхід VIN використовується для подачі напруги живлення від зовнішнього джерела. Живлення з цього входу подається через регулятор напруги.

У платі передбачений висновок 3V3 з напругою 3.3, GND висновки заземлення. Максимальне споживання струму 50 мА.

У мікроконтролері ATmega328 флеш пам'ять становить 32 кБ, з яких 0,5 кБ відведено для зберігання завантажувача, а також 2 кБ оперативно записуючого пристрою SRAM і 1 кБ EEPROM.

3.2 Програмування та проведення досліджень

Управління платформою здійснюється за допомогою програмування Arduino. У мікроконтролері вже встановлений завантажувач, що дозволяють записувати нові програми без застосування зовнішніх програматорів. Зв'язок між блоками передбачений оригінальним протоколом STK500.

Основою програмування проектів Arduino стала мова C++, це одна з найвідоміших і широко застосовуваних мов програмування. Він підтримує будь-який рівень команд як низької складності, так і побудова складних об'єктів. Контролери Arduino програмуються у спеціальному середовищі

Arduino IDE. Що дуже зручно, оскільки туди вже включено основний функціонал для роботи з контролерами.

До початку роботи на комп'ютер необхідно встановити програму Arduino IDE з офіційного сайту. Встановлення програми здійснюється стандартно і схоже з будь-якою іншою, потрібно лише відкрити доступ до адміністративних повноважень, і вибрати варіант установки серед запропонованих. Потім необхідно підтвердити завантаження драйверів порту після успішного завантаження можна переходити до роботи у програмі [22]. Робоче вікно програми зображено рисунку 3.6.

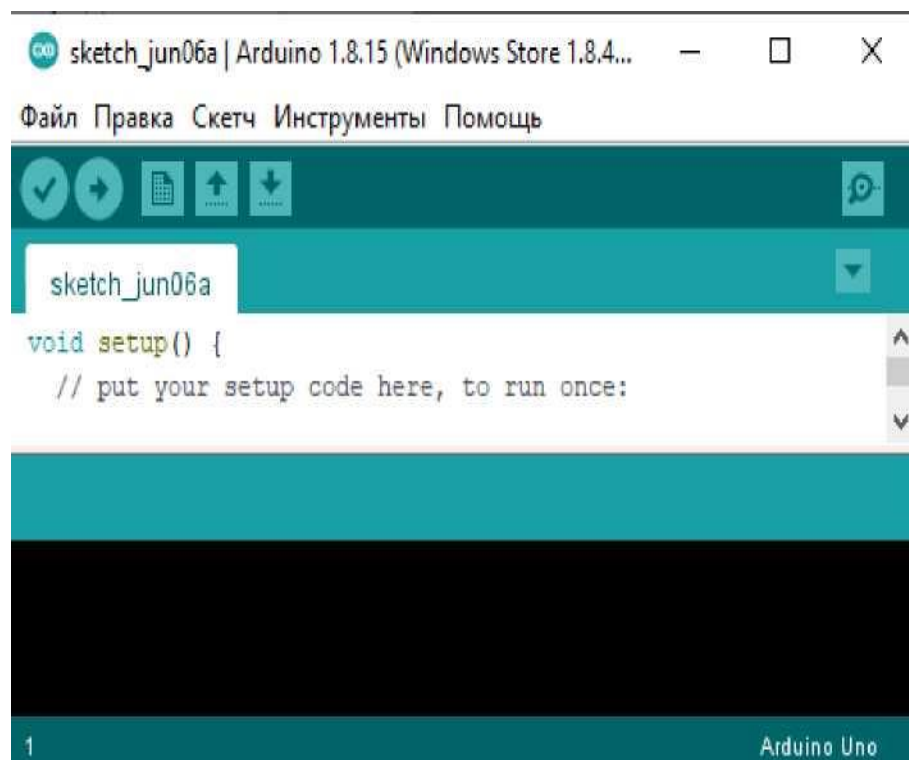


Рисунок 3.6 - Вікно Arduino IDE

Середовище розробки досить інтуїтивне і має зрозумілий російськомовний інтерфейс. При запуску програми Arduino IDE має відкритися вікно, в якому вже знаходиться шаблон програми, відповідно до рисунка 3.6. Шаблон пропонує дві функції: setup та loop. Функція setup містить команди, які виконуються один раз при включенні платформи, це може бути встановлення різних номерів порту вводу/виводу при керуванні на моніторах, або фіксація швидкості обміну даними між комп'ютером та

Arduino. Функція loop виконується безперервно до вимкнення живлення.

Контролер Arduino UNO підключається до комп'ютера за допомогою порту USB, після чого програма IDE самостійно встановлює зв'язок між ними. Для цього в програмі вказується номер порту підключення контролера COM1 як на рисунку 3.7.

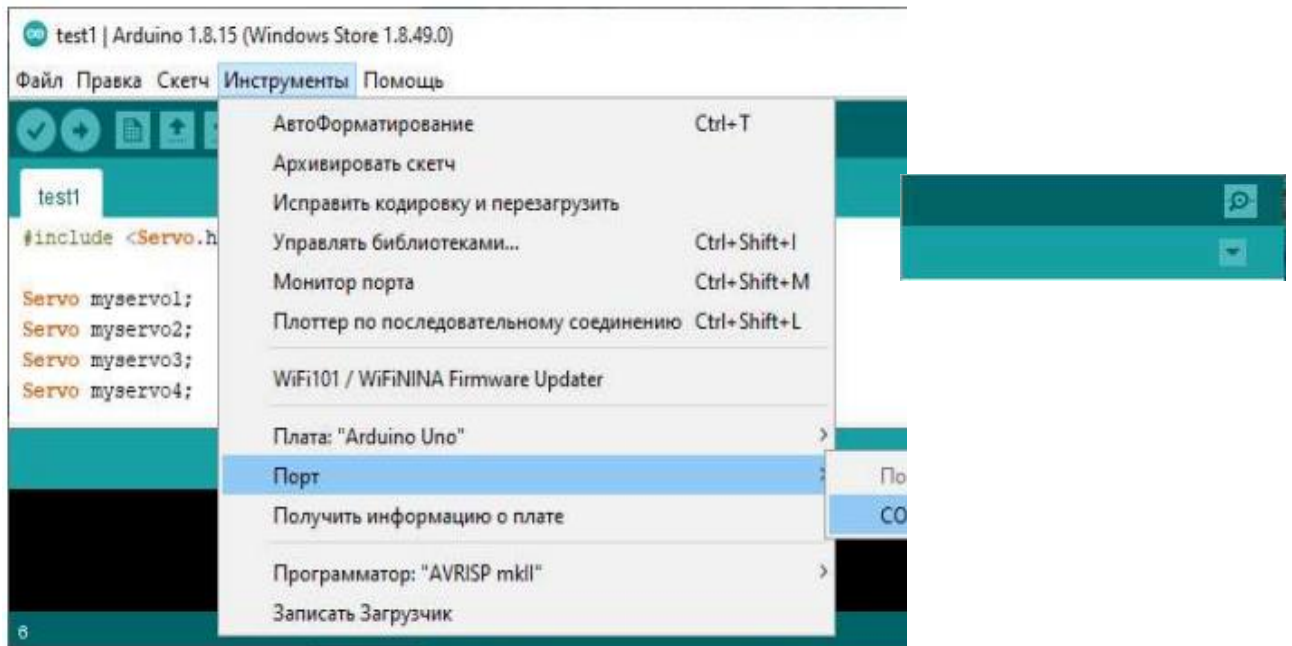


Рисунок 3.7- Вибір потрібного порту

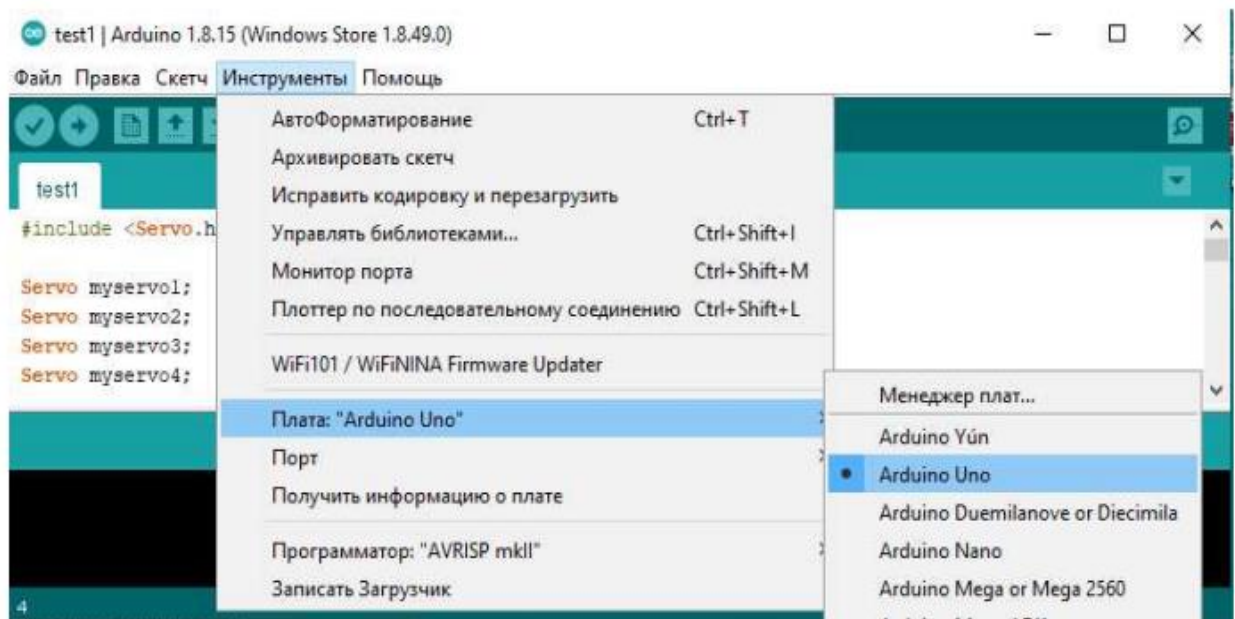


Рисунок 3.8- Вибір типу контролера Arduino

Програмне середовище дозволяє в залежності від типу контролера Arduino використовувати різні кабелі USB. У разі автоматичного вибору контролера системою, необхідно перевірити вибір програми, оскільки деякі контролери мають на увазі вибір підвиду мікроконтролерів, на яких реалізовано саму плату.

Після написання програмний код завантажують у контролер. Система IDE проводить перевірку на помилки у програмі після чого здійснює її переведення в двійковий код. Завершальним етапом стане запис коду плати Arduino, тепер контролеру зрозумілі команди.

У разі успішного завантаження програми в плату на Arduino блимають світлодіоди TX і RX відразу.

Кожна функція містить у собі блок кодів програми, кожен із яких має найменування і ряд. Виклик функції можна здійснити з будь-якого місця програми. Вони поділяються на попередньо встановлені, які вже існують у стандартній бібліотеці та створені в рамках відкритої програми. Безумовно можна знайти вже готові бібліотеки скетчів, вони легко підключаються до поточної програми і реалізують свої функції, залежно від того, для яких пристроїв і датчиків вони були написані.

Серводвигун підключається програмно.

Спочатку завантажується бібліотека (`#include <Servo.h>`), потім створюємо об'єкт `servomtr`.

Серводвигун можна підключити безпосередньо до плати або через макетну плату для керування за допомогою потенціометрів як на рисунку 3.9.

Контакт серводвигун повинен бути фізично підключений до порту Arduino UNO R3 і на мотор подано електроживлення.

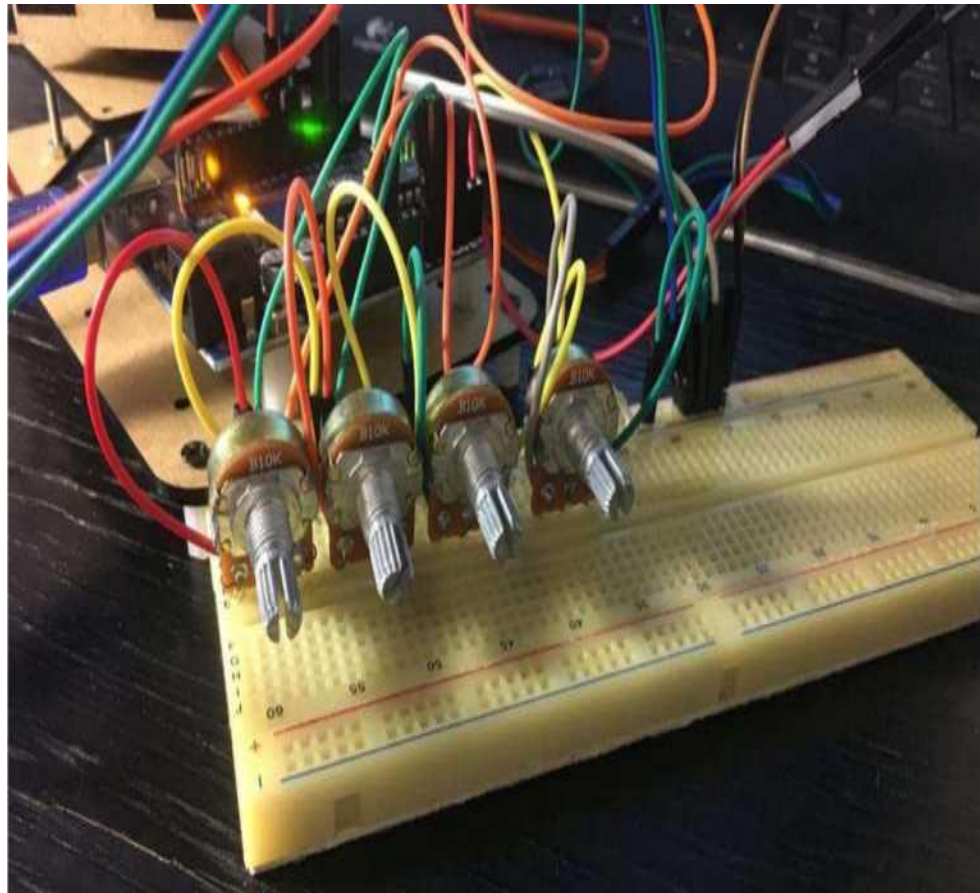


Рисунок 3.9 - Підключення серводвигуна до контролера Arduino через макетну плату

План фізичного експерименту з сервоприводом та програмна реалізація - варіант 1:

```
#include <Servo.h> // Підключаємо додаткову бібліотеку Servo servo1; //
Об'єкт управління сервоприводом
void setup()
{
  servo1.attach(9); // Призначається пін 9 для підключення серводвигуна
}
void loop()
{
  int position;
  servo1.write(90); // Команда серве повернутися на позицію 90 градусів
```

```

delay(1000);// Пауза 1 мкс, щоб дати час повернутися servo1.write(180); //
Команда серве повернутися на позицію 180 градусів delay (1000); // Пауза 1
мкс servo1.write (0); // Команда серве повернутися на позицію 0 градусів delay
(1000);          // Пауза 1 мкс
    // Формується команда сервоприводу повернутися на позицію 180
градусів,
    // з кроком у два градуси:
for(position = 0; position < 180; position += 2)
{
servo1.write(position); // Команда переміщення на наступну позицію
delay(20);      // Коротка пауза
}
    // Формується команда сервоприводу повернутися на позицію 0
градусів,
    // з кроком в 1 градус:
for(position = 180; position >= 0; position -= 1)
{
servo1.write(position); // Команда сервоприводу переміститися на
// наступну позицію
delay(20); // Коротка пауза
}

```

План фізичного експерименту з сервоприводом та програмна реалізація
- варіант 2:

```

int servopin=9;// select digital pin 9 for servomotor signal line int myangle;//
initialize angle variable int pulsewidth;// initialize width variable int val;
void servopulse(int servopin,int myangle)// define a servo pulse function
{
pulsewidth=(myangle* 11)+500;//convertangle to 500-2480 pulse width
digitalWrite(servopin,HIGH);// set thelevel of servo pin as

```

```

“high”delayMicroseconds(pulsewidth);//delaymicrosecond of pulse width
digitalWrite(servopin,LOW);// setthe level of servo pin as “low” delay(20-
pulsewidth/1000);
}
void setup()
{
  pinMode(servopin,OUTPUT);// set servo pin as “output” erial.begin(9600);//
connect to serial port, set baud rate at “9600” Serial.println("servo=o_seral_simple
ready" );
}
void loop();// convert number 0 to 9 to corresponding 0-180 degree angle,
LED blinks corresponding number of time
{
  val=Serial.read();// read serial port value if(val>='0'&&val<='9')
  {
    val=val-'0';// convert characteristic quantity to numerical variable
val=val*(180/9);// convert number to angle
    Serial.print("moving servo to "); Serial.print(val,DEC); Serial.println();
    for(int i=0;i<=50;i++) // giving the servo time to rotate to commanded
position
    {
      servopulse(servopin,val);// use the pulse function
    }
  }
}

```

Результати відпрацювання робочого процесу програмного управління сервоприводом показаний рисунку 3.10.

```

COM3
-----
servo=0_serial_simple ready
moving servo to 0
moving servo to 180
moving servo to 0
moving servo to 20
moving servo to 40
moving servo to 60
moving servo to 80
moving servo to 100
moving servo to 120
moving servo to 140
moving servo to 160
moving servo to 180
moving servo to 0
-----
 Autoscroll You've pressed Send b...
No line ending
9600 baud

```

Рисунок 3.10 - Результати робочого процесу програмного керування Сервоприводом

3.3 Результати експериментальних досліджень

Дослідження проводилися з метою визначення динамічних характеристик принтера та силової взаємодії електричних приводів. під час коливального процесу. Визначення даних параметрів здійснювалося при варіюванні величин зовнішнього та внутрішнього навантаження, а також конструктивний взаємозв'язок вузлів агрегату на експериментальному макеті будівельного SD-друку, який імітував процес роботи під час впливу динамічних та вібраційних навантажень.

У ході дослідження макету застосовано наступне обладнання: датчики вібрації DFR0052 п'єзоелектричні, датчик струму ACS712, ПД регулятор (DAMP/GAIN) з драйвером щіткового серводвигуна ЩСД PLD2080s. Визначення вібраційних навантажень здійснювалося з вивчення їх частки впливу параметри і точність позиціонування. Вимірювання проводилися з роботою установки на холостому ході, а також у режимі друку. Датчик вібрації закріплювався на корпусі макету.

Дослідження динамічних процесів формування склофібробетонних конструкцій проводилися при наповненні бункера склофібробетонною сумішшю та процес руху з одночасним вібруванням стінок бункера та ковзної опалубки.

Під час проведення експериментів визначалися динамічні характеристики процесів віброформування:

- 1) - Міцність на стиск та частота коливань стінок вібробункера та ковзної опалубки;
- 2) - Амплітуда та частота коливань скло фібробетонної суміші.

Головним критерієм працездатності у режимі впливу на 3D принтер динамічних навантажень є амплітуда коливань бункера та її друга похідна прискорення. Серед інших параметрів, що впливають величину динамічної навантаженості є: маса коливальної системи, маса дебалансу вібратора, радіус ексцентриситета, частота обертання дебалансу, кут зсуву фаз, обсяг бетонної суміші [21].

Параметри, визначені у процесі експериментів, наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Вихідні параметри

Параметр	Апаратний склад	Об'єкт певних параметрів
Амплітуда та частота коливань на стінках бункера, Гц	Analog Devices, USB	Відбійний брус, диск
Щільність суміші, кг/м ³	ВА - 2	+
Загальна вага компонентів суміші, кг	Дозатор	+
Міцність на стиск, МПа	Шкала величин	Прес

На рисунку 3.11 наведено віброграму конструкції тривимірного принтера.

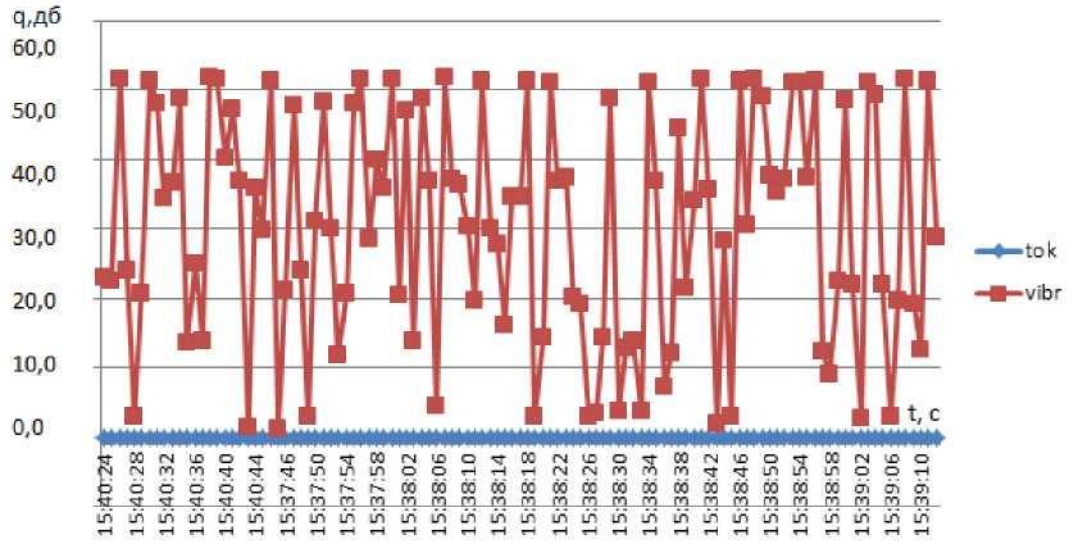


Рисунок 3.11- Віброграма пристрою

На рисунку 3.12 наведено графік залежності струму електроприводу від часу.

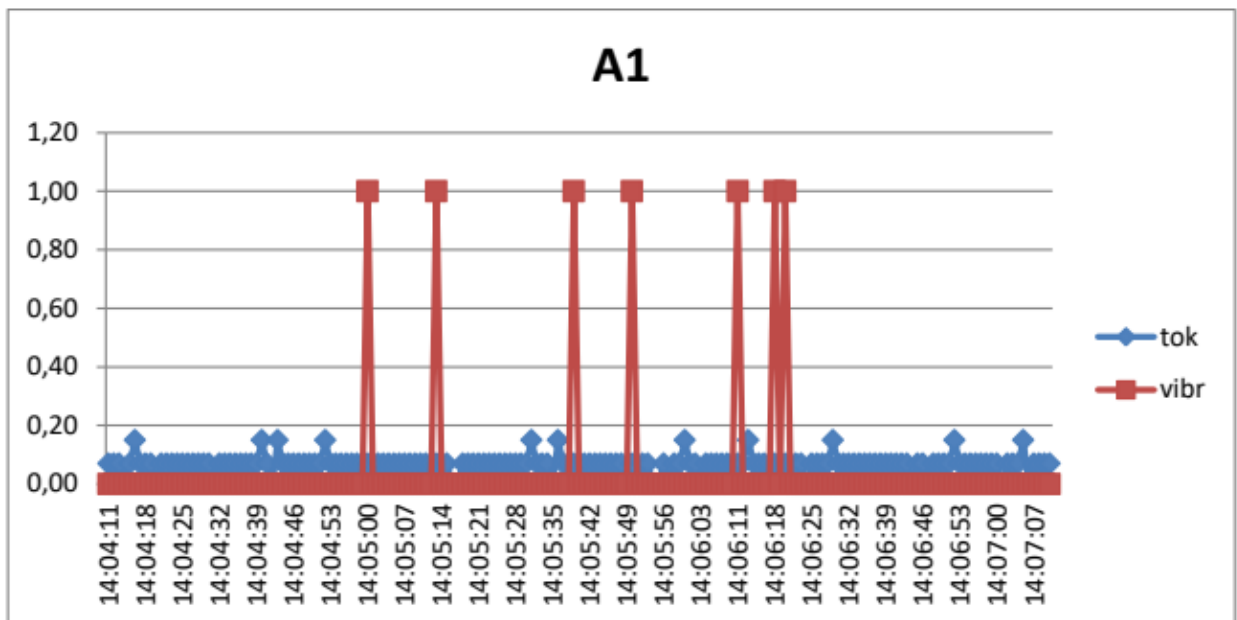


Рисунок 3.12 - Графік досліджень струму електроприводу

Як видно з наведених графіків максимальне значення амплітуди коливань ходового візка не перевищує 0,8 мм, максимальне значення струму в пусковому режимі становить 8,0 А. Визначено основні закономірності зміни

сили крокового двигуна, параметрів коливального процесу, принтера для підлоги різних ситуацій.

На рисунку 3.13 наведено графік прискорення рами принтера в залежності від коефіцієнта пружності суміші.

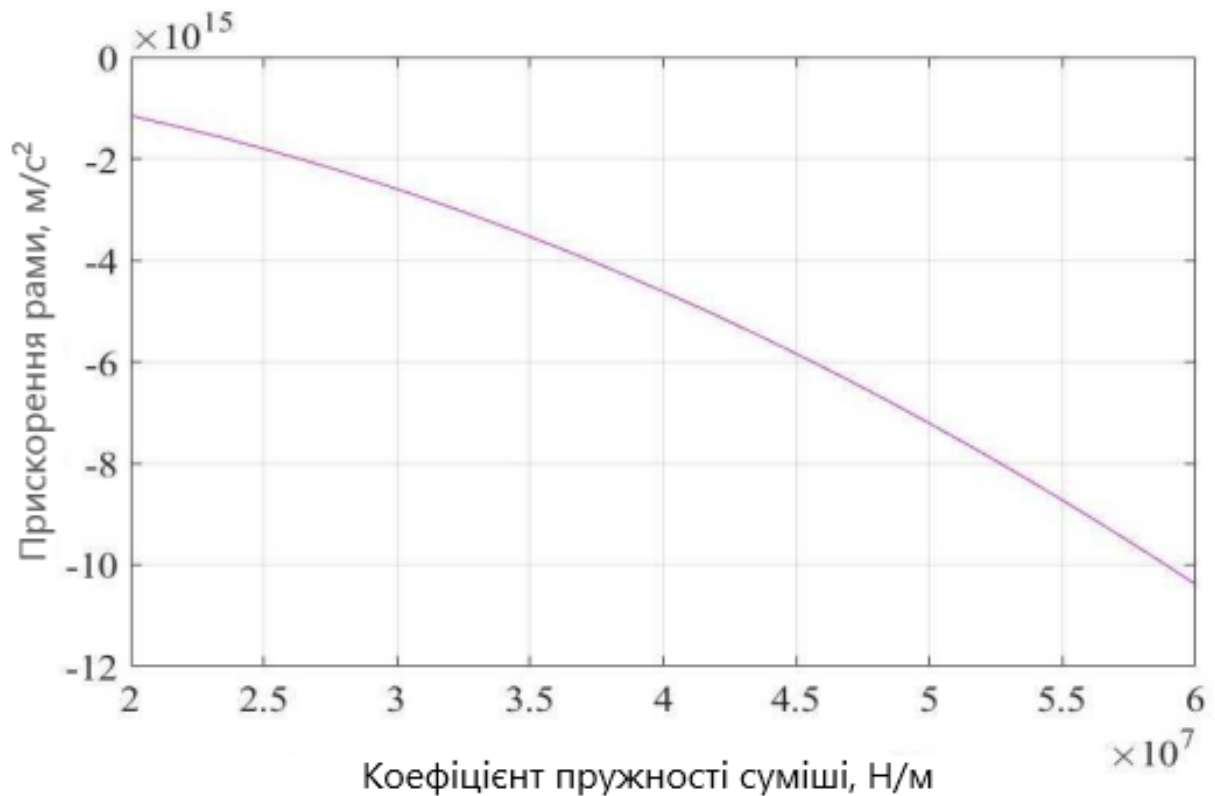


Рисунок 3.13 - Графік прискорення рами принтера залежно від коефіцієнта пружності суміші

3.4 Методи контролю якості 3D друкування будівельних виробів

Для забезпечення контролю якості виробництва будівельних виробів за допомогою 3D принтера необхідно вибрати величину, що вимірюється, яка визначала б параметри якісних властивостей підсумкового продукту. З об'єкта контролю, тобто. розчину, а також механізмів, що застосовуються в процесі екструзії, а саме друкуючої головки принтера, можливим і єдино правильним способом контролю якості є відстеження розтікання екструдованого складу. Розчин повинен наноситися відповідно до 3D моделі об'єкта пошарово, досягаючи проектного положення, залишатися і схоплюватися до необхідного

набору міцності.

Залежно від своєї констистенції, розчин може бути пластичний, малорухливий. При надмірному водонасиченні або недоліку компонентів в суміші, може бути недостатньо міцний для екструзії, розчин буде просто розтікатися і не дозволить коректно нарощувати об'єкт друку. Ця зміна як розчин веде до шлюбу всього виробу.

Для інтеграції в системну плату Ардуїн використовуємо датчик HC SR04, рисунок 3.14.



Рисунок 3.14 - Ультразвуковий датчик відстані HC SR04

Так як 3D принтер нарощує об'єкт пошарово, друкуюча головка слід відповідно до програми, розчин під час екструзії повинен відразу займати своє проектне положення. Відхилення від допустимих параметрів можна виміряти за допомогою ультразвукового датчика. Їм здійснюватимемо вимірювання відстані до поверхні шару, що видавлюється.

Ультразвукові далекоміри Ардуїно відносно прості, достатньо точні та доступні, завдяки чому досить потрібні в різних робототехнічних проектах. Їх застосування не обмежується експериментами, а широко використовуються як прилади виявлення та контролю перешкод, визначення розмірів предметів, вони можуть змоделювати карту простору та сигналізувати про зближення чи віддалення від об'єктів. Найпоширенішим варіантом такого датчика відстані ультразвуковий далекомір HC SR04. Він відрізняється простотою принципу дії датчика відстані, безліччю варіантів підключення до плат Arduino та схем взаємодії.

Принцип роботи пристрою схожий на сонар. Випромінюючи ультразвукові імпульси певної періодичності, він приймає відбитий сигнал із затримкою часового інтервалу, таким чином визначається відстань до навколишніх об'єктів. Конструктивно він складається з генератора імпульсів та приймача.

Ультразвуковий далекомір HC SR04 має такі технічні параметри:

- 1) Напруга живлення – 5В;
- 2) Сила струму в робочому стані – 15 мА;
- 3) Сила струму при пасивній роботі <2 мА;
- 4) Кут огляду – 15°;
- 5) Роздільна здатність сенсора - 0,3 см;
- 6) Кут вимірів - 30 °;
- 7) Ширина імпульсу – 10^{-6} с.

Як прилад безконтактного типу, датчик відстані Arduino забезпечує високу точність вимірювань і стабільність роботи. Цей пристрій використовує ультразвукові хвилі для вимірювання відстані до об'єкта. Ультразвукові датчики, що є тандеми мікрофона і динаміка, посиляють і приймають надвисокочастотні звукові хвилі для визначення відстані до об'єкта або наскільки він близько. Надвисокочастотні звукові хвилі відбиваються від об'єкта. На рисунку 3.15 зображено відбиток надвисокочастотних звукових хвиль від поверхні об'єкта.

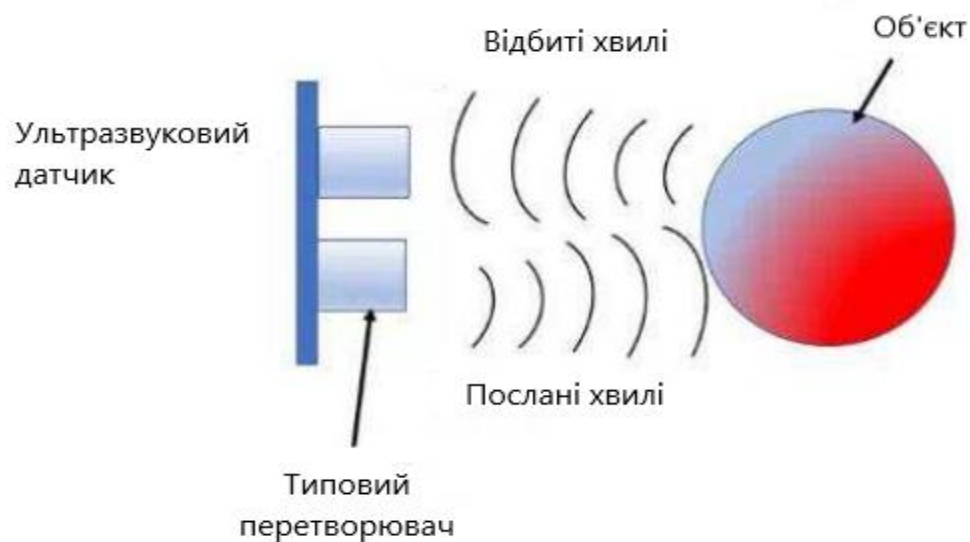


Рисунок 3.15 - Відображення надвисокочастотних звукових хвиль

Для підключення датчика рекомендується користуватися онлайн-симулятором схем, що дозволяє моделювати різні електричні та електронні схеми, перш ніж з'єднати їх на реальній макетній платі. Віртуальну функціональну схему будуємо за допомогою TinkerCad Circuits. У цій програмі ми можемо протестувати свої віртуальні проекти для забезпечення їх правильної функціональності перед створенням фізичної моделі. На рисунку 3.16 показано проект функціонального ультразвукового датчика Arduino, побудованого за допомогою TinkerCad Circuits.

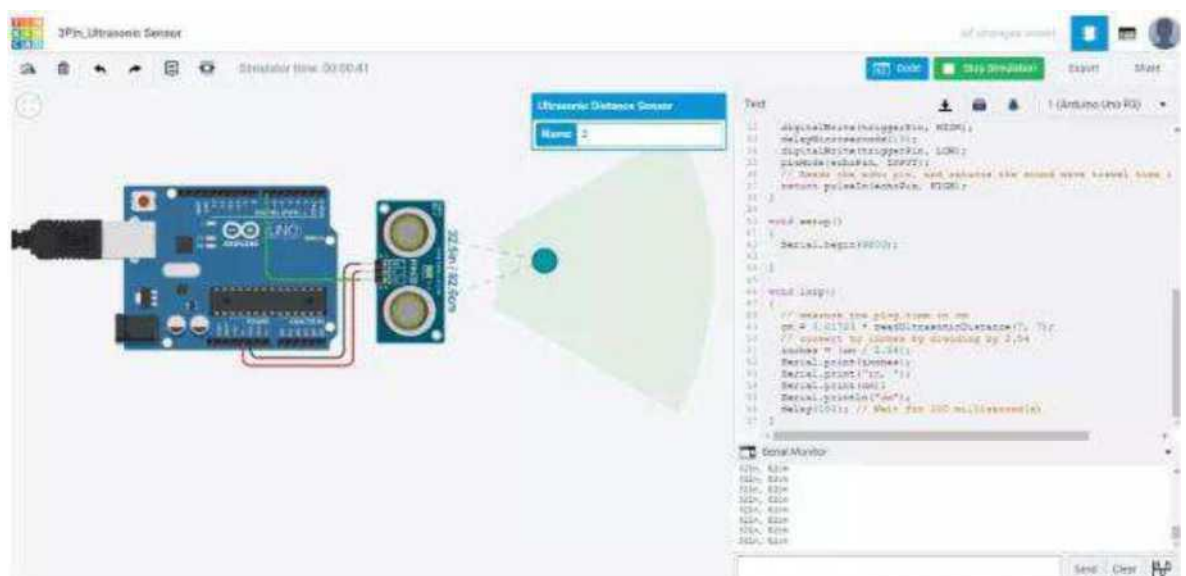


Рисунок 3.16 - Підключення датчика до плати Arduino за допомогою TinkerCad

Після успішного підключення віртуальної моделі виконуємо фізичне підключення датчика до плати. На платі Arduino до висновку GND підключаємо контакт землі, вихід з'єднуємо живлення з роз'ємом 5V. Цифрові піни Arduino приєднуються до висновків Echo та Trig. Схеми підключення безпосередньо та за допомогою макетної плати прості та показані на рисунку 3.17.

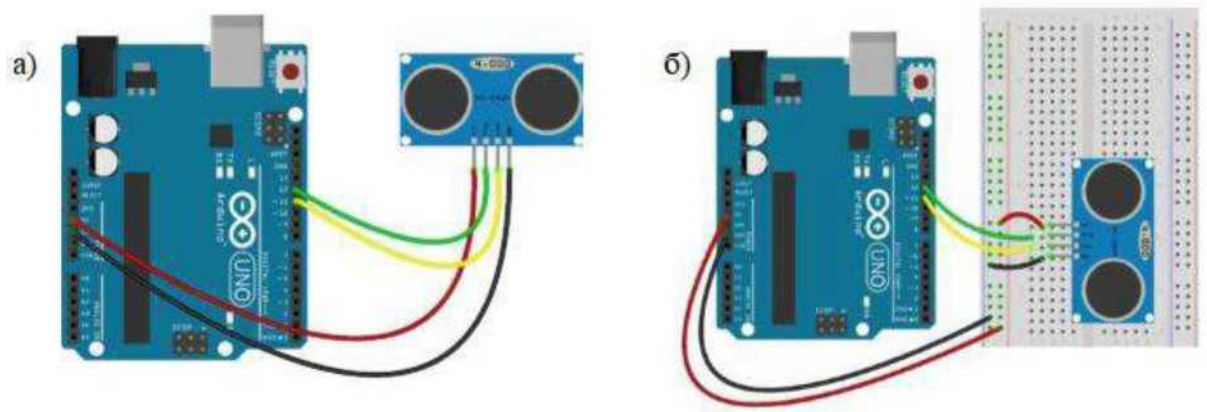


Рисунок 3.17- Схема підключення ультразвукового датчика :

а) безпосередньо до плати Arduino; б) за допомогою макетної плати

Для забезпечення спільної роботи в оплату необхідно запрограмувати. У додатку А наведено фрагмент коду Arduino IDE визначення датчиком відстані до об'єкта.

У програмному коді налаштовуються необхідні величини і параметри, наприклад, одиниці вимірювання відстані до об'єкта, частоту вимірювань, а також калібрування і визначення похибки приладу.

На рисунку 3.18 показаний приклад зміни даних про відстань у IDE.



Рисунок 3.18 - Дані відстані до об'єкта в IDE

Після того, як датчик підключений, налаштований і готовий до застосування його необхідно встановити в положенні, що слідує за друкувальною голівкою. У разі, якщо розчин розтікатиметься, відстань змінюватиметься. За допомогою програмного забезпечення необхідно виставити допустимі параметри, які визначаються датчиком. У разі перевищення нормованих величин система буде автоматично зупинена та попередить оператора про наявність та причину несправності.

Такий пристрій допоможе виключити шлюб, запобігти некоректному друку, скоротити час на усунення несправності, оскільки виявлено його буде ментально. Для даної системи можна розробити програмне забезпечення, що дозволяє на підставі величини відхилення від допустимого коригувати роботу систем з'єднання компонентів суміші, виготовлення та подачі розчину. У такому разі буде забезпечено повну автономність комплексу навіть у разі несправності.

3.5 Економічна ефективність тривимірного друку у будівництві

Найважливішим питанням застосування методу у реальну практику є економічна обумовленість. Якщо цей метод просто не рентабельний,

дослідження себе не виправдовують. Для цього пропонується кошторисне порівняння виконання робіт даним методом і методом більш традиційним, типовим і широко поширеним. Варто зазначити, що для чистоти та прозорості порівняння чітко опрацьовано обсяги конструкцій, їх призначення, підсумкові характеристики, можливі ускладнення та невраховані витрати при впровадженні нової, незвичної технології.

У таблиці 3.3 введено об'ємно-планувальні показники споруджуваної споруди для порівняння вартості будівництва різними методами.

Таблиця 3.3 - Об'ємно-планувальні показники

Найменування показників	Одиниці виміру	Значення
1. Об'ємно-планувальні показники		
Каркас, що несе		Стіни бетонні самонесучі
Поверховість	пов.	1
Висота бетонних конструкцій	м	4,5
Горизонтальні розміри стін	м	10x10
Товщина несучих стін	мм	350
Обсяг несучих конструкцій з урахуванням отворів	3 м	60
Площа забудови	2 м	100
Корисна площа	2 м	86

Приймаємо до розрахунку зведення бетонних несучих стін прямокутної форми заввишки 4,5 метра, довжиною та шириною 10 метрів. У конструкціях передбачаємо проріз вхідних дверей і три віконні отвори стандартних розмірів загальною площею 8,75 квадратних метра. При товщині несучих стін 0,35 метра, об'єм дверних та віконних отворів становив 3 кубічні метри. Загальний обсяг бетонних конструкцій за вирахуванням отворів становитиме 60 м³.

У зв'язку з тим, що будівельний 3D друк на даний момент не має нормативної бази, стандартів та її цінова політика не регламентується, розрахунки традиційного методу проводимо без урахування незначних

коефіцієнтів менше 3 відсотків вартості, таких як коефіцієнт непередбачених витрат, зимового подорожчання. Вони будуть застосовні в обох випадках і ніяк не вплинуть на загальну відсоткову різницю між коштами двох методів.

У разі адитивної технології потрібно розрахувати необхідний час роботи принтера для друку даної конструкції. Для початку необхідно розбити конструкцію на горизонтальні шари. Оптимальні параметри шару ширина 8 см, висота шару 2,5 см. При такій висоті шару їх кількість у конструкції висотою 4,5 метра складе 180 штук. Особливість друку передбачає усадку розчину з будь-яких причин максимальною величиною 2% від висоти конструкції. З урахуванням усадки для досягнення висотної проектної позначки принтеру може знадобитися ще 4 таких шари, загальна їх кількість становитиме 184.

Довжина шару безпосередньо залежить від форми споруди та її габаритів. У нашому випадку довжина складається з довжин внутрішніх та зовнішніх стін, а також проміжного посилення. Приклад такої стінової конструкції зображено на рисунку 3.19.



Рисунок 3.19 - Приклад стінової конструкції

А – зовнішня стіна, Б – внутрішня стіна, В – посилення

Посилення необхідне збільшення несучої здатності конструкції, з його довжини змінюється площа несучої поверхні. Довжина визначається добутком зовнішньої довжини на коефіцієнт зміни, для нашої конструкції одноповерхового будинку він становитиме 1,4. Загальна довжина шару становила 133,2 метра.

Нормальна швидкість реального друку приймається у проміжку від 100 до 250 мм/с. Приймаємо швидкість 150 мм/с, така величина дозволяє відобразити середню швидкість друку конструкцій з моменту запуску до моменту завершення з урахуванням усіх технологічних пауз, непередбачених зупинок і можливих несправностей систем.

На зведення конструкцій при заданих параметрах принтера необхідно 46 годин. Для його експлуатації необхідний 1 інженер для контролю друку та систем автоматики, а також кваліфікований бетонник, для поповнення бункерів та своєчасним пристроєм композитної арматури та закладних деталей. Для перевезення та встановлення потрібні напівпричіп та невеликий кран. Час монтажу та підготовки до роботи становитиме не більше 1 зміни. Загальна трудомісткість становила близько 110 чол-год. Такий метод дозволить звести конструкцію за тиждень під час роботи у дві зміни та за 5 діб при безперервній роботі.

Основна вартість таких робіт складатиметься із вартості матеріалів, заробітної плати робітників, електроенергії для роботи принтера та транспортування обладнання. Підсумкова вартість виконання робіт становитиме 356 тисяч.грн з урахуванням ПДВ.

Економічна ефективність визначається процентною величиною різниці двох методів. Різниця між вартістю традиційного зведення та печаткою конструкцій становила 121 тисяч.грн. Застосування принтера виявилось економічно ефективнішим на 34%.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень вирішено завдання, поставлені перед цією роботою, а саме:

- 1) Виконано аналіз попередніх досліджень, на підставі яких виявлено проблеми даної тематики, визначено напрямок та мету дослідження;
- 2) Розроблено розрахункову схему конструкції принтера;
- 3) Здійснено розрахунок математичної моделі комплексу будівельного тривимірного друку;
- 4) Створено імітаційну модель маніпулятора у програмному середовищі MATLAB/Simulink;
- 5) Розроблено методику комп'ютерного моделювання та проведено експеримент над пристроєм, що імітує принтер-маніпулятор;
- 6) Запропоновано, обґрунтовано та експериментально впроваджено варіанти вдосконалення робочих процесів будівельного принтера;
- 7) Розроблено теоретичну базу системи контролю 3D друку у будівництві;
- 8) Зроблено порівняльний розрахунок вартості робіт зі зведення бетонних конструкцій традиційним методом та за допомогою адитивних технологій у будівництві, з впровадженням розробок даного дослідження, чим і доведено економічну ефективність дослідження, що склала 34%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування технології 3D-друку в будівництві. Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. 2015. Вип. 3. С. 11–18.
2. Савицький М., Айріх Ш., Халаф І. та ін. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3D-друку будівельних об'єктів : колективна монографія; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О. М., 2019. 233 с.
3. Литвиненко Ю. М., Остапенко С. О., Рогозинський А. А., Солонін Ю. М. Ручна версія 3D-друкування. Science and innovation. 2019, Вип. 15(5), С. 78–83 URL: <http://scinneng.org.ua/sites/default/files/pdf/2019/N5/Lytvynenko.pdf>.
4. Стасюк Т. С. Аналіз існуючих технологій виготовлення будівель за допомогою 3D-принтерів і перспективи їх застосування в Україні / Студентський вісник НУВГП : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2023. - Вип.1(19). - С. 21-24.
5. Шатов С. В., Савицький М. В., Марченко І. О. Удосконалення обладнання 3D-друку об'єктів. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2019. Вип. 6. С. 90–101. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/192233>.
6. Savytskyi N. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. 3D-printing of build objects. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2016. № 3. С. 18–26.
7. Davidla Delgado J. M., Oyedele, L.O., Ajayi A.O., Akanbi L.A., Akinade O.O., Bilal M., A.O., Owolabi H.A. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption // Journal of Building Engineering. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100868>
8. Застосування 3D технологій у будівництві - статті компанії Нові Зодчі. (2020). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL:

<http://www.n-zodchie.com/ua/articles/pro-zastosuvannya-3d-tehnologiy-u-budivnyitstvi.html>

9. Мельник Л. Г., Маценко О. М. Інноваційний досвід підприємств у сфері енергозбереження: енергетика, будівництво, транспорт, агровиробництво. Управління енергоспоживанням: промисловість і соціальна сфера : монографія / під заг. редакцією О. М. Теліженка та М. І. Сотника. Суми : видавничо-виробниче підприємство «Мрія-1», 2018. С. 106–140. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/77293>

10. Позитивні ефекти проривних технологій / Л. Г. Мельник та ін. Проривні технології в економіці і бізнесі (досвід ЄС та практика України у світлі III, IV і V промислових революцій) : навчальний посібник ; за ред. Л. Г. Мельника та Б. Л. Ковальова. Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 18–23. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/80619>

11. Розвиток будівельної галузі та детінізація ринку праці у будівництві. (2020). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/rozvitok-budivelnoyi-galuzi-ta-detinizatsiya-rinku-pratsi-u-budivnitstvi>

12. Розробка 3D-моделі архітектурних споруд : /С. В. Мартинюк та ін. Тернопіль : ТНПУ, Студ.наук. вісн. Вип. № 43, 2018, С. 121–123.

13. Мартинюк С., Волос О. Підготовка моделей архітектурних споруд для 3D-друку. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. з міжнар. участю, м. Тернопіль, 9–10 лист. 2017 р. Тернопіль, 2017.

14. Пінкера В.А. Пінобетон в сучасному будівництві / В.А. Пінкера / Будівельна альтернатива. - 2002. - № 3

15. Андрійчук О.В., Оласюк П.Я. Застосування 3D-технологій у будівництві. Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. 2015. Вип. 3. С. 11–18

16. ДСТУ Б В.2.7-137:2008 Будівельні матеріали. Блоки із ніздрюватого бетону стінові дрібні. Технічні умови (41007).

17. Мосьпан В.І. Підвищення стійкості піни в бетонній суміші / В.І.Мосьпан // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури .– Дніпропетровськ: ПДАБА, 2011. – № 1-2. – С. 73 –76.

18. Сівко В.Й. Обладнання підприємств промисловості будівельних матеріалів і виробів: Підручн. / В.Й. Сівко , В.А. Поляченко / За ред. В.Й. Сівка.– КНУБА. – К.: "ТОВ "АВЕГА", 2004. – 276.

19. Герої 3D-друку: як пластикові деталі рятують фермерів / Катерина Шевченко // [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://agravery.com/uk/posts/show/geroi-3d-druku-ak-plastikovi-detali-ratuut-fermeriv>

20. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) /Андрощук Г. О. // Рецензований журнал «Наука, технології, інновації» №2 2017 рік – С.29-36

21. Яригін В.А. Аналіз параметрів, що впливають на якість 3d друку / В.А Яригін., С.П. Вислоух // Materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar “Modern questions of production and repair in industry and in transport”, March 23-29, 2020, Kosice, Tbilisi, Georgia. – С. 180-183.

22. Чонка Е.Я. Аналіз точності формування поверхонь деталей виготовлених на 3d-принтері / Е. Я Чонка, В.С. Антонюк // Збірник праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 року – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 197-200.

23. Обзор 3D-принтера Wanhao Duplicator i3 Plus // [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://3dtoday.ru/blogs/sergey/browse-3d-printer-wanhao-duplicator-i3-plus/>

24. CreatBot DX Plus 3D принтер // [Електронний ресурс] –режим доступу: <https://3dreams.com.ua/товар/creatbot-dx-plus-3d-принтер/>

25. Переваги ПЗ CreoParametric // [Електронний ресурс] –режим доступу: <https://www.ptc.com/ru/products/cad/creo>

26. Яригін В.А. Про сучасні методи та засоби моделювання / В.А. Яригін,С.П. Вислоух// Збірник праць XV Науково-практичної конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 року – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 211-213.

27. Яригін В.А. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3d друку // В.А Яригін., С.П Вислоух.// збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю Процеси механічної обробки, верстати та інструмент м. Житомир, 6–9 листопада 2019 р. - С. 209-213.

28. Можливості використання 3D-друку під час навчання фізики у загальноосвітній та вищій школі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/bitstream/123456789/15553/1/Krivtsov.pdf>.

29.Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/bitstream/123456789/21883/1/Strutynska.pdf>.

30.Петришина А.А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього. Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів (25-26 листопада 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 26–27.

31.Застосування 3D принтерів в навчальних закладах.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://dixi.education/using-3d-printers/>.

32. 3D Slicer Software: How it Works and What to Expect [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solidprint3d.co.uk/3d-slicer-software-how-it-works-and-what-to-expect/>

33. Setting up Support Material in FDM Slicers [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.solidprint3d.co.uk/setting-up-support-material-in-fdm-slicers/>

34. What is Slicing Software, and what does it do? [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.additive-x.com/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>

35. 3D Slicing Software – The Basics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://the3dbros.com/3d-slicing-software-the-basics/> –01.12.2021р.

36. 3D Slicer Settings for Beginners – 8 Things You Need to Know [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pinshape.com/blog/3d-slicer-settings-5-things-you-need-to-know-about-3d-printing-software/>

37. A Quick Guide to Slicers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buildbee.com/blog/article/a-quick-guide-to-slicers> – 18.04.2021р.

38. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies. Automation in Construction. 2004. Vol. 13, iss. 1. Pp. 5–19. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736>.

39. Lipson H. Fabricated. The New World of 3D Printing. Hod Lipson, Melba Kurman. [Indiana] : Wiley, 2013.320 p.

40. Joop de Boer Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? Pop-Up City. 2014. 1 July. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/>.

41. Hamidreza Gh.S., Corker J., Fan M. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. Automation in Construction. 2018. Vol. 93. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>

42. Baiani, S., & Altamura, P. (2018). Waste materials superuse and upcycling in architecture: Design and experimentation. Techne, 16, 142–151. URL: <https://doi.org/10.13128/Techne-23035>

43. Dai, L., Cheng, T., Duan, C. at al. (2019). 3D printing using plant-derived cellulose and its derivatives: a review. Elsevier Ltd, pp 71–86.

URL:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.027>

44. Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., & Kim, J. H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1). URL: <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0388-2>

45. Kler, R., & Piller, F. T. (2019). Local manufacturing and structural shifts in competition: Market dynamics of additive manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 216(September 2018), 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.04.019>