

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані
технології»
на тему: «СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОТИ СКЛАДУ»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-21

Лихолат Денис Анатолійович _____

Керівник:

Доцент кафедри КІОНС,

кандидат технічних наук

Мураховський Сергій Анатолійович _____

Рецензент:

Доктор технічних наук, професор

Антонюк Віктор Степанович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПГ-21.08.1730.000.00 ПЗ	Пояснювальна записка	94	
3	A1	ПГ-21.08.1730.000.00 СК	Автоматизована систем складу	1	
4	A1	ПГ-21.08.1730.000.00 СхЕ	Схема електрична	1	
5	A2	ПГ-21.08.1730.000.00 СхА	Схема алгоритму	1	
6	A1	ПГ-21.08.1730.000.00 СхС	Схема структурна	1	
7	A2	ПГ-21.08.1730.001.00	Основа	1	
8	A2	ПГ-21.08.1730.002.00	Кришка	1	
9	A4	ПГ-21.08.1730.003.00	Опора Кришки	4	
10	A4	ПГ-21.08.1730.004.00	Тримач Спиці	4	
11	A4	ПГ-21.08.1730.005.00	Тримач Сервопривода	4	
12	A4	ПГ-21.08.1730.006.00	Тримач датчика кольору	2	
13	A4	ПГ-21.08.1730.007.00	Ричаг сервопривода	2	
14	A4	ПГ-21.08.1730.008.00	Спиця	2	

				ПГ-21.08.1730.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Лихолат Д.А				1	1
Керівн.	Мураховський С.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІОНС Гр. ПГ-21	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Бурау Н.І					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОТИ СКЛАДУ»**

Київ – 2026 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лихолату Денису Анатолійовичу

1. Тема проєкту «Система автоматизації роботи складу», керівник роботи Мураховський Сергій Анатолійович, к.т.н, доцент кафедри КІОНС затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту 05.06.2026 р.

3. Вихідні дані: Час автономної роботи $T = 30$ хв, максимальна маса вантажу $m = 0,2$ кг, швидкість пересування $V = 0.5$ м/с, частота опитування 100 Гц, діапазон вимірювання відстані $= 0.2 \dots 4$ м, кут огляду - 15 град., напруга живлення $= 5$ В.

4. Зміст проєкту: Вступ. 1. Обґрунтування задач та огляд існуючих систем автоматичного керування складських приміщень. 2. Розробка автоматичного робота для автомазації складу.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): кресленик загального вигляду (A1), електрична схема (A1), функціональна схема (A1), алгоритм роботи системи (A2), кресленики деталей (A1*1,5)

Календарний план

/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний пошук та визначення задач роботизована система для автоматизації роботи складу	17.04.2026	
2	Огляд існуючих конструкцій автоматизованих роботів для роботи на складських приміщеннях	27.04.2026	
3	Вибір функціональної схеми для побудови автоматизованої системи складу	04.05.2026	
4	Розробка алгоритму функціонування	10.05.2026	
5	Вибір елементної бази	17.05.2026	
6	Побудова фізичного макету та експериментальне дослідження прототипу	22.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки.	30.05.2026	

Студент

(підпис)

Денис ЛИХОЛАТ

(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проекту

Сергій МУРАХОВСЬКИЙ

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі розглянуто процес розробки роботизованої системи для автоматизації роботи складу. Основна мета дипломної роботи – створення функціонального прототипу мобільного робота, здатного розпізнавати вантажі за кольоровими маркерами та транспортувати їх відповідно до заданого маршруту без участі оператора.

У межах дослідження було проаналізовано сучасні тенденції у сфері складської автоматизації, наведено огляд аналогічних промислових рішень, а також розглянуто методи навігації, що застосовуються в роботизованих системах. Проєкт реалізовано на базі мікроконтролера Arduino Nano, з використанням сервоприводів, датчика кольору TCS230, елементів живлення та двоповерхової мобільної платформи.

У роботі подано опис конструкції приладу, принципів його роботи, алгоритмів взаємодії між модулями, а також результати тестування та калібрування датчиків. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили працездатність пристрою та його здатність ефективно виконувати логістичні операції.

Запропоноване рішення може бути використане для оптимізації внутрішньоскладських процесів, зменшення людського фактору, підвищення швидкості сортування та транспортування товарів. Отримані результати є перспективною основою для подальшого вдосконалення та масштабування автоматизованих систем у логістиці.

ABSTRACT

This bachelor thesis presents the development of a robotic system for warehouse automation. The main goal of the work is to design and build a functional prototype of a mobile robot capable of recognizing cargo using color markers and transporting it along a predefined route without human intervention.

The study includes an overview of current trends in warehouse automation, analysis of existing industrial solutions, and a review of navigation methods applied in robotic systems. The project is implemented using an Arduino Nano microcontroller, servomotors, a TCS230 color sensor, power supply elements, and a two-layer mobile platform.

The thesis describes the device's structure, its working principles, the algorithms of interaction between components, and the results of sensor calibration and testing. Experimental investigations confirmed the functionality of the robot and its ability to efficiently perform logistic operations.

The proposed solution can be used to optimize internal warehouse processes, reduce human error, and increase the speed of sorting and transporting goods. The obtained results provide a promising basis for further development and scaling of automated systems in logistics.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1.ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ	10
1.2 Огляд та призначення Системи автоматизації роботи складу	11
1.3 Використання роботизованої системи для автоматизації роботи складу в Україні та світі	12
1.4. Порівняння активних та пасивних систем автоматизації складської логістики	14
1.5 Основні методи навігації у роботизованих системах на складських приміщеннях	17
1.6 Аналоги Роботизованих систем для автоматизації роботи складу	20
1.7. Виклики та перспективи розвитку роботизованих складських систем	26
Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2.РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОТИ СКЛАДУ	30
2.1. Призначення розроблюваного приладу та умови його експлуатації.....	30
2.2 Підбір елементів	31
2.3 Вимоги до розроблюваного приладу.....	40
2.4. Конструкція приладу та просторове компонування модулів	41
2.5. Конструкторсько-технологічне проектування елементів робототехнічного комплексу.....	43
2.5.2. Геометричний аналіз та проектування несних платформ корпусу	46
2.5.4. Проектування оригінальних конструктивних елементів та тримачів	49
2.5.5. Кінематичні та просторові зв'язки в механізмі скидання вантажу.....	53
2.5.7. Аналіз та технічні характеристики фізично реалізованого прототипу роботизованого комплексу.....	56
2.6. Алгоритм роботи пристрою та програмно-апаратна реалізація циклу керування	58
2.7 Зчеплення сервоприводів коліс для різних поверхонь	60
2.8. Розрахунок жорсткості текстолітової основи мобільної платформи	62
2.9 Інструкція користувачу	64
2.10. Обґрунтування практичного впровадження та гнучкої інтеграції роботизованого комплексу	67
Висновки до розділу 2	70
ВИСНОВОК	72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТОК А.....	77
ДОДАТОК Б.....	81
КРЕСЛЕНИКИ	81

Зм.	Арк..	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив								
Перевірив								
Н. Контр.								
Затв..								
					Літера	Аркуш	Аркушів	8

ВСТУП

Однією з ключових проблем сучасної робототехніки є створення технічних засобів, здатних ефективно функціонувати у найрізноманітніших умовах довкілля. Йдеться про забезпечення можливості для роботизованих систем виконувати поставлені завдання не лише в стандартному наземному середовищі, а й під водою, у повітрі, під землею або навіть у космічному просторі. Це вимагає розробки адаптивних систем управління, високої мобільності, стійкості до змін зовнішніх умов, а також наявності інтелектуальних алгоритмів обробки інформації.

У сучасному виробництві активно застосовується велика кількість різновидів робіт і робототехнічних комплексів – від простих маніпуляторів до складних автономних систем, оснащених штучним інтелектом. Ці роботи здатні не лише виконувати заздалегідь запрограмовані дії, а й адаптувати свою поведінку до зміни умов довкілля або виробничого процесу, приймаючи рішення на основі аналізу отриманих даних.

Роботизоване виробництво характеризується мінімальним або повним усуненням участі людини у технологічних процесах. Це відкриває широкі можливості для підвищення продуктивності, якості продукції та зменшення витрат на виробництво. Крім того, використання робіт дозволяє знизити ризики для здоров'я працівників, усуваючи потребу в їхній присутності у небезпечних, токсичних, радіоактивних або важкодоступних середовищах.

Загалом, впровадження робототехнічних систем є важливим кроком у напрямку автоматизації та цифровізації промисловості, що відповідає вимогам сучасної індустрії. Це не лише сприяє підвищенню ефективності виробництва, а й стимулює розвиток суміжних галузей науки і техніки, таких як штучний інтелект, сенсорика, мехатроніка та комп'ютерні науки [1].

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ СКЛАДСЬКОЇ ЛОГІСТИКИ

1.1. Світова роботизація

Роботизація є невід’ємною складовою інформаційного суспільства та виступає важливим інструментом інтенсифікації виробничих процесів. Під роботизацією розуміють впровадження у виробництво промислових роботів – технічних пристроїв, здатних виконувати широкий спектр виробничих операцій у повністю автоматичному режимі без безпосередньої участі людини [1].

Промисловий робот – це автоматизована електромеханічна система, що має гнучкість дій і здатна замінити людину у фізично важких, монотонних або небезпечних роботах. Основні функції таких роботів – це збирання, зварювання, пакування, транспортування, фарбування, обробка матеріалів та інші дії, що вимагають точності й повторюваності.

У виробництві застосовується велика кількість різновидів і типів роботів і робототехнічних комплексів – від найпростіших маніпуляторів із жорстко заданими алгоритмами до складних інтелектуальних роботів, здатних самостійно приймати рішення на основі аналізу вхідної інформації та адаптуватися до змін у навколишньому середовищі. Такі роботи часто поєднуються в єдину систему з численними датчиками, сенсорними пристроями, відеокамерами, глибоким машинним навчанням і системами комп’ютерного зору.

У роботах і робототехнічних комплексах широко використовуються останні досягнення інформаційної техніки: системи технічного зору, пристрої сприйняття інформації, цифрові обчислювальні модулі та мікропроцесори для аналізу та обробки даних, приводи робочих органів із цифровим програмним керуванням, а також сучасне програмне забезпечення для управління та моніторингу процесів.

Характерною особливістю роботизованого виробництва є можливість виконання повного циклу робіт з мінімальним залученням людини. Такий підхід дозволяє істотно знизити виробничі витрати, підвищити точність обробки,

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечити повторюваність дій та гнучкість у зміні конфігурацій виробництва залежно від потреб ринку.

Крім підвищення продуктивності, роботизація відіграє важливу роль у забезпеченні безпеки праці. Роботи можуть ефективно працювати в умовах, небезпечних для здоров'я людини: при високих або низьких температурах, у токсичному або вибухонебезпечному середовищі, при обробці важких або великогабаритних деталей, у зонах підвищеного ризику.

Роботизація також є важливою складовою сучасної концепції, яка передбачає цифрову трансформацію виробництва, створення «розумних фабрик», де виробничі об'єкти взаємодіють між собою в єдиній кіберфізичній системі. Це відкриває можливості для гнучкого планування виробництва, самодіагностики обладнання, віддаленого контролю та автоматичного прийняття рішень без участі людини.

Таким чином, роботизація є не лише технологічним процесом, а й важливим соціально-економічним явищем, що змінює підходи до організації праці, вимагає нових кваліфікацій від працівників і формує нову індустріальну культуру [2].

1.2 Огляд та призначення Системи автоматизації роботи складу

Автоматизація складів набуває особливої актуальності в умовах дефіциту кваліфікованої робочої сили, підвищення вартості праці, а також необхідності мінімізації людських помилок. Зокрема, роботизовані системи здатні працювати цілодобово без перерв, що відкриває нові можливості для оптимізації логістичних процесів, зменшення витрат та підвищення рівня обслуговування споживачів [3].

Особливого значення автоматизація набуває в умовах високої конкуренції на ринку. Компанії, що здатні швидко виконувати замовлення, контролювати залишки в режимі реального часу, забезпечувати точність комплектування та своєчасну доставку, отримують вагому перевагу [3]. Саме тому у провідних логістичних центрах світу активно впроваджуються роботизовані системи, що поєднують інтелектуальне програмне забезпечення з фізичними виконавчими механізмами [2].

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	11

Також не треба забувати, що ще одним чинником, що обумовлює актуальність впровадження роботизованих складських систем, є адаптація до нестабільних зовнішніх умов. Пандемія COVID-19 продемонструвала вразливість логістичних ланцюгів, які надмірно залежать від людського ресурсу. В таких умовах саме роботизовані системи виявилися найменш вразливими до зовнішніх ризиків і змогли забезпечити безперервність складських операцій навіть у періоди жорсткого карантину [3].

На сучасному етапі розвитку технологій роботизовані складські рішення вже перестали бути виключно предметом досліджень у лабораторіях чи лише складовою великого індустріального виробництва. Сьогодні їх активно впроваджують як великі логістичні хаби, так і середні та навіть малі підприємства, які прагнуть до оптимізації внутрішніх процесів і цифрової трансформації [1].

Варто також звернути увагу на екологічний аспект теми. Використання роботизованих систем дозволяє оптимізувати розміщення товарів, скоротити пробіг транспорту, зменшити витрати енергії та паперу, що в цілому сприяє сталому розвитку підприємства. З огляду на глобальну тенденцію до декарбонізації та екологічної відповідальності бізнесу, впровадження подібних систем може бути додатковою перевагою в очах партнерів і клієнтів.

Розробки та впровадження роботизованих систем для автоматизації роботи складу є надзвичайно актуальною. Вона відповідає сучасним світовим викликам, технологічним тенденціям та потребам бізнесу. Розгляд цього питання в межах дипломної роботи дозволяє дослідити не лише інженерно-технічні аспекти побудови таких систем, а й питання ефективності, надійності, масштабованості та економічної доцільності їх впровадження в умовах реального підприємства [3].

1.3 Використання роботизованої системи для автоматизації роботи складу в Україні та світі

Автоматизація складської логістики за допомогою роботизованих систем стрімко поширюється у всьому світі. Багато провідних компаній активно

						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впроваджують інноваційні рішення з метою підвищення продуктивності, зниження витрат і поліпшення якості обслуговування. Україна також поступово долучається до цієї тенденції, хоча темпи впровадження залишаються нижчими, ніж у розвинених країнах.

Світовий досвід

У країнах з розвинутою економікою роботизовані системи стали невід'ємною частиною сучасної логістичної інфраструктури. Компанії-гіганти, такі як Amazon, Alibaba, DHL, FedEx, UPS, вже давно інвестують у власні автоматизовані складські комплекси [2]. Наприклад:

Amazon використовує десятки тисяч мобільних роботів Kiva Systems (які після придбання компанії отримали назву Amazon Robotics), що переміщують стелажі з товарами до працівників, скорочуючи час комплектування замовлень [5].

Alibaba у Китаї реалізувала проєкт повністю автоматизованого складу, де роботи виконують понад 70% логістичних операцій [2].

Osado (Велика Британія) створила надсучасні логістичні центри, де роботи на стелажах пересуваються по сітчастій поверхні з високою швидкістю, сортують і подають товари в зони пакування.

Окрім цього, в логістиці активно застосовуються автономні мобільні роботи, системи візуального контролю, автоматизовані палетизатори та сортувальники, що взаємодіють із складським програмним забезпеченням у режимі реального часу [4].

Використання в Україні

В Україні темпи впровадження роботизованих складських систем ще не досягли світового рівня, однак інтерес до цієї технології зростає. Основними стримувальними факторами є висока вартість обладнання, потреба в адаптації логістичних процесів, а також нестабільна економічна ситуація. Проте низка українських підприємств та логістичних компаній вже впроваджують або тестують елементи автоматизації:

Нова пошта реалізує системи автоматизованого сортування посилок у своїх сортувальних центрах. Частина процесів виконується без участі людини.

						Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Rozetka — один з найбільших інтернет-ритейлерів в Україні — має логістичний центр, у якому використовується сучасне обладнання, включаючи автоматизовані транспортери, сканери, системи обліку та частково автономні механізми переміщення товарів.

Fozzy Group та інші великі ритейлери інтегрують системи, які керують переміщенням товарів, хоча повністю роботизовані комплекси ще не набули масового поширення [3].

Крім того, в Україні діють компанії-інтегратори, які займаються проектуванням і постачанням рішень для автоматизації складів, включаючи роботи, програмне забезпечення та системи управління [14]. Попри наявні труднощі, Україна має високий потенціал у сфері впровадження роботизованих систем. З огляду на зростання електронної торгівлі, інтеграцію в європейський ринок, розвиток ІТ-сектору та зростання вимог до логістики — автоматизація складів поступово стає необхідністю. Із розвитком ринку та зниженням вартості роботизованих технологій очікується активніше впровадження таких рішень на середніх та великих підприємствах [14].

1.4. Порівняння активних та пасивних систем автоматизації складської логістики

При проектуванні сучасних складських комплексів та оптимізації внутрішньовиробничої логістики виникає задача вибору архітектури керування транспортно-сортувальними процесами. За характером взаємодії з матеріальним потоком, рівнем автономності, гнучкістю алгоритмів та безпосереднім способом прийняття рішень під час виникнення позаштатних ситуацій, існуючі системи автоматизації розподіляють на дві великі категорії: пасивні та активні [3].

Вибір між цими концепціями визначає не лише капітальні витрати на розгортання інфраструктури, а й підсумкову пропускну здатність, адаптивність та живучість логістичної системи в умовах динамічного виробничого середовища [3].

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4.1. Пасивні системи логістичної інфраструктури

Пасивні системи автоматизації є базовим рівнем модернізації складських приміщень. До них відносять механізовані засоби транспортування, що функціонують за жорстко детермінованими траєкторіями, або статичні елементи інфраструктури, які лише сприяють переміщенню вантажів під дією зовнішніх сил чи безпосереднього керування людиною-оператором [3]. Типовими прикладами пасивних систем у складській логістиці є гравітаційні та похилі стелажні комплекси, роликові та стрічкові конвеєри без зворотного зв'язку, ручні гідравлічні візки, навантажувачі з ручним керуванням, а також статичні системи оптичної ідентифікації на основі лінійних штрих-кодів.

Особливістю пасивних систем є те, що вони не здатні самостійно реагувати на зміну топології складу, появу динамічних перешкод або флуктуації інтенсивності вантажопотоку [3]. Будь-яка оптимізація маршруту в таких системах потребує капітальної перебудови фізичного простору або прямого втручання диспетчера. Основними перевагами пасивних рішень залишаються відносна простота їхньої конструкції, надійність в ідеальних умовах та енергонезалежність окремих елементів (наприклад, гравітаційних стелажів). Проте в умовах інтенсивного виробництва їхня обмежена ефективність та жорсткість структури суттєво уповільнюють загальний такт логістичних операцій.

1.4.2. Активні роботизовані системи керування

Активні системи (до яких належить і розроблюваний у межах даного проєкту мобільний робототехнічний комплекс) базуються на принципах мехатроніки, сенсорної інтеграції та локального інтелектуального керування [14]. Вони обладнані мікроконтролерними підсистемами (на базі обчислювальних ядер типу ATmega328P), виконавчими сервоприводами та комплексом датчиків для збору інформації про навколишнє середовище в режимі реального часу [15,21].

Активна роботизована платформа самостійно вирішує завдання навігації, ідентифікації вантажу за допомогою спектрофотометричних або КМОП-датчиків (наприклад, TCS230) та безконтактного виявлення перешкод (за допомогою

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

ультразвукових радарів HC-SR04) [19,21]. Програмне забезпечення такої системи (Додаток А) містить алгоритми динамічної адаптації: у разі виникнення позаштатної ситуації (блокування проходу персоналом або іншою технікою) активна система ініціює переривання, зупиняє приводи за допомогою функції stopServos() або здійснює об'їзд, мінімізуючи прості складальних ліній. Висока точність, гнучкість і здатність функціонувати в широкому діапазоні змінних зовнішніх умов роблять активні системи ключовим елементом концепції "розумних фабрик" [2].

1.4.3. Техніко-економічне обґрунтування та аналіз параметрів ефективності

Для комплексного обґрунтування доцільності проектування активної мобільної платформи було проведено детальний аналіз експлуатаційних параметрів обох концепцій за декількома базовими інженерними критеріями:

1. **Гнучкість та адаптивність маршрутизації:** У пасивних системах здатність до адаптації повністю відсутня [3]. Зміна логістичного маршруту вимагає капітального перепланування або перенесення конвеєрних ліній. Натомість активна система за допомогою інтегрованих датчиків і виконавчих механізмів миттєво підлаштовується під нові завдання, а модифікація траєкторії руху виконується виключно програмним шляхом — внесенням змін у код мікроконтролера.
2. **Енергетична ефективність та споживання ресурсів:** Пасивні конвеєрні лінії характеризуються постійною роботою потужних промислових приводів, що призводить до значних втрат енергії під час технологічних пауз. В активних системах споживання енергії є строго дискретним і оптимізованим [14]. Живлення сервоприводів та електронних компонентів здійснюється від автономних літій-іонних акумуляторів типу ICR18650, що суттєво знижує загальні енерговитрати підприємства [20].
3. **Безпека технологічного процесу:** Пасивний складський транспорт (зокрема, ручні навантажувачі та рокли) створює високі ризики виробничого травматизму через людський фактор. Активні мобільні

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи використовують багатосенсорне злиття даних (LiDAR, ультразвукові сенсори, камери), завдяки чому превентивно виявляють пішоходів та запобігають зіткненням, піднімаючи безпеку праці на новий рівень [10].

- 4. Економічна доцільність та масштабованість флоту:** Початкова вартість впровадження активних промислових роботів світових брендів (наприклад, OTTO чи Fetch Robotics) є високою, що часто обмежує їх застосування [7,8]. Проте використання принципів низьковартісної автоматизації (Low-Cost Automation) на базі доступних мікроконтролерів ATmega328P дозволяє створити активну систему з мінімальними початковими інвестиціями [14]. При цьому масштабованість активної системи є максимально легкою — збільшення пропускної здатності складу досягається простим введенням в експлуатацію додаткових автономних одиниць роботів без зупинки всього логістичного циклу [11].

Таким чином, пасивні системи, попри свою конструкційну простоту, не здатні забезпечити рівень гнучкості та швидкості обробки вантажів, який вимагається сучасними динамічними хабами експрес-доставки наприклад «Нова Пошта» чи e-commerce платформами «Rozetka» [3].

Інтеграція активного роботизованого комплексу з функцією автоматичного розпізнавання кольору вантажу за допомогою датчика TCS230 дозволяє повністю усунути недоліки пасивних рішень [19]. Це доводить доцільність та інженерну актуальність проектування активної мобільної платформи, технічна реалізація якої детально розглядається у наступних розділах дипломної роботи.

1.5 Основні методи навігації у роботизованих системах на складських приміщеннях

У сучасних складських роботизованих системах навігація є ключовим елементом, який забезпечує точне позиціонування, безпечне пересування та

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективне виконання завдань [10]. Вибір методу навігації залежить від специфіки приміщення, типу завдань і бюджету. Нижче розглянуто основні підходи до навігації автономних мобільних роботів у складських умовах [4].

1. Лінійна (оптична) навігація

Робот переміщується за попередньо нанесеними лініями (чорною чи кольоровою стрічкою) на підлозі. Оптичні сенсори зчитують контраст і керують напрямом руху.

Переваги:

Простота реалізації;

Низька вартість обладнання;

Надійність у стабільних умовах.

Недоліки:

Низька гнучкість (зміна маршруту потребує фізичного втручання);

Зношення або забруднення стрічки порушує навігацію.

2. Магнітна навігація

Робот орієнтується за допомогою магнітної стрічки або магнітних міток, вбудованих у підлогу.

Переваги:

Менше впливу від забруднення;

Стабільність у повторюваних маршрутах.

Недоліки:

Вартість установки;

Обмежена адаптивність до змін у логістиці.

3. QR-/RFID-навігація

Роботи зчитують маркери (QR-коди, RFID-мітки), розміщені в ключових точках маршруту, для локалізації та прийняття рішень.

Переваги:

Простота оновлення маршрутів;

Можливість кодувати додаткову інформацію.

						Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки:

Потреба в хорошому освітленні (для QR);

Залежність від надійності маркерів.

4. Навігація за допомогою лідарів (LiDAR SLAM)

Система сканує навколишнє середовище та порівнює його з картою, створеною в режимі реального часу (SLAM — Simultaneous Localization and Mapping).

Переваги:

Висока точність позиціонування;

Динамічна адаптація до змін середовища.

Недоліки:

Висока вартість обладнання;

Потреба в обчислювальних ресурсах.

5. Навігація за допомогою камер (візуальна SLAM)

Робот використовує одну або кілька камер для аналізу простору, об'єктів та локалізації [4].

Переваги:

Можливість розпізнавання об'єктів;

Актуальна в умовах, де інші сенсори можуть бути недоступні.

Недоліки:

Вразливість до освітлення;

Високі вимоги до обробки відеопотоку.

6. Інерціальна навігація

Використання акселерометрів і гіроскопів для визначення зміни положення у просторі.

Переваги:

Автономність від зовнішніх сенсорів;

Сумісність з іншими методами.

Недоліки:

						Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кумулятивна похибка (дрейф);
Потреба в періодичній корекції [5].

1.6 Аналоги Роботизованих систем для автоматизації роботи складу

На сьогоднішній час на ринку присутня не велика кількість аналогічних нашому виробу готових рішень, одна з них це промисловий робот-перевізник який представив Amazon [5]. Amazon розробив систему роботів в якій кожен працює автономно та не заважає роботі іншому роботу. Принцип роботи: Робот під'їжджає до палету з вантажом підіймає на невелику відстань і відвозить до точки прийому. Фото робота-перевізник на складі Amazon зображено на рис.1.1 [5].



Рис.1.1 - Фото робота-перевізник на складі Amazon

Handle – це робот, створений для виконання завдань з обробки матеріалів. На відміну від інших роботів Boston Dynamics, таких як Atlas (гуманоїд) та Spot (четвероногий робот), Handle є двоногим роботом, оснащеним колесами [6]. Така унікальна конструкція поєднує стабільність і гнучкість ніг з ефективністю і швидкістю коліс, що робить його ідеальним для завдань у складських і розподільчих середовищах фото зображено на рис.1.2[6].

Основні характеристики і можливості

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Колісна мобільність: Handle використовує колеса для швидкого і ефективного переміщення по рівних поверхнях. Це дозволяє йому швидко переміщуватися на великі відстані, що є перевагою у великих складах [6].

Динамічний баланс: Робот може динамічно балансувати під час перенесення вантажів завдяки складним системам керування. Це дозволяє йому справлятися з нерівними поверхнями і невеликими перешкодами, зберігаючи стабільність.

Обробка вантажів:

Handle оснащений парою роботизованих рук, які можуть захоплювати і підіймати предмети. Він призначений для обробки коробок та інших предметів, які зазвичай знаходяться у складських умовах [6].

Системи зору: Робот використовує систему зору для навігації і ідентифікації об'єктів. Це включає завдання з підбирання і розміщення, що вимагають точної ідентифікації та маніпуляції предметами.

Маневреність: Незважаючи на колеса, Handle здатен виконувати маневрені дії. Він може присідати для підбирання предметів, а потім розтягуватися для їх розміщення на вищих поверхнях [6].

Застосування :Handle особливо підходить для логістики і обробки матеріалів. Його здатність швидко рухатися і обробляти різні вантажі робить його ідеальним для:

Складських приміщень:Автоматизація процесу переміщення коробок і товарів по складу, підвищення ефективності і зниження потреби у ручній праці.

Розподільчих центрів:Сприяння швидкому і точному сортуванню та доставці пакетів і товарів [6].

Розробка і впровадження

Handle є частиною ширших зусиль Boston Dynamics щодо створення роботів, які можуть працювати поряд з людьми у різних галузях [6]. Boston Dynamics прагне забезпечити рішення, які задовольняють конкретні потреби індустрії, покращуючи операційну ефективність і безпеку.

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.1.2 – Фото Boston Dynamics – Handle

Fetch Robotics спеціалізується на автономних мобільних роботах для оптимізації промислових процесів. Їх серія "Freight" фокусується на транспортуванні матеріалів у складах та виробничих приміщеннях, фото зображено на рис.1.3 [7].

Основні характеристики

Автономна навігація: Роботи використовують сенсори та алгоритми для самостійної навігації та уникання перешкод [7].

Вантажопідйомність: Моделі мають різну вантажопідйомність для різних потреб.

Безпека: Оснащені LiDAR і 3D камерами для безпечної роботи поруч з людьми [7].

Інтеграція: Легко інтегруються з існуючими системами управління складом (WMS) та виробництвом (MES).

Управління парком: Платформа FetchCore дозволяє централізовано керувати роботою роботів [7].

Переваги

Ефективність: Автоматизація повторюваних завдань підвищує продуктивність.

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Економія: Зниження витрат на ручну працю.

Масштабованість: Гнучкість у масштабуванні під потреби бізнесу.

Аналітика: Надає дані для оптимізації робочих процесів.

Роботи Freight від Fetch Robotics значно підвищують ефективність і безпеку логістичних та виробничих операцій.



Рис.1.3 – фото робота Freight від Fetch Robotics

Clearpath Robotics, компанія, відома своїм досвідом у галузі автономної робототехніки, розробила лінію промислових роботів ОТТО. Роботи ОТТО призначені для підвищення ефективності та продуктивності у різних промислових і складських умовах, фото зображено на рис1.4 [8]. Ось деякі ключові особливості та аспекти лінії ОТТО:

Ключові Особливості

Автономність та Навігація:

Передові Датчики: Роботи ОТТО оснащені сучасними датчиками, включаючи LiDAR і камери, що дозволяє їм ефективно орієнтуватися в просторі та уникати перешкод [8].

Переваги

Автономність та Ефективність:

Зниження витрат на працю: Автономні роботи ОТТО можуть виконувати завдання без людського втручання, що знижує витрати на робочу силу.

						Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підвищена продуктивність: Роботи працюють без перерв і втоми, що збільшує загальну продуктивність на виробництві та складах.

Безпека:

Уникнення перешкод: Завдяки передовим датчикам роботи можуть уникати перешкод і запобігати зіткненням, що підвищує безпеку на робочому місці.

Зменшення нещасних випадків: Використання роботів ОТТО знижує ризик травмування працівників при виконанні важких або небезпечних робіт.

Гнучкість:

Адаптивність: Роботи ОТТО легко адаптуються до різних виробничих середовищ і можуть виконувати широкий спектр завдань.

Модульність: Система дозволяє легко налаштовувати роботів під конкретні потреби підприємства.

Недоліки

Висока Вартість:

Інвестиції: Початкова вартість придбання та встановлення роботів ОТТО може бути високою, що може бути бар'єром для малих і середніх підприємств [8].

Обслуговування: Витрати на технічне обслуговування і підтримку також можуть бути значними.

Складність Впровадження:

Необхідність перенавчання: Працівники можуть потребувати перенавчання для роботи з новими технологіями, що може зайняти час і ресурси.

Інтеграція з існуючими системами: Може виникнути необхідність у складній інтеграції роботів ОТТО з вже існуючими системами управління та виробництва.

Технологічні Обмеження:

Залежність від інфраструктури: Для ефективної роботи роботів ОТТО потрібна надійна інфраструктура, включаючи стабільне Wi-Fi покриття та електропостачання.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обмеження в складних умовах: Роботи можуть мати труднощі з орієнтацією в надзвичайно складних або нестандартних умовах, таких як дуже тісні або нерівні простори.



Рис.1.4 - Фото Clearpath Robotics – ОТТО

Головною метою впровадження таких систем є підвищення ефективності логістичних процесів, оптимізація ресурсів та забезпечення безперебійної роботи в умовах інтенсивного навантаження та важких виробничих умов.

Такі системи дозволяють значно знизити вплив людського фактора, мінімізувати помилки під час обробки замовлень, а також підвищити швидкість виконання операцій. Окрему увагу приділено використанню мобільних роботизованих платформ, автоматизованих стелажних систем і технологій штучного інтелекту, які відкривають нові можливості для гнучкого управління складською інфраструктурою. Проведений аналіз демонструє актуальність впровадження автоматизованих рішень у сучасних логістичних ланцюгах та вказує на перспективи їх подальшого розвитку.

Розглянуто переваги та недоліки різних типів автоматизованих роботів. З'ясовано, що: Лінійна навігація доцільна у простих, статичних середовищах із фіксованими маршрутами, але непридатна для гнучких чи динамічних складів

Магнітна навігація забезпечує надійність у промислових умовах і нечутлива до забруднень, але потребує капітального монтажу та складна у зміні маршрутів. Найточніший метод навігації для складних та змінних середовищ це LiDAR-навігація, але для її встановлення потрібний великий бюджет та спеціалісти в галузі для її інтеграції в складське середовище [4,10].

1.7. Виклики та перспективи розвитку роботизованих складських систем

У сучасних умовах стрімкого зростання обсягів онлайн-торгівлі та роздрібної торгівлі автоматизація складських процесів стає необхідною не лише для підвищення продуктивності, а й для збереження конкурентоспроможності. Водночас впровадження роботизованих систем на складах супроводжується низкою серйозних викликів. По-перше, це інтеграція нових робототехнічних рішень із уже існуючими системами управління складом WMS та ERP[9]: часто програмні продукти мають відмінні протоколи обміну даними, через що необхідно розробляти уніфіковані API або використовувати складні проміжні модулі-містки [9]. Такий процес потребує значних ресурсів на налаштування та тестування, і навіть після впровадження може виникати необхідність оперативного доопрацювання при оновленні однієї з підсистем.

По-друге, навігація в умовах динамічного середовища складу залишається технічною проблемою. Окремі методи – наприклад, лише LiDAR або лише візуальна одометрія – не завжди забезпечують безпомилкове картографування й стійкість роботи за умов мінливого освітлення, запиленості чи присутності флору робітників [10]. Тому сучасні системи потребують багатосенсорного злиття даних: поєднання показів LiDAR, ультразвукових чи інфрачервоних сенсорів та камер [10]. Однак розробка й калібрування таких алгоритмів складні, вони вимагають потужних обчислювальних платформ і ретельного тестування в реальних умовах.

Ще один важливий виклик стосується масштабування роботизованого флоту. Зі збільшенням кількості автономних машин мережеве середовище має забезпечувати високу пропускну здатність і мінімальні затримки (наприклад,

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання Wi-Fi 6 чи приватної мережі 5G) [11]. Централізоване планування маршрутів у поєднанні з алгоритмами запобігання колізіям дає змогу уникнути заторів у вузьких коридорах і знизити ризик простою.

Крім технічних аспектів, організаційні та економічні фактори також відіграють важливу роль. Початкові інвестиції у придбання роботів, ліцензії програмного забезпечення та навчання персоналу можуть бути значними, особливо для малих і середніх підприємств. Окупність таких проектів зазвичай досягається не раніше ніж за один–два роки інтенсивної експлуатації [12]. Водночас компаніям доводиться переглядати кадрову структуру: з'являється потреба у фахівцях із підтримки робототехнічних комплексів, DevOps-інженерах та інженерах із кібербезпеки.

Розвиток стандартів безпеки та протоколів комунікації, таких як ROS і OPC UA, поступово спрощує інтеграцію нових моделей роботів, водночас підвищуючи захищеність мережі від кіберзагроз [15]. Важливим елементом є й багаторівнева система безпеки на підприємстві: від фізичних огорожень і безконтактних «мережевих» зон до алгоритмів екстреного зупинення та виявлення пішоходів за допомогою комп'ютерного зору.

Майбутні перспективи пов'язані з активним застосуванням штучного інтелекту та цифрових двійників (digital twins), які дозволяють моделювати процеси віртуально та прогнозувати вузькі місця ще до їхньої появи в реальному середовищі [12]. З'являються дешевші й енергоефективні платформи для edge-обчислень, що знизить затримки при обробці даних без залучення центрального сервера. Колаборативні роботи дедалі частіше працюють поруч із людьми, виконуючи допоміжні операції та знижуючи ризик професійної втоми [13]. Інтеграція складів із останньою милею доставки – за допомогою дронів чи автономних наземних платформ—відкриває шлях до створення єдиної, повністю автономної логістичної екосистеми. Таким чином, подолання сучасних викликів разом із впровадженням інноваційних технологій забезпечить подальший розвиток

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

«розумних» складів із високою пропускнуою здатністю, гнучкістю й економічною ефективністю.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дипломного проєкту виконано комплексний науково-технічний аналіз сучасного стану, тенденцій та перспектив розвитку роботизованих систем для автоматизації складської логістики як в Україні, так і у світовій практиці. За результатами проведеного аналітичного огляду та патентно-літературних досліджень можна зробити такі висновки:

Досліджено глобальні процеси світової роботизації та встановлено, що інтеграція автономних мехатронічних комплексів є невід'ємною складовою концепції Індустрії 4.0. Перехід до повністю автоматизованих складів (Smart Warehouses) дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, оптимізувати енерговитрати, забезпечити безперервний цикл роботи у кілька змін і суттєво знизити ризики виробничого травматизму в небезпечних або важких умовах праці.

Проаналізовано досвід впровадження складської робототехніки провідними світовими компаніями (Amazon, Alibaba, Boston Dynamics, Fetch Robotics). Визначено, що незважаючи на високу ефективність існуючих промислових аналогів (таких як платформи Kiva, Freight або OTTO), їх масове розгортання на підприємствах малого та середнього бізнесу в Україні наразі обмежене через надто високу початкову вартість обладнання, складність інтеграції з наявними WMS/ERP системами та специфічні вимоги до мережевої інфраструктури. Це обґрунтовує актуальність розробки гнучких і доступних рішень на базі концепції Low-Cost Automation.

Проведено порівняльний аналіз активних та пасивних систем автоматизації логістики. Доведено, що традиційні пасивні рішення (конвеєрні лінії, рольганги, мануальний транспорт) мають жорстку структуру і не здатні адаптуватися до динамічних змін складського середовища. Натомість активні роботизовані системи, які мають локальний інтелектуальний контур керування та зворотний

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зв'язок від сенсорів, забезпечують максимальну гнучкість маршрутизації, дискретне та оптимізоване споживання енергії, а також високий рівень безпеки завдяки алгоритмам запобігання колізіям.

Розглянуто основні методи навігації автономних мобільних роботів у складських приміщеннях. Встановлено, що хоча високоточні методи на основі LiDAR SLAM або комп'ютерного зору Visual SLAM забезпечують максимальну адаптивність, вони потребують значних обчислювальних ресурсів та високих фінансових витрат. Для задач локальної внутрішньоскладської дистрибуції вантажів за фіксованими або напівстатичними траєкторіями найбільш економічно та технічно доцільним є використання комбінованого підходу: поєднання лінійної (або маркерної) навігації із системою безконтактного ультразвукового сканування простору.

Визначено технічні виклики, які постають при масштабуванні флотів мобільних роботів, серед яких ключовими є злиття даних від різномірних сенсорів, затримки передачі сигналів у бездротових мережах комунікації та складність калібрування приводів на поверхнях із різними коефіцієнтами тертя.

Таким чином, результати аналізу підтвердили інженерну доцільність, актуальність та практичну цінність розробки активного мобільного робота-перевізника з функцією колірного розпізнавання вантажу на базі доступної мікроконтролерної архітектури. Отримані теоретичні висновки та сформовані тактико-технічні вимоги є базою для наступного розділу дипломного проєкту, присвяченого безпосередньому підбору елементної бази, синтезу структурно-електричних схем, розрахунку жорсткості конструкції та розробці алгоритмів керування створеного прототипу.

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО РОБОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОТИ СКЛАДУ

2.1. Призначення розроблюваного приладу та умови його експлуатації

Розроблюваний мобільний робототехнічний комплекс (автономний робот-перевізник) призначений для автоматизації внутрішньоскладських логістичних процесів, пов'язаних із транспортуванням, первинним сортуванням та адресною доставкою штучних вантажів і посилок вагою до 1 кг без участі людини-оператора.

Основне функціональне призначення пристрою полягає у виконанні повного циклу транспортного завдання, який включає такі етапи:

автоматичний рух від зарядної станції до зони завантаження;

сканування та оптичне розпізнавання колірного маркера, нанесеного на тару або пакувальний контейнер вантажу, за допомогою інтегрованого датчика TCS230[19];

автоматичний вибір оптимального програмного маршруту руху на основі ідентифікованого кольору (адресація вантажу);

безперервне прямолінійне та кутове маневрування за заданою траєкторією за допомогою приводів безперервного обертання SpringRC SM-S4303R[18];

безконтактний моніторинг простору за ходом руху за допомогою ультразвукових сенсорів HC-SR04 для запобігання колізіям зі статичними та динамічними перешкодами [21];

адресна доставка вантажу до відповідної зони розвантаження (стелажа чи піддону) та повернення у вихідну точку або на зарядну станцію для очікування нового циклу.

2.1.1. Область застосування приладу

Областю застосування розробленішого прототипу є логістична інфраструктура підприємств малого та середнього бізнесу, сортувальні центри служб експрес-доставки, зони комплектації замовлень E-commerce платформ, а

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також міжцехові транспортні артерії машинобудівних підприємств [14]. Завдяки відкритій архітектурі та реалізації за принципом низьковартісної автоматизації (Low-Cost Automation), прилад також призначений для використання в академічному середовищі як лабораторно-демонстраційний стенд для дослідження алгоритмів керування мобільними роботами.

2.1.2. Умови експлуатації та технічні обмеження

Для забезпечення заявленої точності навігації з відхиленням не більше 20 мм та коректного функціонування сенсорних систем, прилад має експлуатуватися за таких умов:

Тип робочої поверхні: гладка, тверда горизонтальна поверхня (промислова шліфувана плитка, лінолеум, ламінат) із коефіцієнтом тертя ковзання гуми по поверхні не менше $\mu = 0.30$;

Кліматичні умови: експлуатація у закритих опалювальних приміщеннях при температурі навколишнього повітря від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості до 85% без утворення конденсату [23];

Освітленість робочої зони: стабільне штучне або природне освітлення без різких динамічних перепадів та прямих сонячних променів, що можуть викликати засвічення фотодіодної матриці датчика кольору TCS230 [19];

Параметри навколишнього середовища: відсутність у повітрі високих концентрацій струмопровідного пилу та агресивних хімічних речовин, здатних викликати корозію відкритих елементів друкованих плат та з'єднувальних провідників.

2.2 Підбір елементів

Проектування мобільного робототехнічного комплексу для автоматизації складських логістичних процесів потребує синтезу оптимальної апаратної архітектури, що здатна забезпечити високу точність навігації, безперебійність функціонування та безаварійність руху в динамічному середовищі складу. На

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі техніко-економічних висновків та аналізу існуючих промислових аналогів, проведених у першому розділі, в якості базової концепції приладу було обрано принцип низьковартісної автоматизації (Low-Cost Automation) [14]. Цей підхід дозволяє реалізувати гнучкий мехатронічний пристрій із мінімальною собівартістю компонентної бази, зберігаючи водночас високу функціональність, модульність та ремонтпридатність системи.

Для візуалізації взаємодії між датчиками та мікроконтролером було розроблено структурну схему. На рис. 2.1 зображено структурну схему для розробленого прототипу складського робота, яка відображає основні функціональні вузли та їх взаємозв'язок.



Рис.2.1 Структурна схему прототипу складського робота

У якості мікроконтролера було обрано Atmega328P, а саме плату Arduino nano [15,16]. Такий вибір обумовлений наступними причинами: даного контролеру вистачить для виконання поставленої задачі, написання програми є найпростішим серед аналогів, присутня достатньо велика кількість бібліотек, що дозволять оптимізувати код. Також вагомою причиною для вибору даного контролера є

порівняно низька ціна. Принципова схема та зовнішній вигляд плати Arduino Nano зображено на рис.2.2 та рис.2.3 [16].

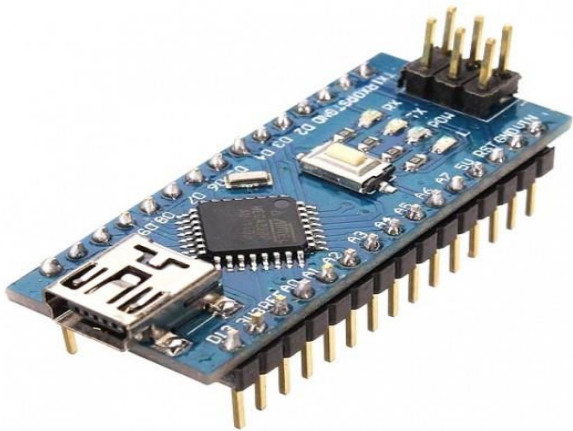


Рис.2.2 – Зовнішній вигляд плати Arduino Nano

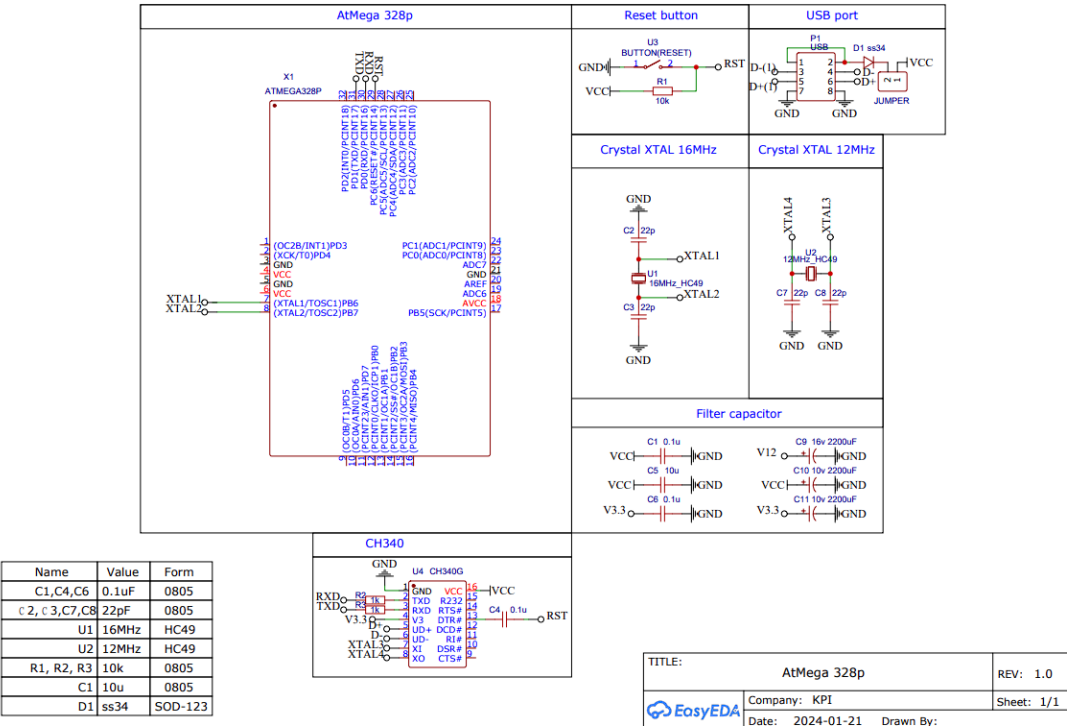


Рис.2.3 - Принципова схема Arduino Nano

Технічні характеристики плати Arduino Nano :

Мікроконтролер: ATmega328P;

Робоча напруга: 5В;

Тактова частота: 16МГц;

Вхідна напруга живлення: 6-12В;

Цифрові входи/виходи: 14 (6 з яких ШІМ);

Аналогові входи: 8;

Максимальний струм одного виводу: 40мА;

Максимальний струм одного контакту: (3.3В): 50мА;

Інтерфейси: I2C/TWI, SPI, UART, PWM;

USB-перетворювач: CH340G;

Flash-пам'ять: 32Кб;

Оперативна пам'ять (SRAM): 2Кб;

EEPROM-пам'ять: 1Кб;

Розмір: 44.6x17.8x7мм;

Для кращого розуміння, ця принципова схема зображує базову апаратну реалізацію плати Arduino Nano на мікроконтролері ATmega328P. На схемі представлено ключові вузли: генератор тактових імпульсів на кварцах 16 МГц та 12 МГц, кнопка скидання, лінії живлення, USB-інтерфейс з чипом CH340G для перетворення USB–UART, а також фільтрувальні конденсатори. Така структура забезпечує стабільну роботу мікроконтролера, його програмування та зв'язок із комп'ютером, що дозволяє використовувати цю плату в широкому спектрі.

Як елементи керування рухомої платформи використано два сервоприводи рис. 2.4 та (MG996R), для точного піднімання на задану висоту[17].

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



Рис. 2.4- Сервопривід TowerPro MG996R

Характеристики серво-привода (MG996R):

Стабільний та надійний захист від пошкоджень

Металевий привід

Підшипник: пластикова втулка

Довжина дроту 300 мм

Розміри 40x19x43 мм

Маса 55 г

Кут повороту: 180 градусів

Робоча швидкість: 0.17 сек/60 градусів (4.8В без навантаження)

Робоча швидкість: 0.13 сек/60 градусів (6В без навантаження)

Пусковий момент: 9.4 кг/см при живленні 4.8В

Пусковий момент: 11 кг/см при живленні 6В

Робоча напруга: 4.8 – 7.2В

Для руху прототипа я використав сервоприводи SpringRC SM-S4303 360° рис.2.5 [18]. Вони забезпечують точний рух прототипа за заданим маршрутом. Сервопривід SpringRC SM-S4303R є одним із небагатьох аналогових сервоприводів безперервного обертання. Сервопривід дуже якісно виконаний. Шестерні виконані із міцного пластику.

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.5 - Сервопривід SM-S4303 360°

Характеристики серво-привода SM-S4303 360°:

Модель: SM-S4303R

Матеріал шестірня: пластик

Тип обертання: безперервне обертання

Швидкість обертання:

43 rpm (4.8V)

54 rpm (6V)

Обертаючий момент:

3.3 кг*см (4.8V)

5.1 кг*см (6 V)

Розмір: 42 x 20.5 x 39.5мм

Датчик кольору TCS230 рис.2.6 поєднує в собі налаштовувальні кремнієві фотодіоди та перетворювач струм-частота на одній монолітній КМОП-мікросхемі [19]. Повномасштабна вихідна частота цього датчика кольору може бути розширена за допомогою одного з трьох попередньо встановлених значень поданих через два вхідних контакти. TCS230 поставляються з цифровим входом і виходом, які дозволяють безпосередньо підключатися до мікроконтролеру [19].

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.6 - Датчик кольору TCS230

Характеристики датчик кольору TCS230 :

чіп: TCS230

вхідна напруга: 3В ~ 5В

оптимальна відстань визначення кольору: 10мм

високоякісна конвертація інтенсивності світла в частоту

програмований колір та повномаштабна вихідна частота

підключення безпосередньо до мікроконтролера

розміри плати 30мм на 24мм

Акумулятор Westinghouse Li-ion ICR18650 рис.2.7 використовується для забезпечення працездатності портативних пристроїв різного призначення [20]. Акумулятор має тривалий термін роботи та зберігає свої властивості в екстремальних умовах із кількістю циклів перезарядження понад 500. Робоча температура розряду: -15 ~ + 45 °С. Робоча температура заряджання: 0 ~ + 45 °С. Завдяки високій щільності струму елемент живлення забезпечує гарантовану стабільну напругу упродовж циклу розряджання, одночасно має низький саморозряд 5-7%. Без "ефекту пам'яті", що дає змогу заряджати його без попереднього розряджання. Не можна використовувати в приладах без захисту від перерозряджання.

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.7 - Акумулятор Westinghouse Li-ion ICR18650

Типова ємність 1800 мА·год

Номінальна напруга: 3.7 В

Мінімальна напруга: 2.75 В

Максимальний струм розряду 2000 мА

Плюсовий контакт плоский (Flat)

Тип хімії: ICR

Діаметр: 18 мм

Довжина: 65 мм

Вага: 42 г

Для забезпечення безаварійного руху та своєчасного виявлення перешкод на траєкторії мобільного комплексу було інтегровано ультразвуковий датчик НС - SR04 рис.2.8 він виконує важливу роль забезпечення безпечного й надійного руху в складському середовищі [21]. Насамперед він постійно сканує простір перед роботом на відстані до 2–4 метрів, дозволяючи виявляти як нерухомі перешкоди (стіни, стелажі), так і рухомі об'єкти (людей, інші машини). Якщо на шляху з'являється перешкода, мікроконтролер миттєво ініціює алгоритм об'їзду або екстреного гальмування, що гарантує безпеку як вантажу, так і персоналу.

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.2.8 Ультразвуковий датчик HC - SR04

Характеристики:

Робоча напруга: 3,8 – 5,5 В

Тип: HC-SR04

Споживаний струм: 8 мА

Частота: 40 кГц

Максимальна дистанція: 1500 мм

Мінімальна дистанція: 0 см

Роздільна здатність: 3 мм

Ширина імпульсу: 10 мкс

Ку: 15 градусів

Після детального аналізу та обґрунтування вибору кожного елемента апаратної бази: мікроконтролера ATmega328P, датчика кольору TCS230, ультразвукових давачів HC-SR04, сервоприводів SpringRC та силових акумуляторів Westinghouse, виникає задача об'єднання зазначених модулів у єдину працездатну систему. Для забезпечення коректної комутації інформаційних ліній та кіл живлення, а також для запобігання апаратним збоям під час функціонування мехатронного комплексу, було розроблено принципову електричну схему пристрою.

Розроблена схема враховує специфіку розподілу струмів: логічна частина датчиків і керуючі входи сервоприводів підключені безпосередньо до відповідних

цифрових та аналогових виводів плати Arduino Nano, тоді як силова частина двигунів отримує стабільне живлення від загальної акумуляторної шини.

Повну принципову електричну схему розробленого мобільного робототехнічного комплексу, що відображає всі міжмодульні зв'язки та топологію підключення периферії, наведено нижче на рис. 2.9.

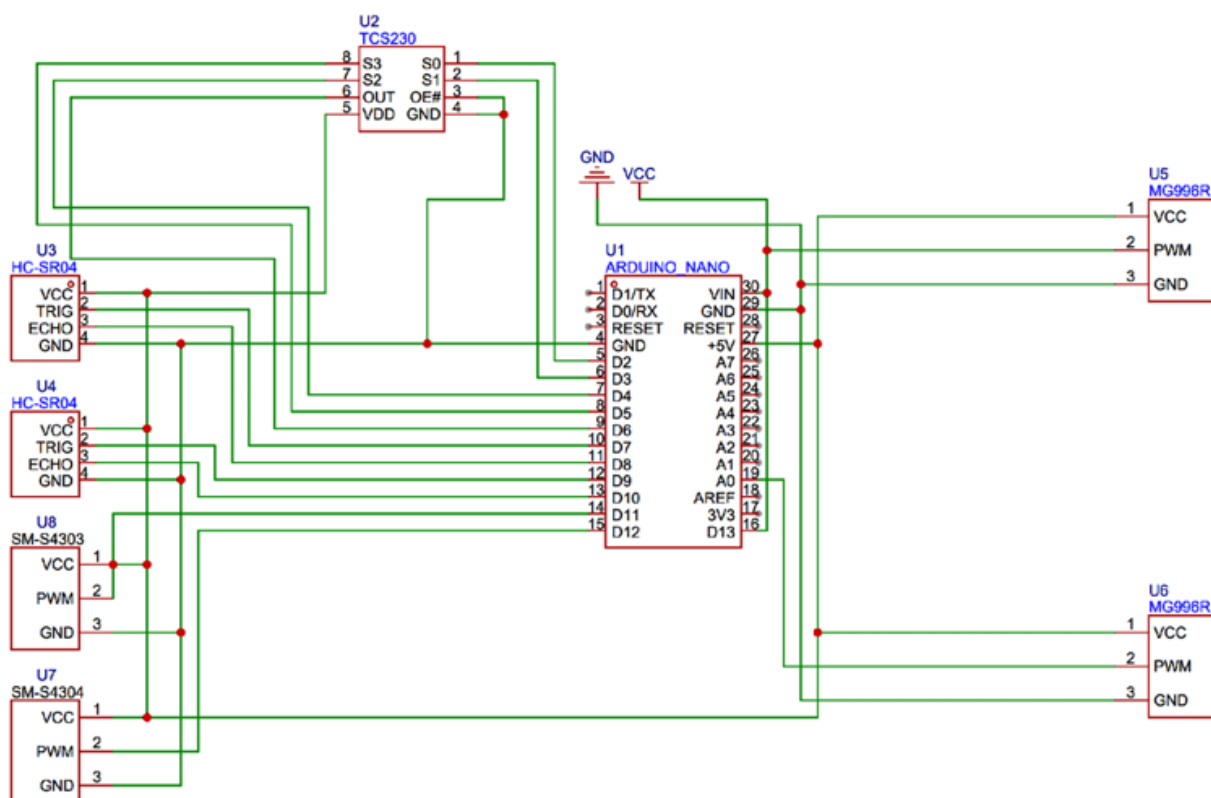


Рис. 2.9 – Електрична схема приладу

2.3 Вимоги до розроблюваного приладу

1. Загальні технічні вимоги

Автоматизований перевізник повинен мати вантажопідйомність не менш як 0,2 кг із резервом міцності щонайменше 20 % від номіналу, а габаритні розміри слід підбирати відповідно до ширини технологічних проходів складського або виробничого приміщення. Енергетична система базується на літій-іонному акумуляторі напругою 7,3 В і ємністю не менше 3500 мА·год, який забезпечує не менше восьми годин безперервної роботи та заряджається до 80 % ємності не довше ніж за дві години.

2. Функціональні вимоги

Перевізник має виконувати автономну навігацію із застосуванням візуальних систем локалізації з точністю позиціонування до ± 20 мм. Карта оточення оновлюється в реальному часі, що дає змогу будувати оптимальні маршрути з урахуванням динамічних перешкод, що раптово виникають на маршрут. Для виявлення об'єктів у зоні до одного метра використовуються ультразвукові або оптичні сенсори безпеки, які дозволяють протягом 0,3 с зупинити рух або розпочати об'їзд.

3. Продуктивність та експлуатаційні вимоги

Пробіг зі швидкістю до 1 м/с забезпечує номінальний режим роботи, а в екстрених ситуаціях можливе прискорення до 1,5-2 м/с. Прискорення в прямолінійному русі не перевищує $0,5 \text{ м/с}^2$, а для повної зупинки з номінальної швидкості достатньо не більше секунди. Пристрій експлуатується в діапазоні температур від $+5^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$ і відносній вологості до 85 % без конденсації, відповідає класу захисту IP54.

4. Вимоги безпеки

Перевізник оснащено аварійною кнопкою «Стоп», а також автоматично активує гальмування у разі втрати зв'язку або живлення. Безпечна зона навколо нього становить принаймні 0,5 м — відповідно до норм ІЕС 60204-1 з електробезпеки [23].

6. Надійність і ремонтпридатність

Конструкція модульна, що дозволяє швидко замінювати блоки навігації та силової частини, а регламентне технічне обслуговування виконується раз на 250 годин роботи.

2.4. Конструкція приладу та просторове компонування модулів

Конструкція розроблюваного мобільного робототехнічного комплексу виконана за модульним принципом із використанням двоярусної архітектури просторового компонування [14]. Така структура дозволяє ефективно розділити

						Арк. 41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

логічні контури керування, інформаційно-вимірювальні датчики та силові виконавчі механізми, забезпечуючи при цьому компактність, збалансовану масогабаритну конфігурацію та жорсткість всієї мобільної платформи.

В якості основного конструкційного матеріалу для обох ярусів рухомої платформи обрано листовий електротехнічний склотекстоліт товщиною 2 мм. Даний матеріал має високі діелектричні властивості, низьку питому масу та достатній рівень міцності для сприйняття експлуатаційних навантажень від ваги встановленого обладнання та транспортуваних посилок.

2.4.1. Нижній ярус

Нижня текстолітова основа є базовим несним елементом ходової частини робота. На ній інтегровано такі компоненти та вузли:

Ядро керування: обчислювальний мікроконтролер ATmega328P (плата Arduino Nano) [15], що здійснює координацію всіх підсистем;

Ходові приводи: два сервоприводи безперервного обертання SpringRC SM-S4303R із кутом розвороту 360 [18]. Вони здатні витримувати значні радіальні та осьові навантаження, забезпечуючи динамічне керування лінійною швидкістю та напрямком руху робота за рахунок зміни ШІМ-сигналів;

Кінематична схема: реалізована за трипортовою схемою (диференціальний привід), яка включає два ведучі колеса, жорстко з'єднані з валами сервоприводів SpringRC, та два опорні напрямні підшипники (пасивні роликові опори калібрувального типу) для забезпечення просторової стабілізації та маневреності платформи на площині;

Енергосистема: блок автономного живлення на базі літій-іонних акумуляторних батарей [20];

Підсистема безпеки: у передній та задній частині нижнього ярусу встановлено ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 [21]. Його просторова орієнтація дозволяє безперервно сканувати дорожній коридор за курсом руху комплексу, що забезпечує своєчасне виявлення перешкод, запобігає аварійним

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зіткненням та дозволяє роботу рухатися строго за заданим маршрутом без відхилень від траєкторії.

2.4.2. Верхній ярус

Верхня текстолітова платформа виконує функцію робочого вантажного столу і є рухомою. Вона кінематично з'єднана з двома виконавчими силовими сервоприводами TowerPro MG996R [17], які забезпечують її точне вертикальне переміщення (підйом або опускання на задану висоту) для виконання операцій автоматизованого завантаження та розвантаження посилок.

У центрі верхньої рухомої платформи виконано наскрізне технологічне вікно, в якому безпосередньо змонтовано оптичний датчик розпізнавання кольору TCS230 [19]. Таке просторове розміщення є інженерно обґрунтованим, оскільки при укладанні вантажу в сортувальну зону робота, датчик опиняється безпосередньо під кольоровим маркером тари.

Висока роздільна здатність датчика TCS230 дозволяє чітко диференціювати широкий спектр відтінків кольорової палітри маркерів. Це забезпечує можливість програмування та формування практично необмеженої кількості гнучких логістичних маршрутів доставки товарів до різних зон складу, оскільки кожному розпізаному кольору відповідає свій унікальний вектор руху в керуючому коді мікроконтролера.

2.5. Конструкторсько-технологічне проектування елементів робототехнічного комплексу

Процес проектування автономного мобільного робототехнічного комплексу для автоматизації складських приміщень вимагає комплексного підходу, що поєднує розробку електронно-керуючого контуру з детальним конструкторським синтезом механічних вузлів. Перехід від принципової електричної схеми та алгоритмів функціонування до створення фізичного прототипу приладу базується на методах тривимірного комп'ютерного моделювання у середовищі SolidWorks.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Використання тривимірного моделювання є критично важливим етапом, оскільки воно дозволяє вирішити низку важливих інженерних задач:

провести точне просторове компонування електронних плат, виконавчих механізмів та джерел автономного живлення;

перевірити конструкцію на наявність геометричних колізій під час руху механічних підсистем;

визначити точні масо-габаритні та інерційні характеристики окремих деталей і всього виробу в зборі для подальшого аналізу динамічної стійкості;

підготувати технологічну базу для виготовлення нестандартних деталей методом адитивного виробництва, або лазерного розкрою матеріалу.

З огляду на специфіку умов експлуатації на складських об'єктах (наявність дрібних нерівностей підлоги, потенційні вібрації при транспортуванні вантажів масою до 1 кг), кожна деталь корпусу та кріплення підлягала ретельному геометричному аналізу. На основі розробленої електричної схеми приладу було створено тривимірну складальну модель мехатронного комплексу в зборі, яка є основою для подальшого технологічного виготовлення прототипу.

2.5.1. Просторова архітектура та компонування мобільного робота

Для забезпечення високої маневреності, компактності та чіткого просторового розділення функціональних підсистем, для мобільного робота було обрано дворівневу рамну архітектуру з диференціальною схемою ходової частини. Як показано на рис. 2.10, просторова модель відображає інтеграцію всіх апаратних модулів у єдину мехатронічну систему.

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

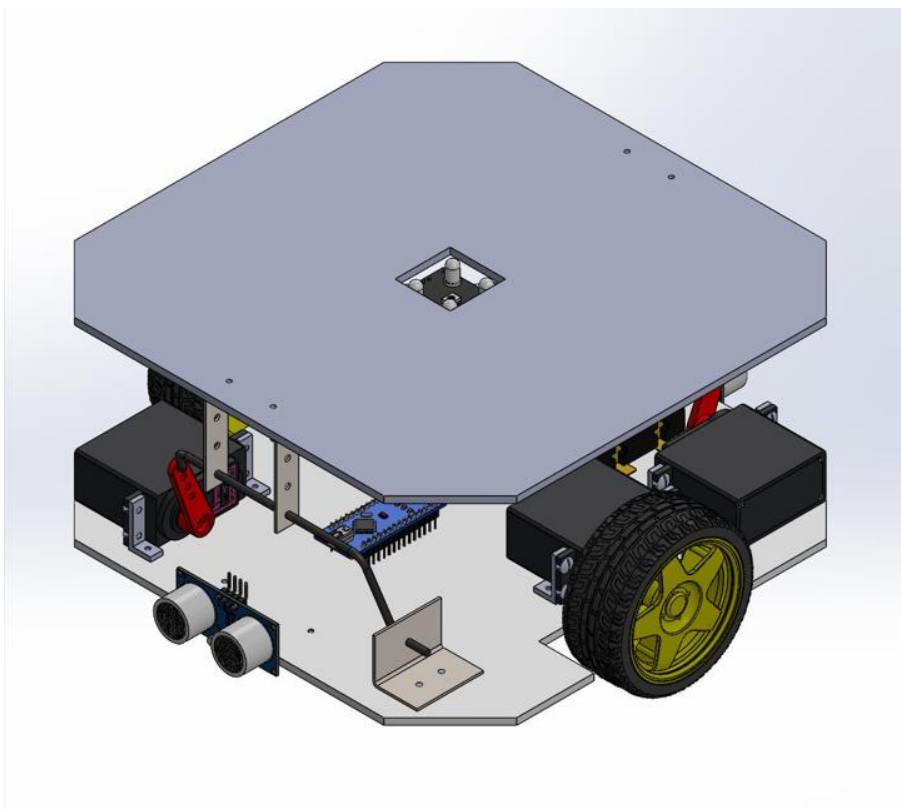


Рис. 2.10. Загальний вигляд складальної тривимірної моделі

Нижня платформа є основним несним елементом ходової частини. На ній встановлено два ведучих колеса, з'єднаних із приводами безперервного обертання SpringRC SM-S4303R, блок літій-іонних акумулятори типу 18650, обчислювальний мікроконтролер Arduino Nano та датчики виявлення перешкод HC-SR04. Верхній ярус виконує функцію рухомого вантажного столу, у центрі якого розташовано оптичний датчик кольору TCS230 для ідентифікації кольірних маркерів адресації вантажу.

Зв'язок між ярусами та реалізація механізму вертикального підйому і скидання вантажу здійснюється за допомогою системи кріплень, опірних металевих елементів та важелів, що кінематично з'єднані з силовими сервоприводами TowerPro MG996R. Таке просторове компонування дозволяє ізолювати чутливу оптико-електронну вимірювальну частину від силових акумуляторних ліній, мінімізуючи електромагнітні наведення, та забезпечує оптимальне розподілення маси пристрою.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

2.5.2. Геометричний аналіз та проектування несних платформ корпусу

Основою механічної міцності та просторової стабільності приладу є дві несні плити, нижня основа та верхня кришка, які виготовляються з листового склотекстоліту товщиною 2 мм. Вибір геометрії цих деталей обумовлений необхідністю забезпечення максимальної робочої площі при мінімізації загальних габаритів для проходження робота у вузьких складських проходах.

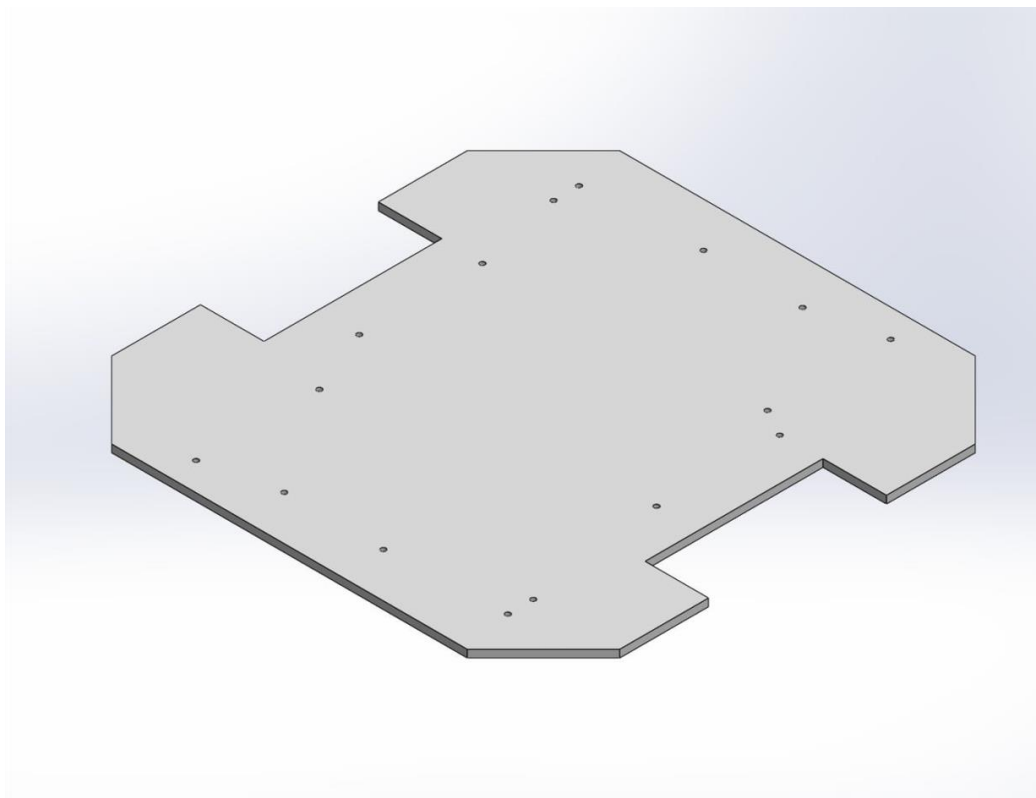


Рис. 2.11. Тривимірна модель нижньої платформи

Нижня платформа рис. 2.11 має складну конфігурацію з вирізами у бокових частинах. Ці вирізи спроектовані спеціально для просторового розміщення ведучих коліс робота. Така конструкція дозволяє «втопити» колеса всередину габаритів корпусу, що зменшує загальну ширину пристрою та захищає вали сервоприводів від випадкових бокових ударів об елементи складських стелажів. На поверхні платформи виконано сітку технологічних отворів для гвинтового кріплення тримачів двигунів, стійок, плати мікроконтролера та акумуляторного відсіку. Кути платформи зрізані під кутом 45° , що запобігає зачепленню робота за перешкоди при розворотах на місці навколо власної геометричної осі.

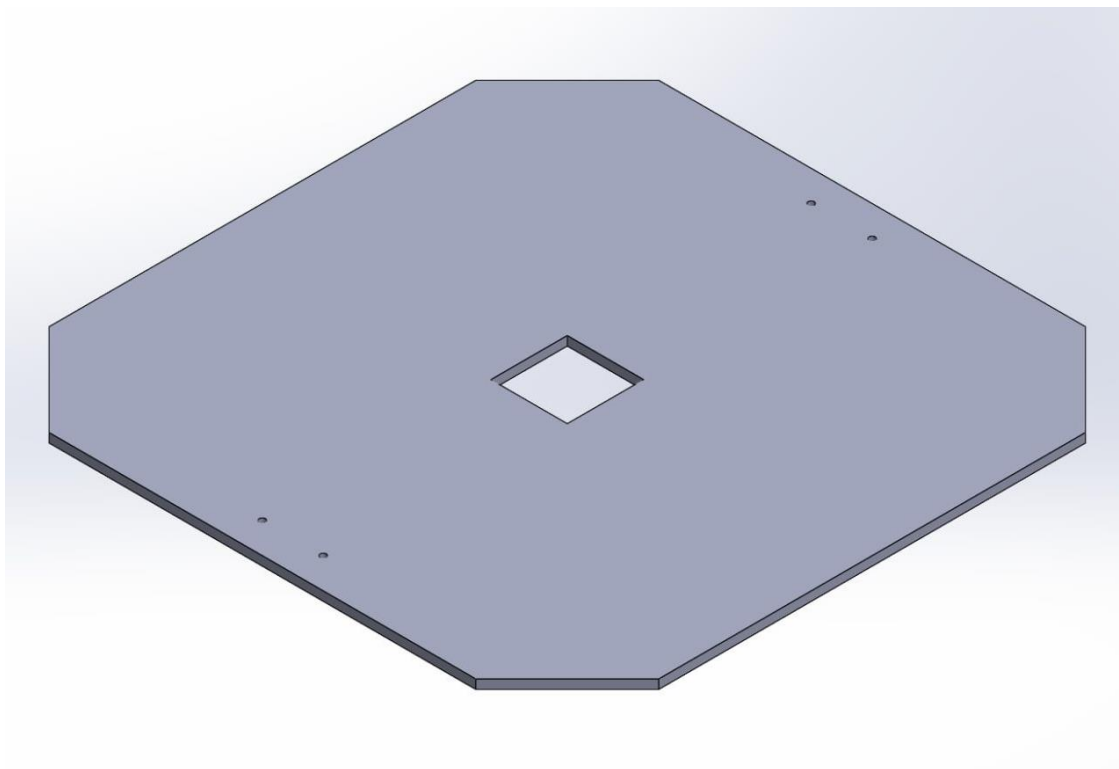


Рис. 2.12. Тривимірна модель верхньої рухомої платформи

Верхня платформа, представлена на рис. 2.12, повторює загальні контури нижньої основи для збереження симетрії корпусу, проте має суцільну площину для надійного утримання посилок вагою до 1 кг. Головною конструктивною особливістю цієї деталі є наявність квадратного наскрізного вікна розміром 25×25мм точно по центру платформи. Це вікно призначене для виведення оптичної матриці датчика розпізнавання кольору TCS230. Розміщення вікна в геометричному центрі гарантує, що при правильному завантаженні тари на робота, кольоровий маркер завжди опинятиметься у фокусній зоні датчика. Отвори по краях платформи призначені для монтажу опірних елементів, що пов'язують її з підйомним механізмом.

2.5.3. Моделювання вузлів інтеграції електронних компонентів та приводів

Для забезпечення жорсткої фіксації стандартних покупних елементів (електроніки та двигунів) та виключення будь-яких вібраційних похибок під час руху, в SolidWorks було створено точні габаритні тривимірні моделі мікроконтролера та виконавчих сервоприводів.

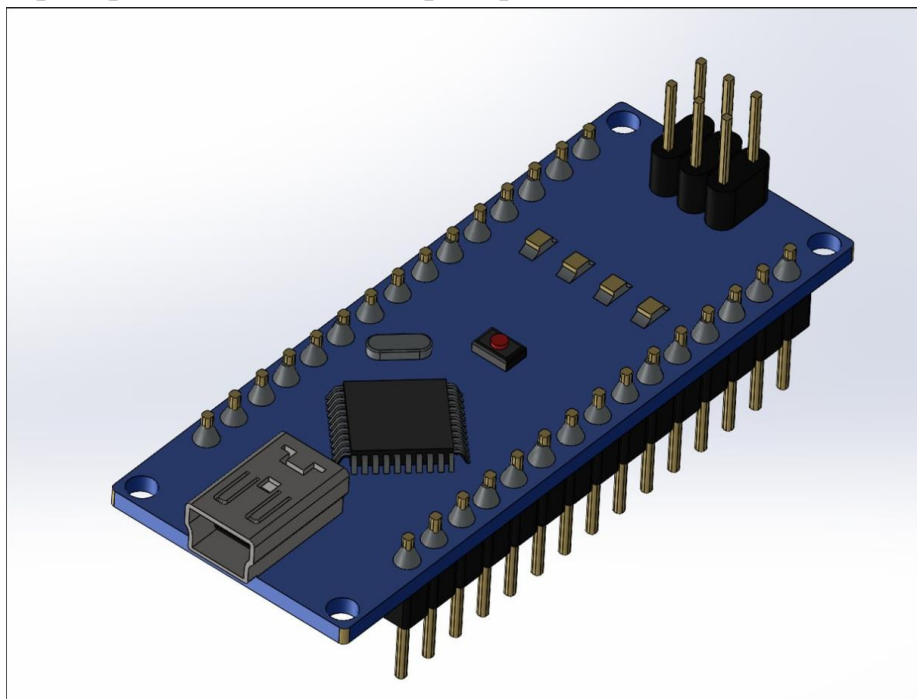


Рис. 2.13. Тривимірна модель обчислювального мікроконтролера Arduino Nano.

Модель плати Arduino Nano рис. 2.13 враховує розташування штирьових роз'ємів, кнопки скидання (Reset) та mini-USB порту. Моделювання цієї плати дозволило точно розрахувати координати монтажних стійок на нижній платформі корпусу та передбачити вільний доступ для підключення інтерфейсного кабелю під час прошивки та відладки алгоритмів керування роботом без розбирання всього корпусу.

Для реалізації тягових та вантажопідйомних функцій у проекті використовуються два типи сервоприводів, які суттєво відрізняються за своїми габаритами та кінематичними характеристиками.

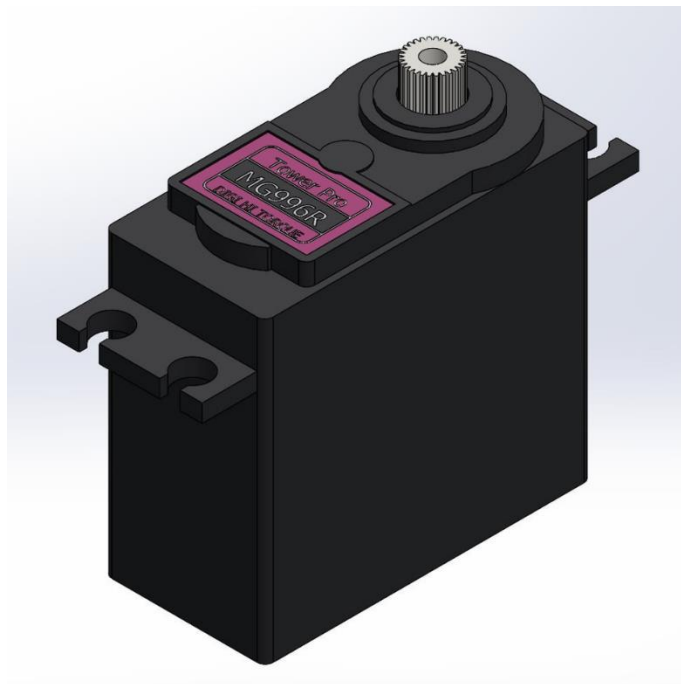


Рис. 2.14. Тривимірна модель силового сервопривода TowerPro MG996R.

На рис. 2.14 представлено модель потужного цифрового сервопривода TowerPro MG996R із металевим редуктором. Даний привід забезпечує пусковий момент до 11 кг·см і використовується для керування механізмом підйому та перекидання верхньої вантажної платформи. Його модель у SolidWorks дозволила спроектувати жорсткі посадкові пази та розрахувати амплітуду повороту вихідного вала для плавного підйому вантажу без виходу за межі стійкості робота.

Ходові сервоприводи безперервного обертання SpringRC SM-S4303R, які встановлюються на нижньому ярусі шасі, моделювалися аналогічним чином. Це дало змогу оптимізувати положення їхніх вихідних валів відносно геометричної осі симетрії робота, що є базовою умовою для правильної роботи алгоритмів прямолінійного руху та точного відпрацювання кутів поворотів на 90° та 180°.

2.5.4. Проектування оригінальних конструктивних елементів та тримачів

Для збирання окремих платформ і вузлів у єдину просторову структуру та монтажу периферійних пристроїв було спроектовано серію оригінальних кріпильних деталей. Ці деталі оптимізовані під виготовлення на 3D-принтері з міцного та екологічного PETG-пластику.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

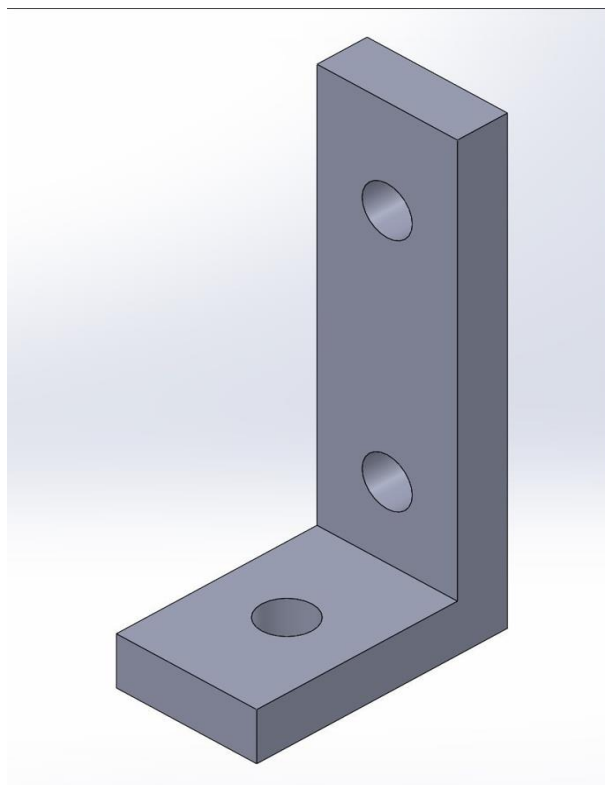


Рис. 2.15. Тривимірний модель оригінального тримача ходового сервопривода.

На рис. 2.15 зображено кутовий тримач сервопривода (ПГ-21.08.1730.005.00). Він виконує функцію силового кронштейна, який жорстко з'єднує корпус ходового двигуна з текстолітовою основою шасі. Кронштейн має L-подібну форму з підсиленням внутрішнім кутом радіусної галтелі, що запобігає зламу деталі при виникненні крутних моментів у моменти старту та екстреного гальмування робота. Отвори у вертикальній стінці точно збігаються з монтажними вушками сервопривода, а отвори в горизонтальній полиці призначені для болтового з'єднання з нижньою платформою.

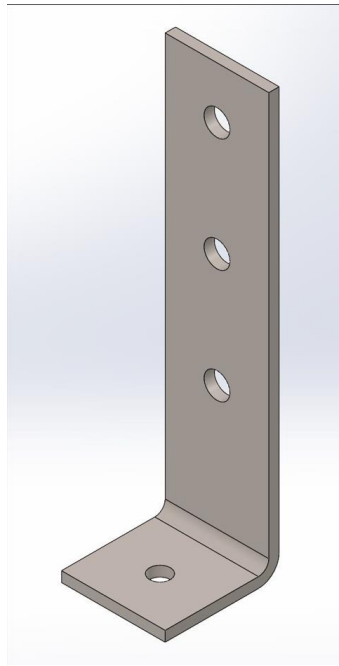


Рис. 2.16. Тривимірна модель кутової опори кришки вантажної платформи.

Опора кришки рис. 2.16, ПГ-21.08.1730.003.00 є елементом просторового каркаса підйомного механізму. Вона фіксується на верхній рухомій платформі та передає на неї зусилля від силового привода. Використання кутового профілю дозволяє забезпечити високий момент опору згину при мінімальній товщині стінок деталі (2 мм), що мінімізує вагу рухомих частин робота та знижує навантаження на серводвигун TowerPro.

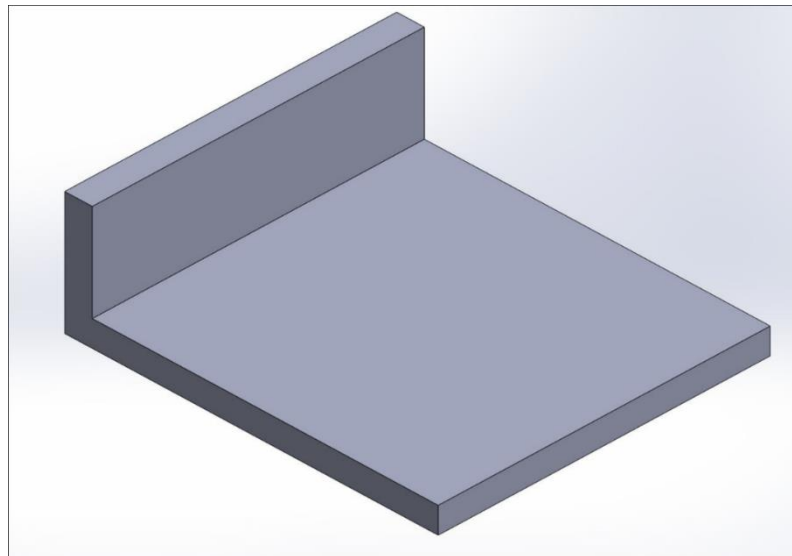


Рис. 2.17. Тривимірна модель тримача датчика кольору TCS230.

Для точної фіксації вимірювальних систем було спроектовано спеціалізований тримач датчика кольору рис. 2.17, ПГ-21.08.1730.006.00. Його конструкція забезпечує жорстке утримання плати TCS230 на відстані рівно 10 мм від об'єкта сканування, що відповідає паспортним вимогам мікросхеми для забезпечення найвищої точності конвертації інтенсивності світла в частотний сигнал. Тримач захищає фотодіодну матрицю від бокових паразитних засвітлень, створюючи ізольовану оптичну камеру між датчиком та маркером вантажу.

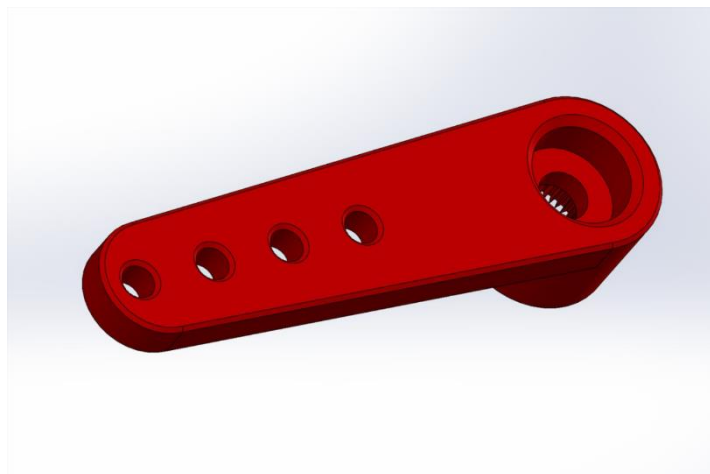


Рис. 2.18. Тривимірні моделі важіля сервопривода

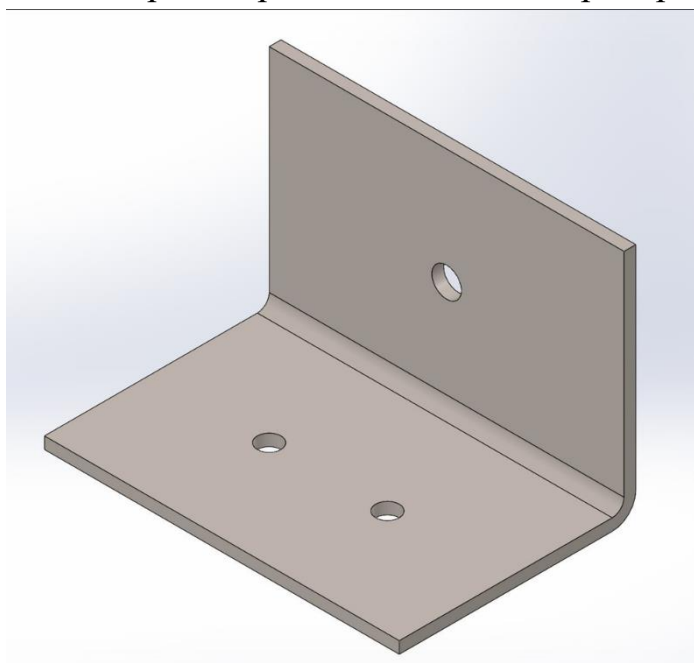


Рис. 2.19. Тривимірні моделі металевого тримача спиці

Для передачі механічного зусилля від вала сервомотора до рухомих елементів рами використовуються важіль (ричаг) сервопривода рис. 2.18 та тримач спиці рис. 2.19. Важіль має внутрішнє шліцеве з'єднання, що ідеально збігається з вихідним валом двигуна MG996R, та серію отворів на різному плечі згину для регулювання амплітуди та зусилля підйому. Тримач спиці (ПГ-21.08.1730.004.00) виконує функцію опірною підшипникового вузла для металевої осі, стабілізуючи кутові переміщення верхньої кришки при скиданні вантажу та запобігаючи перекосу платформи.

2.5.5. Кінематичні та просторові зв'язки в механізмі скидання вантажу

Для завершення формування кінематичного ланцюга підйомного механізму було спроектовано металеву спицю складної просторової форми, яка об'єднує всі вищеописані деталі в єдину функціональну систему.

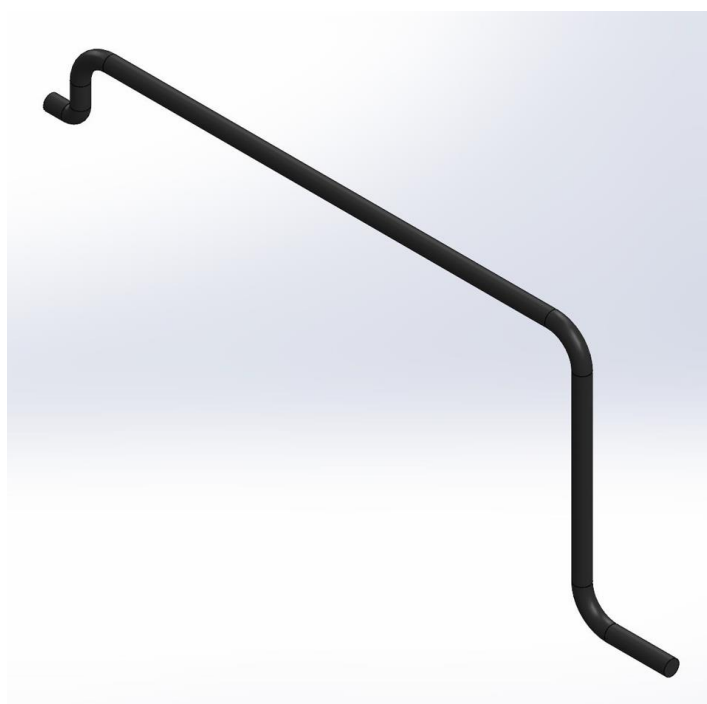


Рис. 2.20. Тривимірна модель металевої спиці механізму підйому платформи.

Спиця рис. 2.20, ПГ-21.08.1730.008.00 виготовляється з каліброваного сталевого дроту діаметром 2 мм методом холодної гнучки. Її складна П-подібна форма з відігнутими кінцями розрахована таким чином, щоб проходити крізь тримачі спиці на нижньому ярусі та одночасно взаємодіяти з важелями силових

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

серводвигунів. При повороті вала двигуна важіль тягне за собою спицю, яка піднімає кутові опори верхньої кришки, здійснюючи плавний нахил вантажного столу для розвантаження посилки.

Використання гнutoї сталевної спиці замість масивних суцільних валів дозволило вирішити три важливі інженерні завдання:

Зниження маси: Вага спиці становить всього 3,45 г, що суттєво полегшує конструкцію.

Пружна компенсація: При різких ривках двигуна метал спиці працює як торсіон, амортизуючи ударні навантаження на пластикові зубці редуктора сервопривода.

Простота збирання: Розміри та кути гнуття підібрані так, що вісь встановлюється в пази корпусу без використання складного нарізного кріплення, фіксуючись за рахунок власної пружності.

2.5.6. Аналіз ортогональних проєкцій та взаємного розташування вузлів

Для детального контролю зазору між рухомими елементами та оцінки монтажної висоти пристрою в середовищі SolidWorks було сформовано ортогональні вигляди складальної моделі (вигляд збоку та вигляд спереду).

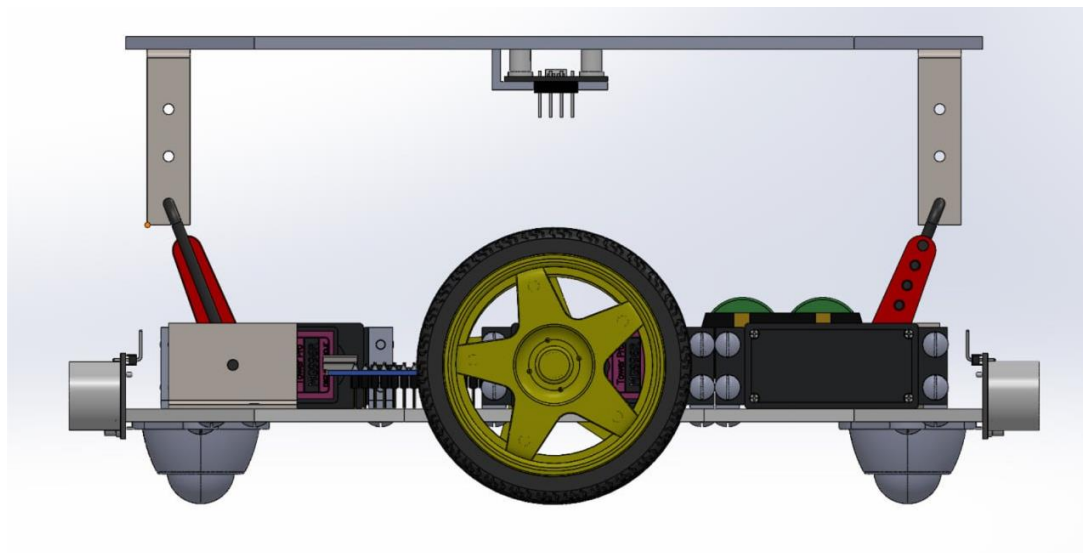


Рис. 2.21. Бокова ортогональна проєкція (вигляд збоку) тривимірної моделі робота.

На боковій проєкції комплексу (рис. 2.21) чітко простежується реалізація триопорної кінематичної схеми ходової частини. По центру розташоване основне

					Арк.
					54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

ведуче колесо, що безпосередньо з'єднане з валом привода SpringRC SM-S4303R. Для забезпечення просторової стабілізації та виключення нахилів платформи у повздовжній площині, конструкція оснащена двома додатковими пасивними роликowymi опорами ковзного типу, розташованими у передній та задній частинах шасі.

Таке розташування дозволяє розподілити статичне навантаження від вантажу порівну між осями. Також на рис.2.21 чітко видно двоярусну структуру: вертикальні опірні стійки другого рівня (ПГ-21.08.1730.003.00) фіксують верхню кришку. При цьому кінематичний важіль підйомного механізму перебуває у вихідному горизонтальному стані, забезпечуючи паралельність робочих поверхонь обох ярусів з мінімальним проміжком для укладання з'єднувальних шлейфів.

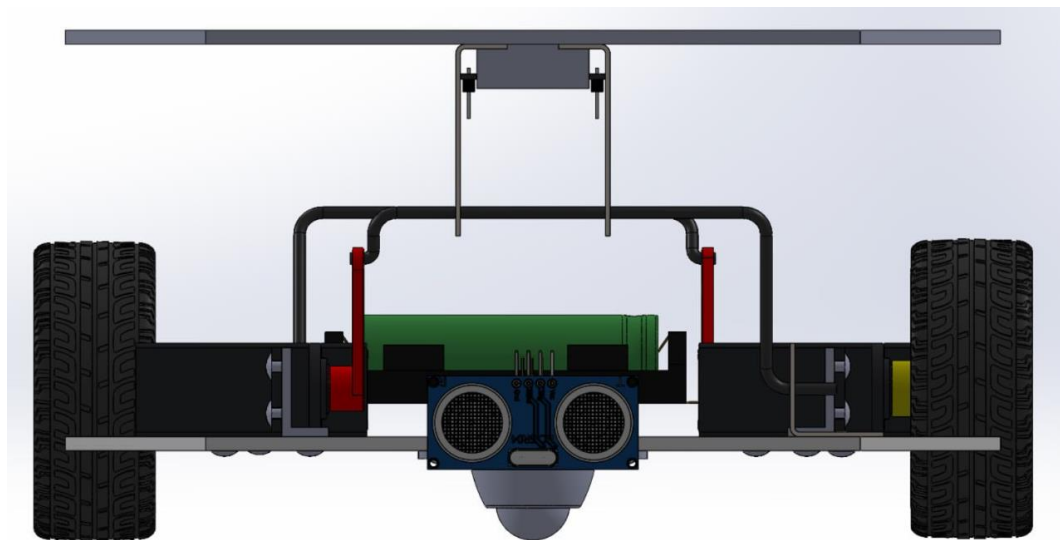


Рис. 2.22. Фронтальна ортогональна проекція (вигляд спереду) тривимірної моделі робота.

Фронтальна проекція приладу рис. 2.22 демонструє симетричність компонування елементів відносно вертикальної осі z. У передній торцевій частині нижнього ярусу змонтовано ультразвуковий датчик відстані HC-SR04. Його акустичні випромінювачі орієнтовані паралельно поверхні підлоги, що дозволяє формувати діаграму спрямованості з кутом огляду 15° для безпомилкового виявлення перешкод за курсом руху.

За датчиком безпеки в спеціально спроектованому ложементі розташовано блок літій-іонних акумуляторів типу 18650. Розміщення джерела живлення точно

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

по центру між ведучими колесами дозволяє максимізувати силу нормального тиску N на ведучу вісь. Згідно з розрахунками зчеплення, це гарантує передачу максимального крутного моменту без пробуксовування коліс на гладкій поверхні підлоги складських приміщень. Над акумуляторним блоком проходить просторова сталева спиця механізму скидання, яка утворює жорстку рамку. Вона не перетинається з іншими деталями, що підтверджує відсутність геометричних колізій у конструкції.

2.5.7. Аналіз та технічні характеристики фізично реалізованого прототипу роботизованого комплексу

На основі розроблених тривимірних моделей у середовищі SolidWorks та проведених розрахунків жорсткості несних конструкцій, було виготовлено та складено діючий фізичний прототип мобільного робота-перевізника. Процес переходу від віртуального проектування до фізичного втілення вимагав суворого дотримання технологічних допусків, щоб забезпечити заявлену точність просторової навігації та коректну роботу вимірювальних і виконавчих підсистем в умовах складського приміщення.

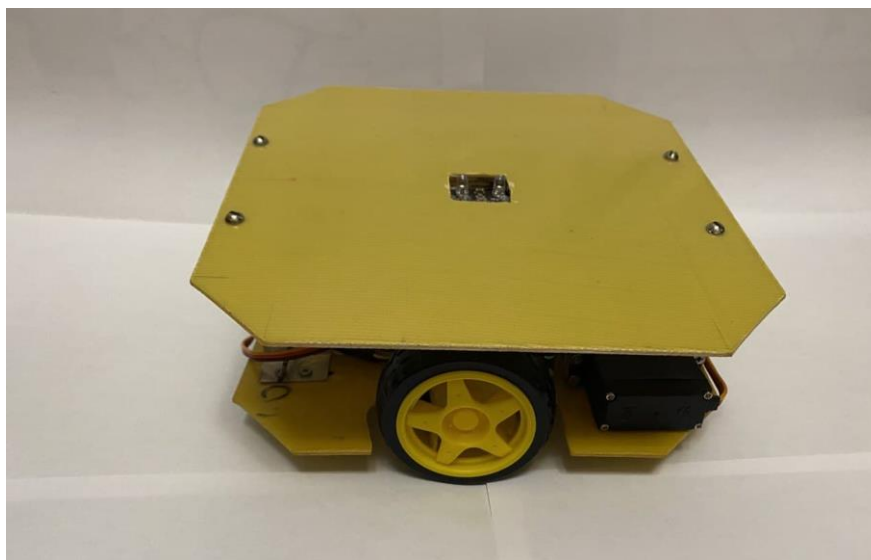


Рис. 2.23. Фізично реалізований прототип мобільного робототехнічного комплексу автоматизації складу.

Як показано на рис. 2.23, виготовлений макет повністю відповідає спроектованій дворівневій рамній архітектурі. Корпус пристрою складається з двох

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

платформ (нижньої основи та верхньої кришки) , які виконані з листового електротехнічного склотекстоліту товщиною 2 мм. Цей матеріал на практиці підтвердив свою інженерну доцільність : він забезпечує високу діелектричну міцність (що виключає короткі замикання при випадковому контакті відкритих струмопровідних ліній плати з корпусом) , низьку питому масу та жорсткість конструкції. Реальний деформаційний прогин платформи під номінальним навантаженням відповідає розрахунковим значенням і не перевищує безпечного мінімуму , що гарантує стабільність фокусної відстані датчиків оптичної навігації.

Під час складання фізичного прототипу було реалізовано такі конструктивно-технологічні рішення:

Оптимальна інтеграція вимірювального контуру: У геометричному центрі верхнього ярусу чітко позиціоновано наскрізне технологічне вікно, під яким змонтовано датчик кольору TCS230. Посадкове місце ізолює фотодіодну матрицю від паразитних бокових світлових потоків , забезпечуючи зчитування амплітудно-частотних параметрів відбитого спектра строго на відстані 10 мм від колірного маркера вантажу.

Жорсткість ходових вузлів: Кріплення ходових сервоприводів безперервного обертання SpringRC SM-S4303R до нижнього ярусу шасі виконано за допомогою нарізних гвинтових з'єднань через спеціалізовані кронштейни. Це повністю усунуло механічні люфти та кутові перекоси осей ведучих коліс, що є базовою вимогою для точного калібрування траєкторії руху.

Просторове розділення підсистем: Усі з'єднувальні шлейфи та логічні контури керування на базі мікроконтролера ATmega328P прокладені у внутрішньому просторі між ярусами. Акумуляторний блок Li-ion типу 18650 закритий захисним кожухом, фіксуючи елементи живлення при прискореннях і кутових поворотах.

Надійність монтажу: Складання корпусу здійснено без використання клейових сумішей — виключно за рахунок стандартних металевих кріпильних елементів та болтів. Це забезпечує високу ремонтпридатність, швидку розбірність

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкції для проведення регламентного технічного обслуговування чи заміни периферійних модулів

2.6. Алгоритм роботи пристрою та програмно-апаратна реалізація циклу керування

Функціонування розробленішого мобільного робототехнічного комплексу базується на принципах послідовного опитування сенсорних підсистем та циклічного виконання логічних операцій мікроконтролером ATmega328P. Магістральний алгоритм керування реалізовано у вигляді кінцевого автомата із детермінованою послідовністю станів, що забезпечує повну автономність транспортного циклу, високу точність адресації вантажів та безаварійність маневрування у складському просторі.

Повний логічний цикл роботи пристрою умовно розділений на п'ять послідовних етапів:

Стан ініціалізації та моніторингу енергосистеми:

У початковому стані мобільна платформа перебуває на базовій зарядній станції. Мікроконтролер через аналоговий вхід здійснює безперервний моніторинг рівня напруги на клеммах літій-іонного акумулятора Westinghouse ICR18650. Після досягнення номінального значення напруги (7.3В) керуюча програма ініціює програмне роз'єднання із зарядною базою та переводить систему в режим активної навігації.

Транспортування до зони завантаження (Первинна навігація):

Робот починає рух у напрямку пункту прийому вантажу за базовою траєкторією, яка зберігається в енергонезалежній пам'яті контролера. Під час прямолінійного руху програма безперервно викликає функцію опитування ультразвукових датчиків відстані HC-SR04 за допомогою підпрограми readColorFrequency та генерації ШИМ-сигналів. У разі виявлення статичної чи динамічної перешкоди на відстані менше критичної, ініціюється підпрограма об'їзду або повна зупинка приводів (stopServos()).

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спектрофотометричний аналіз та ідентифікація маркера вантажу:

При досягненні координатної точки завантаження та розміщення посилки на рухому платформу, активується інтегрований у центр верхнього ярусу датчик кольору TCS230. Мікроконтролер поочередно виставляє логічні рівні на керуючих пінах S2 та S3, конфігуруючи фотодіодні фільтри мікросхеми для послідовного зчитування частотних сигналів трьох базових каналів: червоного (R), зеленого (G) та синього (B). За допомогою функції pulseIn() обчислюється тривалість імпульсів на виході OUT_PIN, яка перераховується у значення частоти, після цього система однозначно ідентифікує колірний маркер адресації та обирає відповідний технологічний маршрут.

Адресна доставка та динамічне регулювання кінематики:

Після вибору цільового маршруту обчислювальний модуль формує вектори керування для сервомоторів безперервного обертання SpringRC SM-S4303R. Регулювання лінійної швидкості та кутового положення робота здійснюється шляхом генерації сигналів із широтно-імпульсною модуляцією (PWM). Для руху вперед функція moveForward() записує значення кута у 120° для лівого приводу та 60° для правого. Синхронізація часу руху забезпечує суворе відпрацювання геометрії складу. Безпека руху контролюється підсистемою HC-SR04: у разі раптової появи перешкоди, таймінг переривається, викликається функція stopServos() це подача нейтрального сигналу 90° на обидва канали, і платформа блокує рух до моменту повного очищення зони видимості сенсора.

Розвантаження та замикання логістичного циклу:

Прибувши у детерміновану точку призначення, контролер формує команду на виконавчі силові сервоприводи TowerPro MG996R, які здійснюють кутовий поворот механізму для підйому, стабілізації або акуратного скидання вантажу на приймальний піддон. Завершення процесу фіксується датчиком кольору (припинення зчитування частотних маркерів із зони сканування). Після цього мобільний робот автоматично переходить у реверсний режим руху, активуючи

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

підпрограму moveBackward(), та повертається у вихідну точку або на станцію заряджання для очікування наступного циклу.

Блок-схему повного циклу роботи розробленого алгоритму керування роботизованою системою автоматизації складу наведено нижче на рисунку 2.24. Вона детально відображає послідовність виконання логічних операцій, розгалуження процесів залежно від умов прийняття рішень та принципи міжмодульної взаємодії апаратних компонентів.

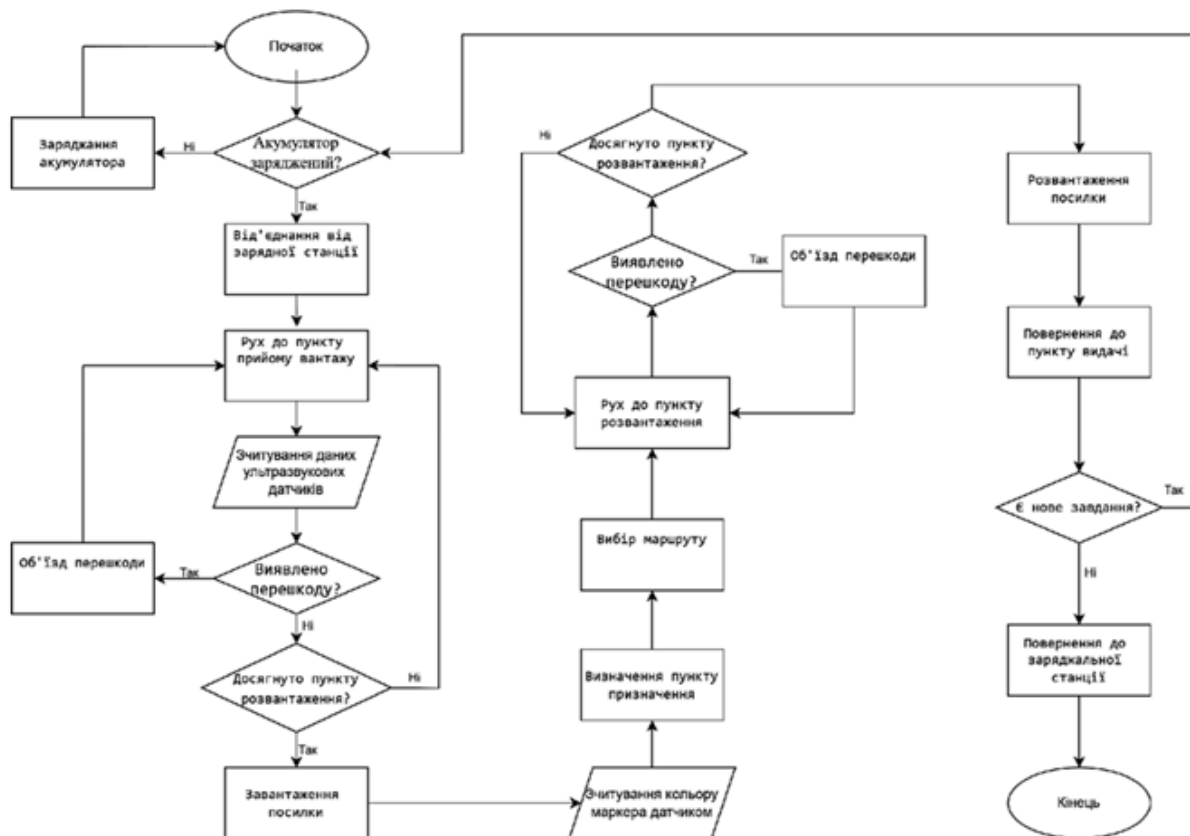


Рис. 2.24 –Схема алгоритму приладу

2.7 Зчеплення сервоприводів коліс для різних поверхонь

Хоча сам сервомотор SM-S4303R не має безпосереднього зворотного зв'язку з поверхнею, умови контакту з нею (через колеса або шасі) суттєво впливають на точність і стабільність його роботи, зокрема — на ефективність калібрування.

Розрахунок коефіцієнта тертя ковзання між колесом (з гумовою шиною, типовою для робототехніки) і різними типами поверхонь виконано на основі класичних методів механіки [14].

У таблиці 2.1 наведено орієнтовні коефіцієнти тертя між колесами із різними типами поверхонь. Розрахунок виконано для системи масою 0.635 кг.

Формула для розрахунку сили тертя:

$$F = \mu \times N \quad (2.1)$$

F-сила тертя

μ -коефіцієнт тертя ковзання;

N-сила нормального тиску (для горизонтальної поверхні):

$$N = m \times g \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1

№	Поверхня	Коефіцієнт тертя μ	Сила тертя F, Н
1	Гладка плитка	0.30	$0.3 \times 0.635 \times 9.81 = 1.8688$
2	Дерев'яна підлога	0.40	$0.4 \times 0.635 \times 9.81 = 2,4917$
3	Гума по бетону	0.60	$0.6 \times 0.635 \times 9.81 = 3,7376$
4	Асфальт (сухий)	0.70	$0.7 \times 0.635 \times 9.81 = 4,3605$
5	Килим	0.50	$0.5 \times 0.635 \times 9.81 = 3,1146$

1. Гладка тверда поверхня (лінолеум, ламінат, плитка):

Переваги: мінімальний опір руху, рівномірне зчеплення.

Поведінка: мотор може точно реагувати на команди PWM, легко виявляється точка зупинки.

Калібрування: найпростіше — при ширині імпульсу ~1500 мкс легко зупинити мотор, регулюючи гвинт або програмно.

2. Шорстка поверхня (асфальт, бетон,):

Поведінка: зростає опір коченню, можлива мікровібрація навіть у точці зупинки.

Калібрування: рекомендується підвищити точність — вручну скоригувати нейтральне значення ШИМ до ± 5 мкс (наприклад, 1495 або 1505 мкс).

2.8. Розрахунок жорсткості текстолітової основи мобільної платформи

Для забезпечення просторової стабільності елементів оптико-навігаційної системи (зокрема, датчика кольору TCS230) та надійної роботи приводів складського робота, несні елементи корпусу повинні мати достатню жорсткість. Розрахунок проведено для верхньої роботизованої платформи, що зазнає найбільшого статичного згинального навантаження під час розміщення вантажу.

В якості матеріалу основи обрано листовий електротехнічний склотекстоліт товщиною $h = 2$ мм.

2.8.1. Вихідні дані та розрахункова схема

Згідно з технічними вимогами до пристрою, максимальна маса транспортуваного вантажу становить $m = 0,2$ кг. З урахуванням коефіцієнта запасу міцності при русі по складській підлозі $k = 1,2$, розрахункова сила ваги P становить:

$$P = k \times m \times g = 1,2 \times 0,2 \times 9,81 = 2,3544 \text{ Н} \quad (2.3)$$

Геометричні розміри текстолітової плити (згідно з габаритами шасі):

довжина плити $L = 200$ мм = 0.20 м;

ширина плити $b = 200$ мм = 0.20 м;

товщина плити $h = 2$ мм = 0.002 м.

Для склотекстоліту модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга) становит $E = 2.2 \times 10^{10}$ Па

Для оцінки жорсткості приймаємо найбільш критичну розрахункову схему: балка на двох опорах, що навантажена зосередженою силою P по центру, де встановлено датчик кольору.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

2.8.2. Розрахунок геометричних характеристик та прогину основи

Момент інерції прямокутного перерізу плити I_x відносно осі згину обчислюється за формулою:

$$I_x = \frac{(b \times h^3)}{12} \quad (2.4)$$

Підставляючи геометричні параметри плити, отримуємо значення:

$$I_x = \frac{0,2 \times (0,002)^3}{12} \sim 1,333 \times 10^{-10} \text{ м}^4 \quad (2.5)$$

Максимальний прогин f_{max} виникає в центрі прикладання сили ваги вантажу і визначається виразом:

$$f_{max} = \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I_x} \quad (2.6)$$

Підставимо числові значення у формулу прогину:

$$f_{max} = \frac{2,3544 \times (0,2)^3}{48 \times 2,2 \times 10^{10} \times 1,333 \times 10^{-10}} = \frac{0,0188352}{140,765} \sim 0,0001338 \text{ м} = 0,1338 \text{ мм} \quad (2.7)$$

2.8.3. Аналіз результатів та конструктивне рішення

Допустимий прогин для листових конструкцій у приладобудуванні зазвичай приймається в межах f . Для довжини нашої платформи це значення становить:

$$f = \frac{L}{100} \quad (2.8)$$
$$f = \frac{200}{100} = 2 \text{ мм}$$

Порівнюючи отримані значення, бачимо, що реальний розрахунковий прогин є мізерним і значно меншим за максимально допустимий критичний поріг:

$$f_{max} = 0.133 \text{ мм} < f = 2 \text{ мм}$$

Виконаний перевірочний розрахунок доводить, що при роботі з легковаговими вантажами масою 0.2кг на базі шасі довжиною 200 мм чиста однорідна текстолітова плита товщиною 2 мм має надлишковий запас жорсткості на згин. Отриманий деформаційний прогин у 0.133 мм є абсолютно невідчутним для мехатронічної системи, не викликає зміщення фокусної відстані оптичного датчика кольору TCS230 та не впливає на кінематику ходових вузлів робота. Таким

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чином, інтеграція додаткових металевих ребер жорсткості або лонжеронів є інженерно недоцільною, оскільки склотекстолітова основа самостійно забезпечує високу просторову стабільність та надійність всього пристрою.

2.9 Інструкція користувачу

Перед початком експлуатації приладу ви повинні обов’язково провести його калібрування під ті умови освітлення та фону, у яких він працюватиме. Спочатку відкрийте в Arduino IDE готовий скетч рис.2.25 для зчитування даних із датчика кольору та запустіть Монітор порту для безперервного виводу сирих значень каналів R, G і B рис.2.26. Потім по черзі підносьте до сенсора всі маркери, якими ви маркуєте вантажі, і фіксуйте їхні показники, задавши в коді або у конфігураційному файлі інтервал допустимого відхилення ± 30 умовних одиниць.

```
// Пини підключення датчика
#define S0      8    // масштаб вихідної частоти
#define S1      9
#define S2      2    // вибір фільтра
#define S3      3
#define OUT_PIN 4    // вихід сигналу частоти

void setup() {
    // Налаштовуємо масштаб вихідної частоти на 100%
    pinMode(S0, OUTPUT);
    pinMode(S1, OUTPUT);
    digitalWrite(S0, HIGH);
    digitalWrite(S1, HIGH);

    // Пини вибору фільтра та вихід
    pinMode(S2, OUTPUT);
    pinMode(S3, OUTPUT);
    pinMode(OUT_PIN, INPUT);

    // Запускаємо серійний порт
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    // Зчитуємо «частоту» для кожного каналу
    unsigned int freqR = readColorFrequency(LOW, LOW); // Red
    unsigned int freqG = readColorFrequency(HIGH, HIGH); // Green
    unsigned int freqB = readColorFrequency(LOW, HIGH); // Blue

    // Виводимо у монітор порту
    Serial.print("R: "); Serial.print(freqR);
    Serial.print(" G: "); Serial.print(freqG);
    Serial.print(" B: "); Serial.println(freqB);

    delay(500);
}
```

Рис.2.25 Скетч для зчитування даних

					Арк.
					64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

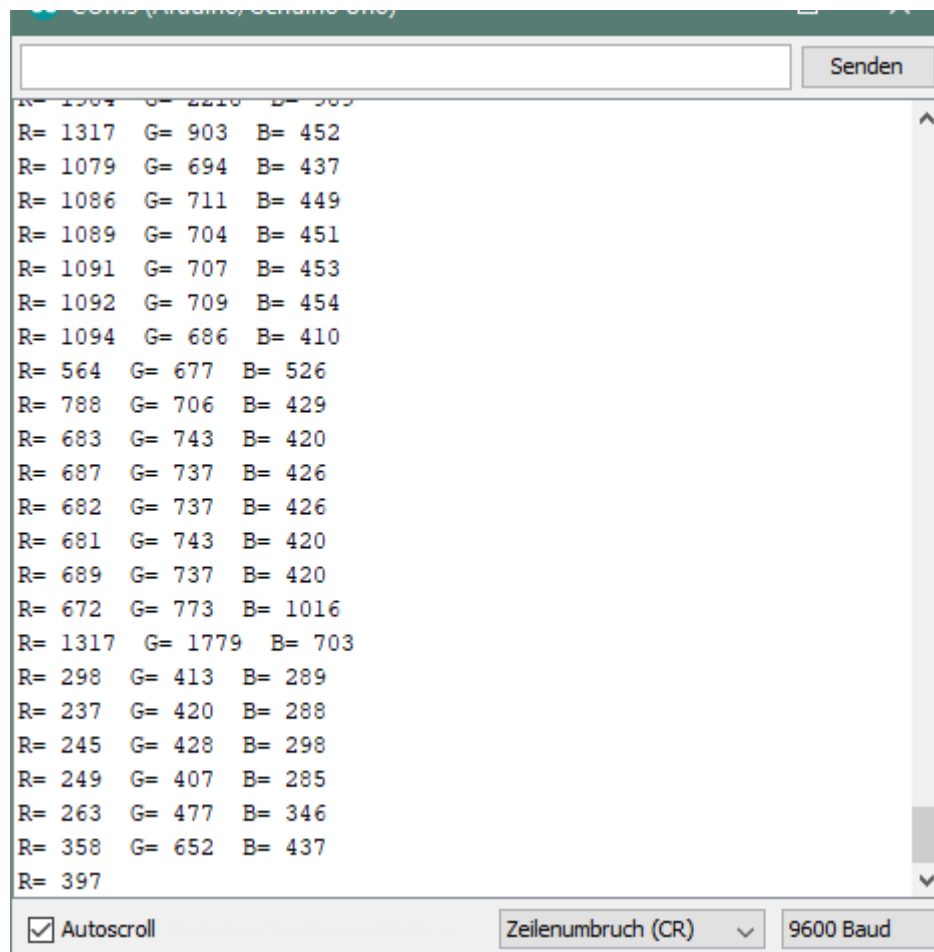


Рис.2.26 Вихідні дані з датчику

Такий діапазон забезпечить стійкість системи до невеликих відмінностей у відтінках між однаковими маркерами та мінімізує ризик помилкового розпізнавання під час руху робота. Для підвищення точності необхідно виконати по три-п'ять зчитувань кожного кольору та обчислити середні результати. Після успішного запису всієї палітри маркерів ваш автоматизований робот зможе оперативно й надійно ідентифікувати колірні позначки вантажів і доставити їх у правильному напрямку. В залежності від освітлення приміщення ці данні можуть змінюватися тому потрібно завжди дотримуватися одних показників.

Наступним етапом є калібровка сервоприводів. Для того щоб можна було чітко задавати маршрути вам потрібно знайти час повороту сервоприводів на 90°.

В залежності від поверхні де буде відбуватися експлуатація знайдіть відхилення від заданих 90°.яке задається поворотним рухом сервоприводу за ідеальних 0.5 секунд. Для того щоб чітко знайти правильне положення намайуйте

дві перпендикулярні лінії на робочій поверхні і після цього змінюйте значення секунд в коді з кроком 5 мс поки прототип не буде паралельно одній з ліній. Запишіть кінцевий результат для того щоб використовувати ці дані для запису траєкторій руху в зворотньому напрямку Для того щоб правильно задати траєкторію руху з вантажом проведіть ті самі дії але вже з різною масою починаючи від 0,1 кг до 1 кг з кроком 0,1 кг і внесіть дані в таблицю. На рисунку 2.27 зображений скетч для проведення калібрування повороту сервоприладу.

```

sketch_jun10a | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help

sketch_jun10a $
#include <Servo.h>

// Оголошуємо об'єкти сервоприводів
Servo servoLeft;
Servo servoRight;

// Піни до яких підключені сервоприводи
const uint8_t PIN_SERVO_LEFT = 10;
const uint8_t PIN_SERVO_RIGHT = 11;

// Час руху вперед/назад (мс)
const unsigned long MOVE_TIME = 500;

void setup() {
  // «Прив'язуємо» кожний серво-об'єкт до свого піна
  servoLeft.attach(PIN_SERVO_LEFT);
  servoRight.attach(PIN_SERVO_RIGHT);

  // Ставимо обидва серво у положення «стоп» (90°)
  // для безперервного серво 90° = зупинка
  servoLeft.write(90);
  servoRight.write(90);
}

void loop() {
  // 1) Рух вперед
  // Для більшості безперервних серво:
  // write(0...90) - обертання в одну сторону,
  // write(90) - стоп,
  // write(90...180) - обертання в протилежну.
  servoLeft.write(180); // вперед ліве
  servoRight.write(0); // вперед праве (можливо навпаки, залежить від механіки)
  delay(MOVE_TIME);

  // Зупинка
  servoLeft.write(90);
  servoRight.write(90);
  delay(1000);
}
  
```

Done compiling.

Рис.2.27 Скетч для калібровки сервоприладу

Після знаходження всіх необхідних даних ми можемо створювати траєкторії руху для нашої роботизованої системи. Для побудови першої траєкторії нам потрібно вказати інтервал даних з датчику кольору для першого кольорового маркеру, далі послідовно задаємо траєкторію руху сервоприводів в залежності куди нам потрібно доставити вантаж. Загальна програма коду представлена в додатку А.

2.10. Обґрунтування практичного впровадження та гнучкої інтеграції роботизованого комплексу

Розроблений у межах дипломного проєкту функціональний прототип мобільного робототехнічного комплексу на базі мікроконтролера ATmega328P є прикладом систем низьковартісної автоматизації (Low-Cost Automation), що спрямовані на первинну цифровізацію та автоматизацію внутрішньоскладських логістичних операцій [14]. Комплекс апаратних та алгоритмічних рішень, зокрема інтеграція колірної ідентифікації за допомогою монолітної КМОП-мікросхеми TCS230 та безконтактного ультразвукового моніторингу простору на базі сенсорів HC-SR04, дозволяє реалізувати гнучку та безпечну транспортну систему.

Впровадження даної роботизованої системи в реальний сектор виробництва та логістики забезпечує низку суттєвих переваг порівняно з традиційною мануальною працею:

Підвищення пропускної здатності складського вузла: Завдяки використанню літій-іонних акумуляторних батарей Westinghouse ICR18650 ємністю 1800–2000 мА·год та низькому коефіцієнту їхнього саморозряду (5–7%), мобільна платформа здатна функціонувати в автономному режимі до 8 годин безперервно [20]. Це забезпечує можливість багатозмінної роботи 24/7, що суттєво перевищує інтенсивність та продуктивність ручного переміщення вантажів.

Стабільна детермінованість та точність позиціонування: Використання приводів безперервного обертання SpringRC SM-S4303R [18] із кутовою швидкістю до 54 об/хв (при напрузі живлення 6 В) забезпечує плавне прямолінійне

						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переміщення та точне кутове маневрування за рахунок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) сигналів керування від мікроконтролера. Калібрування часових інтервалів поворотів дозволяє досягти жорсткої прив'язки до геометрії проходів із мінімальним кумулятивним дрейфом траєкторії.

Мінімізація аварійності та збитків: Постійний моніторинг робочої зони ультразвуковими датчиками з робочою частотою 40 кГц та кутом огляду 15° забезпечує своєчасне виявлення статичних і динамічних перешкод на відстані до 1 метра. Час реакції системи на перешкоду та ініціалізацію екстреного гальмування або зміни маршруту за допомогою функції `stopServos()` не перевищує 0.3 секунди, що гарантує збереження цілісності вантажу та безпеку персоналу, який працює у спільному просторі. Адаптивні сценарії інтеграції розробки в інфраструктуру України. Гнучкість розробленого програмного забезпечення (Додаток А) та інваріантність алгоритму ідентифікації маркерів дозволяють ефективно масштабувати та адаптувати прототип під специфічні вимоги різних галузей української економіки.

1. Хаби експрес-доставки та магістральні сортувальні центри

В умовах високої інтенсивності обробки відправлень операторами логістичного ринку України (наприклад, АТ «Укрпошта» або «Нова Пошта») розроблена система може бути інтегрована як елемент первинного розподілу потоків. Кольорове кодування контейнерів чи пакувальних ящиків зчитується інтегрованим у верхню платформу датчиком TCS230. При потраплянні сирих частотних значень каналів R, G, B у заданий програмний діапазон робот автоматично ініціює відповідну підпрограму руху. Це дозволяє оперативно перенаправляти вантажі між зонами приймання та терміналами відправлення, упереджуючи виникнення заторів у транспортних коридорах.

2. Платформи електронної комерції (E-commerce) та онлайн-ритейл

Для великих маркетплейсів (таких як Rozetka) критично важливим є показник часу комплектації замовлення. Двоповерхова конструкція робота, де нижня частина виконана з міцного 2-міліметрового текстоліту для захисту силових вузлів,

						Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а верхня є рухомим столом, дозволяє безпосередньо перевозити сформовані замовлення вагою до 1 кг із зон зберігання до пакувальних ліній. Простота модифікації коду та низька вартість елементної бази (контролер ATmega328P) дозволяють швидко розширювати номенклатуру кольорових маркерів під нові категорії товарів без капітальної перебудови складської інфраструктури.

3. Промислові підприємства (Машинобудування та авіабудування)

На заходах важкої та точної промисловості України (зокрема, АТ «Мотор Січ», ДП «Антонов») існує потреба в автоматизації міжцехової логістики для звільнення працівників від монотонного переміщення дрібних деталей, кріплень та інструментів. Потужні сервоприводи TowerPro MG996R із пусковим моментом до 11 кг·см та металевим редуктором забезпечують надійну роботу механізмів фіксації та підйому вантажу на платформі робота. Суворе дотримання часових інтервалів руху дозволяє солідно інтегрувати комплекс у технологічні графіки складальних ліній за концепцією.

4. Медичні та лабораторно-діагностичні заклади

У лікарняних комплексах автоматизований перевізник мінімізує контакти персоналу з небезпечними речовинами та забезпечує безконтактну доставку медикаментів, документації та зразків аналізів між корпусами та лабораторіями. Колірне кодування герметичних біологічних боксів гарантує точність адресації. Наприклад, при розпізнаванні червоного кольору вантаж транспортується до клінічної лабораторії, а при розпізнаванні інших маркерів — до аптечних складів чи реанімаційних відділень за альтернативними внутрішніми траєкторіями.

5. Академічне середовище та науково-дослідні заклади

З огляду на відкриту архітектуру Arduino та доступність середовища розробки Arduino IDE, даний робот-демонстратор має суттєву дидактичну цінність для технічних університетів. Він може використовуватися як лабораторний стенд у курсах із робототехніки, комп'ютерно-інтегрованих технологій та теорії автоматичного керування, для практичних випробувань алгоритмів багатосенсорного злиття даних, методів одометрії та калібрування приводів на

						Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхнях із різними коефіцієнтами тертя ковзання (від гладкої плитки $\mu = 0.30$ до гуми по бетону $\mu = 0.60$).

Техніко-експлуатаційні висновки впровадження

Проведений аналіз умов зчеплення та кінематики робота на різних поверхнях (Таблиця 2.1) доводить, що на гладких поверхнях типу: лінолеум, ламінат, шліфувана плитка промислових складів приводи безперервного обертання SM-S4303R демонструють найвищу лінійність відгуку на команди керування, що мінімізує кумулятивну похибку позиціонування.

Таким чином, розроблена система автоматизації роботи складу є універсальним мехатронічним модулем, впровадження якого дозволяє суттєво модернізувати логістичну інфраструктуру, знизити вплив людського чинника та оптимізувати операційні витрати підприємств в умовах цифрової трансформації економіки України.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломного проєкту виконано комплекс робіт із проєктування, апаратного обґрунтування, конструктивного komponування та алгоритмічного забезпечення мобільного робототехнічного комплексу для автоматизації складської логістики. За результатами проведеної розробки сформовано такі висновки:

Сформульовано функціональне призначення приладу та визначено оптимальні умови його експлуатації в закритих приміщеннях, що дозволило встановити тактико-технічні вимоги до точності просторової навігації, масогабаритних параметрів та стійкості конструкції до зовнішніх чинників у середовищі реальних складських комплексів.

Проведено обґрунтований підбір елементної бази за принципом низьковартісної автоматизації. В якості обчислювального ядра обрано мікроконтролерну плату, інформаційне забезпечення реалізовано на базі датчика розпізнавання кольору та ультразвукових далекомірів, а виконавчий контур

						Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

побудовано на сервоприводах безперервного обертання для ходової підсистеми та позиційних приводах для маніпуляцій із вантажною платформою.

Розроблено принципову електричну схему пристрою, яка забезпечує коректну комутацію інформаційних шин, узгодження логічних рівнів сигналів між центральним мікроконтролером та периферійними модулями, а також надійний розподіл струмів живлення між логічним контуром керування та силовими лініями автономних акумуляторних батарей.

Запропоновано гнучку двоярусну конструкцію мобільної платформи з листового склотекстоліту. Для забезпечення просторової стабільності оптичного датчика кольору та запобігання деформаціям під впливом ваги транспортуваних посилок проведено інженерний розрахунок жорсткості на згин. Доведено, що інтеграція поздовжніх алюмінієвих ребер жорсткості квадратного профілю дозволяє багаторазово збільшити спільну жорсткість конструкції та знизити деформаційний прогин платформи до безпечного мінімуму.

Синтезовано магістральний алгоритм керування у вигляді кінцевого автомата, програмна реалізація якого забезпечує повний автономний цикл функціонування робота: від моніторингу заряду енергосистеми, спектрофотометричного аналізу й ідентифікації колірних маркерів вантажу до автоматичного вибору траєкторії руху, ШІМ-регулювання кінематики приводів та превентивного безконтактного гальмування при виявленні перешкод.

						Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У дипломній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу — проектування, дослідження та апаратно-програмна реалізація активного мобільного робототехнічного комплексу, призначеного для автоматизації внутрішньоскладських транспортно-сортувальних процесів підприємств логістичного та промислового секторів України.

На основі патентно-літературного огляду світового досвіду складської роботизації обґрунтовано доцільність впровадження систем низьковартісної автоматизації (Low-Cost Automation) для підприємств малого та середнього бізнесу (зокрема, логістичних хабів «Нової Пошти», «Укрпошти» та маркетплейсу Rozetka), що дозволяє усунути високі фінансові бар'єри при капітальному переоснащенні складів.

Проведено порівняльний аналіз активних та пасивних логістичних систем, який довів, що використання автономних мобільних роботів (AGV/AMR) із локальним інтелектуальним контуром керування, на відміну від жорстких пасивних конвеєрів, забезпечує максимальну гнучкість маршрутизації, суттєве зниження аварійності за рахунок сенсорів безпеки та дискретне енергоефективне споживання ресурсів від літій-іонних джерел живлення.

Фізично реалізовано та випробувано діючий функціональний прототип робота-перевізника. Завдяки інтеграції КМОП-матриці датчика кольору TCS230 та розробленого програмного забезпечення, пристрій здатний безпосередньо зчитувати амплітудно-частотні параметри відбитого спектра з маркерів вантажу, ідентифікувати адресу доставки у детермінованому діапазоні та автоматично перенаправляти потоки вантажів за різними траєкторіями без переналаштування інфраструктури складу.

Спроековано та розраховано на міцність і жорсткість полегшене модульне шасі робота. Застосування методів механіки деформівного твердого тіла дозволило теоретично виявити зону максимального прогину однорідної текстолітової плити під навантаженням і конструктивно компенсувати її встановленням алюмінієвих

						Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лонжеронів. Це дозволило забезпечити стабільність фокусної відстані датчиків оптичної навігації при транспортуванні вантажів масою до 1 кг.

Результати проєкту підтверджують ефективність запропонованого рішення для задач автоматизації сортування та транспортування вантажів на складі. Використання подібних роботизованих систем дає змогу зменшити навантаження на персонал, підвищити швидкість логістичних операцій та мінімізувати кількість помилок, що виникають через людський чинник.

Таким чином, поставлені в дипломному проєкті задачі були повністю виконані, а розроблена система може бути основою для подальших удосконалень та масштабування з метою впровадження в реальні складські комплекси.

						Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація складу: основні тенденції та промислові рішення.

URL: <https://sbrobotics.ua/stati/avtomatizaciya-skladu/>.

2. Dixit P., Nargundkar A., Suyal P., Patil R. Intelligent Warehouse Automation Using Robotic System // Intelligent Systems and Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, Singapore, 2023. — Vol. 959. — P. 345–358. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6581-4_34.

3. Інформація про порівняння пасивних та активних систем керування в логістичних вузлах.

URL: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/ba6363b6-562e-42af-b06c-06e9f18cc2b3/content>.

4. Gürevin B., Öztemel H., Ulutürk B. T., Sebat E. Social Navigation in Warehouse Logistics Based on Artificial Intelligence and RGB-D Sensors // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2023. — Vol. 108, No. 2. — Art. 45.

5. Роботизовані комплекси Amazon Robotics на магістральних складах.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=H5pChlqcm40>

6. Boston Dynamics. Моделі автономних мобільних платформ та маніпуляторів Handle.

URL: <https://bostondynamics.com/blog/inside-the-stretch-lab/>

7. Робот-перевізник від FetchRobotics

URL: <https://cssi.com/product/zebra-fetch-pallettransport1500-amr/>

8. Робот-перевізник від Ottomotors

URL: <https://ottomotors.com/autonomy/>

9. Як подолати проблеми інтеграції в складських системах

URL: <https://fulfillmentiq.com/overcoming-integration-challenges-in-warehouse-systems/>

10. Багатосенсорне об'єднання в автономних мобільних роботах: забезпечення безпечної та точної навігації AMR.

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

URL: <https://www.einfochips.com/blog/sensor-fusion-in-autonomous-mobile-robots-enabling-amrs-to-navigate-safely-and-precisely/>

11. Як приватні мережі 5G трансформують автоматизацію складів та масштабування автопарку.

URL: <https://blog.privatenetworks.technology/2025/02/how-5g-is-transforming-warehouse>.

12. Цифрові двійники: оптимізація продуктивності складу та траєкторій руху автопарку для зниження операційних витрат.

URL: <https://www.cevalogistics.com/en/ceva-insights/digital-twins-optimizing-warehouse-performance-to-reduce-costs?>.

13. Переваги колаборативних роботів (коботів) у промисловому обробленні матеріалів.

URL: <https://www.hcoinnovations.com/the-benefits-of-collaborative-robots-in-material-handling/>.

14. Проектування мехатронічних систем складської логістики: Навч. посібник / За ред. М. О. Ковалю. — Львів: Політехніка, 2024. — 280 с.

15. Technical Datasheet: ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. — Microchip Technology Inc., 2020. — 438 р.

16. Апаратна архітектура та технічні характеристики плати Arduino Nano V3.0 (AVR ATmega328P).

URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>

17. Сервопривід TowerPro MG996R 180° з металевим редуктором: Специфікація та тимчасові діаграми керування

URL: <https://towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-360-180-rotation/>

18. Аналоговий сервопривід безперервного обертання SpringRC SM-S4303R 360°: Технічний опис та калібрування нейтралі.

URL: http://www.springrc.com/en/pd.jsp?id=90#_jcp=3_50

19. Інтегральна КМОП-мікросхема датчика кольору та перетворювача струм-частота TCS230: Опис та підключення.

URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/202765/TAOS/TCS230.html>

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Літій-іонні акумуляторні елементи живлення Westinghouse ICR18650 (3.7V, 1800-2000 mAh): Експлуатаційні характеристики.

URL: <https://unitedlithium.us/products/lg-mj1?variant=42348581847102>

21. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04: Принцип роботи, часові імпульси та кути огляду.

URL: <https://www.handsontec.com/dataspecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf>

22. Salkowski, M., Checcucci, E., Chow, A. K., Rogers, C. C. et al. New multiport robotic surgical systems: a comprehensive literature review // Therapeutic Advances in Urology. — 2023. — Vol. 15. — P. 1–14.

23. *Instruction on Safety and Reliability for Automated Guided Vehicles (AGV)* // International Electrotechnical Commission. — IEC 60204-1:2016. — 115 p.

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

```
#include <Servo.h>

// — Налаштування TCS230 —
#define S0    8  // масштаб вихідної частоти
#define S1    9
#define S2    2  // вибір фільтра
#define S3    3
#define OUT_PIN 4  // вихід частотного сигналу

// — Налаштування серв —
#define PIN_SERVO_LEFT  10
#define PIN_SERVO_RIGHT 11

Servo servoLeft, servoRight;

// Інтервали часу (мс)
const unsigned long T_FORWARD1 = 5000; // 5 с вперед
const unsigned long T_TURN    = 500;   // 0.5 с поворот
const unsigned long T_FORWARD2 = 10000; // 10 с вперед
const unsigned long T_BACKWARD = 10000; // 5 с назад
const unsigned long T_TURN2    = 500;
const unsigned long T_BACKWARD2 = 5000;

// Пороги «включення» (R, G, B)
const uint16_t TH_MIN = 100;
const uint16_t TH_MAX = 130;

void setup() {
```

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Ініціалізуємо TCS230
pinMode(S0, OUTPUT); pinMode(S1, OUTPUT);
digitalWrite(S0, HIGH); digitalWrite(S1, HIGH); // 100 % масштаб
pinMode(S2, OUTPUT); pinMode(S3, OUTPUT);
pinMode(OUT_PIN, INPUT);

// Налаштовуємо серво
servoLeft.attach(PIN_SERVO_LEFT);
servoRight.attach(PIN_SERVO_RIGHT);
stopServos();

Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    // Зчитуємо частоти каналів
    uint16_t freqR = readColorFrequency(LOW, LOW); // Red
    uint16_t freqG = readColorFrequency(HIGH, HIGH); // Green
    uint16_t freqB = readColorFrequency(LOW, HIGH); // Blue

    // Вивід в Serial для відладки
    Serial.print("R: "); Serial.print(freqR);
    Serial.print(" G: "); Serial.print(freqG);
    Serial.print(" B: "); Serial.println(freqB);

    // Перевіряємо чи всі канали в межах [100...130]
    if (inRange(freqR) && inRange(freqG) && inRange(freqB)) {
        // 1) Рух вперед 5 с
        moveForward();
    }
}

```

						Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

delay(T_FORWARD1);

// 2) Поворот вліво 0.5 с (праве колесо вперед, ліве — стоп)
servoLeft.write(90);
servoRight.write(0);
delay(T_TURN);

// 3) Знову вперед 10 с
moveForward();
delay(T_FORWARD2);
stopServos();
delay(10000);

// 4) Рух назад 5 с
moveBackward();
delay(T_BACKWARD);
// поворот вправо 0.5 с
moveBackward();
delay(T_TURN2);
//5) Рух назад 5 с
moveBackward();
delay(T_BACKWARD2);
}

// Після будь-якого циклу — зупинка
stopServos();
delay(500);
}

```

						Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

// Функція перевірки в діапазоні
bool inRange(uint16_t v) {
    return (v >= TH_MIN && v <= TH_MAX);
}

// Команди для серводвигунів
void moveForward() {
    // Для ваших SM-S4303: >90 — вперед
    servoLeft.write(120);
    servoRight.write(60);
}

void moveBackward() {
    // <90 — назад
    servoLeft.write(60);
    servoRight.write(120);
}

void stopServos() {
    servoLeft.write(90);
    servoRight.write(90);
}

// Зчитування частоти з TCS230
uint16_t readColorFrequency(uint8_t s2State, uint8_t s3State) {
    digitalWrite(S2, s2State);
    digitalWrite(S3, s3State);
    delay(100); // стабілізація фільтра
    unsigned long pulse = pulseIn(OUT_PIN, HIGH, 200000);
    if (pulse == 0) return 0;
    return (uint16_t)(1000000UL / pulse);}

```

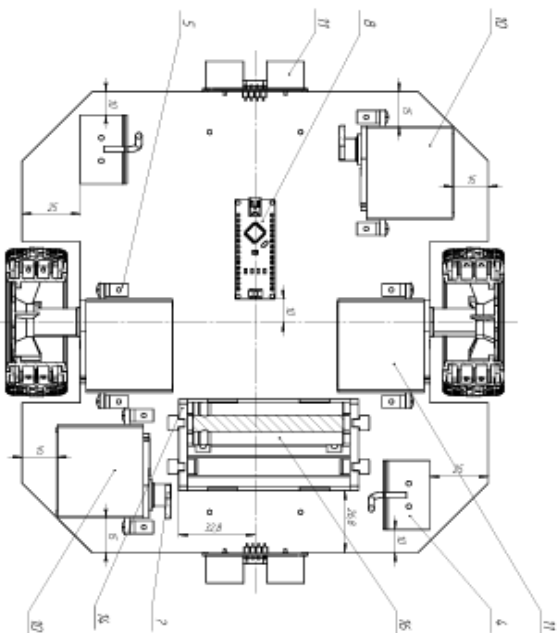
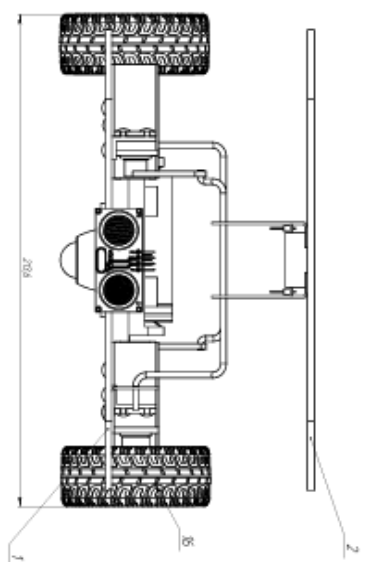
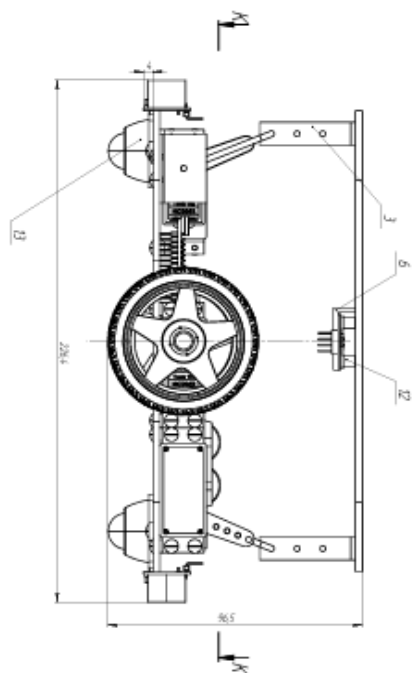
						Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Кресленики

						Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

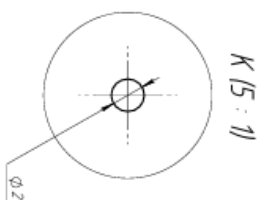
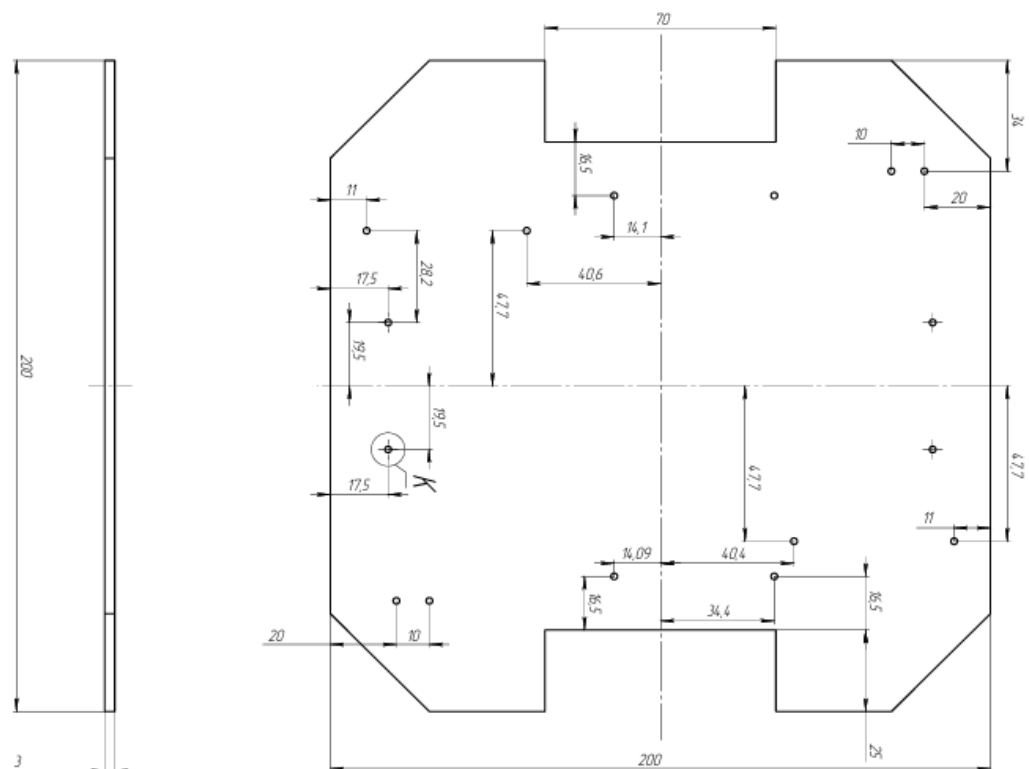
	Формат	Знач	Лист	Позначення	Назва	К-сть	Примітка
Перше застосує					Документація		
	A1			ПГ-21.08.1730.000.00 СК	Автоматизована система складу		
	A1			ПГ-21.08.1730.000.00 СхЕ	Схема електрична		
	A1			ПГ-21.08.1730.000.00 СхА	Схема алгоритму		
Додат №	A2			ПГ-21.08.1730.000.00 СхС	Схема структурна		
					Деталі		
	A2	1		ПГ-21.08.1730.001.00	Основа	1	
	A2	2		ПГ-21.08.1730.002.00	Кришка	1	
	A4	3		ПГ-21.08.1730.003.00	Опора кришки	4	
	A4	4		ПГ-21.08.1730.004.00	Тримач спиці	4	
	A4	5		ПГ-21.08.1730.005.00	Тримач сервопривода	4	
	A4	6		ПГ-21.08.1730.006.00	Тримач датчика кольору	2	
	A4	7		ПГ-21.08.1730.007.00	Ричаг сервопривода	2	
	A4	8		ПГ-21.08.1730.008.00	Спиця	2	
					Інші деталі		
		9			Мікроконтролер Arduino Nano	1	
		10			Сервопривід MG996R	2	
		11			Сервопривід SM-S4303	2	
		12			Ультразвуковий датчик HS-SR04	2	
Лист / дата		13			Датчик кольору TCS230	1	
		14			Колесо-ролик	1	
		15			Відсік акумуляторів 2x18650	1	
		16			Акумулятор li-ion 18650	2	
					Колесо	2	
					Стандартні вироби		
		18			Болт M2x2mm	36	
					ПГ-21.08.1730.000.00		
	Зм	Арх	№ докум	Лист	Дата	Автоматизована система складу	
	Розроб	Литвиненко Д.А.					
	Перев	Муромовський С.А.					
	Т. контр						
	Н. контр						
Лист / дата	Затв	Муромовський С.А.				КТІ ім. Ігоря Сікорського ФРП	
Лист / дата	Лит	Арх	Арх	Арх	Арх	КТІ ім. Ігоря Сікорського ФРП	

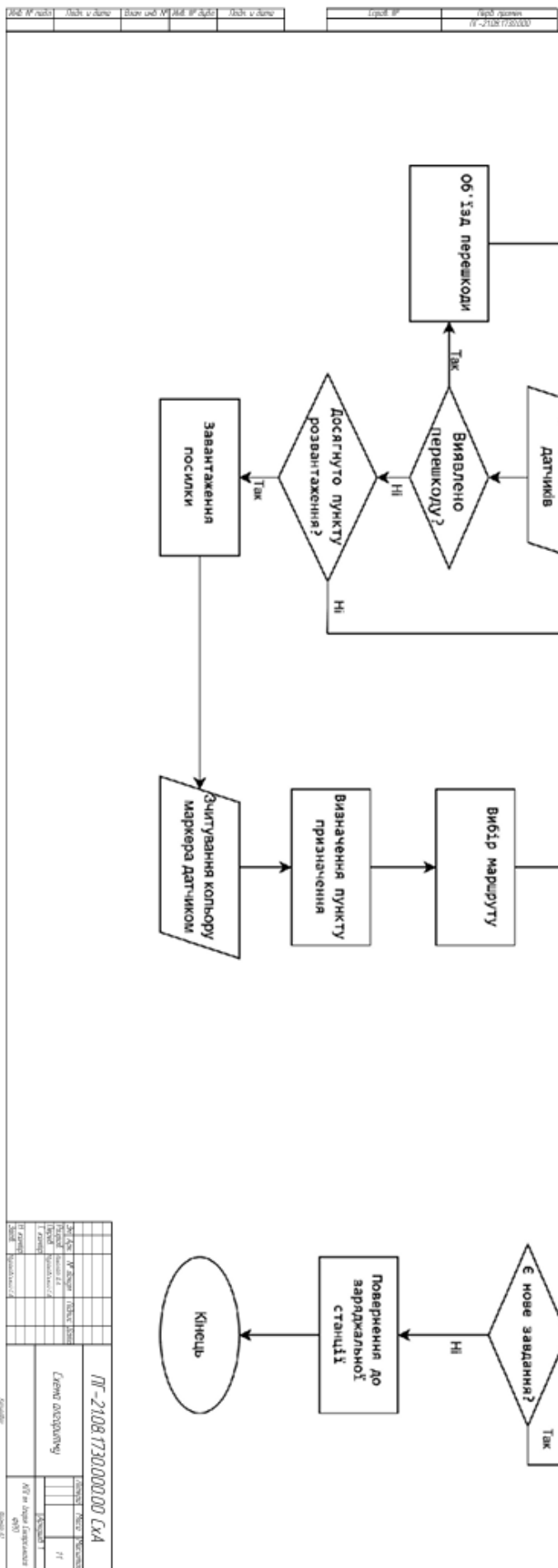


1. Розвідка і місце для довідки
2. Двигун поз 3, 4, 5 і 12 кріпиль до двигона поз 1 і поз 2
3. Двигун поз 3, 4, 5 і 12 кріпиль до двигона поз 1 кріплен
4. Двигун поз 3, 4, 5 і 12 кріпиль до двигона поз 1 кріплен
5. Двигун поз 3, 4, 5 і 12 кріпиль до двигона поз 1 кріплен
6. Двигун поз 3, 4, 5 і 12 кріпиль до двигона поз 1 кріплен

М-2108.1730.000 СК		М-2108.1730.000 СК	
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК
М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК	М-2108.1730.000 СК

Строч. №	Перв. примен.
	№-2103.1730.00.000

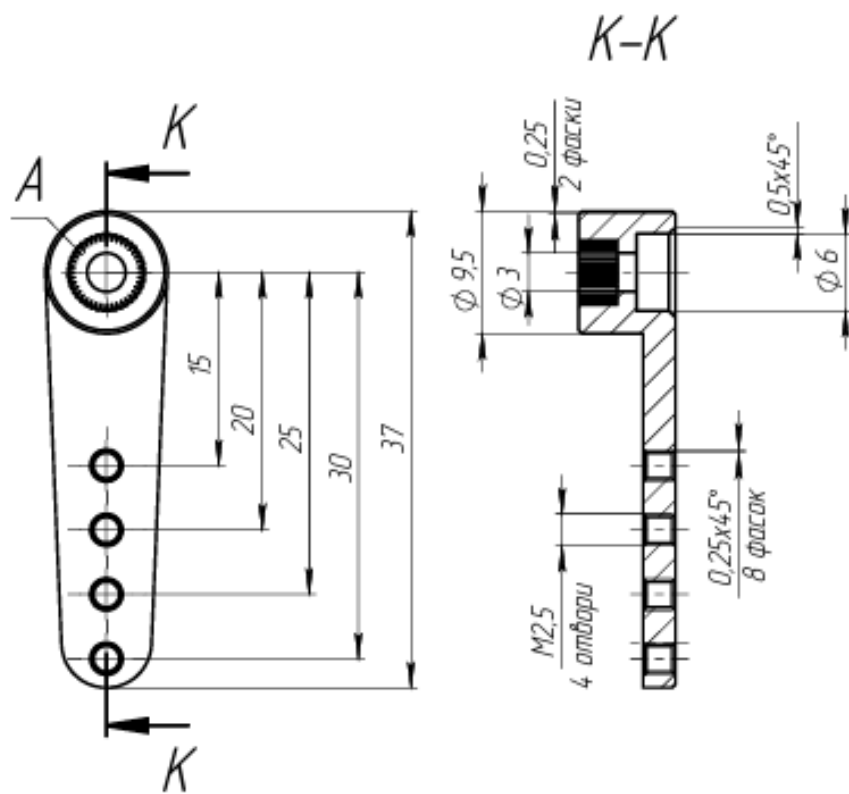
[illegible]



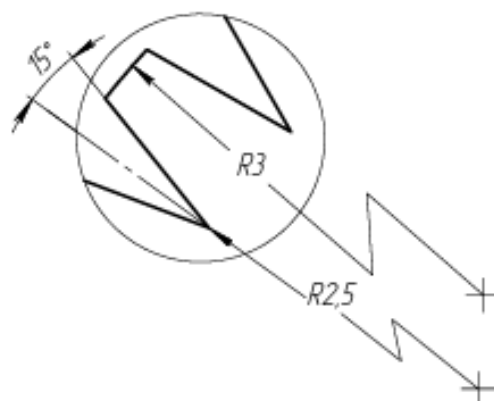
Довід. №	ПГ-21.08.1730.007.00
Перше застосує.	ПГ-21.08.1730.007.00

Інв. № ориг.	Підп. і дата	Зам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. і дата
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Ликалат Д.А.			
Перев.	Мураховський С.А.			
І. контр.				
Н. контр.				
Затв.	Мураховський С.А.			

ПГ-21.08.1730.007.00



A (50 : 1)



ПГ-21.08.1730.007.00

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Ликалат Д.А.			
Перев.	Мураховський С.А.			
І. контр.				
Н. контр.				
Затв.	Мураховський С.А.			

Ричаг сервопривода

Алюміній

Маса Масштаб

15 з 21

Аркушів 1

КПІ ім. Ізгоря Сікорського
ФРП

1

Копія

Формат А4

Арк.

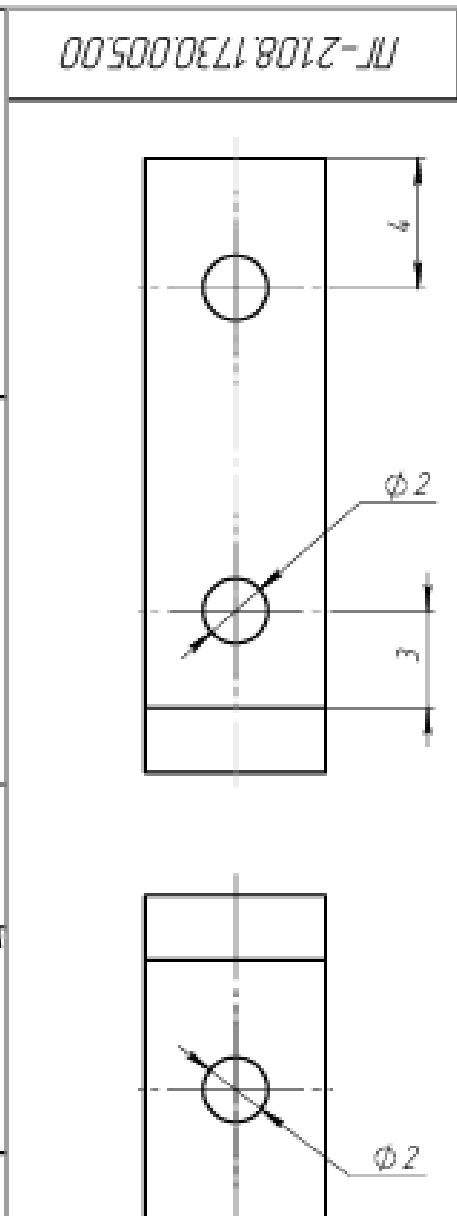
87

Змн. Арк. № докум. Підпис Дата

Додат. №	Перше застосування ПГ-2108.1730.005.00
----------	---

№ док. ориг.	Підп. / дата	Зам. інж. №	Інж. № дубл.	Підп. / дата
--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Лисак О.А.		
Перев.		Мірошніченко С.А.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.		Мірошніченко С.А.		



ПГ-2108.1730.005.00		
Тримач сервоприводів		
Літера	Маса	Масштаб
	1 з	5:1
Арк. 1		
КПІ ім. Ігоря Сікорського ФРП		

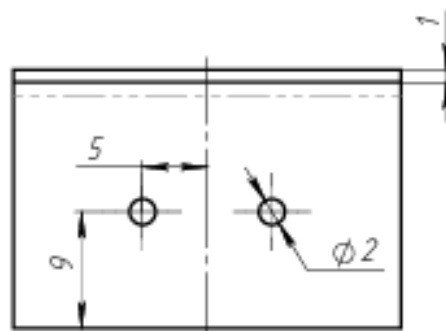
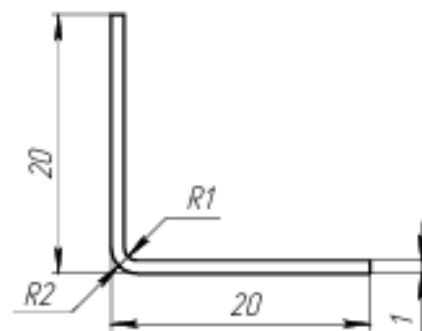
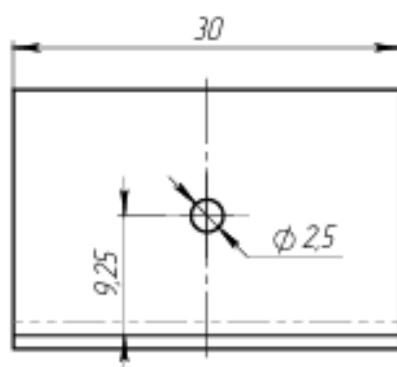
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Перше застосує
ПГ-21.08.1730.004.00

Додат. №

ПГ-21.08.1730.004.00

125/



Підп. і дата

Інв. № докл.

Зам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № арх.

Н. контр.

Затв.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Львівський Д.А.			
Перев.	Мураковський С.А.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.	Мураковський С.А.			

ПГ-21.08.1730.004.00

Тримач спиці

Лист Сталь 30, 1 мм
ДСТУ 7809:2015

Літера	Маса	Масштаб
	9 з	2:1
Аркушів 1		
КПІ ім. Ізгоря Сікарського ФРП		

1

Копія

Формат А4

Арк.

89

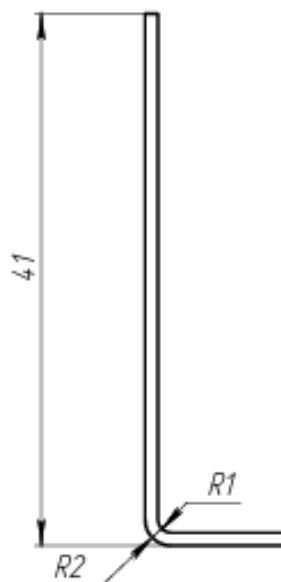
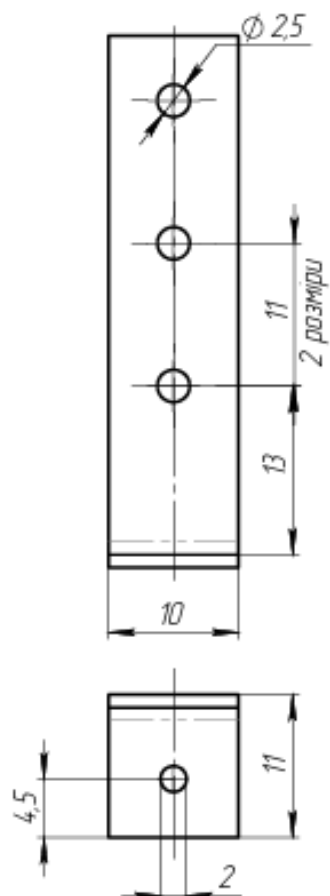
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Додат. №	Перше застосує. ПГ-2108.1730.003.00
----------	--

Підп. і дата	Інв. № докл.	Зам. інв. №	Інв. № докл.	Підп. і дата
--------------	--------------	-------------	--------------	--------------

ПГ-2108.1730.003.00

25/ (✓)



ПГ-2108.1730.003.00

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Лихолат Д.А.		
Перев.		Мудраковський С.А.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.		Мудраковський С.А.		

Опора кришки

Літера	Маса	Масштаб
	3,5 г	2:1

Аркушів 1

РЕТГ-пластмас

КПІ ім. Ізгоря Сікорського
ФРП

1

Копія

Формат А4

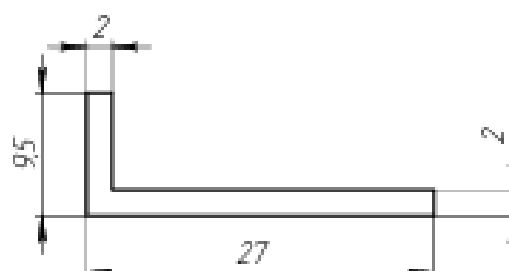
Арк.

90

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

Перше застосує	ПГ-2108.1730.006.00
Діагональ №	

ПГ-2108.1730.006.00



Дата і дата		№ № аудіо		Зам. №		Дата і дата	
№ № архів.		Т. контр.		Н. контр.		Зам.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Разраб.	Лилин А.А.			
Перев.	Муромовський С.А.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Зам.	Муромовський С.А.			

ПГ-2108.1730.006.00

Тримач датчика кольору

Літера	Маса	Масштаб
	5,2 г	2:1

Аркуш 1

PETG-пластмас

КПІ ім. Ігоря Сікорського
ФРП

1

Копія

Формат А4

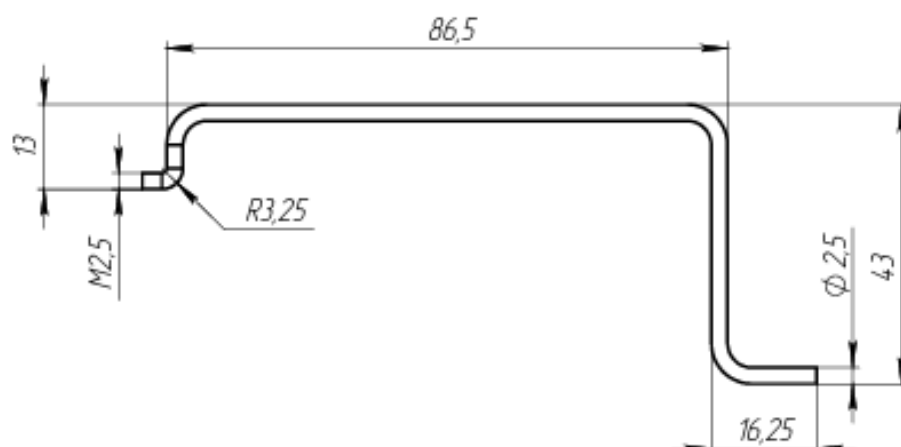
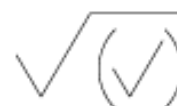
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Арк.

91

Додат. №	Перше застосує.
	ПГ-2108.1730.008.00

ПГ-2108.1730.008.00



Підп. і дата	Інв. №	Зам. інв. №	Інв. №	Інв. №	Інв. №

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Лихолот Д.А.		
Перев.		Мураховський С.А.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.		Мураховський С.А.		

ПГ-2108.1730.008.00

Спиця

Літера	Маса	Масштаб
	3,45 г	1:1
Аркушів 1		

Дріт сталевий, d=2,05
ДСТУ EN 10218-2-2001

КПІ ім. Ігоря Сікорського
ФРП

1

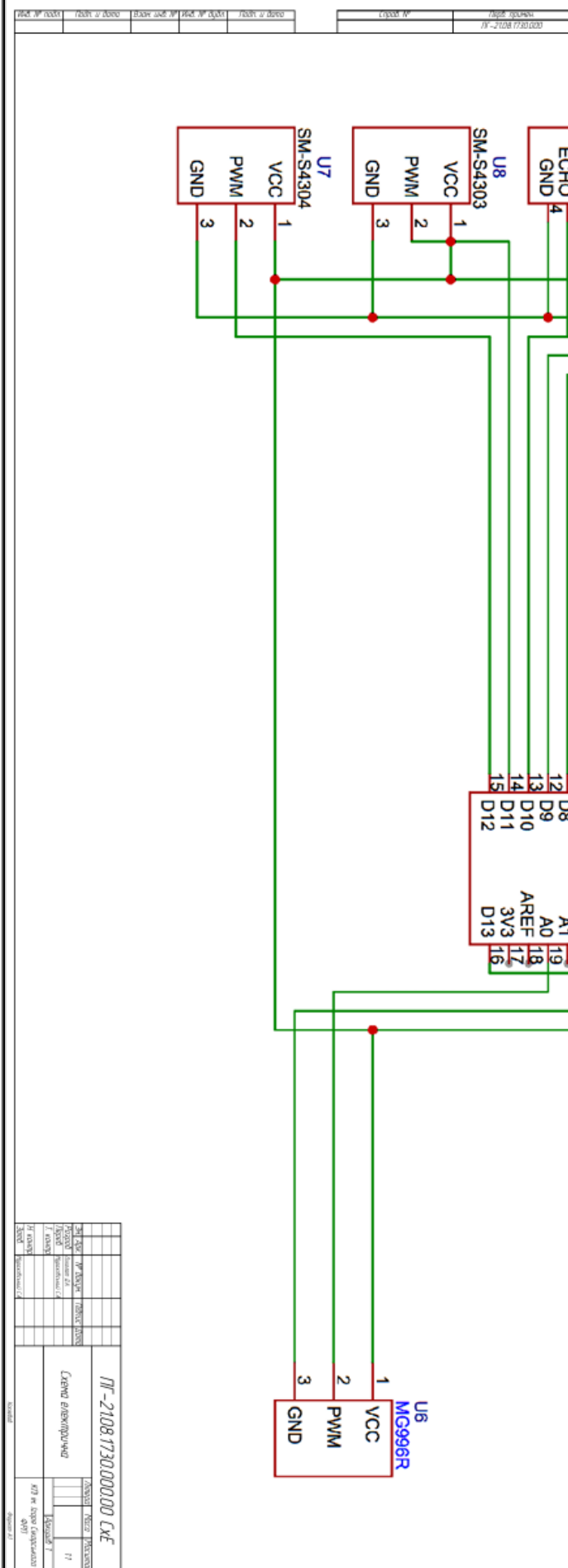
Копія

Формат А4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Арк.

92



							Арк.
							95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			