

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення лабораторного макету роботизованої виробничої
ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання, групи
АКТАКІТ-21-1

Денис ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Сергій НОВОСЕЛОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Вільчинський Денис Васильович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

" 25 " червня 2025 р.



Денис ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____

Кафедра _____ КІТАР _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми _____ Освітньо-професійна _____

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

« 28 » _____ квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві _____ Вільчинському Денису Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення лабораторного макету роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей
затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. № 390 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 26.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Середовище моделювання Autodesk Fusion 360

Середовища розробки STM32CubeIDE, Arduino IDE.

Напруга живлення 12 В

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Аналіз предметної області; 4.2 Аналіз сучасних досліджень; 4.3 Підбір апаратної бази; 4.4 Розробити програмне забезпечення; 4.5 Опис принципу роботи; 4.6 Розроблення апаратної частини; 4.7 Забезпечення безпечних умов праці при проектуванні захватного пристрою

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації (файл Презентація_Вільчинський.pptx), 13 арк. ф. А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	28.04-04.05.2025	виконано
2	Аналіз сучасних досліджень	05.05-10.05.2025	виконано
3	Розроблення апаратної частини	11.05-10.06.2025	виконано
4	Розроблення програмної частини	18.05-23.06.2025	виконано
5	Проведення досліджень конструкції	26.05-31.05.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет- сервісом StrikePlagiarism	23.06-24.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	22.06-23.06.2025	
8	Подання роботи на рецензію	24.06-25.06.2025	
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	24.06-25.06.2025	
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	26.06.2025	

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач _____ Денис ВІЛЬЧИНСЬКИЙ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 53 рис., 19 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВИРОБНИЦТВО, ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТ,
МІКРОКОНТРОЛЕР, ПРОГРАМУВАННЯ, ПРОЄКТУВАННЯ.

Об'єкт розробки – це автоматизація зберігання товарно-матеріальних цінностей на промисловому виробництві.

Предмет розробки – лабораторний макет роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей.

Мета роботи – проектування та складання макету роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей, що дозволяє наглядно бачити як працюють такі системи, а також підвищити рівень підготовки спеціалістів даного напрямку за рахунок більш інтуїтивного навчання.

В роботі розглянуто актуальні питання за темою, та які типи роботизованих ділянок бувають. Спроектовано та створено макет роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей. Проведено випробування та аналіз.

Розроблений макет може використовуватись у навчальному процесі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, для допомоги студентам у дослідженні систем автоматизації виробництва, електромеханіки, механіки, робототехніки та основ програмування.

ABSTRACT

Explanatory note: 61 pages, 53 figures, 19 sources.

AUTOMATION, PRODUCTION, ELECTRONIC COMPONENT,
MICROCONTROLLER, PROGRAMMING, DESIGN.

Object of the development – automation of storage of material assets in industrial production.

Subject of the development – a laboratory model of a robotic production area for storing material assets.

Purpose of the work – design and assembly of a model of a robotic production area for storing material assets, which allows for a visual understanding of how such systems operate, as well as enhancing the training level of specialists in this field through more intuitive learning. Research methods – comparative analysis of robotic storage production sections, and experimental testing.

This work examines relevant issues related to the topic and the types of robotic sections available. A model of a robotic production section for the storage of material assets was designed and constructed. Testing and analysis were carried out.

The developed model can be used in the educational process for the speciality 151 Automation and Computer-Integrated Technologies to assist students in studying automation systems in production, electromechanics, mechanics, robotics, and fundamentals of programming.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ.....	7
1 Аналіз стану роботизованих систем зберігання	9
1.1 Аналіз технічного завдання	9
1.2 Аналіз існуючих методів автоматизації складських приміщень на виробництві.....	10
1.2.1 Палетне сховище Unit Load AS/RS	11
1.2.2 Автоматизоване міні сховище Mini load AS/RS	12
1.2.3 Система з декількома шатлами Shuttle AS/RS	13
1.2.4 Кругові Carousel AS/RS.....	14
1.2.5 Глибокі Deep Lane AS/RS	15
1.2.6 Мобільні роботи AMR та автоматизовані транспортні засоби AGV	16
1.2.7 Системи ідентифікації	17
1.3 Опис архітектури системи (Міни-Load AS/RS)	19
2 Розроблення архітектури та алгоритму роботи макету.....	23
3 Моделювання конструкції макету	26
3.1 Постановка задачі, опис середовища розробки, розробка архітектури макету	26
3.2 Проектування апаратної частини	27
4 Вибір компонентів та побудова апаратної складової.....	55
4.1 Вибір компонентів обґрунтування	55
4.2 Розрахунки ТАУ	58
5 Розроблення програми керування макетом	60
5.1 Принцип роботи програми	60
5.2 Охорона праці.....	62
Висновки	64
Перелік джерел посилань	65
Додаток А Апробація результатів роботи	68
Додаток Б Листинг програми.....	74
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ТМЦ – товарно-матеріальних цінностей;
- AGV – Automated Guided Vehicles;
- AMR – Autonomous Mobile Robots;
- AS/RS – Automated Storage and Retrieval Systems;
- CRM – Customer Relationship Management;
- ERP – Enterprise Resource Planning;
- RFID – Radio Frequency Identification;
- WCS – Warehouse Control System;
- WMS – Warehouse Management System.

ВСТУП

На даний момент, необхідність роботизованих сховищ на підприємствах є високою. Для більш швидкої та якісної роботи підприємства збільшують кількість роботизованих ділянок сховищ, у склад яких входять приміщення, складські роботизовані ділянки та системи керування ними.

Завдяки таким системам вдається досягти високої точності та швидкості виконання операцій, мінімізувати ймовірність помилок, властивих людині, а також підвищити рівень безпеки, замінюючи персонал роботизованими ділянками. Крім того, в окремих випадках це дозволяє скоротити витрати виробництва.

Разом з необхідністю автоматизації складських процесів зростає потреба у вдосконаленні вже існуючих систем та розробки нових.

Об'єкт розробки – це автоматизація зберігання товарно-матеріальних цінностей на промисловому виробництві.

Предмет розробки – лабораторний макет роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей.

Мета роботи – проектування та складання макету роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей, що дозволяє наглядно бачити як працюють такі системи, а також підвищити рівень підготовки спеціалістів даного напрямку за рахунок більш інтуїтивного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих систем;
- провести підбір елементної бази компонентів системи;
- розробити апаратну частину макету;
- розробити програмне забезпечення для макету;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1] та згідно методичним вказівкам з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 [2].

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.5 «Сприяти модернізації інфраструктури та перепрофілюванню промисловості для забезпечення її сталості, підвищення ефективності використання ресурсів та більшого впровадження екологічно чистих і технологічно досконалих процесів», зокрема через розробку та використання роботизованих систем у виробництві, що базуються на сучасних інженерних рішеннях і сприяють цифровій трансформації промисловості

1 АНАЛІЗ СТАНУ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ

1.1 Аналіз технічного завдання

Технічне завдання на розроблення лабораторного макету роботизованої виробничої ділянки зберігання ТМЦ передбачає створення функціональної та демонстраційної системи, яка імітує ключові процеси сучасного автоматизованого складу, що працює відповідно до концепції індустрії 4.0. В рамках поставленого завдання, результатом повинен бути макет лабораторної установки, здатної відтворювати основні функції роботизованої ділянки для зберігання продукції. Макет має бути компактним за розмірами до 50 см в довжину, однак забезпечувати достатній рівень наочності для розуміння принципів роботи роботизованих складських систем нового покоління.

Система повинна виконувати повний цикл роботи системи, що імітують ТМЦ. А саме їх прийом, ідентифікацію, транспортування, розміщення на зберігання, а також зворотну видачу за запитом. Для реалізації цих функцій конструкція макету повинна включати роботизований маніпулятор, автоматизований конвеєр, набір сенсорів для фіксації наявності об'єктів та їх ідентифікації, а також мікроконтролер, що забезпечує централізоване керування всіма підсистемами. Також опціональним є наявність інтерфейсу користувача, який дозволяє здійснювати моніторинг роботи макету, ручне або автоматизоване втручання в процеси, а також налаштування логіки системи.

У якості об'єктів для зберігання будуть використовуватися моделі контейнерів або коробок, кожна з яких маркована унікальним ідентифікатором. Це дає змогу реалізувати логіку адресного зберігання та забезпечити відстеження руху ТМЦ у системі. Також увагу необхідно приділити програмній частині, яка виконує функції обробки та збереження інформації, управління роботизованими елементами, формування маршрутів переміщення, оптимізації розміщення

об'єктів, ведення обліку та здійснення зворотного контролю. Алгоритми мають враховувати просторові обмеження, конфігурацію стелажів, черги на обробку.

Також нам потрібні відповідні розміри макета у масштабі. Масштаби 2 до 1 чи 5 до 1 будуть занадто великим що буде дорого та потребуватиме забагато місця, тому краще взяти ще менший масштаб.

Оскільки макет є лабораторним, треба зробити його найбільш зрозумілим та у не великому масштабі. При цьому всьому макет повинен залишитися функціональним. Для цього найбільш підходить система типу Mini load AS/RS.

Основними вимогами до макету є:

- мініатюрний рухомий шатл для переміщення контейнерів;
- мініатюрні контейнери;
- 3D-друковані стелажі;
- STM32 або інший мікроконтролер для управління рухом механізмів;
- сенсори або камери для ідентифікації та позиціонування;
- простий HMI-інтерфейс для подачі запитів і виводу результатів.

1.2 Аналіз існуючих методів автоматизації складських приміщень на виробництві

Існує декілька видів автоматизованих складських приміщень такі як: автоматизовані системи зберігання AS/RS, мобільні роботи AMR/AGV або комбіновані.

Один з найпоширеніших видів автоматизованих складів є систем зберігання і видачі AS/RS. Такі системи включають автоматизовані стелажі, підйомно-транспортне обладнання, системи керування та програмне забезпечення.

Системи AS/RS бувають різних підтипів:

- системи з кранами-штабелерами (Unit Load AS/RS);
- міні-навантажувальні системи (Mini Load AS/RS);
- shuttle-системи (Shuttle AS/RS);
- автоматизовані карусельні системи (Carousel AS/RS);

– вбудовані стелажні системи (Deep Lane або Flow Rack AS/RS).

1.2.1 Палетне сховище Unit Load AS/RS

Палетне автоматизоване сховище Unit Load AS/RS призначені для роботи з важкими та габаритними вантажами до 2 тон для цього використовується штабельний кран який і дає змогу підіймати такі важкі вантажі завдяки своїй конструкції. Основними компонентами є стелажі, автоматизовані крани та система керування. Перевагами є можливість переміщення важких вантажів. Недоліками даного типу сховищ є дороговизна, не велика швидкість, високий поріг входу для вантажів. Приклад реалізації Unit Load AS/RS системи зазначено на рис. 1.1. [4].

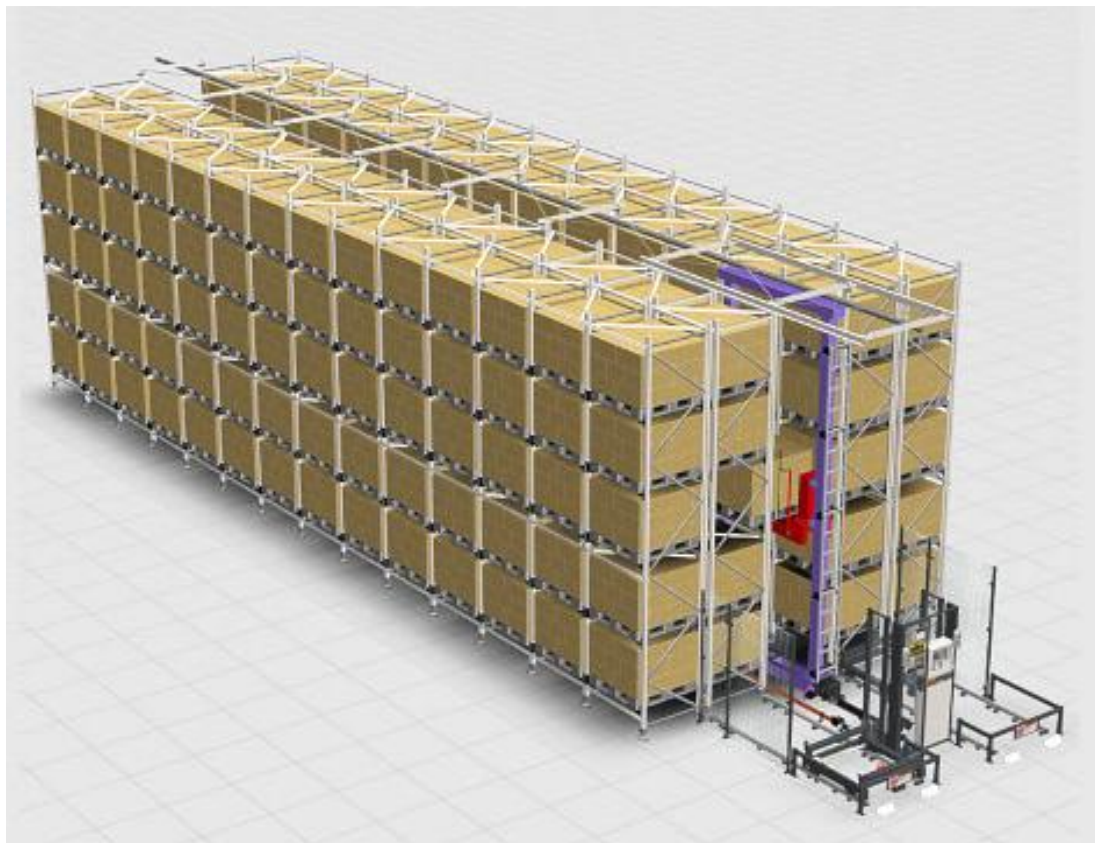


Рисунок 1.1 – Приклад Unit Load AS/RS системи

Основним компонентом який і дає можливість працювати з такими важкими вантажами є кран. Він переміщається у зазначеному вузькому проході між стелажими по рельсах. Для роботи з палетами дані крани мають вилки для взаємодії з ТМЦ [5].

1.2.2 Автоматизоване міні сховище Mini load AS/RS

Автоматизоване міні сховище працює з пластиковими боксами, що дозволяє збільшити щільність зберігання. Основними компонентами є стелажі, один шатл, який сам переміщується і по горизонталі і по вертикалі.

На відміну від Unit load AS/RS призначені для роботи з малими вантажами зазвичай до 50кг хоча і дуже схожі за конструктивом. Для переміщення між рядами використовує рейки та приводи, а для взаємодії з ТМЦ використовує захоплювач або конвеєрний механізм [5]. Перевагами є швидкі роботи та мала ціна впровадження. Приклад реалізації Mini load AS/RS системи зазначено на рис. 1.2 [4] та приклад конвеєрного механізму захвату на рисунку 1.3 [6].

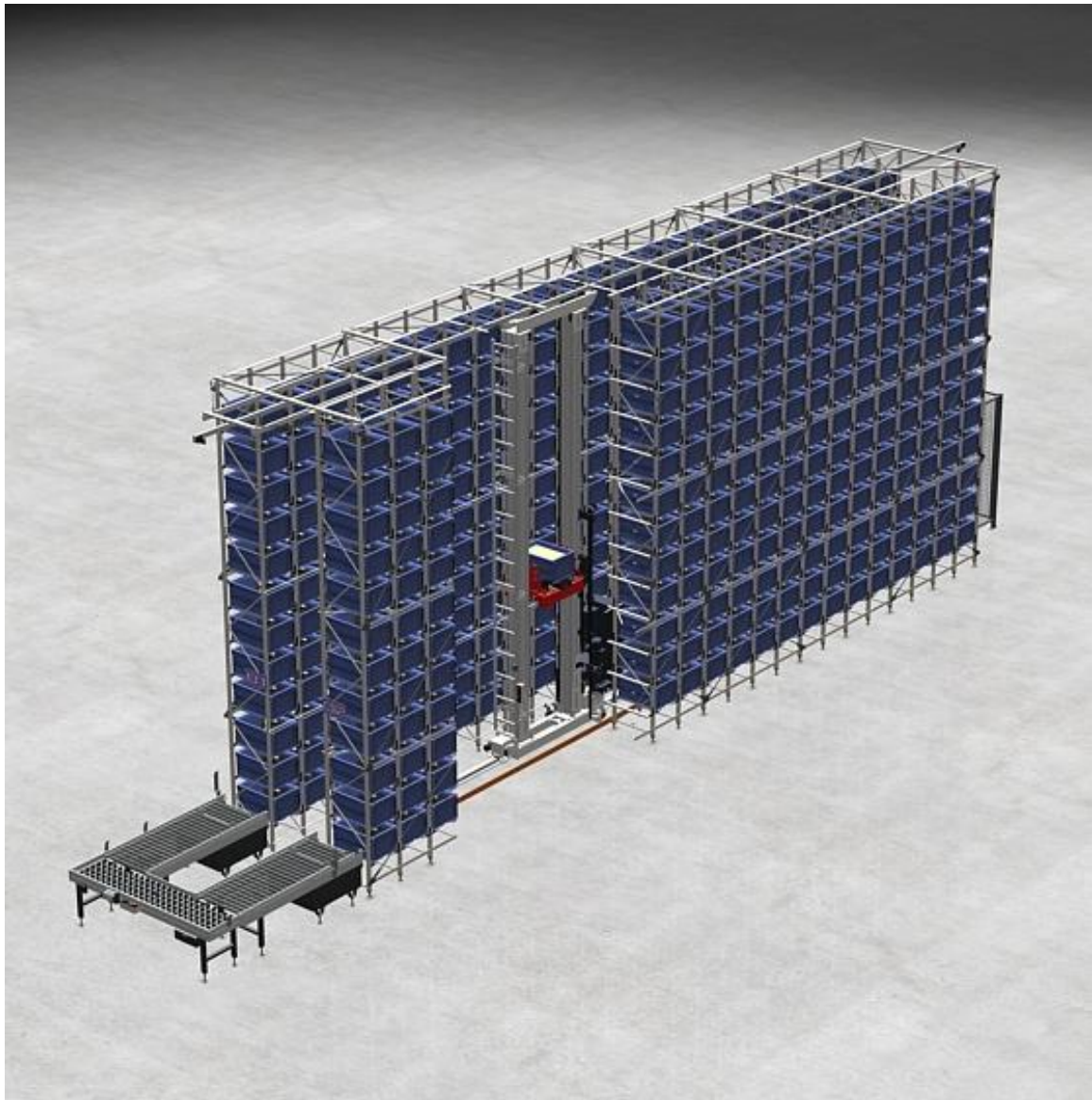


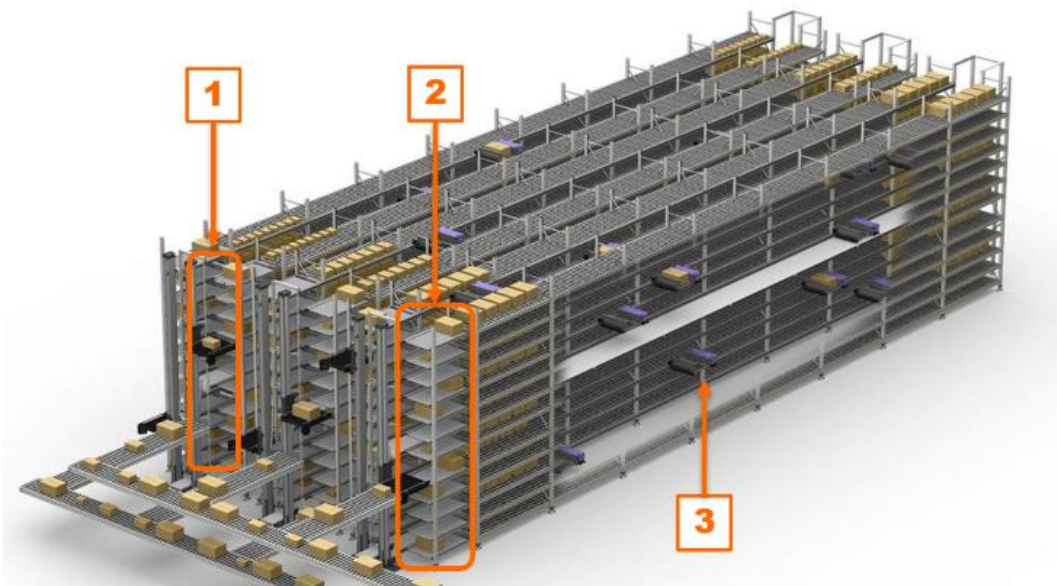
Рисунок 1.2 – Приклад Mini load AS/RS



Рисунок 1.3 – Приклад конвеєрного механізму захвату Mini load AS/RS

1.2.3 Система з декількома шатлами Shuttle AS/RS

В системі є декілька шатлів кожен на своєму рівні та підйомник для вантажів. Призначені для роботи з невеликими вантажами. Перевагами є дуже велика швидкість та ефективність використання місця. Недоліками цього типу автоматизованих складів є дороговизна через велику кількість шатлів. Приклад реалізації Shuttle AS/RS системи зазначено на рисунку 1.4 [3].



1 – підйомник; 2 – стелаж; 3 – шатли

Рисунок 1.4 – Приклад Shuttle AS/RS

1.2.4 Кругові Carousel AS/RS

Кругові склади бувають горизонтальні та вертикальні. Горизонтальні типи використовуються у приміщеннях з невеликою висотою стелі а вертикальні навпаки. Також доволі часто дані системи використовують при видачі ТМЦ напряду до отримувача. Данни тип автоматизованих сховищ в основному використовується для малих товарів. Перевагами є ефективність використання місця та дешеві. Недоліками є невелика швидкість. Приклад реалізації горизонтальної Carousel AS/RS системи зазначено на рисунку 1.5 [7] та приклад реалізації вертикальної Carousel AS/RS на рисунку 1.6 [8].



Рисунок 1.5 – Приклад горизонтальної Carousel AS/RS



Рисунок 1.6 – Приклад вертикальної Carousel AS/RS

1.2.5 Глибокі Deep Lane AS/RS

Глибокі лінійні автоматизовані сховища призначені для збереження великої кількості однакових або декількох видів ТМЦ. Перевагами є найефективніше використання простору та дуже велика швидкість. Недоліками є відносно мала гнучкість. Приклад Deep Lane AS/RS системи зазначено на рисунку 1.7 [9].



Рисунок 1.7 – Приклад Deep Lane AS/RS

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик різних типів роботизованих систем

Тип AS/RS системи	Продуктивність	Щільність зберігання	Масштабованість	Універсальність товарів	Складність обслуговування
Unit Load AS/RS	Середня	Середньо-Висока	Складна	Висока	Середня
Mini Load AS/RS	Висока	Середньо-Висока	Середня	Висока	Середня

Продовження таблиці 1.1

Тип AS/RS системи	Продуктивність	Щільність зберігання	Масштабованість	Універсальність товарів	Складність обслуговування
Shuttle AS/RS	Дуже висока	Середньо-Висока	Висока	Висока	Середня
Carousel AS/RS	Середньо-низька	висока	Обмежена	Висока	Висока
Deep Lane AS/RS	Висока	Дуже висока	Висока	Низька	Низька Середня

Автоматизовані сховища AS/RS забезпечують високу щільність зберігання товарів, знижують потребу в персоналі та суттєво скорочують час на пошук і вилучення продукції. Вони особливо ефективні для роботи з великими обсягами однорідної продукції. Недоліками є висока вартість впровадження та складність модифікації системи після монтажу.

1.2.6 Мобільні роботи AMR та автоматизовані транспортні засоби AGV

Іншим важливим напрямом є використання мобільних роботів AMR та автоматизованих керованих транспортних засобів AGV. AMR відрізняються високим рівнем автономності. Приклад мобільного AMR робота зазначено на рисунку 1.8 [10].



Рисунок 1.8 Приклад роботів AMR

Пристрої можуть вільно переміщатися по складу, використовуючи навігаційні алгоритми на базі LIDAR, камер та штучного інтелекту. AGV своєю чергою, слідує за заздалегідь визначеними маршрутами магнітними смугами, QR-маркерами, оптичними сенсорами.

Ці технології дозволяють швидко переміщувати вантажі між різними зонами складу без людей. Перевагою AMR є їх гнучкість та здатність адаптуватися до змін навколишнього середовища. AGV є дешевшими, але менш адаптивними.

1.2.7 Системи ідентифікації

Ідентифікація товару є необхідною на складах. Є декілька типів ідентифікації: штрих-коди, QR-коди та RFID. Останні особливо ефективні для автоматизованих систем, оскільки не потребують прямої видимості для зчитування, що дозволяє швидше і точніше ідентифікувати товар.

Системи ідентифікації та обліку є одним із ключових елементів сучасних складських і виробничих процесів. Вони забезпечують оперативний контроль за рухом ТМЦ, спрощують інвентаризацію, сприяють автоматизації логістичних процесів.

Основним призначенням систем ідентифікації є зчитування, передача, зберігання та обробка інформації про об'єкти, що знаходяться на зберіганні або в обігу.

Штрих-коди є найбільш розповсюдженим і недорогим способом ідентифікації продукції. Вони наносяться на упаковку або сам товар і зчитуються за допомогою сканерів. Найбільш популярними є коди стандарту EAN-13, Code 128, Data Matrix. Перевагами штрих-кодів є простота реалізації, дешевизна та універсальність. Мінусами є потреба прямої видимості штрих-коду та можливість його пошкодження і втрата даних. Штрих-кодові системи добре підходять для невеликих складів, офісних архівів, роздрібною торгівлі та логістики з невеликим об'ємом товарів.

QR-коди є вдосконаленим різновидом штрих-коду. Вони вміщують більше інформації, можуть бути зчитані з більшого кута і частково залишаються читабельними навіть при механічному пошкодженні. Перевагами QR кодів є простота реалізації, дешевизна та універсальність. Мінусами є потреба видимості хоч якоїсь та можливість його пошкодження і часткова або повна втрата даних.

Завдяки сукупності своїх характеристик, QR-коди часто використовуються в системах логістичного обліку, де важлива точність даних та швидкість їх обробки. Також їх можна легко зчитувати звичайною камерою смартфона.

RFID це сучасна технологія ідентифікації об'єктів на основі радіочастотного сигналу. Вона передбачає використання RFID-міток, які містять інформацію про об'єкт, та зчитувачів, що безконтактно ідентифікують ці мітки на відстані.

Перевагами RFID є:

- швидкість зчитування;
- одночасно можна зчитати декілька міток;
- відсутність необхідності прямої видимості;
- можливість інтеграції в пластикові поверхні;
- підвищена надійність і довговічність
- перезаписуваність.

Недоліками RFID є:

- не велика відстань зчитування;
- дороговизна;
- можливі поміхи від металів або інших приладів.

RFID системи широко застосовуються на великих підприємствах, в автоматизованих складах, а також у системах високочастотного контролю.

Програмне забезпечення класу WMS є центром управління складом. WMS забезпечує повний контроль над усіма процесами: від прийому вантажів до їх відвантаження, контролює запаси, оптимізує розміщення товарів, керує маршрутами.

Інтеграція WMS з ERP дозволяє зв'язати декілька систем що є корисним при впровадженні даного рішення в вже існуючу систему. Таке рішення забезпечує легке впровадження нового рішення, видимість та управління всім з одного місця що в свій час дає більш повну та чітку картину того що та як відбувається на складі або підприємстві.

На даний момент є популярним створення цифрових двійників складських систем віртуальні копії фізичного об'єкта, що дозволяють у режимі реального часу проводити аналіз, прогнозування та оптимізацію роботи складу. За допомогою цифрових двійників можна моделювати різні сценарії, оцінювати ефективність розміщення ТМЦ, виявляти вузькі місця у логістичних процесах, а також тестувати нові алгоритми без ризику збоїв у реальній системі.

Такі рішення зазвичай реалізуються на великих підприємствах із високим рівнем автоматизації, однак концепції цифрового моделювання поступово впроваджуються і в навчальні процеси, зокрема у вигляді лабораторних макетів.

1.3 Опис архітектури системи (Мини-Load AS/RS)

Для цього проекту була вибрана система Мини-Load AS/RS оскільки вона демонструє схему роботи роботизованого сховища найнаочніше.

Система Mini-Load AS/RS є системою що включає в себе, стелажі, штабелери, конвеєр, контейнери, систему керування. Вона має доволі високу швидкість та щільність зберігання малогабаритних товарів.

Вона призначена для автоматизованого управління зберіганням, пошуком і видачою об'єктів у контейнерах, лотках або коробках. На відміну від систем Unit Load, які оперують піддонами, Mini-Load-системи працюють з не важкими ТМЦ за звичай до 50 кг, що робить їх ідеальними для підприємств, де потрібно обробляти велику кількість різнорідних товарів з високою точністю та швидкістю.

Стелаж це спеціально сконструйовані металеві конструкції з комірками, в яких зберігаються контейнери або ящики з продукцією. Стелажі розташовані у кілька рядів і мають кілька рівнів. Конструкція стелажів оптимізована для роботи з вузькими проходами, в яких переміщуються транспортні механізми. Кожна комірка має унікальну адресу в системі – координати X, Y, Z. Стелажі можуть мати глибину 1 або 2 контейнери (глибоке зберігання), залежно від потреб у щільності або швидкості доступу.

Штабелери – це автоматизовані машини, що рухаються по вузьких між стелажних коридорах і завантажують або розвантажують контейнери. Вони переміщуються вертикально і горизонтально, а також механізм захвату – гріпер або вилка, що витягує або вставляє контейнер у стелаж. Штабелери у Mini-Load-системах зазвичай легші й швидші, ніж у Unit Load, і можуть досягати швидкості до 3-4 м/с при русі, що забезпечує швидке обслуговування великої кількості запитів.

Об'єкти зберігаються в контейнерах, пластикових ящиках стандартизованого розміру. Кожен контейнер має унікальний ідентифікатор штрих-код або RFID, що дозволяє системі точно знати та перевірити, що і де зберігається. Контейнери можуть містити як один вид продукції, так і кілька різних позицій мульти-коміркові варіанти, для чого часто застосовуються внутрішні роздільники.

Конвеєри транспортують контейнери від точки відбору/завантаження до відповідної позиції штабелера та назад. Система конвеєрів є критично важливою

для забезпечення безперервної доставки вантажів. Зазвичай використовуються роликові або ланцюгові конвеєри, що синхронізовані з роботою штабелера.

Станції відбору та завантаження, це місце де оператори (або роботи) взаємодіють із системою: отримують потрібні контейнери, комплектують замовлення або завантажують нову продукцію. Станції можуть бути фронтальними, боковими, або розміщеними по обидва боки стелажів.

У сучасних рішеннях також застосовуються автоматизовані станції з використанням роботизованих маніпуляторів або з видачою товарі одразу до людини.

Центральним елементом системи є програмно-апаратна система керування WCS. Вона отримує запити від людини або іншої системи та потім обчислює найоптимальніший маршрут переміщення контейнера, керує всіма пристроями – штабелерами, конвеєрами, сканерами та інтерфейсами.

WCS також веде облік наявності контейнерів, реєструє кожну транзакцію, оптимізує використання простору та ресурсу обладнання. Додатково можуть бути модулі прогнозування навантаження, планування обслуговування, енергозбереження тощо.

Принцип роботи системи Mini-Load AS/RS можна умовно поділити на такі етапи:

- оператор або автоматична лінія подає контейнер з новим товаром на приймальну конвеєрну лінію;
- контейнер сканується, його дані реєструються в системі;
- WCS визначає найоптимальніше місце зберігання;
- контейнер транспортується до вільного штабелера;
- штабелер переміщується до визначеної комірки та вставляє контейнер;
- система оновлює базу даних про нове розташування;
- WMS отримує запит на видачу певної позиції;
- WCS визначає точку розташування відповідного контейнера;
- штабелер витягує контейнер і подає його на станцію відбору;
- оператор або робот вилучає товар із контейнера або сам контейнер.

Якщо контейнер ще містить інші позиції, він повертається назад у стелаж. У разі повного спорожнення контейнер очищується та може бути використаний повторно.

Переваги архітектури Mini-Load AS/RS

- висока щільність зберігання завдяки використанню вузьких проходів і багаторівневої структури;
- швидкий доступ до товарів мінімальні затримки між запитом і отриманням;
- інтеграція з іншими системами легка адаптація до ERP, CRM.

2 РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ МАКЕТУ

Система роботизованої виробничої ділянки зберігання ТМЦ має ряд необхідних для стабільної роботи компонентів. Основними компонентами системи є: вилка для захвату лотків, шатл, балка з рейкою, напрямні опори для горизонтального руху, а також склад, який містить 32 комірки для зберігання ТМЦ.

Геометричні розміри комірок для зберігання в макеті необхідно розробити в масштабі 1:10 до реальних параметрів з метою побудови академічної моделі системи. Тепер, за наявності деяких лімітованих геометричних охоплень системи та обмеження розміру макету, прийнято рішення відмовитись від застосування повноцінного підйомного механізму шатлу, який використовується в Mini Load AS\RS [4] для вертикального руху платформи. Визначені наступні необхідні характеристики підйомного елемента: компактний розмір до 5см в довжину, невелика вага до 10кг, достатня потужність для демонстраційної роботи. Таким чином, буде розроблений альтернативний механізм, який забезпечує потрібну рухомість шатлу з вилкою для захвату лотків. Структурну схему підключення наведено на рисунку 2.1.

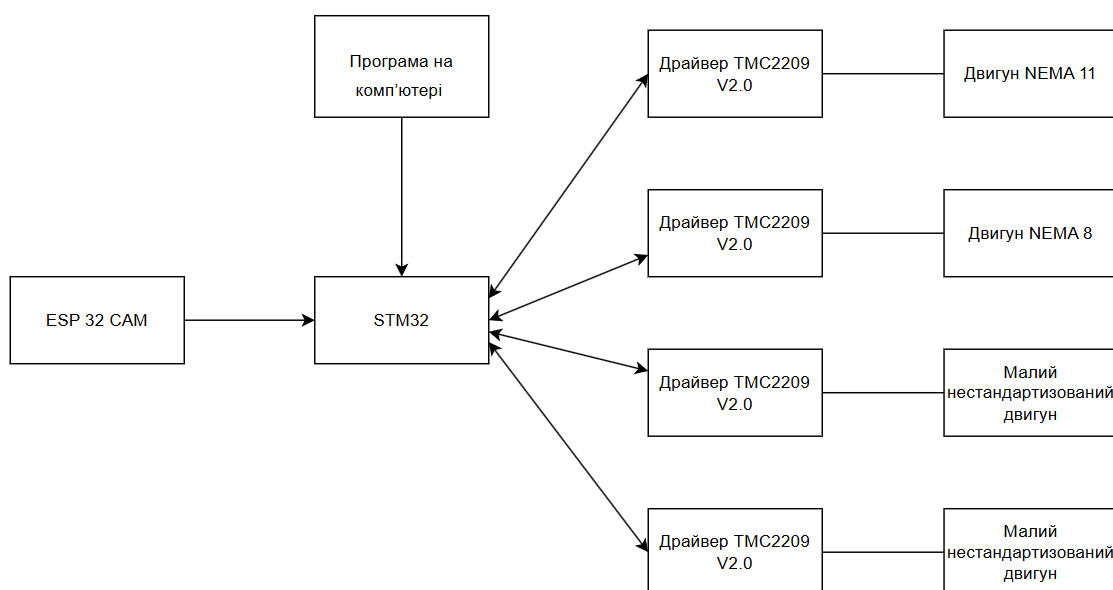


Рисунок 2.1 – Структурна схема

Запропонована модель передбачає використання компактного двигуна NEMA8. Рушійна сила обертального моменту двигуна передається на балкову рейку за допомогою прямого зчеплення шестерні, конфігурація якої має модуль 0,3 мм та 25 зубців, яка, знаходячись в зчепленні з рейкою, починає вертикальний рух шатлу по балці. Такий підхід до проектування підйомного механізму шатлу дозволяє уникнути перешкод, які виникають при масштабованому зменшенні макету системи.

Модель системи, вимагає великої точності 3D друку макету з причин зменшеної масштабованості. Як наслідок, для 3D друку були застосовані мінімальні значення в 0,05 мм для балкової рейки, яка слугує напрямною для підйому шатлу з ТМЦ. Точність в 0,1 мм була призначена для друку нижньої та верхньої баз системи. Нарешті, точність в 0,3 мм є найменш прецизійною та використовувалась для друку інших частин системи – це збільшило швидкість створення макету та зменшило вихідну вартість друкарських робіт.

Операційний алгоритм роботи макету складається з ряду послідовних етапів. Першою в контакт з ТМЦ вступає плата ESP32 CAM, яка перманентно сканує зображення з камери, направленої на лоток шатлу. Така плата обробляє отримане зображення, перевіряючи його на валідність даних та дисперсію значень, діапазон яких має коливатись в межах від 1 до 32 (лімітовано кількістю комірок в системі).

В разі успішної перевірки отримані дані з QR коду транслюються до плати STM32 за допомогою порту UART. Основне призначення STM32 полягає в зберіганні бази даних з ID комірок, звірення отримуваних значень від ESP32 CAM зі збереженими даними в базі, управління напрямом руху та кількістю обертів двигунів, зокрема NEMA 8 та інших типів рушійних приладів.

Характер передаваних даних, які отримує STM32, зводиться до номеру контейнеру (з двох джерел: ESP32 CAM та програми на комп'ютері), ID комірки, запиту на видання/приймання ТМЦ у формі числового значення від 0 до 1. База даних, з якою відбувається звірення отримуваних значень, складається не тільки з ID комірок, а і їх координат у просторі у вигляді аргументів X, Y за наявності контейнеру у комірці, або значення 0 за його відсутності. У такий спосіб

розроблений алгоритм перевірки отримуваних та наявних значень на платі STM32 забезпечує високу точність роботи системи та переміщення контейнерів з ТМЦ.

Після етапу звірення даних STM32 робить логічний висновок про стан комірки, який характеризується бінарними даними та становить 0 (вільна) або 1 (зайнята – знаходиться у використанні). Відповідно, якщо під час звірки отримуваних та наявних даних STM32 з'ясується, що запит на використання комірки надійшов до вже зайнятої одиниці, то плата відправляє помилку на комп'ютер. Такий же процес відбувається за зворотних умов – надходження запиту на видання об'єкту з вільної комірки. Повідомлення про помилку має стандартний характер та надається у формі текстового повідомлення та логічного типу помилки (запит на використання зайнятої комірки, або навпаки). Алгоритм роботи приведено на рисунку 2.2.

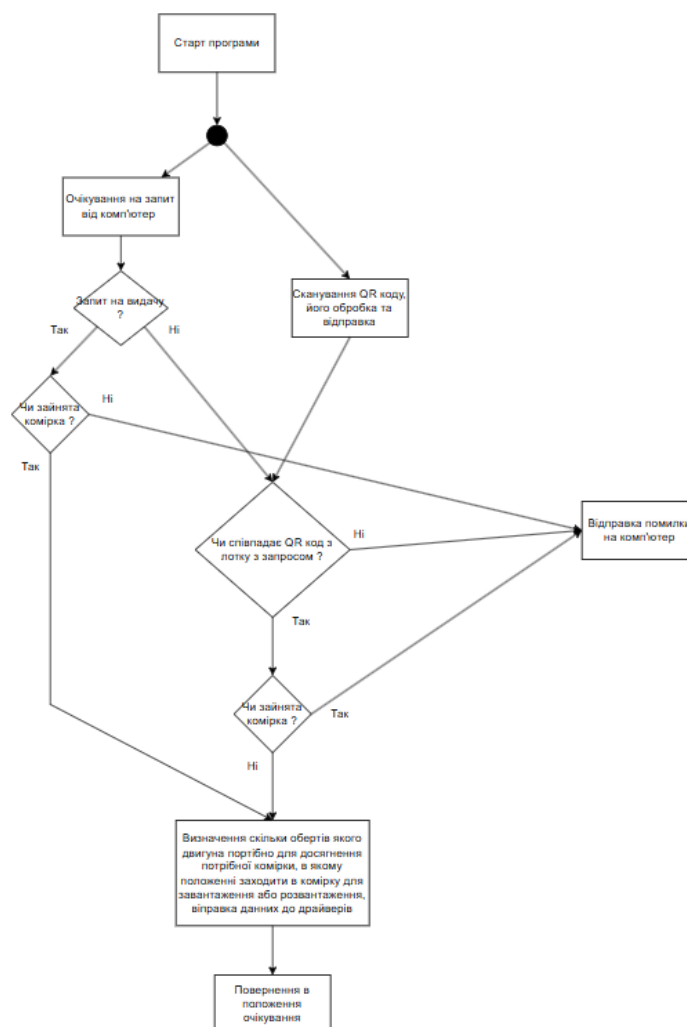


Рисунок – 2.2 Алгоритм роботи програми

3 МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ МАКЕТУ

3.1 Постановка задачі, опис середовища розробки, розробка архітектури макету

Основною задачею даної роботи є розробка лабораторного макету роботизованої виробничої ділянки зберігання ТМЦ. Для цього потрібно розглянути існуючі рішення та проаналізувати їх що вже було зроблено у попередніх розділах.

Також треба спроектувати макет та розробити програмне забезпечення які будуть підходити до поставлених вимог. Раніше ми обрали систему Mini load AS/RS в якості типу для нашого макету оскільки вона найбільш демонстративна та доволі легка як в розумінні так і у відтворенні. Також для переміщень будуть використовуватися двигуни типу NEMA 11/17 для переміщення балки, NEMA 8 для переміщення шатлу вверх вниз та менші не стандартизовані двигуни для висування та втягування вилки.

У якості середовища розробки було обрано Autodesk Fusion оскільки маютьяся практичні навички при роботі з даним ПО та його можливостей буде цілком достатньо для виконання поставленої задачі. Під час створення проекту будь використовуватися функції Create sketch, Extrude, Revolve та інші які зазначені на рисунку 3.1.

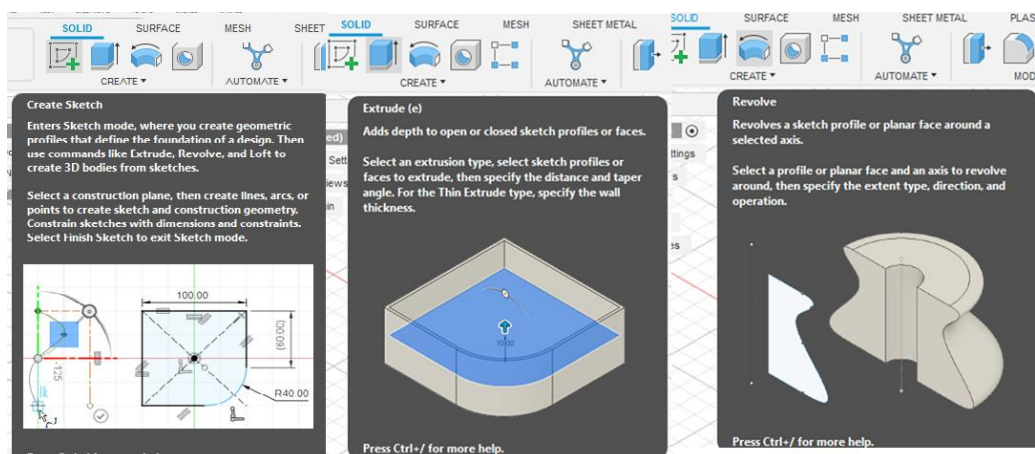
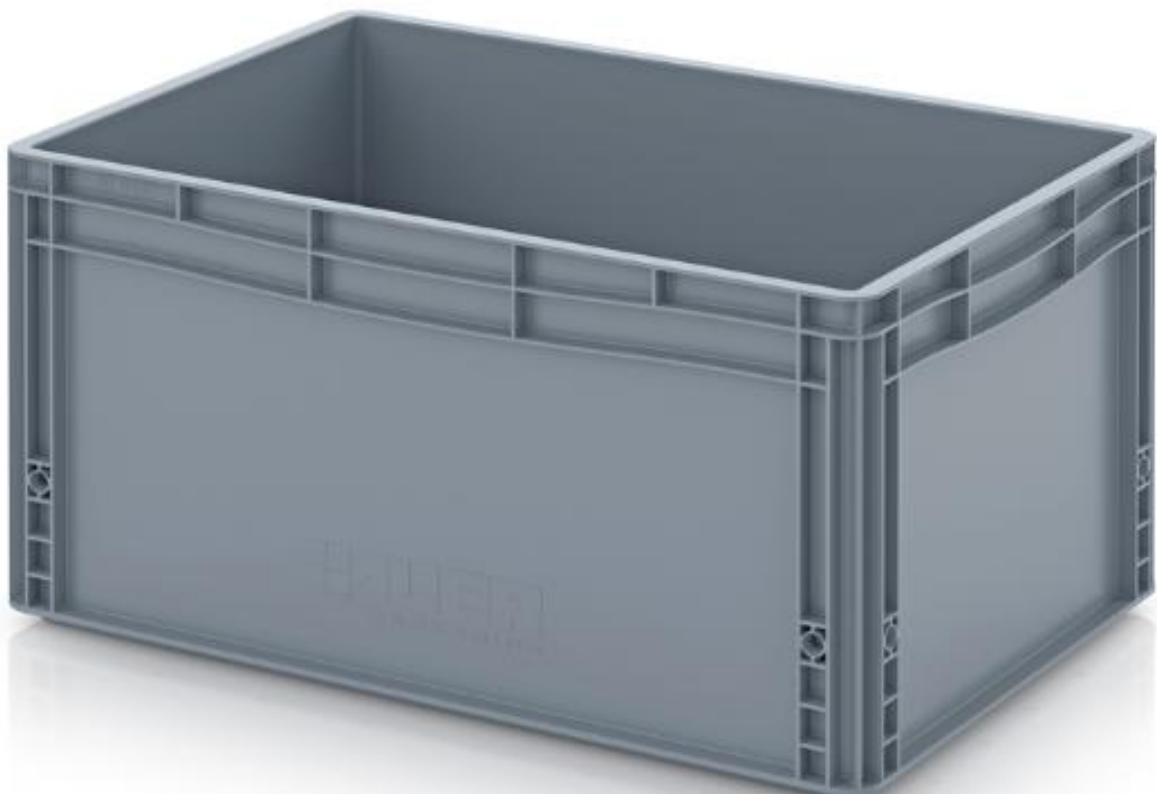


Рисунок 3.1 – Приклад використовуваних функцій

Оскільки ми розроблюємо лабораторний макет він повинен бути не великим тому ми зробимо один ряд з двома стелажми по боках та стрічку для подачі ТМЦ за схемою Mini Load AS/RS.

3.2 Проектування апаратної частини

Почнемо з проектування лотків для ТМЦ. За звичай на підприємствах використовуються стандартизовані лотки розміром $600 \times 400 \times 320$ mm приклад якого зазначено на рисунку 3.2 [11].



3.2 Рисунок – Приклад євро лотка

Тому ми візьмемо цей стандартний розмір у масштабі 1 к 10. Проектуємо лоток $60 \times 40 \times 32$ mm. Спочатку треба зробити ескіз а вже потім за допомогою функції extrude витягнути на потрібну висоту. Даний процес зазначено на рисунку, створення ескізу (рис. 3.3, а), витягування ескізу на потрібну висоту (рис. 3.3, б).

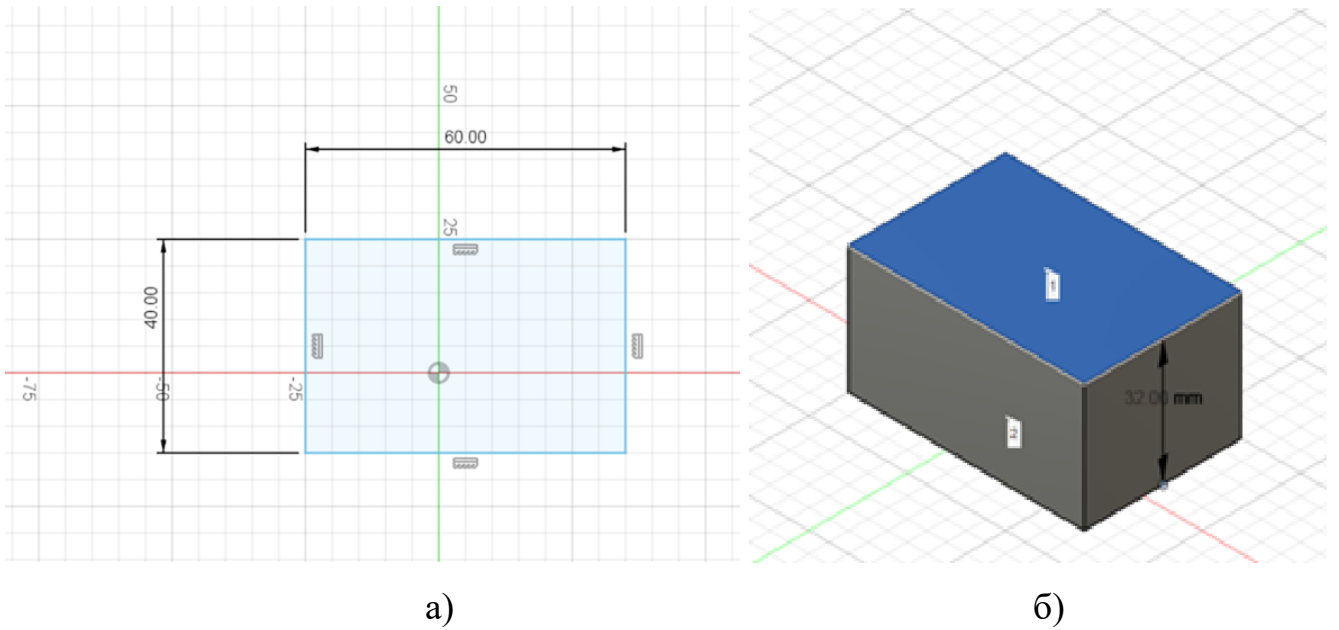


Рисунок 3.3 – Створення заготовки для лотка

Щоб куб став лотком потрібно зробити в ньому виріз. Задля для міцності зробимо стінки по 5 мм для цього також використовуємо функцію ескізу та функцію press pull для вирізання приклад зазначено на рисунку, створення ескізу (рис. 3.4, а), використання функції Press pull на 27 мм (рис. 3.4, б).

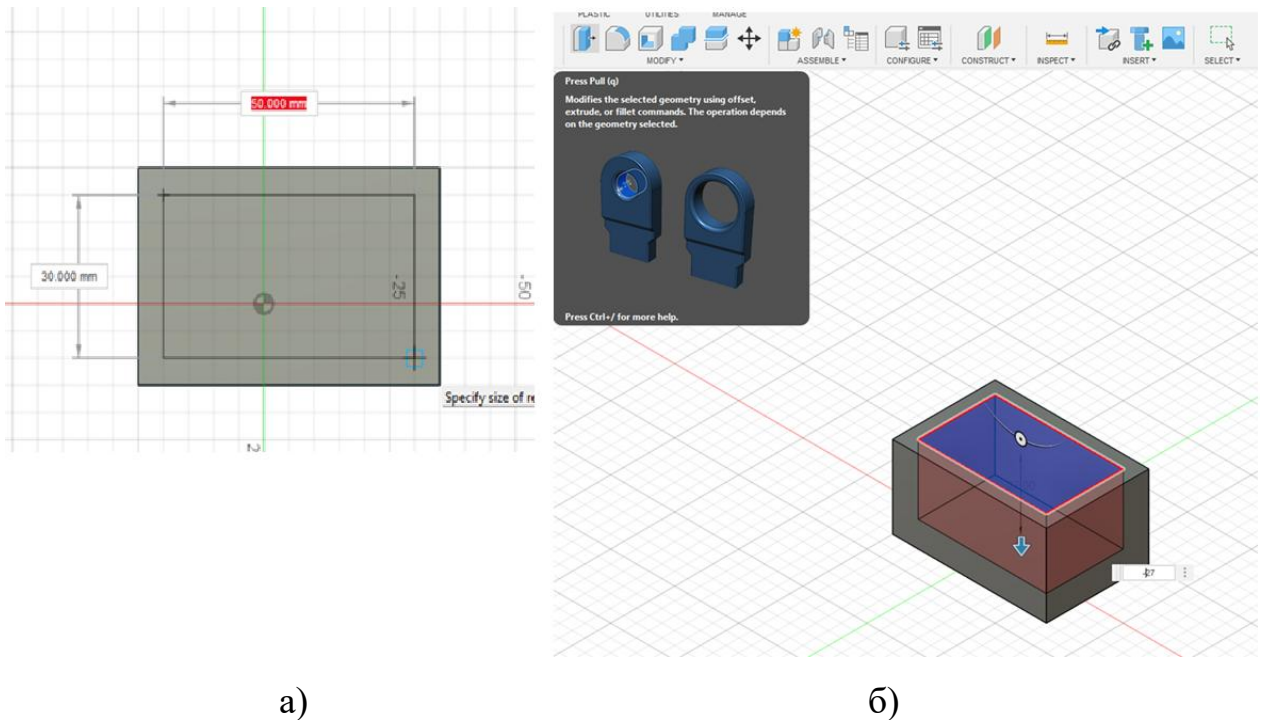
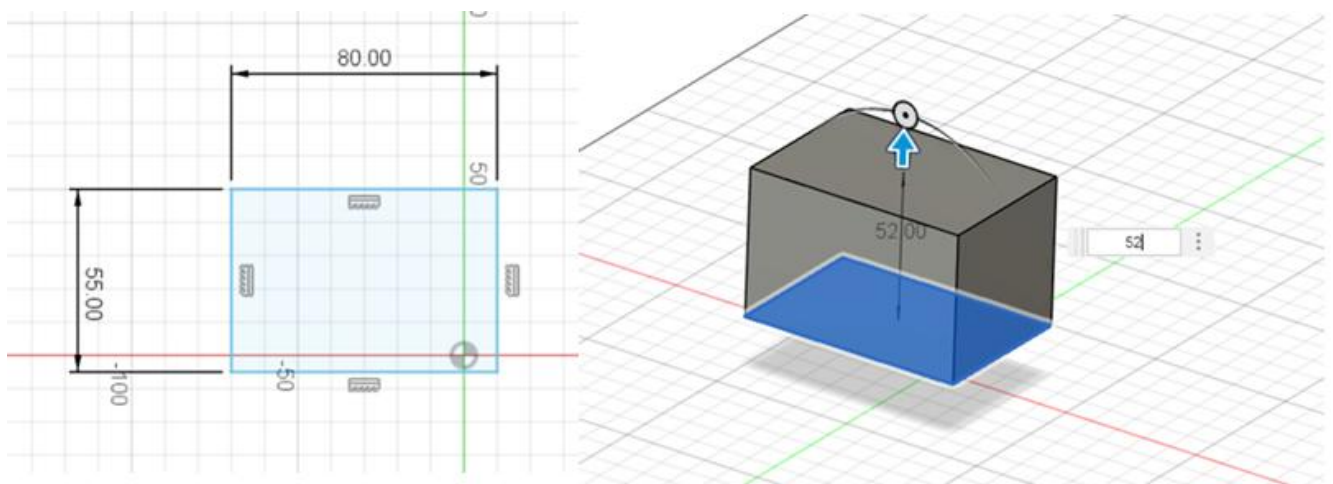


Рисунок 3.4 – Вирізання комірки у прямокутнику

Таким же чином зробимо стелаж для лотків а потім єдиний екземпляр розмножимо за допомогою функції Move/Соре. Розмір лотка $60 \times 40 \times 32$ мм тому ми робимо довжину рівній довжині лотку плюс дві стінки по 5 мм та 10 мм для похибки при роботі отримуємо 80 мм, ширину рівній ширині лотку плюс дві стінки по 5 мм та 5 мм для похибки при роботі отримуємо 55 мм, висоту рівній висоті лотку плюс 5 мм для стінок плюс 5 мм для похибки плюс 10 мм для роботи шатлу отримуємо 52 мм. Результат роботи можна бачити на рисунку, створення ескізу (рис. 3.5, а), витягування (рис. 3.5, б).

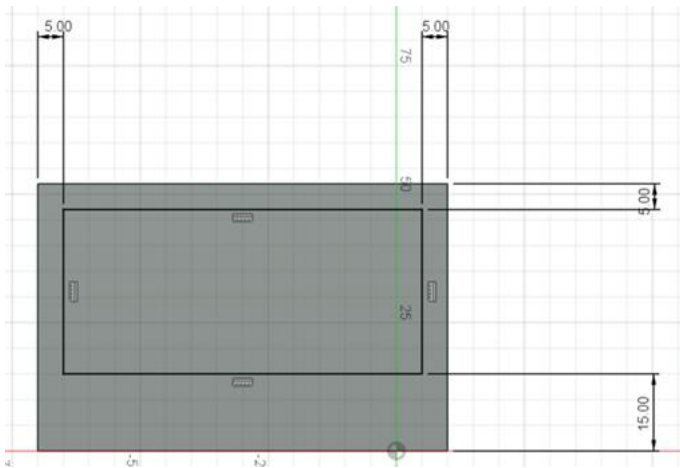


а)

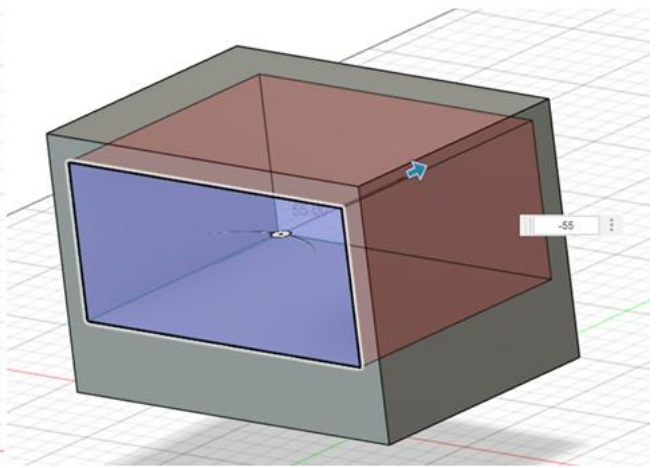
б)

Рисунок 3.5 – Створення основи для стелажа

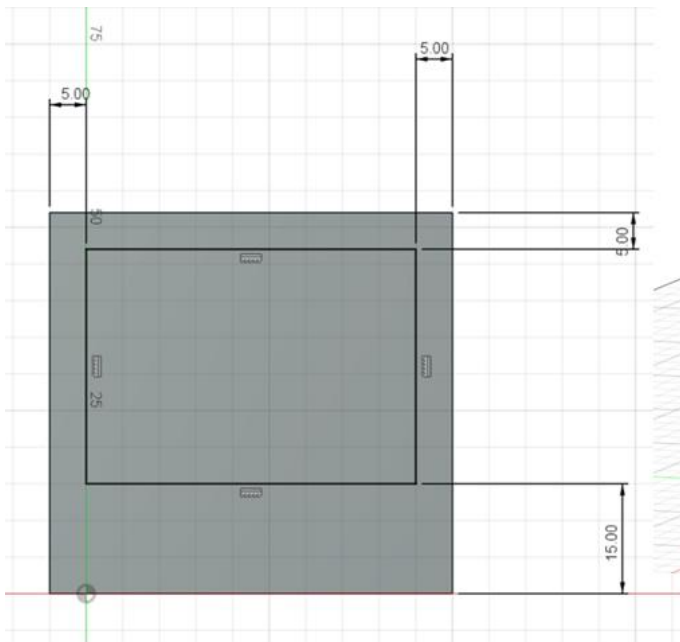
Далі потрібно зробити вирізи для того щоб туди можна було поставити лоток та було простір для роботи шатлу. Оскільки ми вже врахували усі можливі погрішності та неточності роботи шатла а товщина стінки складу 5 мм зробимо короб з балками по 5 мм. Процес роботи зазначено на рисунку, створення ескізу для бокової частини (рис. 3.6, а), виріз з боку (рис. 3.6, б), створення ескізу для вирізу з іншого боку (рис. 3.6, в), виріз з другого боку(рис. 3.6, г), створення ескізу для вирізу зверху (рис. 3.6, г), виріз зверху (рис. 3.6, д).



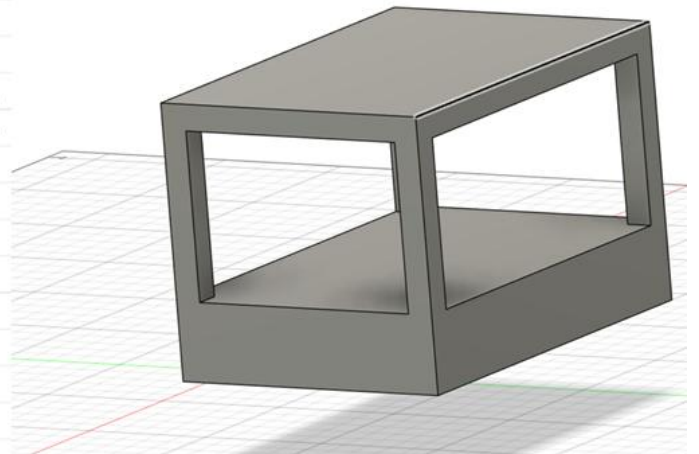
а)



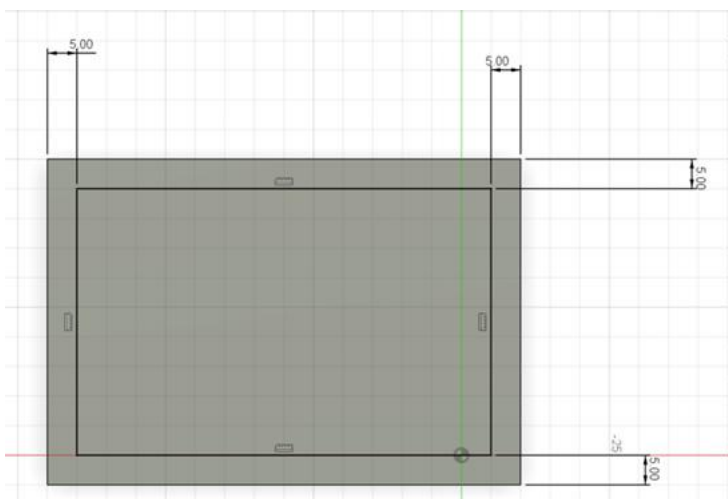
б)



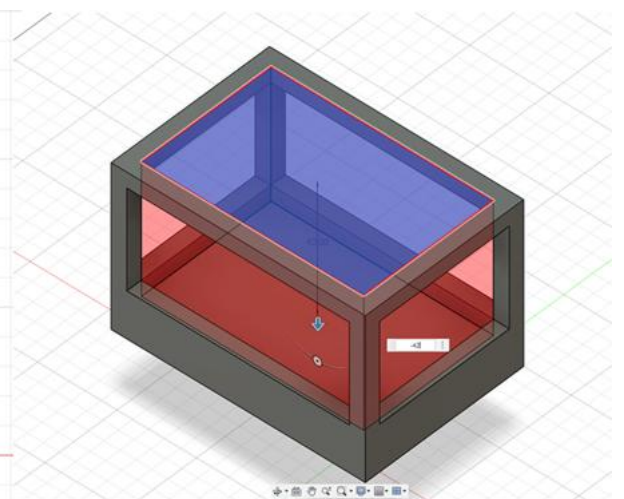
в)



г)



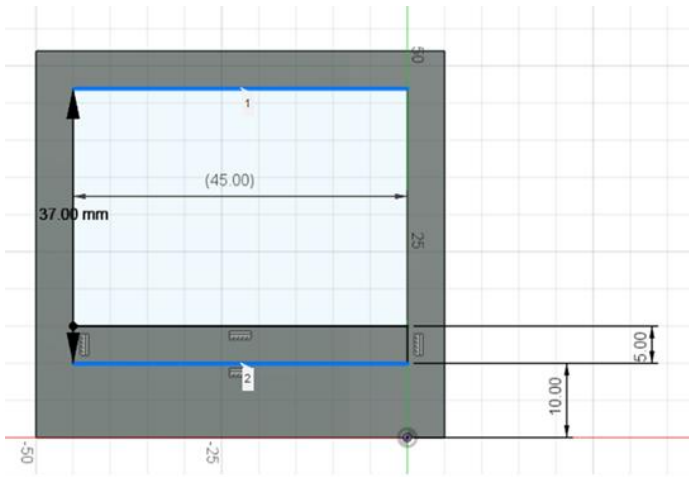
г)



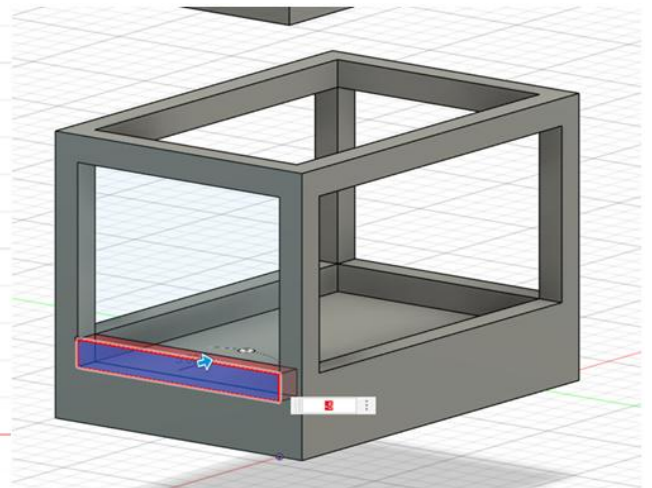
д)

Рисунок 3.6 – Вирізи у стартовій заготовці стелажа

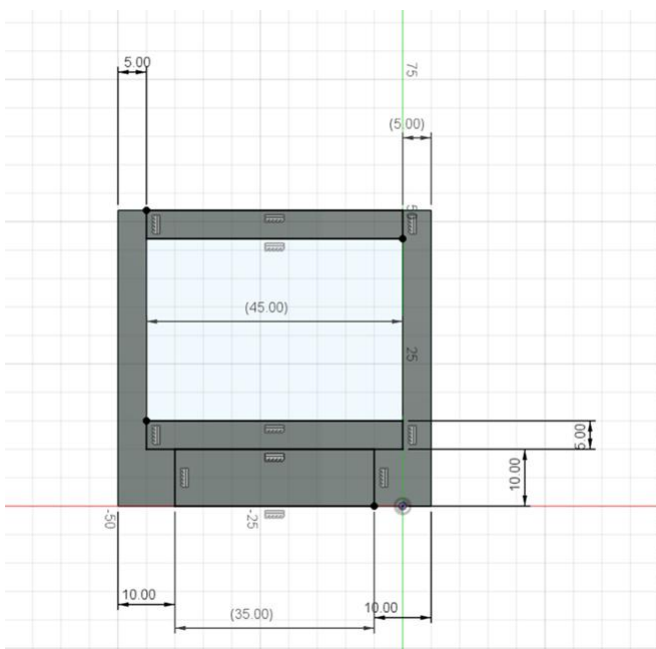
Далі потрібно зробити вирізи для того щоб маніпулятор міг брати та ставити лотки у склад. Для цього ми зробимо вирізи зверху та з низу зі сторони шатлу. Процес зазначено на рисунку, створення ескізу з боку який ми не могли вирізати раніше (рис. 3.7, а), виріз балки з боку (рис. 3.7, б), створення ескізу для роботи шатлу (рис. 3.7, в), виріз для роботи шатлу (рис. 3.7, г), створення силової частини яка не буд заважати шатлу (рис. 3.7, г).



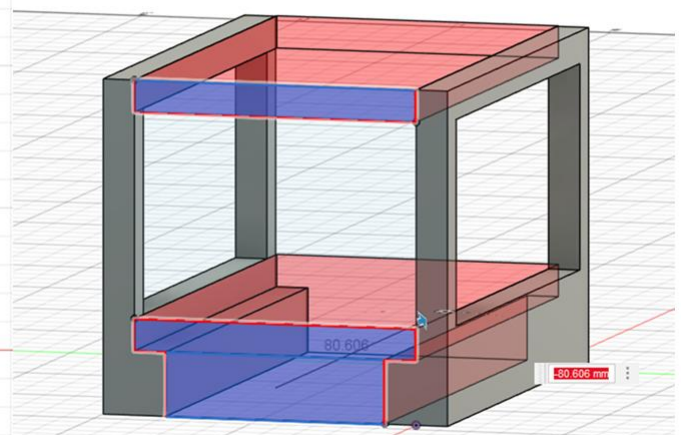
а)



б)

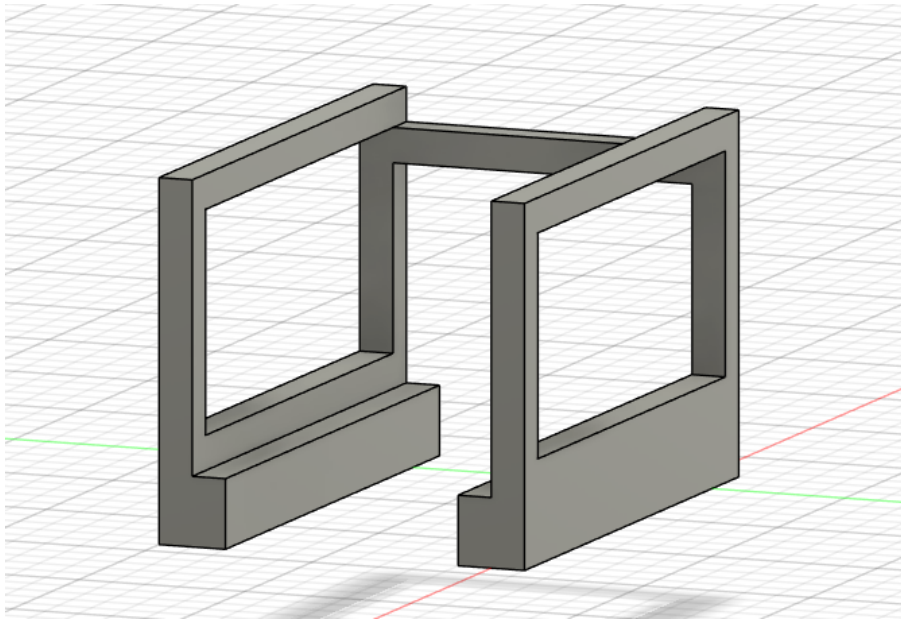


в)



г)

Рисунок 3.7 – Створення вирізів для роботи шатлу



г)

Рисунок 3.7, аркуш 2

Тепер можемо дублювати комірку до розмірів 4x4. В процесі дублювання було зроблено ряд 4x1 який був скомбінований для полегшення подальшої роботи приклад зазначено на рисунку 3.8. Після дублювання до 4x4 все було скомбіновано для спрощення пересування, подальшої роботи та 3D друку приклад зазначено на рисунку 3.9.

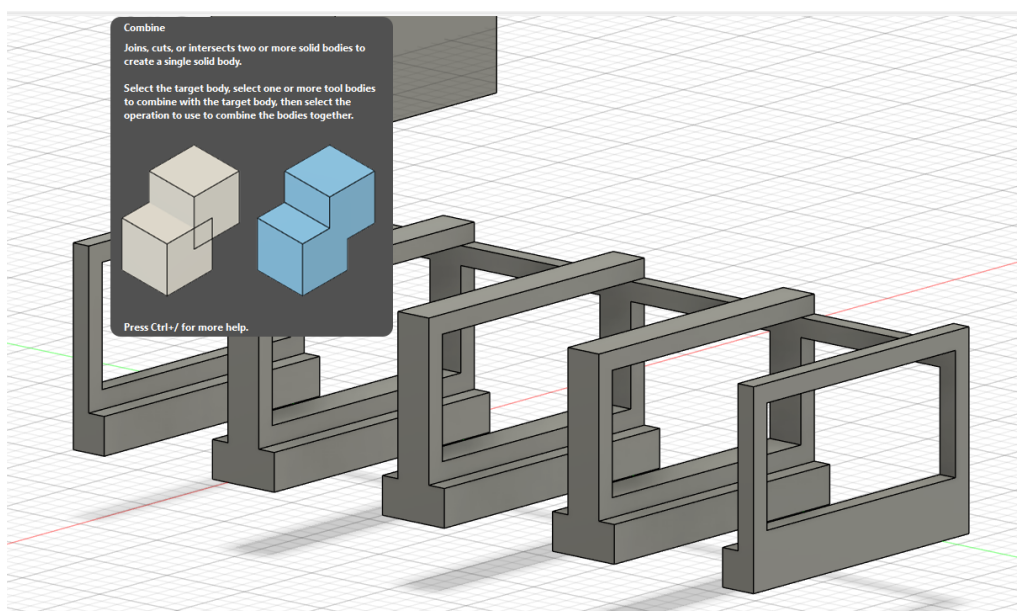


Рисунок 3.8 – Комбінування першого рядка

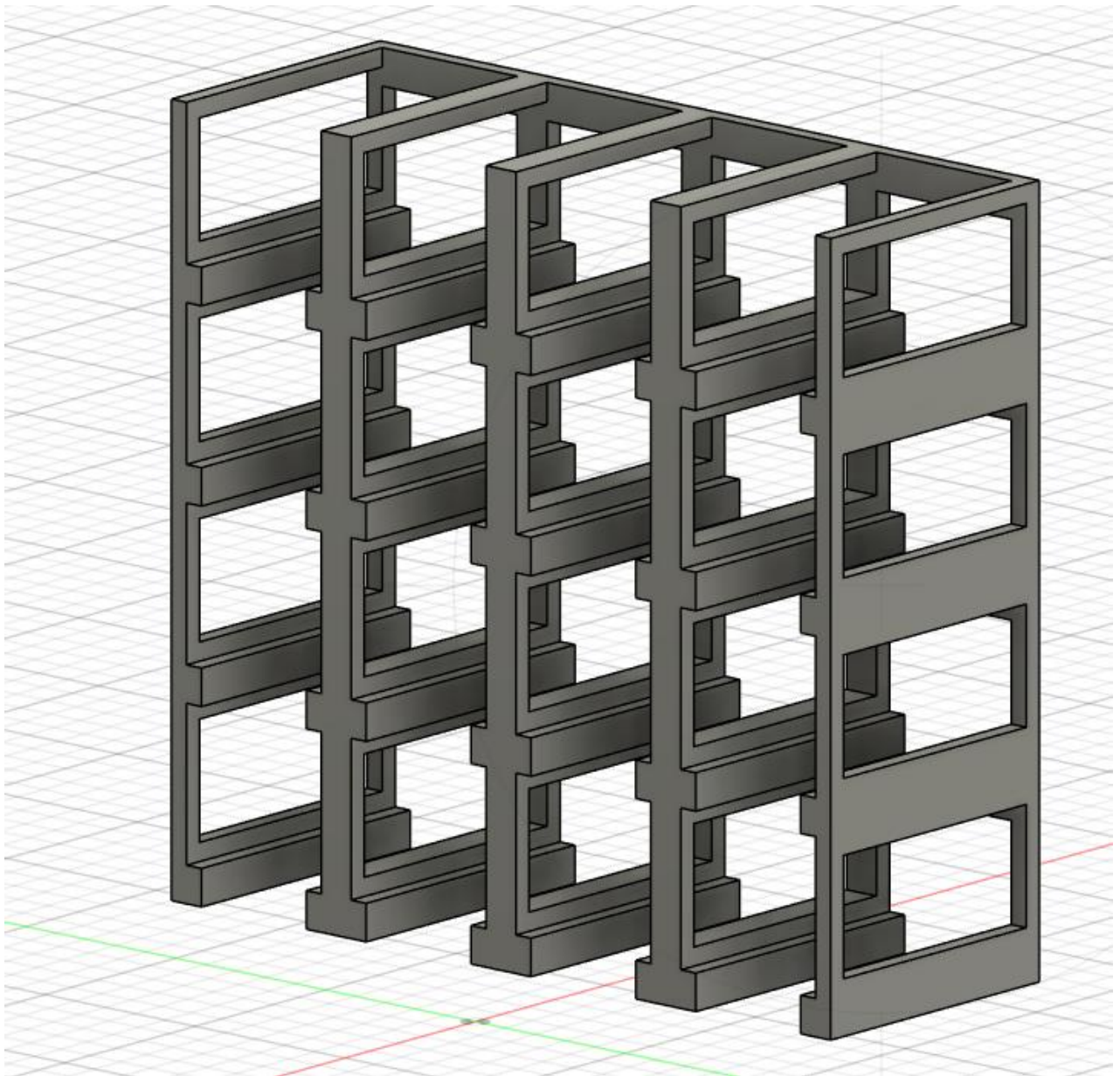
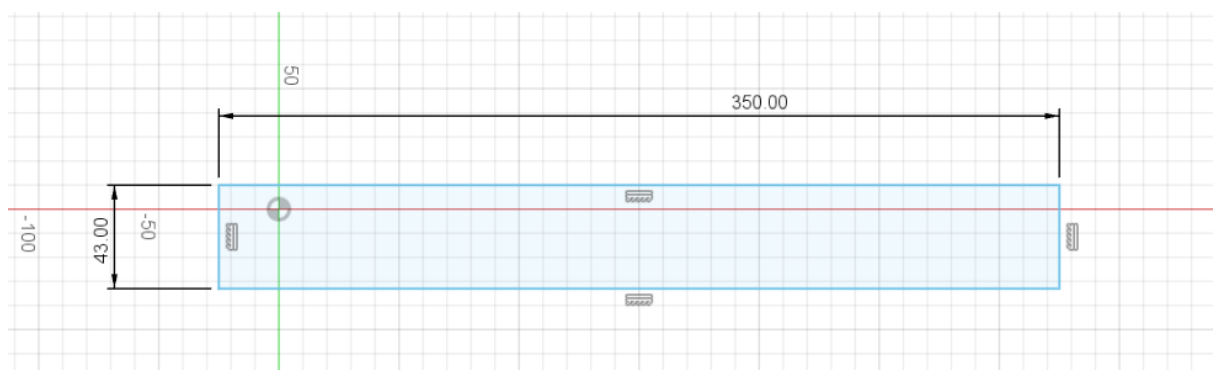


Рисунок 3.9 – Вигляд скомбінованого складу 4x4

Далі потрібно спроектувати шатл та те, як він буде пересуватися. У нашому варіанті шатл являє собою балку з рейкою, яка пересувається вздовж рядів за допомогою крокового двигуна з ремінною передачею GT2. Сам модуль шатла пересувається вздовж балки за допомогою крокового двигуна, на якому закріплена шестерня. Ця шестерня, в свою чергу, перебуває в контакті з рейкою на балці. Оскільки ми маємо невеликий масштаб, у нас немає змоги зробити шатл таким, як у промислових системах цього типу. Відповідно тут ми частково використаємо принцип Unit Load AS/RS і будемо брати лоток за допомогою вилки, яка буде

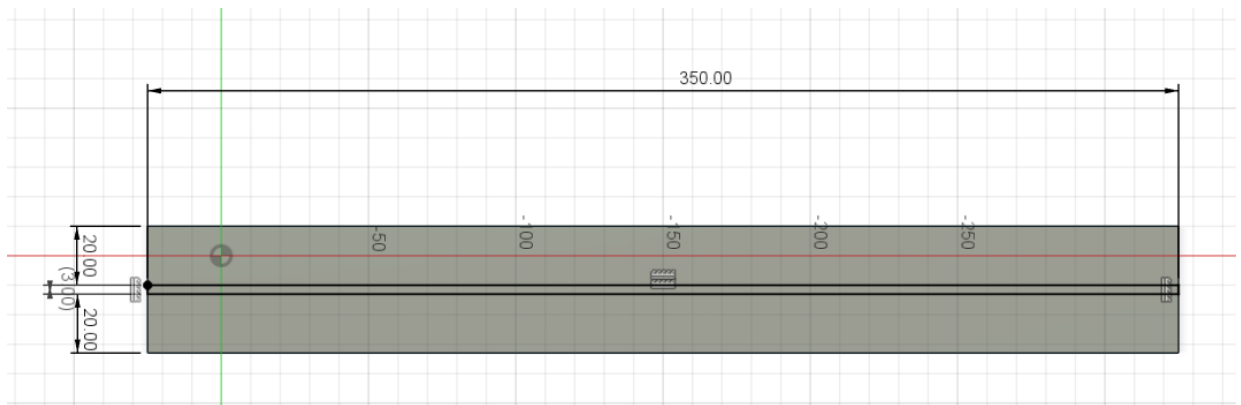
під'їжджати знизу лотка. Потім шатл трохи підійматиметься, і вилка заїжджатиме назад до шатла.

Спочатку потрібно спроектувати напрямну рейку, яка буде розташована знизу та по якій шатл пересуватиметься між рядами. Оскільки шатл пересуватиметься по рейці за допомогою підшипників $608\ 8 \times 22 \times 7$ мм. Таких підшипників буде цілком достатньо для роботи під таким невеликим навантаженням. Ширини у 3 мм для напрямної буде цілком достатньо, оскільки вона не несе жодного фізичного навантаження. Для більшої надійності будемо використовувати 8 мм як посадкове місце для підшипника. Зазор між балкою шатла та напрямною у 2 мм з кожного боку буде достатнім, при цьому не надто великим. Також товщина стінки балки у 5 мм з кожного боку буде достатньою, оскільки на рівні та біля напрямної балка буде широкою – потрібно встановити по два підшипники з кожного боку. У результаті отримуємо: $3+2+2+5+5+8+8=33$ мм. Для більшої стійкості нижньої основи та подальшої модернізації додаємо ще 10 мм – отримуємо ширину бази 43 мм. На цьому етапі довжина бази не грає великої ролі, тому ми встановлюємо 350 мм – з можливістю подальшої зміни. Оскільки напрямна не отримує великого навантаження, зробимо її висотою 10 мм. Процес та результат проектування нижньої бази з напрямною зазначено на рисунку, ескіз (рис. 3.10, а), витягування ескізу (рис. 3.10, б).



а)

Рисунок 3.10 – Процес та результат проектування нижньої бази



б)

Рисунок 3.10, аркуш 2

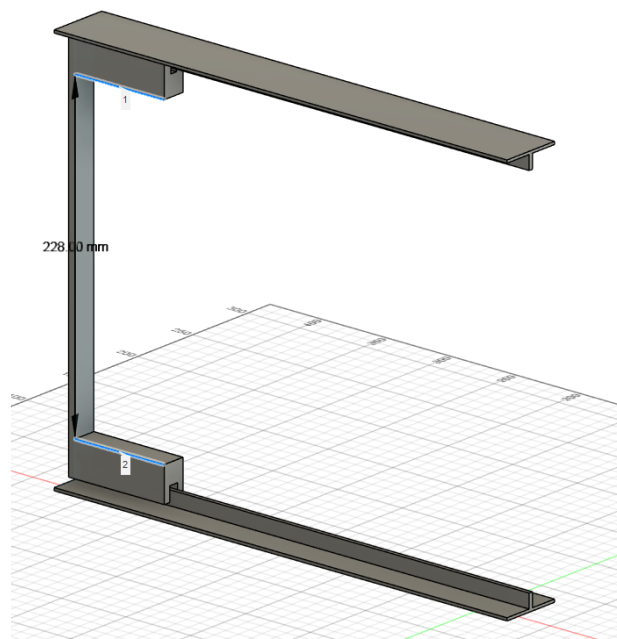
Далі потрібно спроектувати балку для шатла. Як було вище зазначено, товщини стінок у 5 мм з кожного боку біля нижньої напрямної буде достатньо. Також, ми зробимо зазор 3 мм від нижньої точки до бази та 3,5 мм від прорізу до верху напрямної, а бокові зазори по 2 мм з кожного боку.

З верхньою частиною ми зробимо те саме, але із зазорами по 1 мм з кожного боку замість 2 мм, оскільки дана напрямна не несе зовсім ніяких навантажень, тому за її допомогою ми зможемо отримати вищу кінематичну точність. На даному етапі висота також не дуже важлива, і ми будемо змінювати її пізніше. Приклад ескізу наведено на рисунку 3.11.

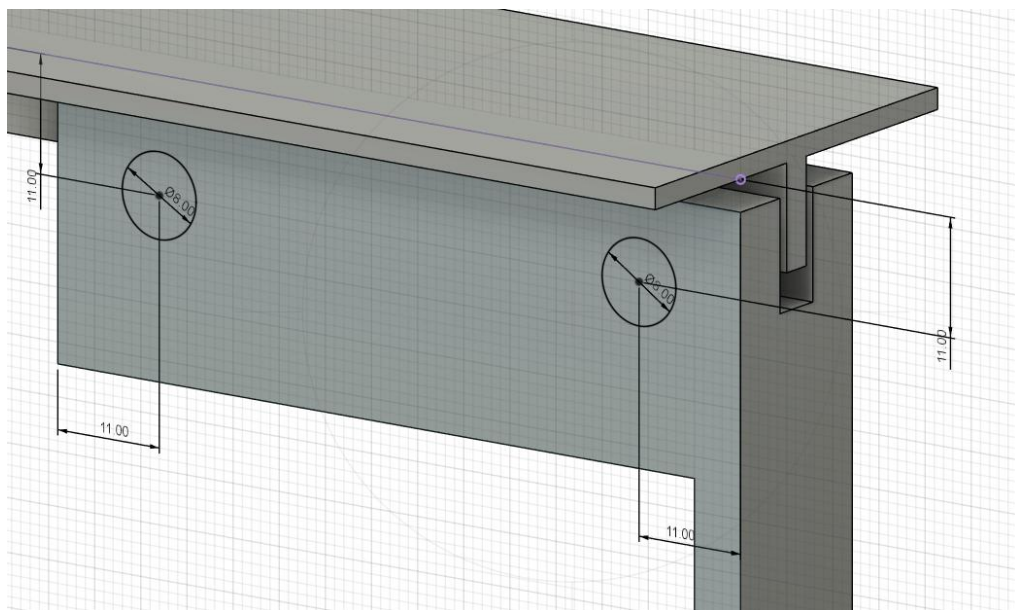


Рисунок 3.11 – Ескіз балки

Тепер нам потрібно зробити посадкові місця для основних підшипників, їх буде по 2 з кожної сторони кожного повзунка для підвищення кінематичної точності. Процес створення посадкових місць зазначено на рисунку, вигляд балки (рис. 3.12, а), база для додаткових розширень для підшипників та створення ескізів для посадкових місць для підшипників (рис. 3.12, б), створення посадкових місць для підшипників (рис. 3.12, в).

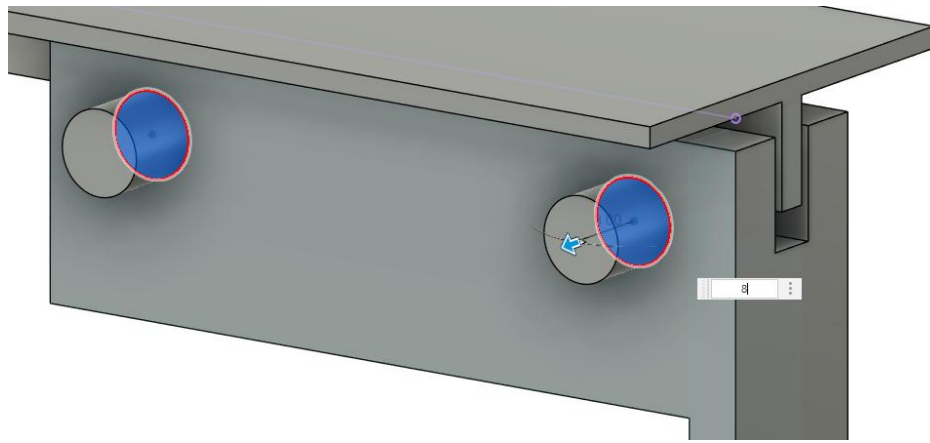


а)



б)

Рисунок 3.12 – Створення посадкових місця для підшипників



в)

Рисунок 3.12, аркуш 2

Для пересування балки ми будемо використовувати ремінну передачу для якої потрібно зробити місце для фіксування на шатлі. Це рішення не є самим оптимальним але у нашому масштабі по іншому не зробити. Ми створимо бокову площину шириною 18 мм приклад зазначено на рисунку 3.13, оскільки ремінь 6 мм та підшипники 7 мм та ще про запас. Потім на цю площину ми поставимо рейку для GT2 ременя шириною 6 мм. Для цього ми скористаємося плагіном GFGearGenerator у Fusion його можна знайти в add-ins приклад зазначено на рисунку 3.14.

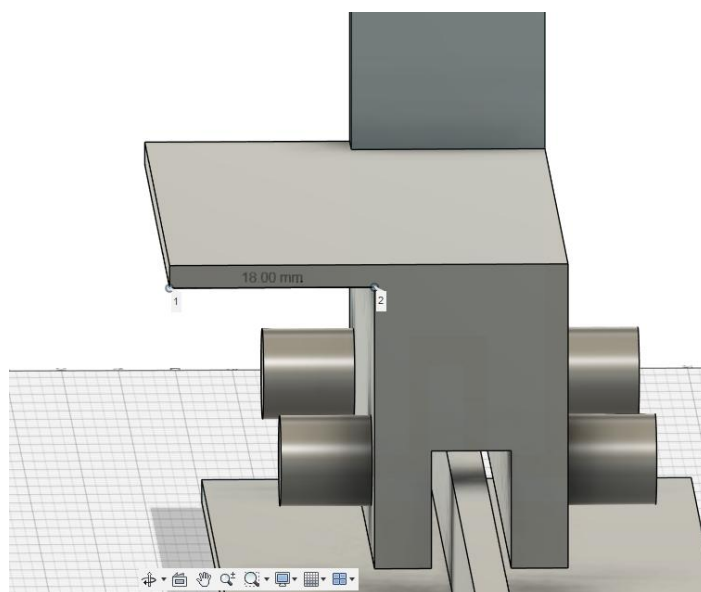


Рисунок 3.13 – Створення площини для рейки

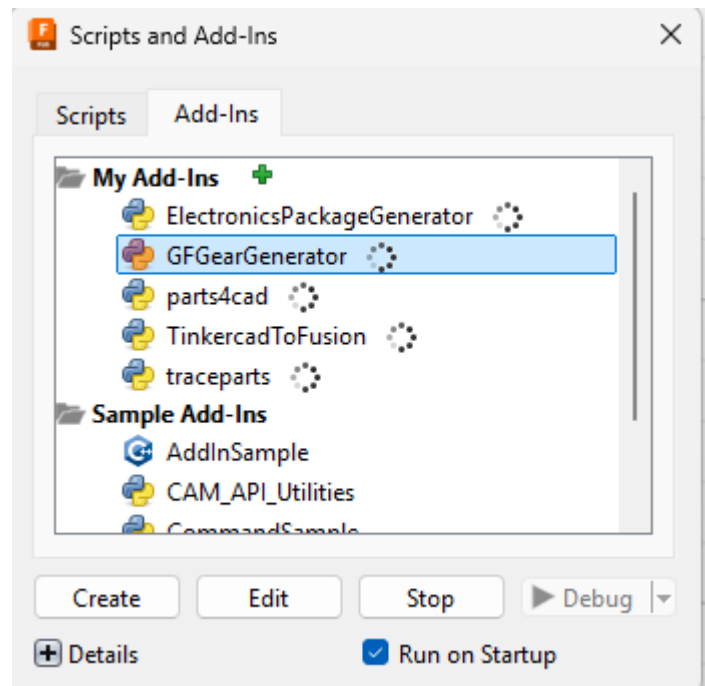


Рисунок 3.14 – Плагін

Для паса gt2 краще всього підходять такі значення як на рисунку 3.15

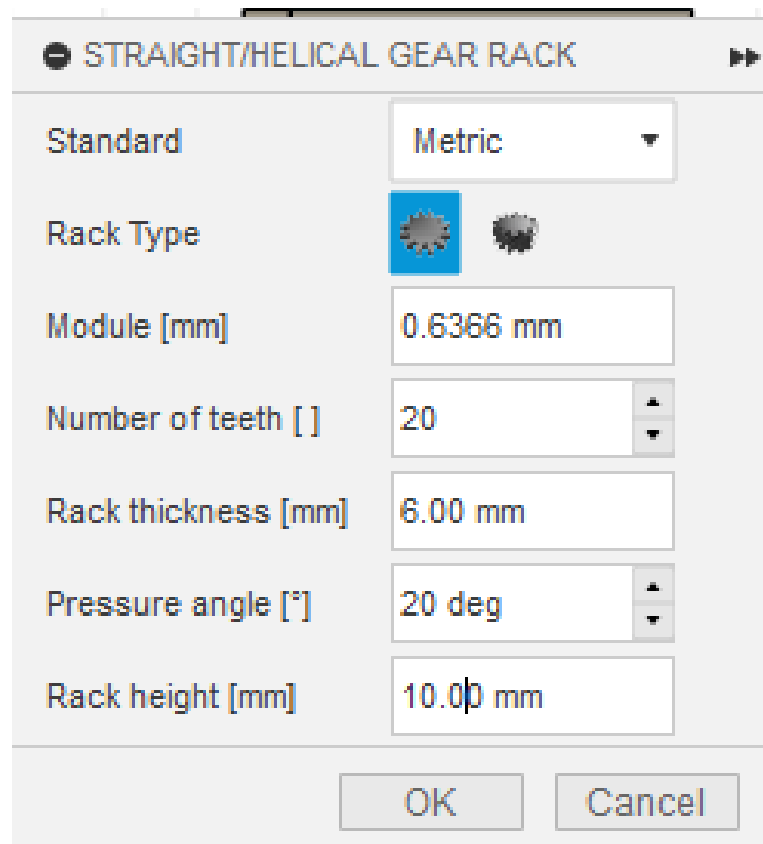
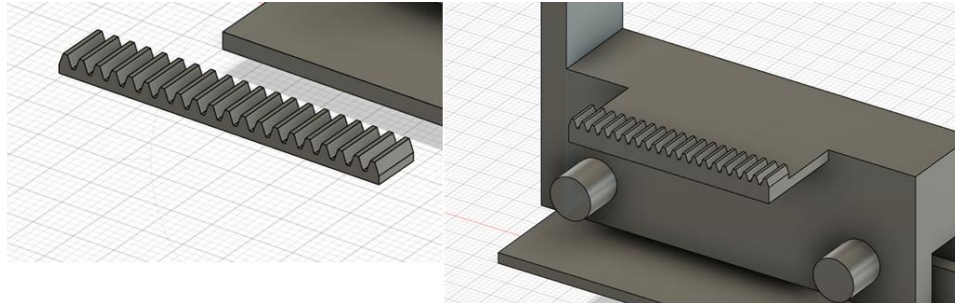


Рисунок 3.15 – Налаштування рейки

Після отримання рейки ставимо її на раніше зроблену площину та прибираємо зайве. Результат роботи зазначено на рисунку, отримана рейка (рис. 3.16, а), приєднана рейка до площини (рис. 3.16, б).



а)

б)

Рисунок 3.16 – Приєднання рейки

Далі потрібно створити частину шатлу, яка буде відповідати за переміщення по балці ввєрх вниз. Для цього спочатку потрібно зробити Т-подібну балку. Для цього ми зробимо прямокутник від низу до верху балки шириною в 10 мм та товщиною в 15 мм, а потім зробимо в ній виріз. Для переміщення шатлу по балці будуть використовуватися підшипники розмірами $3 \times 7 \times 3$ мм. Потім ми зробимо вирізи по 4 мм глибиною та 13 мм шириною, надалі в цих вирізах будуть знаходитися підшипники а все інше на шатлі буде за Т-подібною балкою. Приклад зображено на рисунку 3.17. Оскільки Т-подібна балка висока, товщини 2 мм буде достатньо.

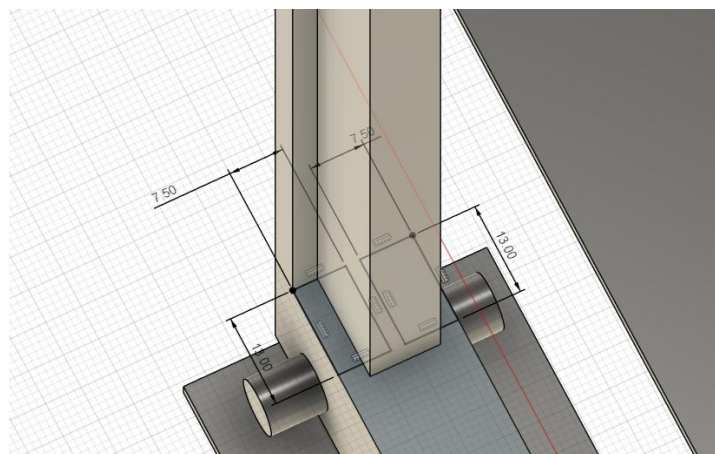
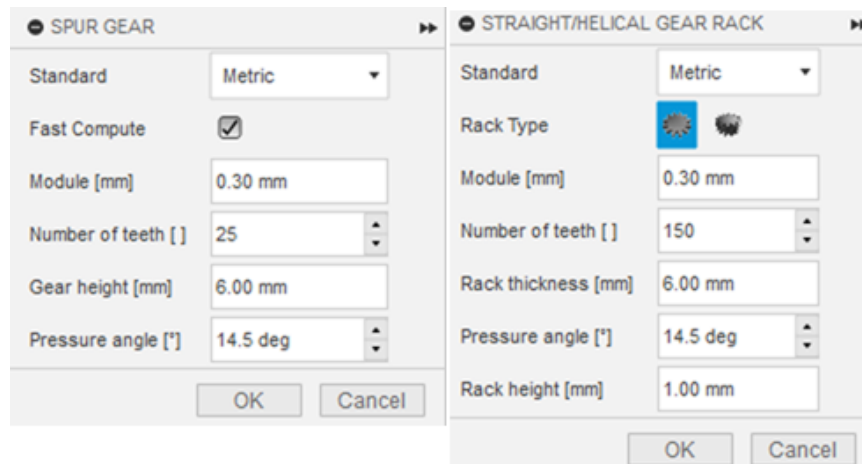


Рисунок 3.17 – Виріз та створення Т-подібної балки

Тепер можемо перейти до шестерні та ланки завдяки яким ми будемо підійматися та опускатися. Створюємо шестерню та ланку які підходять один до одного приклад зазначено на рисунку, створення шестерні (рис. 3.20, а), створення ланки (рис. 3.20, б).

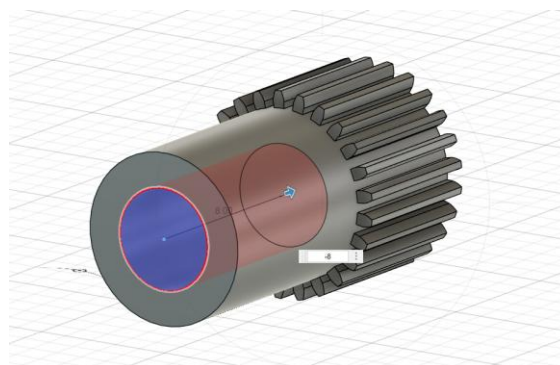


а)

б)

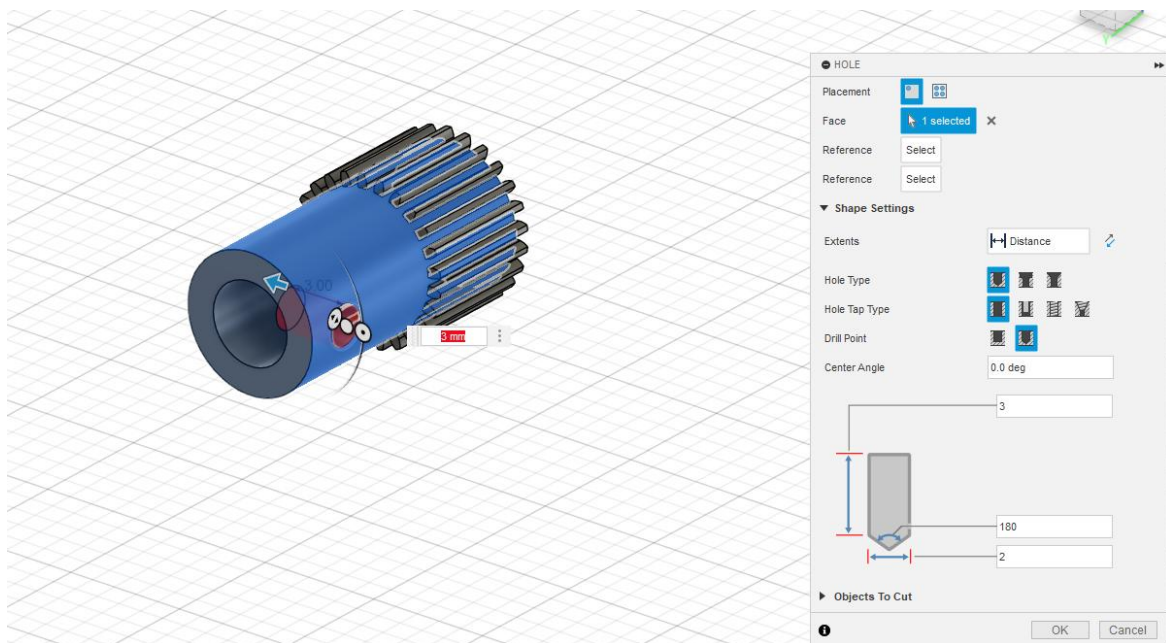
Рисунок 3.20 – Створення шестерні та ланки до неї

Для того, щоб шестерня оберталась, її потрібно поставити на вал мотору. Для переміщення по вертикалі був обраний мотор типу NEMA 8, діаметр його валу складає 4 мм та довжина виступаючої частини 10 мм тому до шестерні було додано циліндр з діаметром 6,750 мм та висотою 8 мм потім додано отвір для валу та фіксуючого гвинта результат роботи зазначено на рисунку, створення отвору для валу (рис. 3.21, а), створення отвору для гвинта (рис. 3.21, б).



а)

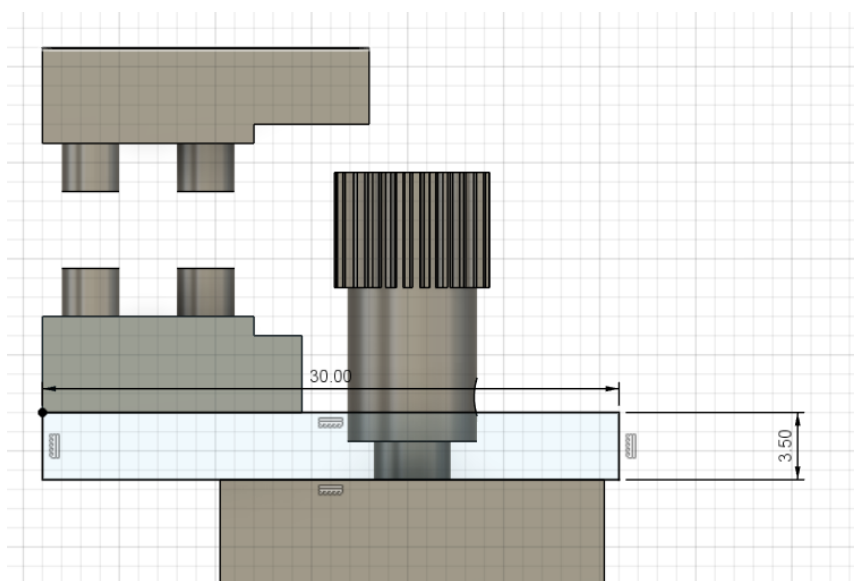
Рисунок 3.21 – Створення посадкового місця на шестерні



б)

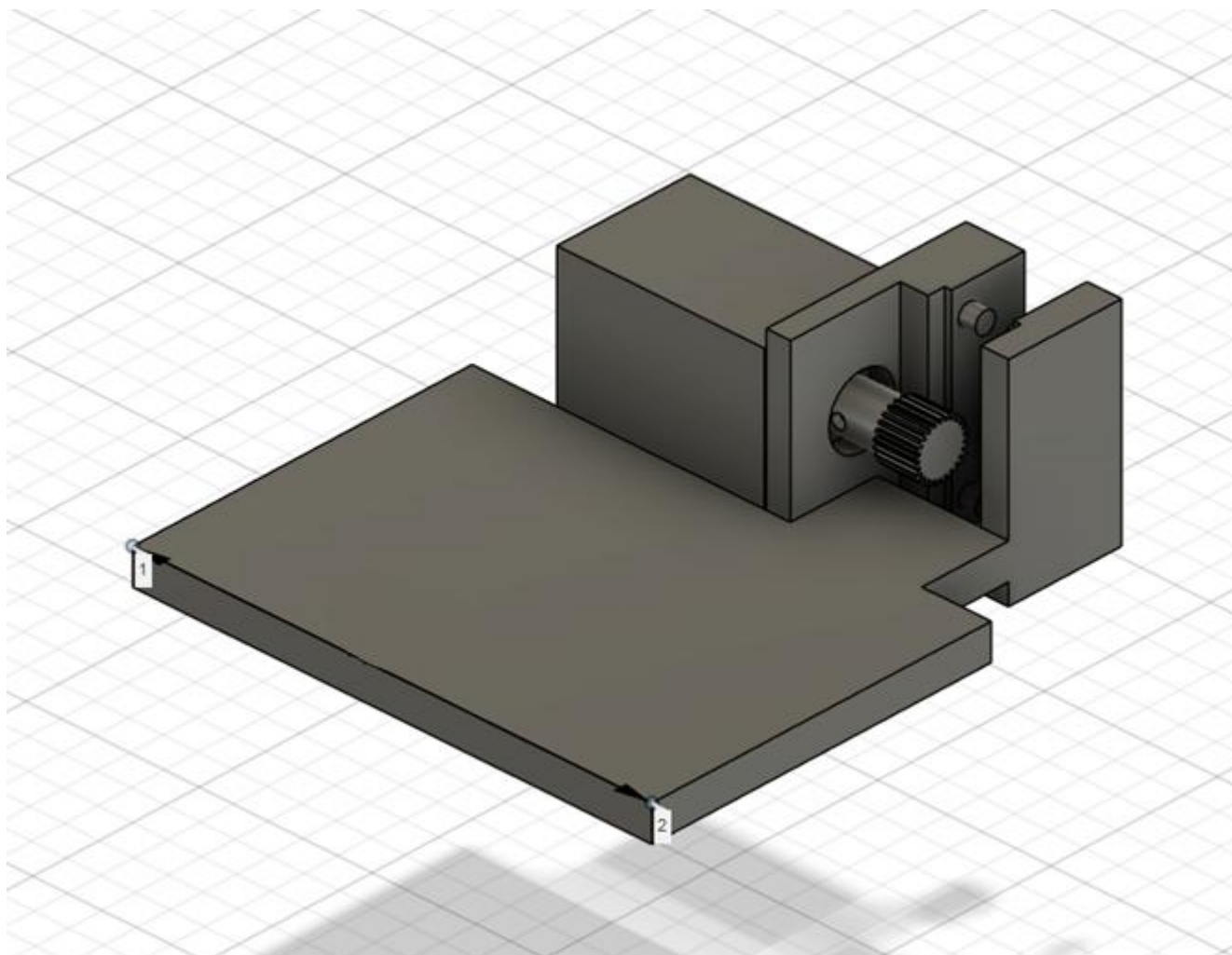
Рисунок 3.21, аркуш 2

Тепер потрібно зробити посадкове місце для мотору та площину для висувної частини шатлу, приклад зазначено на рисунку, створення кріплення для мотору (рис. 3.22, а), створення площини для висувної частини шатлу (рис. 3.22, б). Перед цим довелося трохи обрізати частину, на якій тримається 3 підшипники, оскільки вона заважала валу.



а)

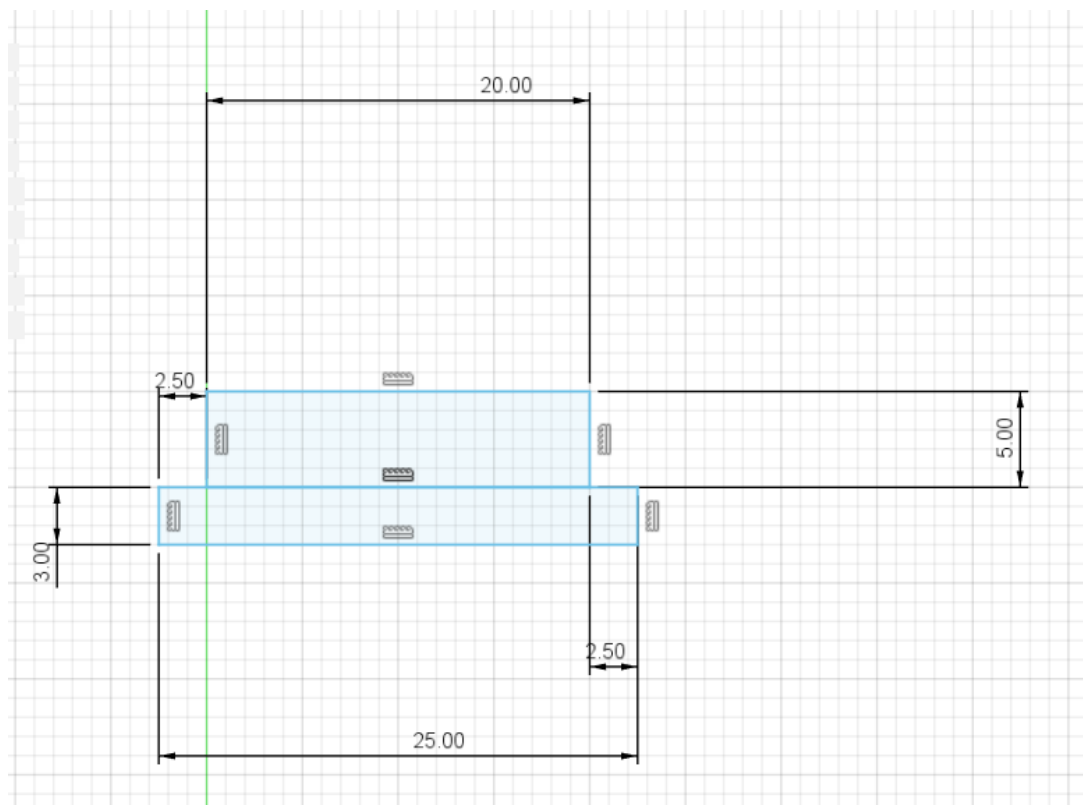
Рисунок 3.22 – Місце кріплення мотору та площина для висувної частини



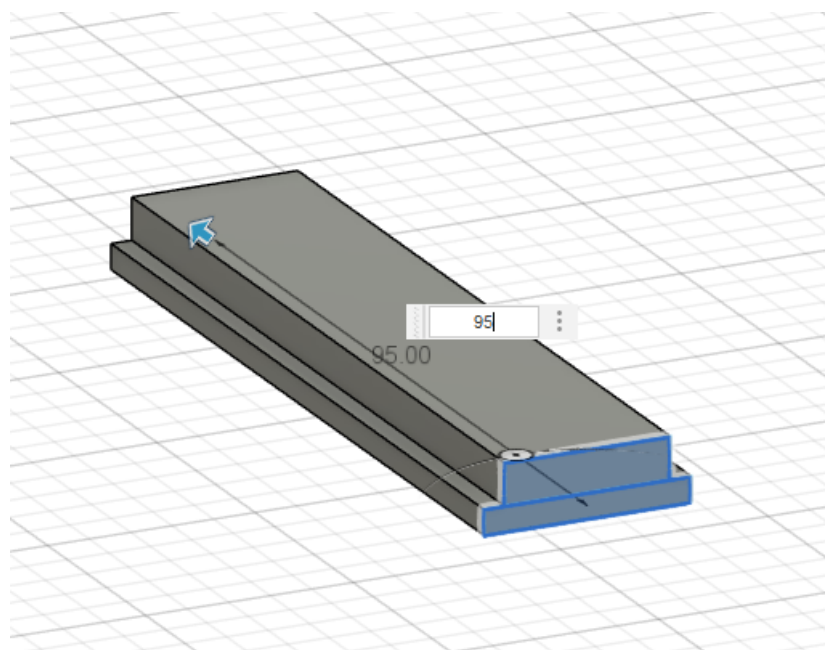
б)

Рисунок 3.22, аркуш 2

Тепер потрібно спроектувати висувну частину. Оскільки проріз у складі 35 мм віднімемо 5 мм для погрішності. З 30 мм віднімемо по 2,5 мм з кожної сторони, які ми пізніше компенсуємо за рахунок товщини рейок. Тепер потрібно зробити частину, яка буде торкатися лотка оскільки нижня частина буде обмежена висотою направляючих, та при попаданні лотка на шатл він буде там застрягати. Зробимо довжину цієї деталі в 95 мм, оскільки нам потрібно висувати цю деталь до 75 мм в одну сторону, при цьому вона не повинна випадати тому додаємо ще по 10 мм з кожної сторони приклад зазначено на рисунку, ескіз (рис. 3.23, а), екструдкування деталі (рис. 3.23, б).



а)



б)

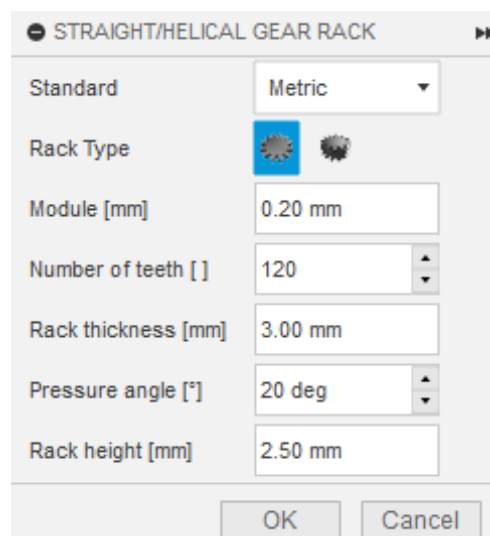
Рисунок 3.23 – Створення висувної частини

Для висовування цієї деталі будуть використовуватися міні крокові двигуни приклад якого зазначено на рисунку 3.24 [12].



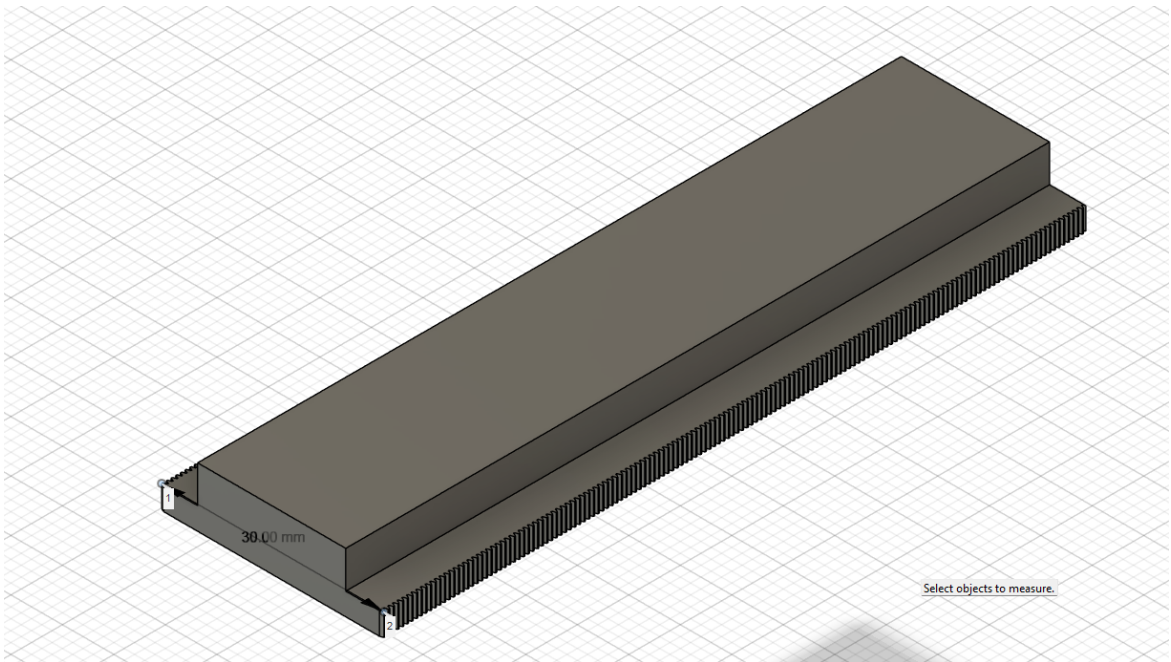
Рисунок 3.24 – Малий кроковий двигун

Тепер ми можемо зробити рейку для даної шестерні, та додати цю рейку до висувної частини для того, щоб ширина була 30 мм. Приклад зазначено на рисунку, параметри рейки (рис. 3.25, а), остаточний вигляд висувної частини з рейками по боках (рис. 3.25, б).



а)

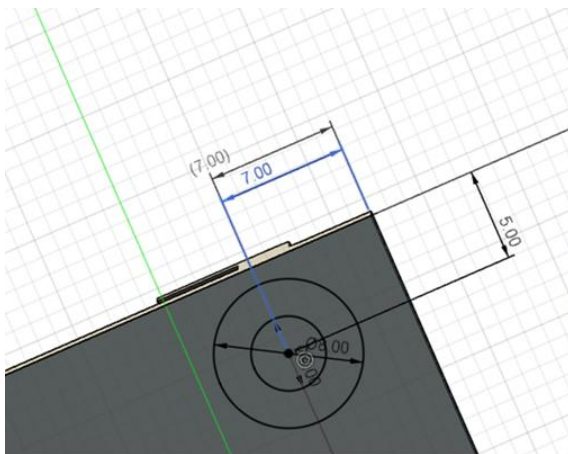
Рисунок 3.25 – Приклад висувної частини з рейками по боках



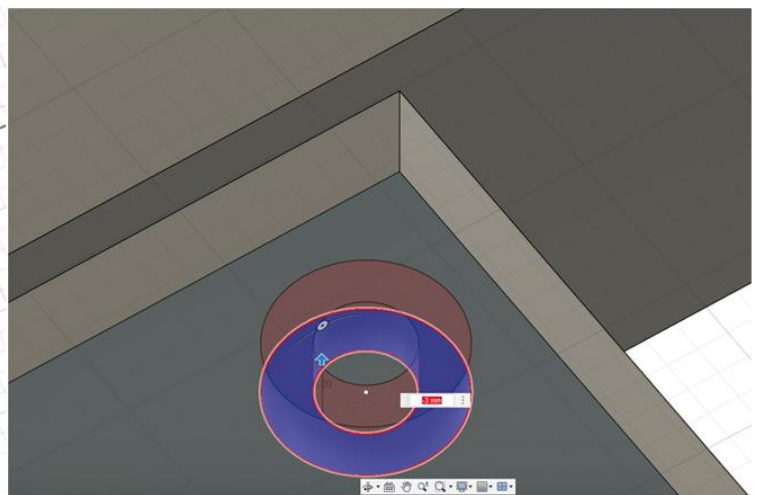
б)

Рисунок 3.25, аркуш 2

Також зробимо отвори для кріплення малих крокових двигунів. Приклад зазначено на рисунку, створення ескізу (рис. 3.26, а), процес вирізання посадкового місця для двигуна (рис. 3.26, б – рис. 3.26, г), результат (рис. 3.26, д).



а)



б)

Рисунок 3.26 – Створення посадкового місця для двигуна

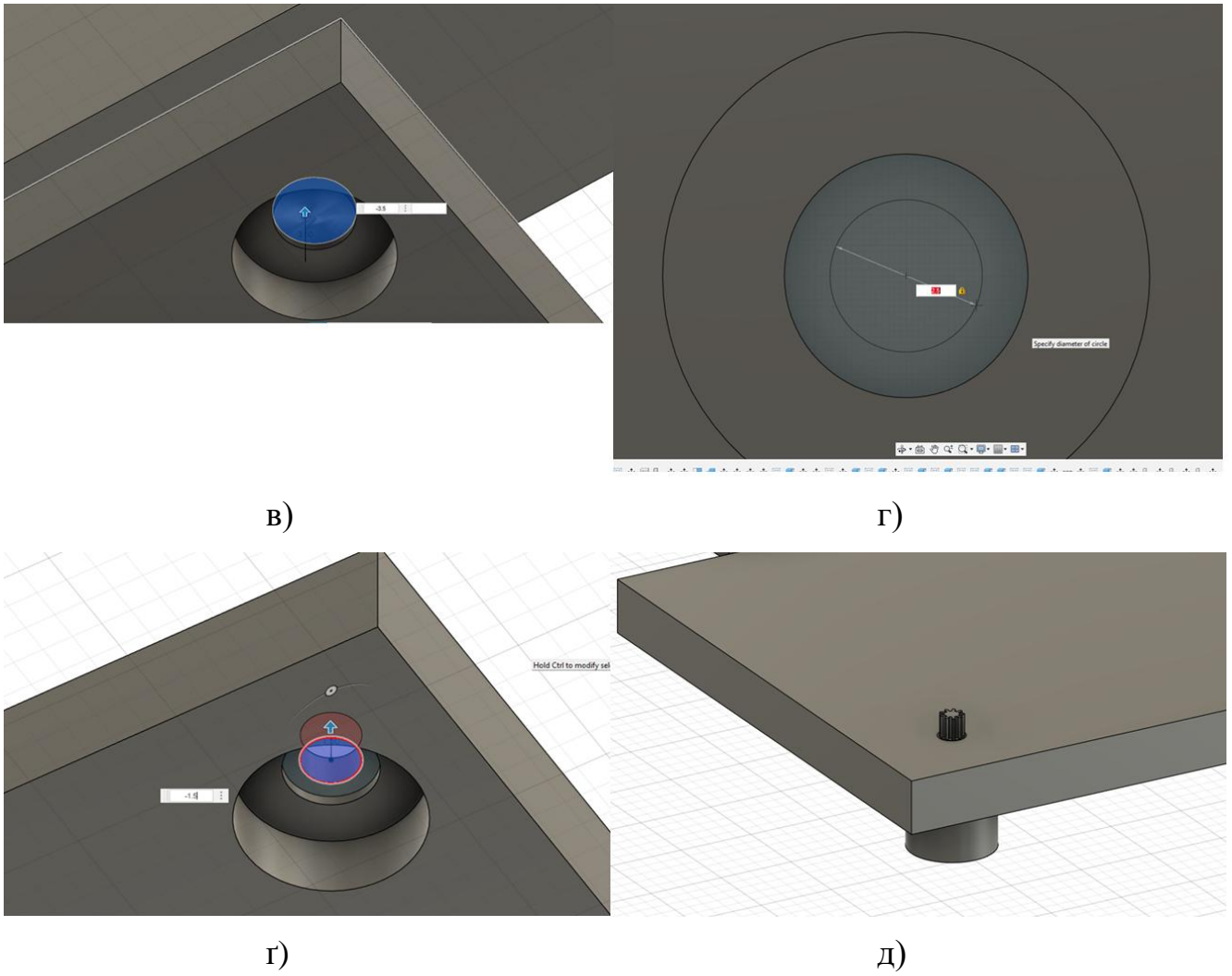


Рисунок 3.26, аркуш 2

Тепер потрібно створити посадкове місце для вилки приклад ескізу зазначено на рисунку 3.27.

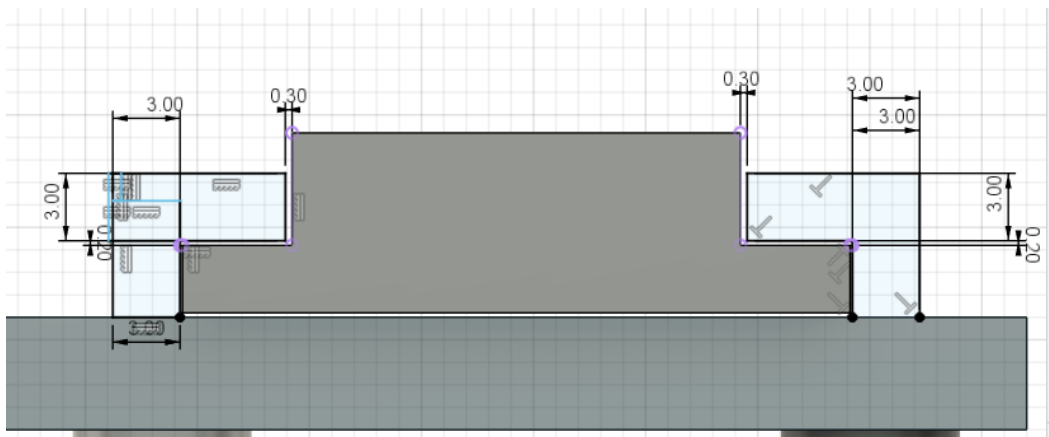
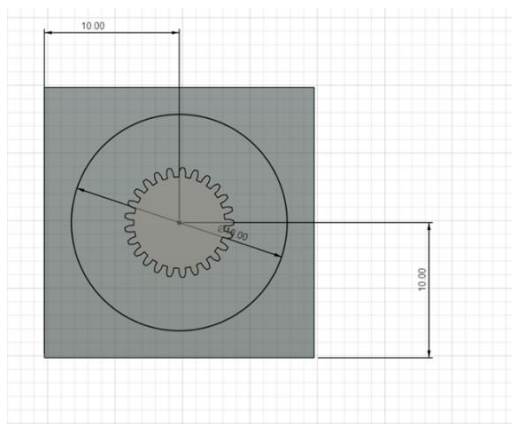
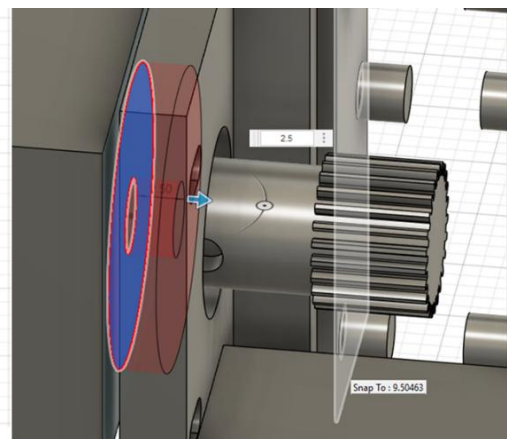


Рисунок 3.27 – Ескіз посадкового місця для вилки

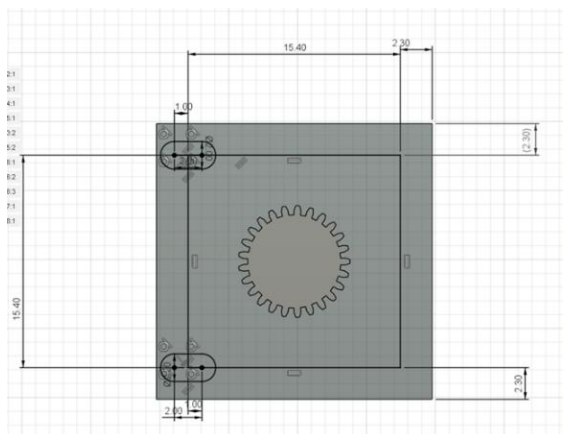
Також потрібно зробити виріз посадкового місця у шатлі для двигуна NEMA 8, а отвори кріплення лише для двох гвинтів з чотирьох, передбачених конструкцією двигуна. Отвори двох інших гвинтів кріплення ми не будемо робити, оскільки це занадто ослабить конструкцію, або потребуватиме специфічних гвинтів. Потрібно додати можливість їх регулювання по ширині для налаштування сили прилягання шестерні до рейки. Також буде зроблено оптимізацію моделі для зменшення маси та підвищення жорсткості процес створення зазначено на рисунку, створення посадкового місця для двигуна NEMA8 (рис. 3.28, а – рис. 3.28, б), створення отворів для кріплення двигуна (рис. 3.28, в – рис. 3.28, г), створення елементів для підвищення жорсткості конструкції (рис. 3.28, г – рис. 3.28, д), створення отвору для можливості закручення кріплення двигуна (рис. 3.28, е), остаточний вигляд шатлу після оптимізації (рис. 3.28, є).



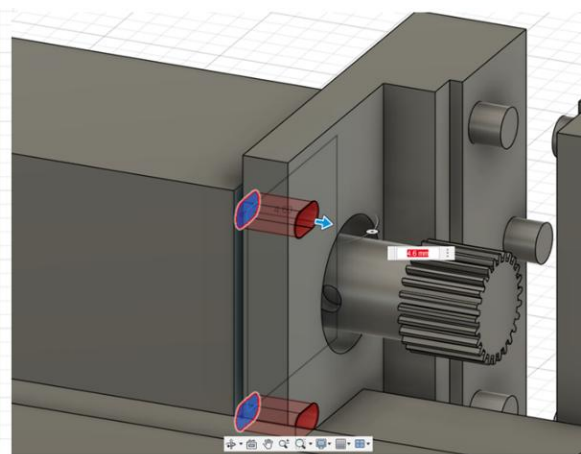
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.28 – Дороблення шатлу+

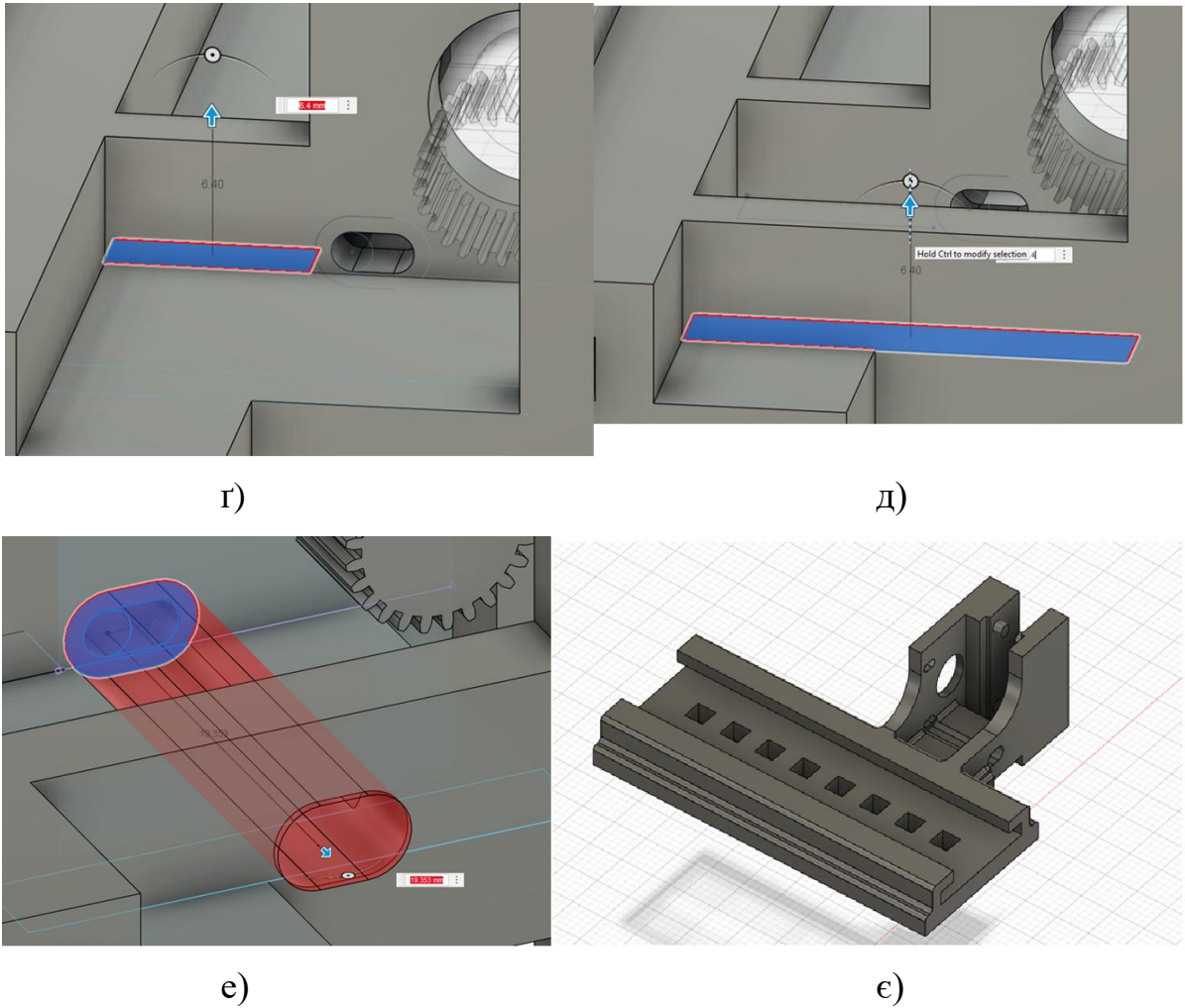
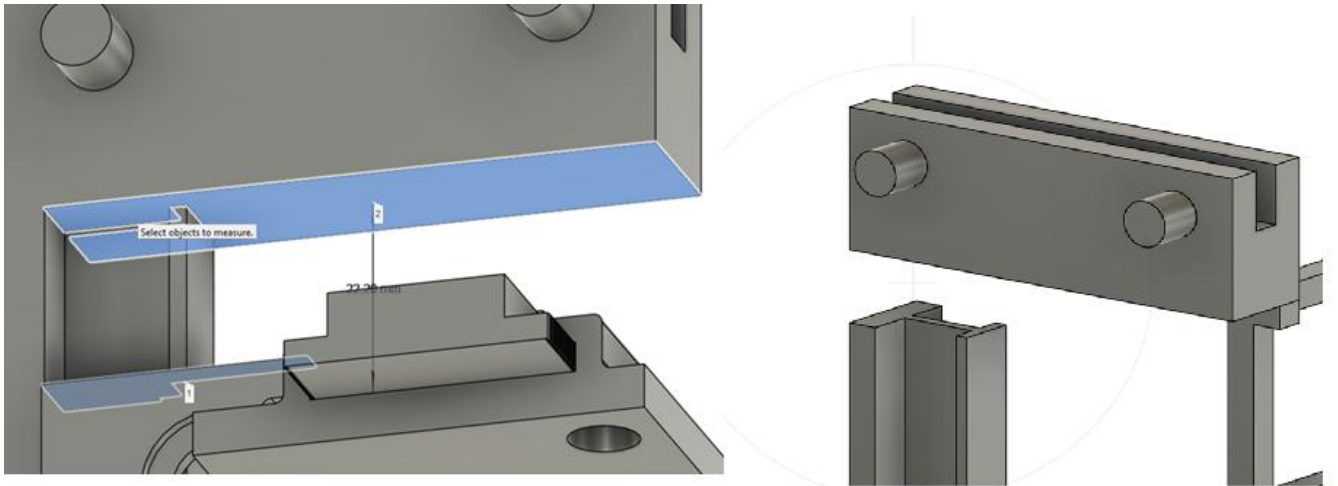


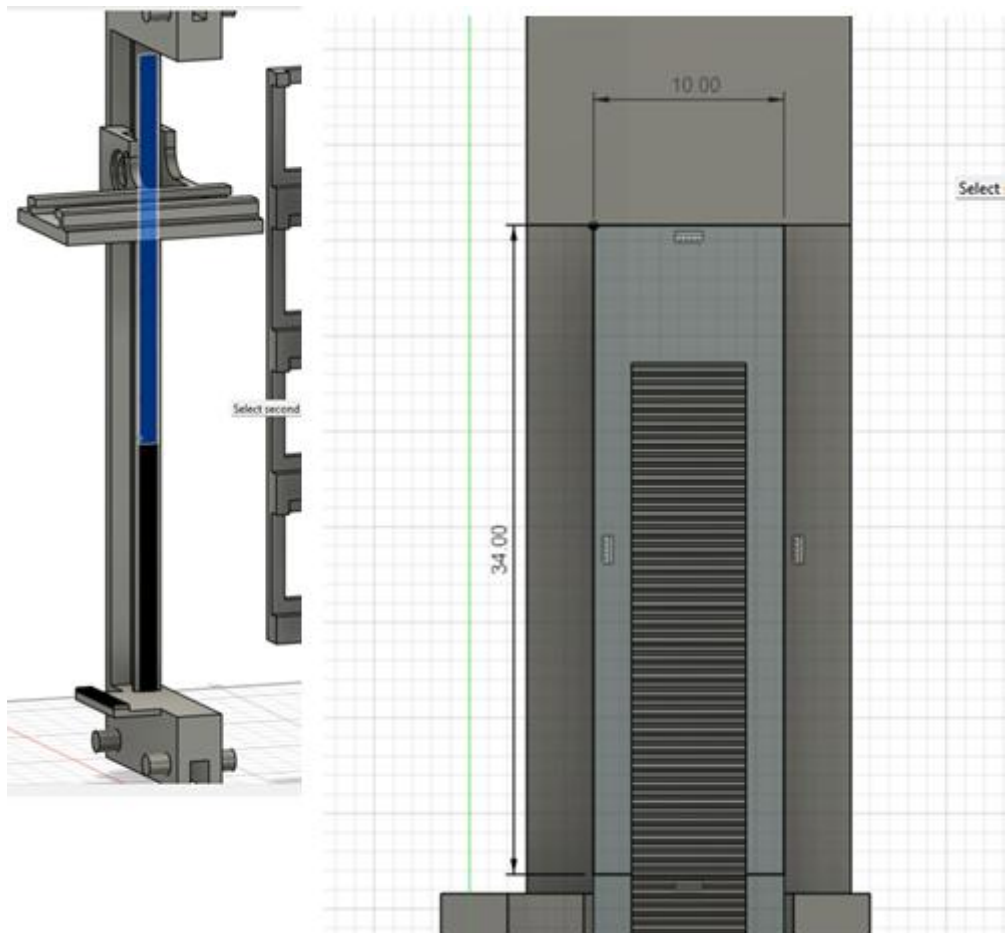
Рисунок 3.28, аркуш 2

Тепер коли маємо остаточні розміри шатлу, ми можемо доробити балку. Для цього ми поставили шатл у найвище робоче положення відносно складу, а склад у найнижче положення відносно нижчого робочого положення шатлу. В нас вийшло, що відстань між вищою точкою шатлу та точкою балки складає 22,28 мм, тому потрібно розтягнути балку в даному місці, щоб відстань була такою, щоб ми могли встановити шатл у балку. Для цього потрібно перемістити шатл на висоту, 30 мм плюс 4 мм зазору та мінус відстань яку ми вже маємо 22,28 мм отримуємо 11,72 мм. А також не забути зробити виріз у Т-подібній частині балки та додати рейку. Приклади зазначено на рисунку, процес збільшення висоти балки (рис. 3.29, а – рис. 3.29, б), додання рейки та виріз частини Т-подібної балки для можливості встановлення шатлу на своє місце (рис. 3.29, в,г).



a)

б)



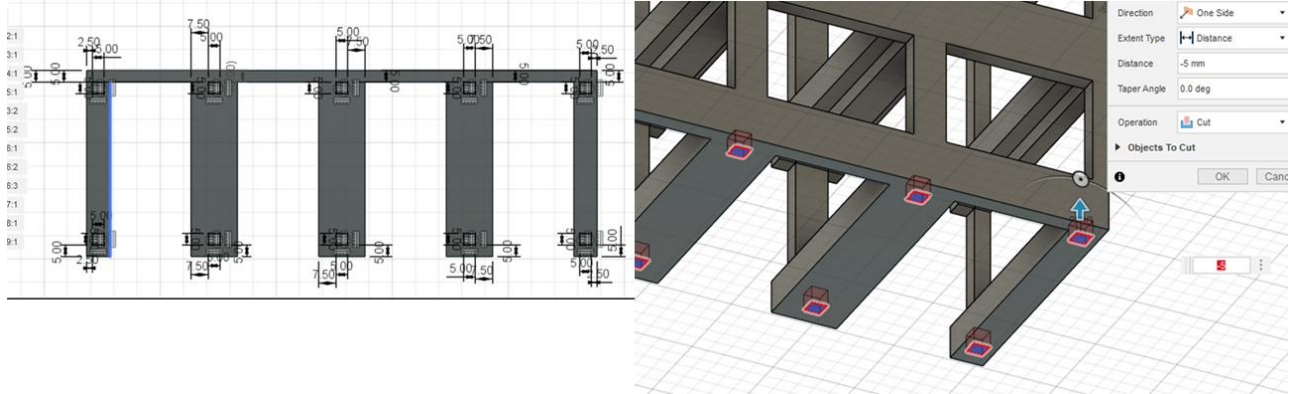
в)

г)

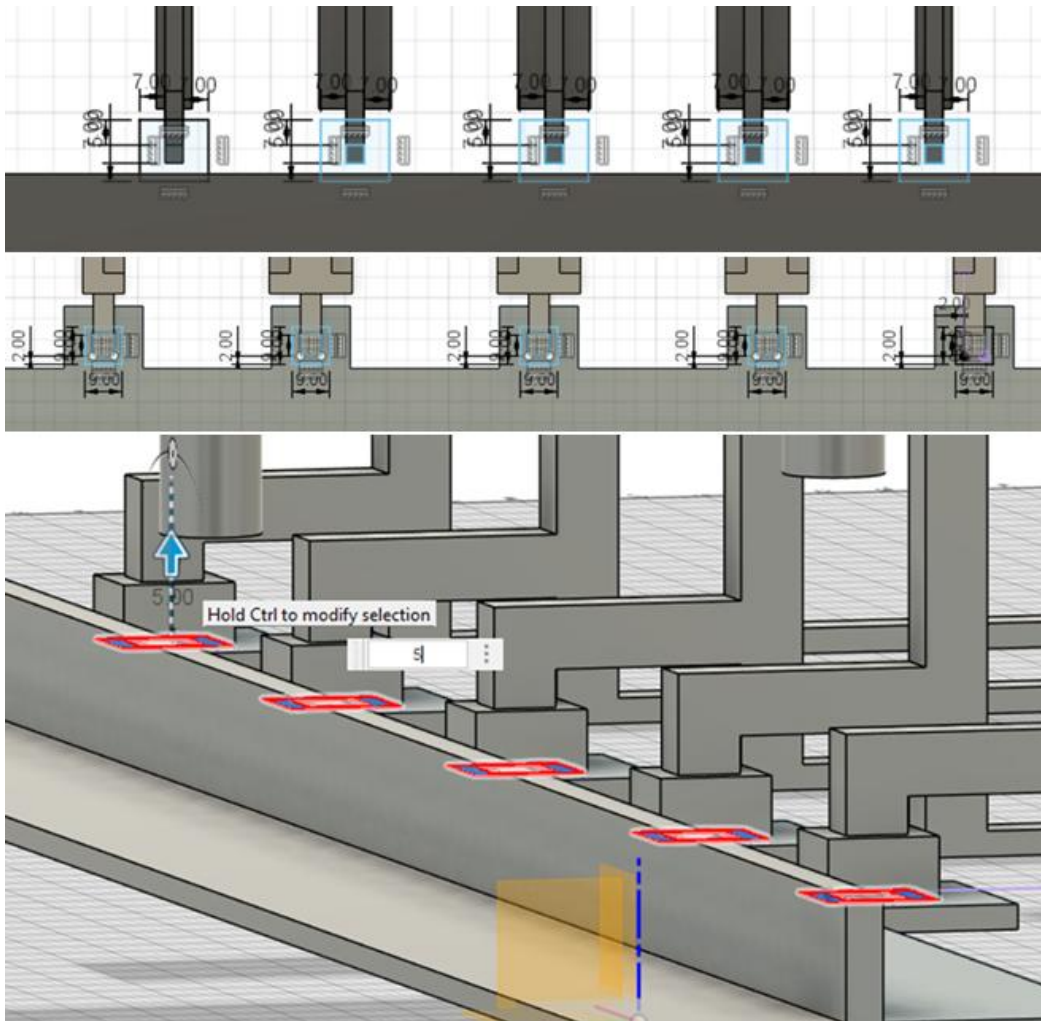
Рисунок 3.29 – Додання висоти та виріз Т-подібної балки

Також для підвищення жорсткості балки було додано 1 мм до Т-подібної частини приклад на рисунку 3.30.

Також потрібно зробити отвори для конектора в складі та на базі розмірами $5 \times 5 \times 5$ мм приклади зазначено на рисунку, створення місць для конекторів у складі (рис. 3.32, а), створення конекторів на базі (рис. 3.32, б).



а)



б)

Рисунок 3.32 – Створення конекторів на базі та складі

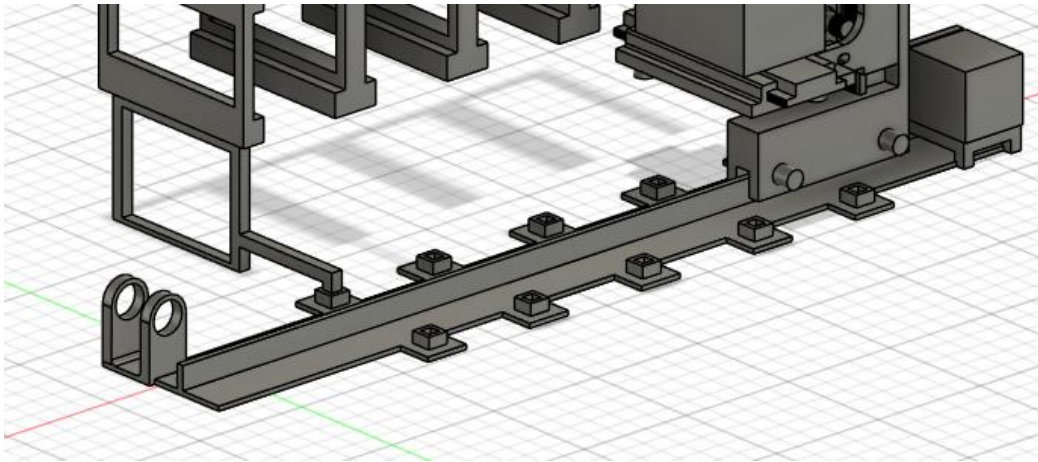


Рисунок 3.35 – Кріплення другої шестерні gt2

Під час оптимізації для друку був обрізан склад на 10 мм по глибині, обрізані нефункціональні частини шатла – закруглені деякі кути, що посприяло підвищенню жорсткості, а також вирізані отвори задля зменшення ваги, та додані конектори приклад зазначено на рисунку 3.36.

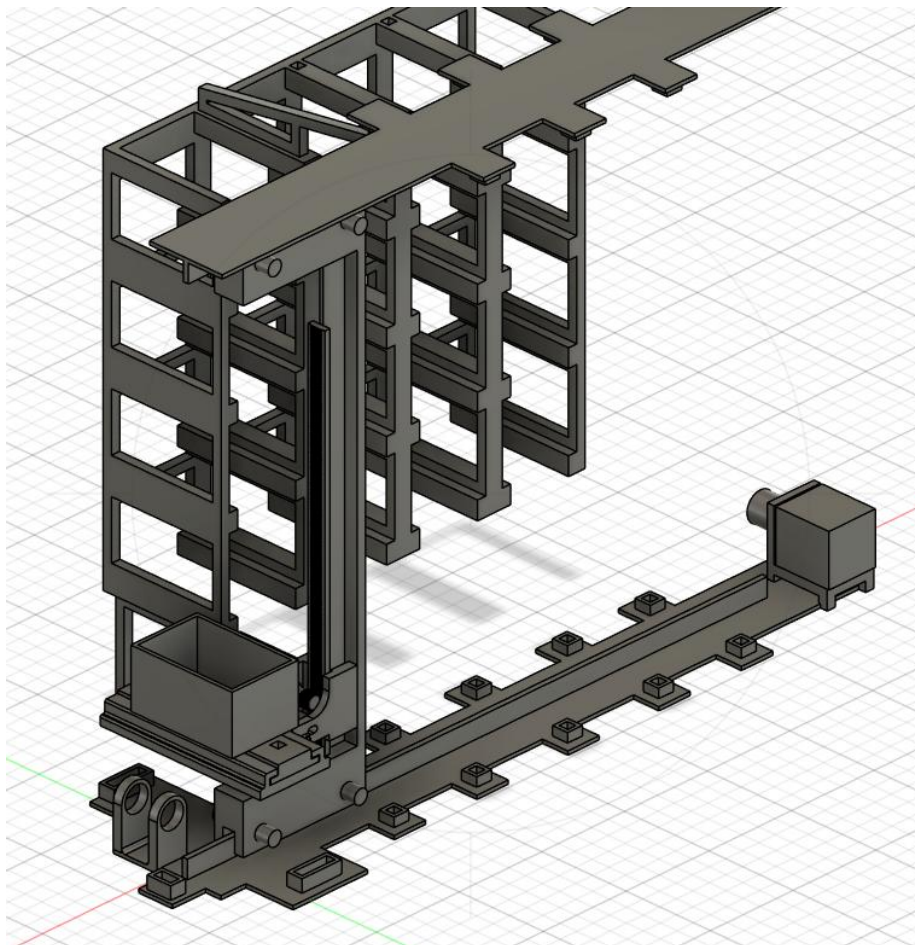


Рисунок 3.36 – Вигляд системи після оптимізації

4 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ТА ПОБУДОВА АПАРАТНОЇ СКЛАДОВОЇ

4.1 Вибір компонентів обґрунтування

Для роботи системи потрібно 4 крокових двигуни, для яких потрібні драйвери, для управління якими потрібно по мінімум три GPIO піни, щоб була можливість використовувати двигун як тормоз або, навпаки, мати можливість вільно крутитися, в нашому випадку ми ще будемо підключати порти RX\TX, це ще по 2 на кожен драйвер в сумі виходить 20 GPIO піни.

Для зменшення ціни та збільшення універсальності для розпізнавання QR-кодів буде використовуватися ESP32 CAM, для якої потрібні порти UART TX\RX, а саме GPIO 3 та GPIO 1 які зазначено на рисунку 4.1 [13].

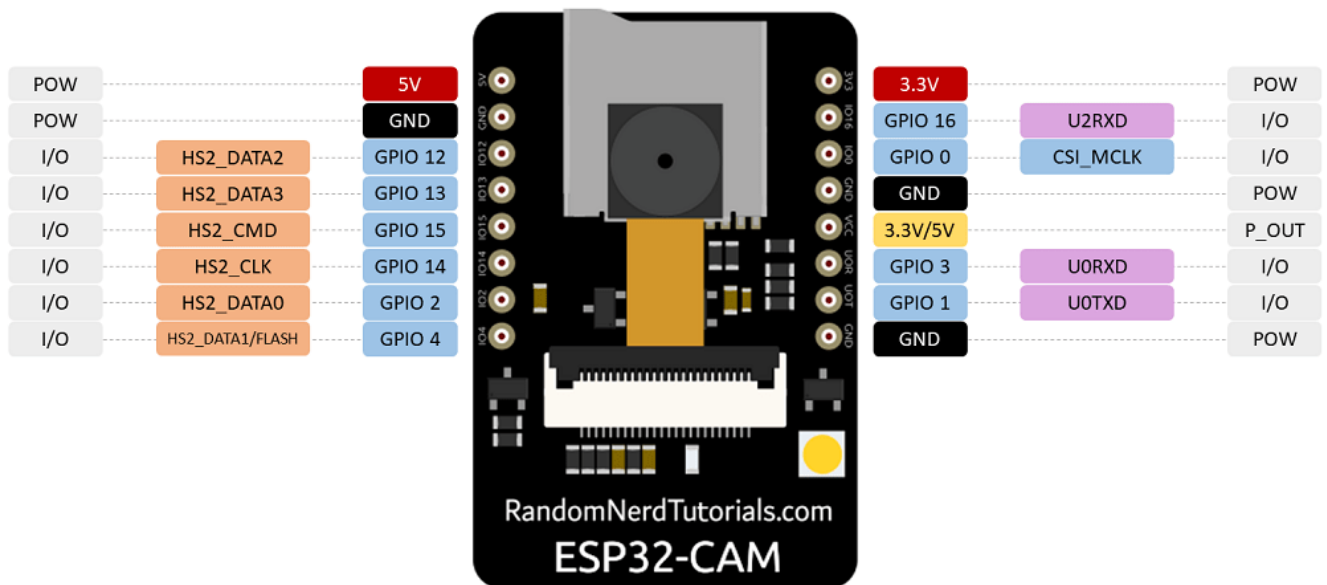


Рисунок 4.1 – Приклад UART виходів на платі ESP32 CAM

Для більш стабільної роботи краще брати плату з швидким процесором, тому візьмемо STM32 F767ZI NUCLEO Board, яка спеціально розроблена для розробки, тому вже має всі розведені виходи зі зручними конекторами та навіть Ethernet виходом [14]. Схему портів плати наведено на рисунку 4.2 [15].

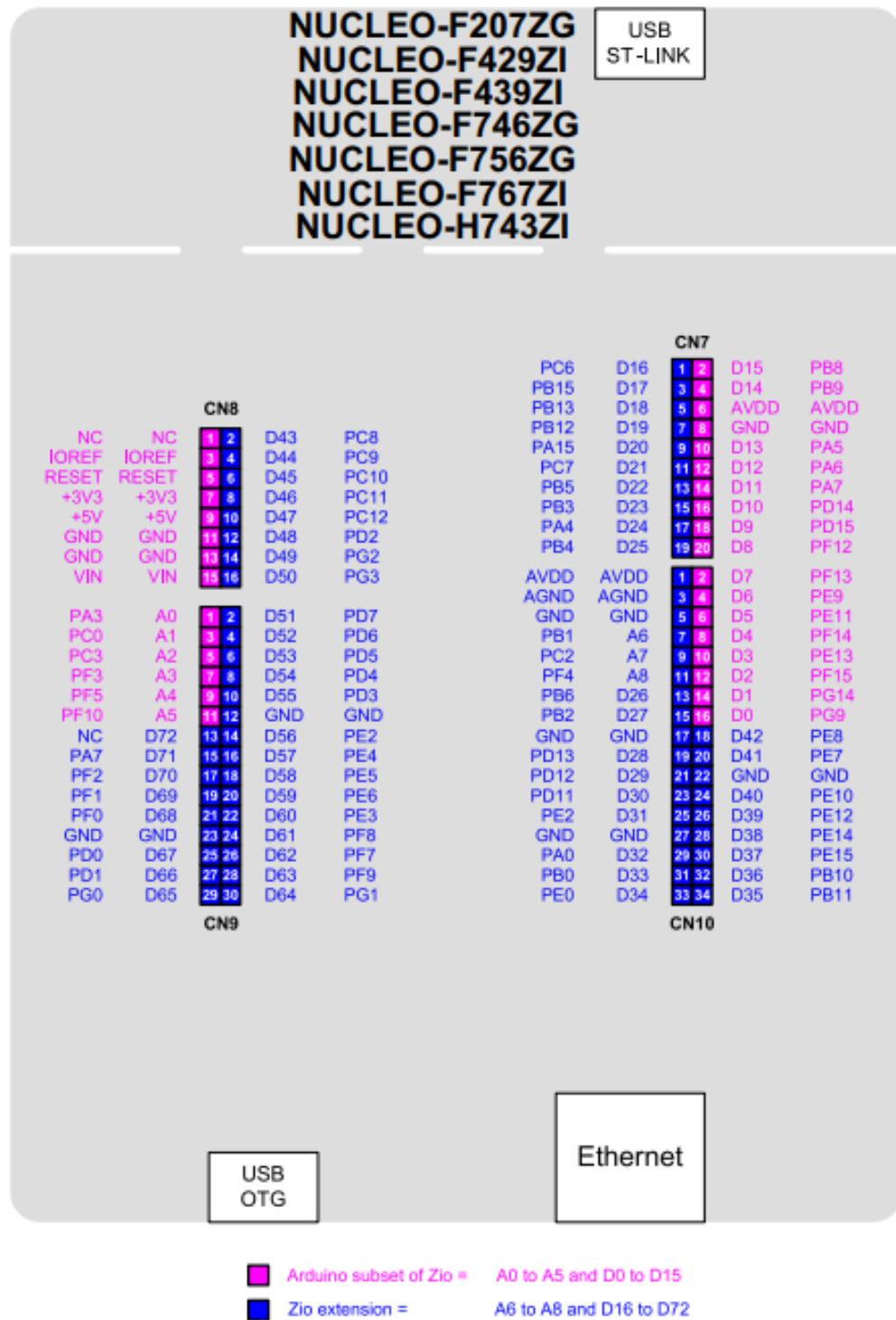


Рисунок 4.2 – Схема портів основної плати

Для переміщення балки по вертикалі потрібен вал 5 мм у діаметрі для шестерні GT2, тому для цієї задачі візьмемо двигун типу NEMA 11 з крутним моментом 7 Н·см [16], також можна взяти будь-який інший двигун NEMA 11 з крутним моментом більше 2 Н·см. Приклад зазначено на рисунку 4.3.

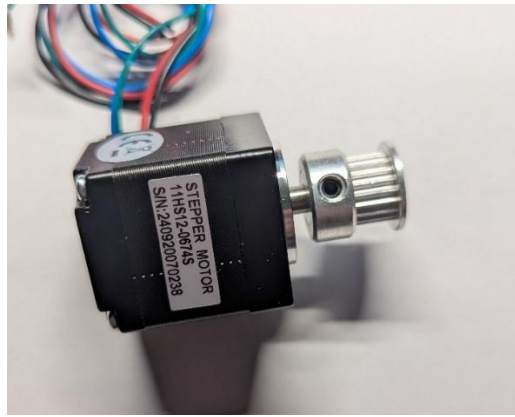


Рисунок 4.3 – Кроковий двигун NEMA 11 з шестернею GT2

Для переміщення шатлу по горизонталі будемо встановлювати мотор на шатл в прямому зчепленні шестерні з рейкою. Основними параметрами є обертальний момент та маса двигуна, тоді як довжина менш критична оскільки такі двигун в основному до 5 см довжиною. По сукупності характеристик краще всього підходить двигун типу NEMA 8 з масою 80 грам обертальним моментом 4 Н·см та довжиною 38 мм [17].

Стандартизовані двигуни не підходять для висування вилки через їх габарити. Тому буде використано малі нестандартизовані двигуни діаметром 8 мм та довжиною 8,2 мм. Приклад зазначено на рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 – Малий нестандартизований кроковий двигун

Для керування двигунами застосовуватимемо драйвери TMC2209 V2 оскільки він підходить по характеристиках до цих двигунів та має можливість мікро шагу до $1/16$ [18] приклад з схемою підключення наведено на рисунку 4.5.

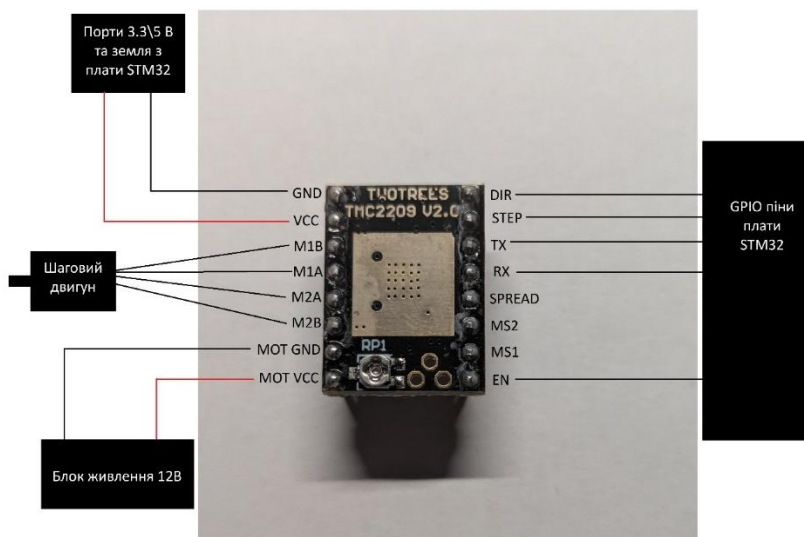


Рисунок 4.5 – Приклад підключення драйверу

Як джерело живлення оберемо блок на 12В зі струмом 6,5А його приклад можна побачити на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Джерело живлення

Логіку системи будемо жити через USB порти на платах та від 3.3 вольт з плат для живлення логіки драйверів.

4.2 Розрахунки ТАУ

Частотні критерії стійкості дозволяють оцінити стабільність роботи системи при впливі зовнішніх збурень.

Розрахуємо електричну та механічну часові сталі двигуну NEMA 11 11HS12-0674S який використовується для пересування балки. Спочатку розрахуємо електричну часову сталу індуктивність двигуна 4,2 мГн а опір 5,6 Ом.

$$\tau_e = \frac{L}{R} = \frac{4.2 * 10^{-3}}{5.6} \approx 0.75 \text{ мс} \quad (4.1)$$

Отримуємо електричну часову сталу у 0,75 мс що доволі стандартно для електро двигунів. Для розрахунку механічної часової сталої потрібно знати масу яку переміщає двигун тобто приблизно 320 грамів з яких: двигун NEMA 8 80 грам, два малих не стандартизованих двигуни по 10 грам, пластик шатла та вилки 90 грам та балка масою 130 грам, також потрібно знати обертальний момент з силою струму, опір двигуна та радіус робочої частини шестерні GT2.

$$J = m * r^2 = 0.32 * (0.006)^2 = 1.152 * 10^{-5} \text{ кг * м}^2 \quad (4.2)$$

Отримуємо момент інерції у $1.152 * 10^{-5} \text{ кг * м}^2$. Тепер порахуємо електромеханічну сталу двигуну.

$$k = \frac{M}{I} = \frac{0.07}{0.67} \approx 0.104 \text{ Н * м/А} \quad (4.3)$$

Тепер можна розрахувати механічну сталу часу:

$$\tau_m = \frac{J * R}{k^2} = \frac{1.152 * 10^{-5} * 5.6}{(0.104)^2} = \frac{6.451 * 10^{-5}}{0.010816} \approx 5.96 \text{ мс} \quad (4.4)$$

Це достатньо мале значення цього параметру щоб назвати систему швидко реагуючою та мало інерційною.

5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ КЕРУВАННЯ МАКЕТОМ

5.1 Принцип роботи програми

ESP32 CAM, основне призначення якої ідентифікація та розшифрування значень QR коду, регулярно транслює сигнал у вигляді числового значення на основну плату STM32.

При цьому важливим аспектом, на який варто звернути увагу, є сама трансляція числового значення лотку зберігаючої об'ємності. Трансляція відбувається за допомогою UART виходів U0RXD та U0TXD. При цьому такі виходи мають прямо протилежне призначення. В той час як U0RXD призначений отримувати значення від STM32, U0TXD призначений його відправляти.

В програмі для ESP32 CAM, використовується роз'єм U0TXD. Такий роз'єм має швидкість передачі до 5 МБіт/с та формат даних від 5 до 8 Біт. Приклад роботи коду ESP32 CAM зазначено на рисунку 5.1.

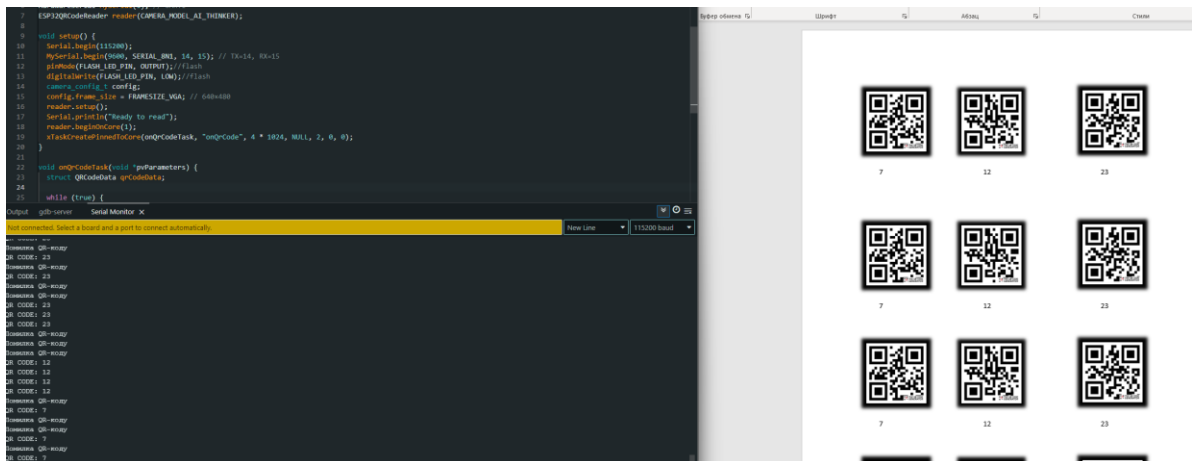


Рисунок 5.1 – Приклад роботи коду

Код працює за допомогою таких програмних бібліотек як Arduino, ESP32QRCodeReader, esp_camera.

Бібліотека Arduino є стандартною та містить наступні основні типи функцій: `setup`, `loop`.

ESP32QRCodeReader – стороння бібліотека, яка розроблена для роботи плати ESP32 з QR кодами. Esp_camera – бібліотека для більш точного налаштування камери під задачі регулювання роботи камери, наприклад встановлення роздільної здатності. Також, було ініційовано розміщення світлодіоду на ESP32, який за умови недостатнього зовнішнього освітлення може збільшити його рівень, забезпечуючи стабільну роботу камери в темних приміщеннях.

Перед роботою з функцією setup, необхідним етапом є призначення ім'я шині UART1 роз'єму GPIO3 та GPIO1. Така шина використовується для передачі даних на STM32. Конкретний процес передавання даних описаний в наступних етапах налаштування роботи системи. Також, задля повноцінного функціонування розпізнавання графічних даних створюється об'єкт “reader”, який бере участь в процесі зчитування зображення з камери ESP32 CAM.

Наступним етапом є робота безпосередньо з функцією setup. В даній функції зазначаються стандартні налаштування для роботи: частота роботи шин, конфігурація камери, індикація стану готовності до зчитування QR коду.

Разом з цим, встановлюються значення “HIGH” порту FLASH_LED_PIN 4, на якому розміщується світлодіод – дискретний порт у використанні дозволяє не перевантажувати процесор розрахунками таймеру, який в аналоговому порті встановлює частоту імпульсу.

Надалі робочі процеси розподіляються за ядрами системи. Відбувається закріплення процесу “reader” за ядром 1, процесу розпізнання кодів за ядром 0. Оголошується структура “qrcodeData” та використовується функція “if”. Плата знаходиться в очікуванні тривалістю 100мс для отримання нового QR code.

За допомогою функції “if (qrCodeData.valid)” відбувається перевірка QR коду на цілісність. В разі, якщо цілісність такого коду було порушено, то до комп'ютера за допомогою метода трансляції даних з використанням роз'єму USB виконується передавання інформації про помилку. Такий процес дозволяє забезпечити точність отримуваних значень про характер об'єкту, розміщеного на шатлі.

Після отримання позитивного значення функції “if (qrCodeData.valid)” цілісність коду визнається достатньою. В такому разі закодовані графічні дані

інтерпретуються в рядок. UART0 забезпечує трансфер декодованих даних для подальшого процесу налагодження коду плати ESP32. Додатковий текст, який відправляється разом зі значенням, використовується для більш зручного розуміння даних технічним спеціалістом.

Рядок, який містить дані типу “string”, перетворюється на числове значення. Допустимий діапазон такого значення лімітується кількістю комірок в сховищі та складає від 1 до 32. Відповідно, було впроваджено перевірку дисперсії діапазону значень за допомогою функції “if (value >= 1 && value <= 32)”. Тепер, коли визначено валідність даних та коректність числових обмежень, отримане значення відправляється з використанням порту UART1 до плати STM32

Також, було передбачено декілька затримок. Необхідність таких затримок дефініюється технічними обмеженнями системи та підвищенням стабільності роботи плати. Код програми зазначено у Додатку Б.

Основна програма для STM32 має декілька основних конструкцій. Одна з них відповідає за прийом даних з плати ESP32 CAM. Процес відбувається через порт USART6 з швидкістю як на ESP32 CAM A CAME 9600 Біт\с усі інші налаштування стандартні тому ми їх не змінюємо. Після отримання байтів за допомогою команди HAL_UART_Receive(&huart6, &rxByte, 1, 100) дані записались у змінну rxByte з порту USART6 у циклі перевірки також додана змінна NomerNaLotke для запису лише після отримання та перевірки для підвищення стабільності роботи системи.

5.2 Охорона праці

В процесі написання кваліфікаційної роботи на тему «Розроблення лабораторного макету роботизованої виробничої ділянки зберігання товарно-матеріальних цінностей», а також експлуатації розроблених механізмів та приладів, визначено ряд ризиків травматизму на робочому місці. Таким чином, було створено інструкції для забезпечення техніки безпеки в робочому середовищі.

Основними чинниками ризику було визначено: ураження електричним струмом, механічні травми внаслідок некоректного використання рухомих та електричних частин макету, недостатня освітленість робочого місця.

З метою мінімізації ризиків травматизму наступні вимоги безпеки мають бути дотримані під час роботи з компонентами системи: з'єднувальні процеси елементів проводити відповідно до електричних схем, перевіряти електричні ланцюги на відсутність коротких замикань, використовувати ізольовані кабелі для підключення макету до джерела живлення.

Під час тестування розробленої системи не можна торкатися конструктивних елементів, не призначених для прямого контакту відповідно до алгоритму роботи макету. Важливо слідкувати, щоб будь-які зайві предмети були відсутні під час використання роботизованої виробничої ділянки, а також під час збірки робочих механізмів. Не виключено і забезпечення комфортних умов праці для працівників.

Паяльне та інше обладнання, яке має робочу температуру, що створює додаткові пожежні ризики, не мають залишатися без нагляду та використовуватись в режимі особливої обережності, на поверхні яка є негорючою або слабогорючою.

Підключене обладнання до мережі завжди експлуатується в присутності осіб, якщо розробленим проектом не передбачення встановлення необхідних протипожежних систем для автоматизації протипожежної безпеки та надання можливості системі працювати автономно (без втручання людини)[20].

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано актуальні роботизовані ділянки зберігання ТМЦ. Також було спроектовано лабораторний макет роботизованої ділянки зберігання ТМЦ та розроблене програмне забезпечення для нього.

Перед стадією проектування було розглянуто аналогічні сучасні системи а саме охарактеризовано їхні архітектурні особливості, зокрема системи AS/RS типів Unit Load, Mini Load, Shuttle, Carousel, Deep Lane, а також мобільні платформи типу AMR та AGV.

Проведено їх порівняльний аналіз за критеріями продуктивності, щільності зберігання, гнучкості, масштабованості, складності обслуговування та вартості впровадження. Обґрунтовано вибір архітектури Mini-Load AS\RS яка була обрана як основний прототип архітектури за сукупністю характеристик.

Після проектування було проведено вибір та обґрунтування компонентної бази для макета яка включає в себе: мікроконтролери STM32 та ESP32 CAM, чотири двигуни різних типів та драйвери для них.

Розроблено програмне забезпечення для зчитування QR кодів, управління двигунами, та задання даних з комп'ютера.

Макет дозволяє наглядно показати усі процеси які відбуваються на виробництві за допомогою чого підвищити рівень спеціалістів під час навчання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипченко, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.
3. Сайт кафедри КІТАР [Електронний ресурс] // Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР). – Режим доступу: <https://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam> (дата звернення: 21.04.2025).
4. Приклади AS/RS систем [Електронний ресурс] // daifuku.com. – Режим доступу: <https://daifuku.com> (дата звернення: 21.04.2025)
5. Інформація про типи систем та їх особливості [Електронний ресурс] // swisslog.com. – Режим доступу: <https://www.swisslog.com> (дата звернення: 25.04.2025)
6. Приклад конвеєрного механізму захвату [Електронний ресурс] // [jungheinrich.in](https://www.jungheinrich.in). – Режим доступу: <https://www.jungheinrich.in/automation/automatic-small-parts-storage/miniload> (дата звернення: 25.04.2025)
7. Приклад горизонтальної Carousel AS/RS [Електронний ресурс] // [conger.com](https://www.conger.com). – Режим доступу: <https://www.conger.com/asrs-warehouse/> (дата звернення: 21.04.2025)
8. Приклад вертикальної Carousel AS/RS [Електронний ресурс] // [kardex.com](https://www.kardex.com). – Режим доступу: <https://www.kardex.com/en-us/products/megamat-vertical-carousels> (дата звернення: 25.04.2025)

9. Приклад Deep Lane AS/RS [Електронний ресурс] // [abelwomack.com](https://www.abelwomack.com). – Режим доступу: <https://www.abelwomack.com/deep-lane-high-density-pallet-storage/> (дата звернення: 21.04.2025)

10. Приклад роботів AMR [Електронний ресурс] // [mecalux.de](https://www.mecalux.de). – Режим доступу: <https://www.mecalux.de/automatische-lagersysteme/autonome-mobile-roboter-amr> (дата звернення: 21.04.2025)

11. Приклади евро лотка [Електронний ресурс] // [auer-packaging.com](https://www.auer-packaging.com). – Режим доступу: https://www.auer-packaging.com/de/de/Eurobeh%C3%A4lter-geschlossen/EG-6432-HG.html?customer_type=private&gad_source=1&gad_campaignid=18077397747&gbraid=0AAAAADgtNLXLmvoHPzHtPIFWjUMrOHUHV&gclid=CjwKCAjw24vBBhABEiwANFG7y5CEha-KzqV7jQQacNtNXkgTQcT6El0I8XuH3AcAubE_aN2_yE0fuhoCme0QAvD_BwE (дата звернення: 14.05.2025)

12. Приклад малого крокового двигуна [Електронний ресурс] // [micro-steppermotor.com](https://www.micro-steppermotor.com). – Режим доступу: <https://www.micro-steppermotor.com/quality-11879303-8mm-micro-stepper-motor-2-phase-4-wire-mini-stepper-motor-with-copper-gear-for-camera-lenses-pm08> (дата звернення: 16.05.2025)

13. ESP32-CAM AI-Thinker Pinout Guide [Електронний ресурс] // randomnerdtutorials.com. Режим доступу: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-cam-ai-thinker-pinout/> (дата звернення: 02.06.2025)

14. STM32 Nucleo-144 development board [Електронний ресурс] // [st.com](https://www.st.com). – Режим доступу: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f767zi.html> (дата звернення: 02.06.2025)

15. UM1974 User manual [Електронний ресурс] // [st.com](https://www.st.com). – Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1974-stm32-nucleo144-boards-mb1137-stmicroelectronics.pdf (дата звернення: 02.06.2025)

16. Nema 11 datasheet [Електронний ресурс] // [steplab.net](https://www.steplab.net). – Режим доступу: https://www.steplab.net/img_shop/8HS11-0204S_files/dsh/11HS12-0674S.pdf (дата звернення: 02.06.2025)

17. Nema 8 datasheet [Електронний ресурс] // omc-stepperonline.com. – Режим доступу: <https://www.omc-stepperonline.com/download/8HS15-0604S.pdf> (дата звернення: 02.06.2025)

18. TMC 2209 [Електронний ресурс] // learn.watterott.com. – Режим доступу: <https://learn.watterott.com/silentstepstick/pinconfig/tmc2209/> (дата звернення: 02.06.2025)

19. Вільчинський Д. В. РОЗРОБЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ РОБОТИЗОВАНОЇ ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ ЗБЕРІГАННЯ ТОВАРНО-МАТЕРІАЛЬНИХ ЦІННОСТЕЙ. *Проблеми та перспективи реалізації та впровадження міждисциплінарних наукових досягнень* : Міжнар. наук. конф., м. Луцьк, 13 черв. 2025 р. 2025. С. 3. URL: <https://doi.org/10.62731> (дата звернення: 23.06.2025).

20. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.