

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

" 16" червня 2025 р.



Максим Белік

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
Кафедра _____ КІТАР
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський)
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

« 28 » Квітня _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві _____ Беліку Максиму Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення конструкції рухомої платформи
для робота-промоутера _____

Затверджена наказом по університету від _____ 119.05.2025 р. № 390 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 16 червня 2025 р

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Вантажопідйомність 30кг _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Оцінка існуючих технологій мобільних баз роботів-промоутерів _____

4.2 Проектування системи рухомої платформи _____

4.3 Розробка системи приводу _____

4.4 Вибір компонентної бази _____

4.5 Розробка програмних алгоритмів керування та навігації _____

4.5 Реалізація інтерфейсів взаємодії _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Слайди у форматі PowerPoint (14 слайдів), відео-запис симуляції системи

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	28.04.2025- 30.04.2025	виконано
2	Опрацювання літератури за темою роботи	01.05.2025- 07.05.2025	виконано
3	Аналіз сучасних рішень для визначення параметрів атоматизованих технологічних процесів	08.05.2025- 15.05.2025	виконано
4	Розробка системи	15.05.2025- 12.06.2025	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	13.06.2025- 15.06.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	16.06.2025- 17.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	18.06.2025- 19.06.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	20.06.2025- 21.06.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.06.2025- 23.06.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.06.2025- 25.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Максим БЄЛІК
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Доцент Оксана СИЧОВА
(посада власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 101 с., 22 рис., 6 табл., 14 джерела, 4 дод.

МОБІЛЬНА ПЛАТФОРМА, РОБОТ-ПРОМОУТЕР, BLDC ДВИГУНИ, КОЛІСНА БАЗА, MODBUS, НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА, LIDAR, SLAM

Метою роботи є розроблення конструкції рухомої платформи для робота-промоутера вантажопідйомністю 30 кг із інтеграцією протоколу Modbus для забезпечення надійної комунікації з іншими електронними компонентами та контролерами системи.

Об'єктом розробки виступає процес пересування робота-промоутера в виставкових приміщеннях, що включає питання стабілізації, маневрування та забезпечення безпеки руху у присутності людей і перешкод.

Предметом розробки є конструкція рухомої платформи робота-промоутера, що охоплює механічні елементи, компоненти приводної системи та інтерфейси зв'язку з електронною апаратурою через протокол Modbus.

Методи дослідження – аналіз існуючих рішень, математичне моделювання, структурний синтез.

В першому розділі проведено аналіз існуючих технологій та конструкцій рухомих платформ, розглянуто типи шасі, приводів, сенсорних систем та протоколів зв'язку. На основі аналізу сформульовано вимоги до проєктованої системи.

В другому розділі розроблено загальну структурну схему рухомої платформи на базі дворівневої архітектури керування. Виконано проєктування механічної конструкції з розрахунком стійкості, а також спроектовано систему живлення та розподілу енергії. Обґрунтовано ключові архітектурні рішення.

В третьому розділі описано середовища симуляції та розробки, апаратну та програмну реалізацію проєкту. Здійснено вибір компонентної бази,

розроблено електричну принципову схему. Детально описано реалізовані програмні алгоритми навігації, включаючи машину станів, алгоритм планування шляху A^* та методи уникнення перешкод. Описано реалізацію комунікаційних інтерфейсів.

У результаті розроблено повний проєкт конструкції рухомої платформи, що відповідає поставленим вимогам, є технічно обґрунтованим і готовим до створення фізичного прототипу.

Отримані в роботі результати безпосередньо сприяють досягненню національних Цілей сталого розвитку України. Зокрема, ця розробка відповідає Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» створюючи прототип продукту в секторі високотехнологічного машинобудування (Завдання 9.4), демонструючи практичний результат ланцюга «освіта–наука–виробництво» (Завдання 9.5) та закладаючи основи для інноваційної автоматизованої інфраструктури в комерційних та промислових просторах (Завдання 9.1)

ABSTRACT

Report on pre-certification practice: 101 p., 22 fig., 6 tables, 14 references, 4pp.

MOBILE PLATFORM, PROMOTER ROBOT, BLDC MOTORS, WHEEL BASE, MODBUS, NAVIGATION SYSTEM, LIDAR, SLAM

The aim of the work is to develop a mobile platform design for a promoter robot with a lifting capacity of 30 kg, integrating the Modbus protocol to ensure reliable communication with other electronic components and system controllers.

The object of development is the process of moving the promoter robot in exhibition halls, which includes issues of stabilization, maneuvering, and ensuring safety in the presence of people and obstacles.

The subject of development is the design of a mobile platform for a promotional robot, covering mechanical elements, drive system components, and communication interfaces with electronic equipment via the Modbus protocol.

The documentation presents a systematic approach to mobile platform development structured across three principal chapters. The first section provides a comprehensive analysis of existing technologies and design methodologies for mobile platforms, examining various chassis configurations, drive systems, sensor technologies, and communication protocols. This foundational analysis serves as the basis for formulating specific requirements for the designed system.

The second chapter establishes the development of a comprehensive structural diagram for the mobile platform, implemented through a two-level control architecture. The documentation includes mechanical design calculations focused on stability requirements and presents the design of power supply and distribution systems. The chapter provides justification for key architectural decisions that inform the overall system design.

The third chapter details the simulation and development environments

utilized in the project, alongside comprehensive descriptions of hardware and software implementation strategies. The documentation presents the selected component base and includes development of electrical schematic diagrams. Theoretical calculations from automatic control theory are presented to substantiate the synthesis of PID controller parameters. The chapter provides detailed descriptions of implemented navigation software algorithms, including state machine logic, A-star path planning algorithms, and obstacle avoidance methodologies. Implementation of communication interfaces receives thorough documentation.

The documentation concludes that a complete mobile platform design has been developed that satisfies established requirements, demonstrates technical soundness, and provides readiness for physical prototype creation.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Оцінка існуючих технологій мобільних баз роботів-промоутерів	11
1.1 Сучасні методи організації конструкції рухомих платформ роботів ...	11
1.2 Аналіз аналогічних конструкцій рухомих платформ для роботів-промоутерів.....	14
1.3 Аналіз сучасних технологій та компонентів для рухомих платформ ...	18
1.3.1 Типи приводів для рухомих платформ	18
1.3.2 Покращення конструкції колісної бази	18
1.3.3 Електронні компоненти керування	19
1.3.4 Матеріали для конструкції платформ	20
1.4 Загальний аналіз навігаційних систем для рухомих платформ	21
1.4.1 Алгоритми SLAM	21
1.4.2 Візуальні системи навігації.....	21
1.5 Загальний аналіз систем інтеграції та комунікації	22
1.5.1 Протокол Modbus: історія та характеристики.....	22
1.5.2 Способи інтеграції рухомої платформи з іншими компонентами..	22
1.5.3 Бездротові технології комунікації.....	23
1.6 Аналіз інструментів для розробки програмного забезпечення рухомих платформ	23
1.6.1 Середовища програмування для контролерів руху	23
1.6.2 Способи реалізації алгоритмів побудови карти місцевості.....	24
1.7 Порівняльний аналіз та вибір контролерів.....	25
1.8 Постановка завдання на розробку	27
2 Проектування системи рухомої платформи	29
2.1 Розробка загальної структурної схеми.....	29
2.2 Розрахунок колісної рами.....	30
2.3 Проектування механічної конструкції	31
2.4 Розробка архітектури системи керування	35

	7
3 Програмна та апаратна реалізація	36
3.1 Опис середовища розробки та симуляції	36
3.2. Апаратна реалізація	36
3.3. Розрахунок та моделювання системи керування.....	39
3.4 Розробка програмних алгоритмів керування та навігації.....	41
3.4.1. Машина станів.....	41
3.4.2 Алгоритм планування шляху A^*	42
3.4.3. Алгоритм уникнення перешкод.....	43
3.5 Реалізація інтерфейсів взаємодії	44
3.5.1 Внутрішньосистемна комунікація (UART).....	44
3.5.2 АРІ для віддаленого керування (HTTP).....	44
3.5.3 Промисловий інтерфейс (Modbus RTU)	45
3.5.4 Командний центр оператора (Веб-додаток).....	46
3.6. Охорона праці.....	49
Висновки	51
Перелік джерел посилання	53
Додаток А Апробація результатів роботи	56
Додаток Б Програмний код основного контролеру Webots	63
Додаток В Програмний код котролеру з АРІ для роботи із командним центром	77
Додаток Г Програмний код веб додатку із телеметрією.....	89
Додаток Д Демонстраційний матеріал.....	104

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- BLDC – безщітковий двигун постійного струму (Brushless Direct Current);
- CAN – controller area network;
- DC – постійний струм (Direct Current);
- FOC – керування за орієнтацією поля (Field Oriented Control);
- GPIO – інтерфейс введення/виведення загального призначення (General Purpose Input/Output);
- I2C – inter-integrated circuit;
- IMU – інерціальний вимірювальний блок (Inertial Measurement Unit);
- Lidar – світлове виявлення і визначення дальності (Light Detection and Ranging);
- MQTT – message Queuing Telemetry Transport;
- PID – пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор);
- PWM – широтно-імпульсна модуляція (Pulse Width Modulation);
- RGB-D – red, green, blue, depth;
- SLAM – одночасна локалізація та картографування (Simultaneous Localization and Mapping);
- SPI – serial peripheral interface;
- UART – universal asynchronous receiver/transmitter;
- USB – universal serial bus.

ВСТУП

У умовах стрімкого розвитку автоматизації та робототехнічних систем особливого впливу зазнає універсальні та ефективні рухомі платформи роботів-промоутерів. Такі роботи відіграють дедалі помітнішу роль у сферах роздрібною торгівлі, виставкових заходах та на виробничих майданчиках й виконання завдань із навігації, збору даних і комунікації з відвідувачами. Розробка надійної конструкції рухомої платформи, здатної витримувати навантаження до 30 кг та взаємодіяти з іншими компонентами робота через стандартизовані шини обміну даними, дає можливість для підвищення гнучкості, автономності й економічної ефективності подібних систем.

Автоматизація буденних завдань підприємств різних галузей – є ключовим фактором продуктивності й конкурентоспроможності. У той самий час більшість рухомих платформ мають недоліки пов'язані із стабільністю та вантажопідйомністю та інтеграцією із зовнішніми системами. Таким чином, розробка рухомої платформи з вантажопідйомністю 30кг та інтеграцією із зовнішніми системами шляхом підключення протоколу Modbus є достатньо актуальною.

Метою роботи є розроблення конструкції рухомої платформи для робота-промоутера вантажопідйомністю 30 кг із інтеграцією протоколу Modbus для забезпечення надійної комунікації з іншими електронними компонентами та контролерами системи.

Об'єктом розробки виступає процес пересування робота-промоутера в виставкових приміщеннях, що включає питання стабілізації, маневрування та забезпечення безпеки руху у присутності людей і перешкод.

Предметом розробки є конструкція рухомої платформи робота-промоутера, що охоплює механічні елементи, компоненти приводної системи та інтерфейси зв'язку з електронною апаратурою через протокол Modbus.

Завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих конструкцій рухомих платформ для робототехнічних систем;
- розробити структурну схему платформи;
- обрати компонентну базу для реалізації привідної системи та електронних модулів;
- розробити механічну конструкцію з урахуванням вимог до вантажопідйомності 30 кг;
- спроектувати алгоритм для побудови карти місцевості в реальному часі[1].

1 ОЦІНКА ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНИХ БАЗ РОБОТІВ-ПРОМОУТЕРІВ

1.1 Сучасні методи організації конструкції рухомих платформ роботів

Існують різні типи рухомих платформ. Серед них найпоширенішими є колісні, гусеничні та всенаправлені платформи. Кожен різновид має унікальні переваги, недоліки та обмеження, тому вони використовуються в різних умовах та ситуаціях [3].

Завдяки простоті конструкції та високій енергоефективності, найчастіше використовуються колісні платформи. В сучасному світі чотириколісні моделі вважаються найбільш стабільними [8]. Що може надати можливість розробки платформи для безпечного перевезення вантажів вагою до тридцяти кілограмів.

Колісні платформи можуть мати різні типи приводу (табл. 1.1):

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця приводів

Тип колісної бази	Тип приводу	Маневреність	Вантажо-підйомність	Складність конструкції	Переваги	Недоліки
Диференціальний привід	Два або більше коліс з незалежним приводом	Висока при повороті на місці	Середня	Низька	Простота, надійність, ефективність	Обмежена маневреність в обмеженому просторі
Привід за схемою Акерман	Керовані передні колеса, ведучі задні	Обмежена, потребує простору для повороту	Висока	Середня	Стабільність руху, природний поворот	Складніший механізм рульового управління
Месапум колеса	Чотири колеса з роликками під кутом 45°	Дуже висока (рух в будь-якому напрямку)	Середня	Висока	Висока маневреність, рух вбік і по діагоналі	Вища складність, погана ефективність
Всенаправлені колеса	Омніколеса з роликками по колу	Максимальна маневреність	Середня	Висока	Рух у будь-якому напрямку без повороту	Складність конструкції і керування

Якщо розглядати простоту реалізації та надійності, то диференційний привід є найпоширенішим для рухомих платформ. Для колісної бази з найкращою маневриністю краще обирати месанум або всенаправлені колеса, які забезпечують кращу маневреність, яка корисна у тісних приміщеннях. В той час, такі типи колес мають обмежену вантажопідйомності та знижену ефективність на нерівних поверхнях.

Для виготовлення рухомих платформ застосовують матеріали, які забезпечують оптимальне співвідношення міцності, ваги та вартості:

- алюмінієві сплави – частий вибір завдяки легкості та високій міцності. Використовуються для рами та несучих елементів;
- сталь – застосовується там, де потрібна підвищена міцність, але має – більшу вагу, що може негативно впливати на енергоефективність;
- пластики та композити – за рахунок своєї невеликої ваги, але в той час досить високої міцності використовуються для корпусних елементів або захисних кожухів.
- вуглецеве волокно – забезпечує високу міцність елементів та невисоку вагу, що позитивно впливає на енергоефективність системи. Але використовується лише в високотехнологічних пристроях через високу собівартість.

Для робота-промоутера важливо зберегти баланс між міцністю і вагою, тому перевага надається алюмінієвим сплавам у поєднанні з легкими пластиками для корпусу.

Сутність рухомої платформи з високою вантажопідйомністю є стійкість платформи. Цієї мети можна досягнути комплексним підходом, а саме низький центр маси та розташування коліс. Таким чином, обраною структурою є чотириколісна платформа з рівномірним розподілом мас. Така платформа буде стійкою до перекидання під час поворотів або зупинок.

Для підвищення комфорту руху та захисту компонентів системи доцільно використовувати системи амортизації, які пом'якшують удари та гасять вібрації.

Також, двоколісних систем з третім вільно рухомим колесом попереду, немає необхідності у складних активних системах балансування, що суттєво спрощує конструкцію та підвищує надійність.

Для забезпечення низького центру ваги та підвищення стабільності рекомендовано розташовувати акумуляторні батареї в нижній частині платформи. Двигуни в свою чергу оптимально розташовувати безпосередньо на осях коліс, що мінімізує втрати при передачі крутного моменту та спрощує конструкцію.

Електронні компоненти, зазвичай, вимагають особливої уваги до захисту від чинників навколишньої середовища, таких як: точкове попадання води, пил та волога. Крім, того слід забезпечити компоненти якісним тепловідведенням для запобігання перегріву та зберегти модульну структуру, що значно покращить модифікацію, налагодження та обслуговування системи.

Сучасні тенденції розвитку рухомих платформ для роботів-промоутерів включають:

- застосування SLAM-навігації для автономного побудови карти приміщення і точного позиціонування. Підвищення маневреності за рахунок впровадження всенаправлених коліс або складних систем керування;

- використання легких матеріалів і модульних конструкцій для зниження ваги і підвищення гнучкості платформи до модифікацій та обслуговування;

- інтеграція з інтелектуальними системами управління, що дозволяють адаптуватися до змін навколишнього середовища і взаємодіяти з людьми;

- забезпечення безпеки руху за допомогою датчиків виявлення перешкод і систем екстреного гальмування;

- розвиток стандартів комунікації (наприклад, Modbus) для сумісності з іншими компонентами роботи.

Таким чином, для розробки рухомої платформи робота-промоутера оптимальним є вибір колісної платформи з чотириколісною базою і диференціальним приводом, виготовленої з алюмінієвих сплавів з урахуванням

сучасних методів навігації (SLAM) та інтеграції систем управління через Modbus. Забезпечення стійкості і правильне компонування внутрішніх систем гарантують надійність і ефективність роботи.

Таким чином, для розробки рухомої платформи було обрано чотириколісну колісну базу із диференційним приводом, виготовленої рами з алюмінію та окремих пластикових частин з сучасними методами навігації (SLAM) та інтеграції систем управління через Modbus. Така конструкція забезпечує високу енергоефективність, добру маневреність та гарну стійкість від перекиду.

1.2 Аналіз аналогічних конструкцій рухомих платформ для роботів-промоутерів

На сучасному ринку зараз можна знайти різноманітні мобільні платформи для роботів-промоутерів, що відрізняються за своїми технологіями, конструкціями, візуальними складовими і типами управління. Серед найбільш відомих моделей варто відзначити декілька цікавих варіантів

Перший, Robotnik RB-KAIROS+ – це модульна платформа, придатна для промислового і комерційного використання, має високу вантажопідйомність і дає змогу під'єднати різні датчики та системи навігації.

Другий, OMRON LD-60/90 – є автономними мобільними роботами, що розроблені з акцентом на безпеку та ефективність під час роботи на складах, оснащені лазерною навігацією і датчиками.

Далі Hello Robot Stretch 2 – платформа з оригінальним маніпулятором, призначена для завдань, пов'язаних з взаємодією з предметами, має середню вантажопідйомність.

Останній – Neobotix MMO-500 – колісна мобільна платформа, розрахована на дослідницькі та промислові завдання, вирізняється надійною роботою і можливістю гнучкого налаштування під власні потреби.

Порівняймо основні характеристики рухомих платформ (табл 1.2)

Таблиця 1.2 – Порівняльна таблиця основних технічних характеристик рухомих платформ

Платформа	Вантажопідйомність, кг	Максимальна швидкість, км/год	Автономність, год	Система навігації
Robotnik RB-KAIROS+	до 50	до 5	до 8	Лідар, ІНС, камери
OMRON LD-60/90	60 (LD-60), 90 (LD-90)	до 4	до 12	Лазерна навігація
Hello Robot Stretch 2	20-30	до 3	до 6	Камери, ультразвук
Neobotix MMO-500	до 50	до 6	до 10	Лідар, ІНС

Вантажопідйомність у межах 30 кг є типовою для роботів-промоутерів. Швидкість руху варіюється від 3 до 6 км/год, що відповідає безпечним параметрам пересування у людних приміщеннях. Автономність залежить від ємності акумуляторів та енергоефективності систем, що варіюється від 6 до 12 годин.

Рухомі платформи мають різні конструктивні рішення, що впливають на їх функціональність:

- колісна база: більшість платформ використовують чотириколісну або шестиколісну базу з незалежним приводом для підвищення маневреності. Наприклад, Robotnik RB-KAIROS+ (рис 1.1) має модульну колісну базу, що дозволяє адаптувати платформу під різні умови експлуатації;

- матеріали: корпуси виготовляються з алюмінієвих сплавів або композитних матеріалів для зменшення ваги і підвищення міцності;

- габарити: платформи мають компактні розміри, що дозволяє їм працювати у вузьких проходах та людних зонах.

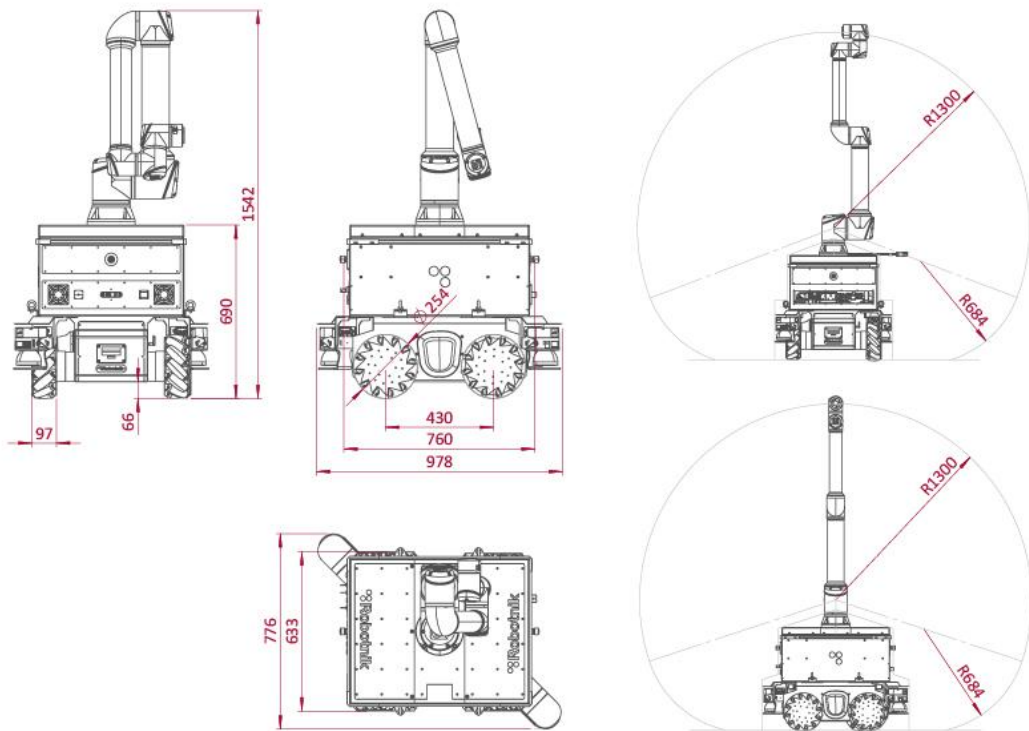


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення колісної бази Robotnik RB-KAIROS+

Так як в більшості випадків робот промоутер знаходиться у людних приміщеннях вибір двигунів для колісної бази обґрунтовується низьким шумом. Через це електричні двигуни з безщітковою технологією (BLDC), вважаються кращим вибором через високу енергоефективність та низьким шумом.

Управління рухом реалізується через мікроконтролери або промислові контролери з підтримкою алгоритмів PID-регулювання та адаптивного керування.

Системи управління включають:

- автономну навігацію з використанням лідарів, камер, ультразвукових сенсорів;
- інтеграцію з системами безпеки (автоматичне гальмування, виявлення перешкод);
- можливість дистанційного керування та моніторингу через мережеві

протоколи.

Таким чином, отримаємо порівняльну таблицю для конструктивних параметрів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки конструктивних рішень

Конструктивне рішення	Переваги	Недоліки
Модульна колісна база	Висока адаптивність, легкість обслуговування	Складність конструкції, вища вартість
Композитні матеріали корпусу	Легка вага, корозійна стійкість	Вища ціна, складність ремонту
BLDC-приводи	Енергоефективність, низький рівень шуму	Вимагають складної електроніки управління
Лідарна навігація	Точність позиціонування, робота в складних умовах	Висока вартість, чутливість до пилу та вологи

Типові технічні рішення для вантажопідйомності близько 30 кг. Для забезпечення вантажопідйомності близько 30 кг застосовуються:

- електродвигуни з номінальною потужністю від 200 Вт до 500 Вт;
- рама з алюмінієвих сплавів для оптимального співвідношення міцності і ваги;
- платформи з низьким центром тяжіння для стабільності при навантаженні;
- використання амортизаторів для захисту вантажу від вібрацій.

Інтерфейс Modbus широко використовується для інтеграції рухомих платформ з іншими компонентами роботів, такими як сенсори, контролери та системи управління.

Згідно із порівняльним аналізом, було виявлено, що більш доцільним буде використання Modbus RTU для внутрішнього використання системою через його меншу ресурсоемність та надійну роботу на коротких дистанціях.

Водночас використовувати Modbus TCP/IP через високу сумісність з корпоративними мережами та покращенням відстані передачі даних.

1.3 Аналіз сучасних технологій та компонентів для рухомих платформ

1.3.1 Типи приводів для рухомих платформ

Двома найважливішими факторами при виборі приводу для мобільної платформи робота-промоутера є характеристики руху та надійність системи. Двигуни постійного струму (DC) мають лінійний зв'язок між прикладеною напругою та швидкістю і відрізняються простотою конструкції та управління. Вони мають великий діапазон швидкостей, високий початковий крутний момент і недорогі. Недоліками є використання щіток, що призводить до зносу, і ККД до 80%. Для платформи вантажопідйомністю 30 кг підійдуть двигуни постійного струму з обертовим моментом від 0,5 до 2 ньютон-метрів і потужністю від 100 до 300 Вт.

Позитивно впливають на час автономної роботи безщіткові двигуни (BLDC), які мають тривалий термін служби, оскільки не мають щіток і мають ККД 85-95%. До їхніх недоліків можна віднести складність системи керування та підвищену вартість. Ідеальними характеристиками платформи є крутний момент 1-3 Нм, швидкість обертання 1000-4000 об/хв і потужність 150-400 Вт [7].

Ідеальним вибором для робота-промоутера з 30-кілограмовим корисним навантаженням є двигун BLDC, оскільки він пропонує найкращий баланс вартості, ефективності та надійності.

1.3.2 Покращення конструкції колісної бази

У місцях, де присутні люди, колісна база робота-промоутера повинна забезпечувати стабільність, маневреність і безпечне пересування.

Типи коліс:

- стандартні колеса. Проте незважаючи на стабільність, фіксованою віссю обмежують маневреність;
- поворотні колеса (ролики) збільшують маневреність, але стають менш стійкими на високих швидкостях;

– всеспрямовані колеса (Omni та Mecanum), хоча й мають обмеження щодо вантажопідйомності, дозволяють пересуватися в будь-якому напрямку, не скручуючи тіло.

Варіанти розташування коліс:

– диференціальний привід (два ведучі та опорні колеса) дозволяє розвертатися на місці і має просту конструкцію;

– триколісний - стабільний, але має обмежені можливості розвороту на місці; автомобільний (Ackermann) - стабільний на високих швидкостях, але потребує місця для розвороту; а всеспрямовані конфігурації з омні-колесами є найбільш маневреними, але більш складними в управлінні;

– диференціальний привід з двома двигунами BLDC або всеспрямована конфігурація з меккановими колесами - найкращі варіанти для робота-промоутера, щоб забезпечити найвищий рівень стабільності та безпеки в густонаселених регіонах.

1.3.3 Електронні компоненти керування

Для забезпечення ефективного керування рухомою платформою слід ретельно підбирати комбінації електронних компонентів, які будуть доцільні для потреб системи та забезпечать добре функціонування системи. Основу обчислювальної частини становлять мікроконтролери серії STM32, які відповідають за безпосереднє керування приводами завдяки своїй надійності та здатності працювати в режимі реального часу. Для більш складних завдань котрі потребують комплексних обчислень, таких як навігація та обробка даних від LiDAR-сенсорів або ультразвукових датчиків відстані, використовуються потужніші одноплатні комп'ютери – найчастіше Raspberry Pi, які забезпечують достатню обчислювальну потужність для алгоритмів побудови карт місцевості [9].

Критично важливим елементом мобільної платформи є драйвери двигунів, вибір яких обґрунтовується типом силової установки. Для двигунів постійного струму рекомендуються драйвери на основі H-мостових схем,

включно із L298N та TB6612FNG, забезпечуючи управління напрямком оберту та швидкістю. Безщитинкові двигун потребують використання трьох фазних драйверів із векторним управлінням, серед яких можна виділити DRV8302 завдяки розширеному функціоналу. При виборі драйверів необхідно враховувати основні параметри: можливості витримувати токи 10-30А и працювати з напругою 12-48В.

Системи зв'язку є невід'ємну частину архітектури управління. Інтеграція із другими модулями робота-промоутера здійснюється шляхом протоколу Modbus, реалізовується в варіанті RTU через RS-485 для надійного зв'язку на коротких відстанях або через TCP/IP по Ethernet для включення в комп'ютерну мережу. Бездротовий зв'язок забезпечується модулями Wi-fi із затримкою 1мс для мережі 5G і Bluetooth для комунікації з мобільними пристроями користувачів

1.3.4 Матеріали для конструкції платформ

Вибір матеріалів для мобільних платформ визначає ключові експлуатаційні характеристики системи, забезпечуючи оптимальний баланс між міцністю, вагою та зовнішнім видом. Серед металевих сплавів алюмінію являє собою найбільш раціональний вибір завдяки найкращому співвідношенню міцності до ваги, що забезпечує створення легких і одночасно жорстких конструкцій рами.

Полімерні і композитні матеріали займають значне місце в конструктивному рішенні платформи. ABS-пластик зазнав значного застосування в виготовленні корпусних деталей завдяки високій механічній міцності, технологічності обробки та сумісна з технологіями адитивного виробництва для швидкого створення прототипів. Для захисних екранів та панелей користувацького інтерфейсу рекомендованим матеріалом є полікарбонат, що має високу оптичну прозорість у сукупності із бездоганною ударостійкістю.

Використання алюмінієвих профілів для формування основного

каркасу, сталевих елементів для високонавантажених вузлів трансмісії та ходової частини, а також пластикових деталей для зовнішнього корпусу.

1.4 Загальний аналіз навігаційних систем для рухомих платформ

1.4.1 Алгоритми SLAM

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) дозволяє роботу орієнтуватися в невідомому просторі, вирішуючи задачу одночасного визначення положення і побудови карти. Етапи роботи: збір даних з сенсорів, передбачення положення на основі одометрії, оновлення карти, корекція положення (loop closure), оптимізація. Найбільш прийнятні реалізації: GMapping на основі фільтра частинок, що добре працює з LiDAR; Hector SLAM, який не потребує одометрії і стійкий до проковзування. Для динамічного середовища важливі методи фільтрації рухомих об'єктів та інтеграція семантичної інформації в карту.

1.4.2 Візуальні системи навігації

Для взаємодії з навколишнім середовищем, виявлення перешкод і локальної навігації використовується масив із восьми ультразвукових датчиків, розташованих по периметру корпусу. На відміну від систем, що будують глобальну мапу, цей підхід фокусується на створенні локальної «зони безпеки» навколо робота, як показано на рисунку 1.2.

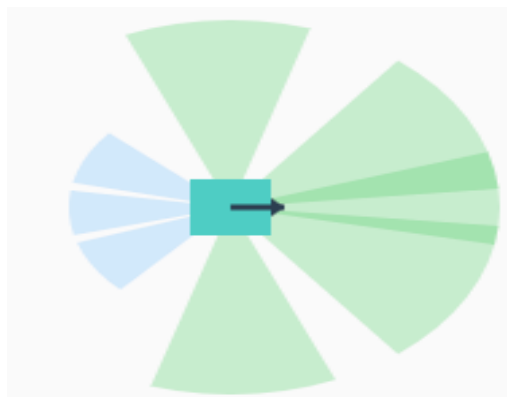


Рисунок 1.2 – Схема «зони безпеки»

Такий підхід, на основі ультразвукових датчиків, є ефективним і економічно виправданим рішенням для поставленої задачі, забезпечуючи надійну і безпечну навігацію робота в цільовому середовищі експлуатації.

1.5 Загальний аналіз систем інтеграції та комунікації

1.5.1 Протокол Modbus: історія та характеристики

Протокол Modbus, розроблений компанією Modicon 1979 року, здобув широке визнання в промисловій автоматизації завдяки концептуальній простоті та експлуатаційній надійності. Стосовно робота-промоутера протокол забезпечує мінімальні службові накладні витрати, як порівняти з альтернативними комунікаційними рішеннями, детерміновану структуру взаємодії за принципом «запити-відповідь» і архітектуру «клієнт-сервер», у якій центральний контролер функціонує як клієнт, а периферійні підсистеми виконують роль серверів.

Протокол Modbus оперує чотирма основними типами даних: дискретні входи з доступом тільки для читання, призначені для моніторингу стану датчиків; керувальні котушки з можливістю читання та запису для контролю вихідних пристроїв; вхідні регістри тільки для читання, які використовуються для аналогових вимірів; та утримувальні регістри з функціями читання та запису для керування параметрами системи. Найпоширенішою реалізацією є Modbus RTU, що використовує компактний двійковий формат передачі даних через інтерфейси RS-485 або RS-232, що забезпечує оптимальну продуктивність для внутрішньої комунікації з часом відгуку в діапазоні мілісекунд.

1.5.2 Способи інтеграції рухомої платформи з іншими компонентами

Фізична інтеграція компонентів системи реалізується за допомогою декількох інтерфейсних рішень: RS-485 забезпечує завадостійке під'єднання контролерів двигунів і сенсорних пристроїв, USB 3.0 призначено для

високошвидкісних пристроїв з обмеженням дальності передавання до 5 метрів, Ethernet гарантує надійне передавання даних на відстанях до 100 метрів.

Оптимальним архітектурним рішенням визнано багаторівневу модель управління. Нижній рівень об'єднує контролери двигунів, драйвери і сенсори, що функціонують за протоколом Modbus RTU. Середній рівень охоплює контролери підсистем, що реалізують алгоритми навігації та локального управління. Верхній рівень відповідає за стратегічне управління, планування траєкторій і взаємодію із зовнішніми інформаційними системами. Для призначеного для користувача інтерфейсу рекомендується застосування веб-технологій, що забезпечують кросплатформену сумісність.

1.5.3 Бездротові технології комунікації

Вибір оптимального поєднання бездротових технологій є критично важливим завданням для робота-промоутера. Технологія Wi-Fi забезпечує високу пропускну здатність з можливістю роботи в діапазонах 2,4 ГГц, що характеризується збільшеною дальністю дії, або 5 ГГц, що забезпечує підвищену швидкість передачі даних. Ця технологія оптимально підходить для передачі відеопотоків і обміну великими обсягами інформації. Bluetooth Low Energy відрізняється зниженим енергоспоживанням і ефективною роботою на відстанях 10-30 метрів в умовах закритих приміщень, що робить цю технологію ідеальним рішенням для персоналізованої взаємодії з користувачами.

1.6 Аналіз інструментів для розробки програмного забезпечення рухомих платформ

1.6.1 Середовища програмування для контролерів руху

Для реалізації програмного компонента проекту і проведення обчислювальних експериментів було обрано сукупність сучасних

інструментальних засобів, що забезпечують ефективний цикл розробки від алгоритмічних рішень до апаратного прототипу. Як основне середовище розроблення програмного забезпечення застосовували редактор Visual Studio Code, що характеризується високою продуктивністю, розширеною підтримкою мови Python за допомогою спеціалізованих розширень, а також інтегрованими засобами налагодження та керування версіями, що істотно прискорило процес створення керуючих алгоритмів для робототехнічної системи.

Моделювання динамічних характеристик платформи та валідацію навігаційних алгоритмів здійснювали у професійному симуляційному середовищі Webots. Ця платформа надає розвинений фізичний рушій і прикладний програмний інтерфейс, що дає змогу контролеру, розробленому мовою Python у середовищі VS Code, взаємодіяти з віртуальною моделлю робота, отримувати дані від симульованих сенсорних пристроїв і керувати виконавчими механізмами. Такий методологічний підхід забезпечив можливість відпрацювання всієї поведінкової логіки, включно з алгоритмами обходу перешкод і проходження заданим маршрутом, на етапі, що передуює створенню фізичного прототипу.

1.6.2 Способи реалізації алгоритмів побудови карти місцевості

Для цього проекту було обрано метод сітки зайнятості (Occupancy Grid Mapping), що є широко поширеним підходом у сфері мобільної робототехніки. Принцип роботи заснований на дискретизації навколишнього простору в двовимірну сітку з комірками фіксованого розміру. Кожна комірка містить значення, що відображає стан відповідної ділянки реального простору: «зайнято» за наявності перешкоди, "вільно" або «невідомо». У програмній реалізації контролера карта динамічно оновлюється на основі інформації від восьми ультразвукових датчиків. У разі виявлення датчиком перешкоди на певній відстані відповідні комірки сітки класифікуються як «зайняті».

Перевагою цього підходу є концептуальна простота і пряма сумісність з

алгоритмами планування шляху на основі сіток. Алгоритм A*, що функціонує з графовими структурами, інтерпретує таку сітку як граф, де кожна вільна клітинка являє собою вершину, а переходи до суміжних вільних клітинок утворюють ребра. Це забезпечує ефективне знаходження оптимального маршруту з обходом зайнятих зон. Незважаючи на потенційно високі вимоги до обсягу пам'яті при картографуванні великих площ, для умов виставкових залів і торгових приміщень ефективність і надійність цього методу роблять його оптимальним рішенням.

1.7 Порівняльний аналіз та вибір контролерів

Для забезпечення надійного управління мобільною платформою, яка повинна обробляти дані сенсорів, виконувати навігаційні алгоритми і взаємодіяти з іншими компонентами, необхідно вибрати контролер, що відповідає наступним вимогам: достатня обчислювальна потужність, можливість роботи з протоколом Modbus, наявність інтерфейсів для підключення периферійних пристроїв, надійність і достатня енергоефективність для забезпечення прийняттого часу автономної роботи для живлення від акумуляторів.

Розглянемо специфікації найпоширеніших контролерів для мобільних платформ. Враховуючи релевантні параметри, які вимагає рухома платформа (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Порівняння контролерів для керування рухомою платформою

Характеристика	Raspberry Pi 4B	NVIDIA Jetson Nano	Arduino Mega + Raspberry Pi	STM32F4 Discovery
Процесор	Quad-core Cortex-A72, 1.5 GHz	Quad-core Cortex-A57, 1.43 GHz	ATmega2560 + Quad-core Cortex-A72	Cortex-M4, 168 MHz

Продовження таблиці 1.4

Характеристика	Raspberry Pi 4B	NVIDIA Jetson Nano	Arduino Mega + Raspberry Pi	STM32F4 Discovery
ОЗП	4/8 ГБ	4 ГБ	8 КБ + 4/8 ГБ	192 кБ
Інтерфейси	GPIO, I2C, SPI, UART, USB, Ethernet	GPIO, I2C, SPI, UART, USB	GPIO, I2C, SPI, UART + різноманітні	GPIO, I2C, SPI, UART, USB
Підтримка Modbus	Через бібліотеки	Через бібліотеки	Через бібліотеки	Через бібліотеки
Обчислювальна потужність для SLAM	Середня	Висока	Висока	Низька
Енергоспоживання	Середнє (3-5 Вт)	Середнє (5-10 Вт)	Високе (5-10 Вт)	Низьке (0.5-1 Вт)
Вартість	Середня	Висока	Висока	Низька

На основі аналізу вимог проєкту та характеристик контролерів, для керування рухомою платформою обрано комбіновану архітектуру, що дозволяє розділити задачі між двома контролерами, де кожен виконує функції, які найкраще відповідають його можливостям. Raspberry Pi 4B з 8 ГБ оперативної пам'яті виконує роль основного обчислювального модуля, відповідаючи за обробку сенсорних даних, реалізацію навігаційних алгоритмів, планування маршрутів, комунікацію через протокол Modbus та забезпечення користувацького інтерфейсу на базі веб-технологій.

STM32F407VGT6 на платформі Pyboard функціонує як низькорівневий контролер реального часу, забезпечуючи безпосереднє управління драйверами двигунів, збір та обробку даних з енкодерів та інерціальних датчиків,

реалізацію систем безпеки та аварійного зупинення, а також комунікацію з основним модулем через UART-інтерфейс.

Такий розподіл функцій передбачає оптимізацію використання обчислювальних ресурсів та підвищення загальної надійності системи через спеціалізацію кожного контролера на відповідних завданнях.

1.8 Постановка завдання на розробку

На підставі сформульованих технічних і функціональних вимог визначаються наступні конкретні завдання для розробки мобільної платформи робота-промоутера.

Необхідно розробити структурну схему мобільної платформи, що включає всі критично важливі компоненти: приводні системи, керуючі контролери, навігаційний комплекс і комунікаційні інтерфейси. Схема повинна відображати функціональні взаємозв'язки між компонентами, потоки даних і енергетичні зв'язки, а також інтерфейси інтеграції з іншими підсистемами робототехнічного комплексу.

Необхідно спроектувати механічну конструкцію платформи з урахуванням вимог до вантажопідйомності, габаритних обмежень і маневреності. Дане завдання включає вибір конструкційних матеріалів, проведення розрахунків міцності і жорсткості, проектування ходової частини і корпусних елементів. Необхідно визначити оптимальну конфігурацію колісної бази і розміщення основних компонентів для забезпечення стійкості та ефективності руху.

Потрібно вибрати і обґрунтувати типи приводних систем для мобільної платформи, виходячи з вимог до швидкісних характеристик, точності позиціонування і навантажувальних параметрів. Потрібно розрахувати необхідні характеристики двигунів, включаючи потужність, крутний момент і швидкісні показники, а також підібрати відповідні редукторні передачі. Необхідно розробити систему управління приводами, що забезпечує плавні

процеси розгону і гальмування, а також точне позиціонування.

Необхідно розробити апаратну та програмну реалізацію інтерфейсу Modbus для комунікації з іншими компонентами робототехнічної системи. Необхідно визначити адресний простір Modbus, реалізувати відповідні регістри для управління рухом, зчитування стану та діагностичних функцій. Слід забезпечити підтримку як Modbus RTU через інтерфейс RS-485, так і Modbus TCP/IP через мережеве підключення Ethernet.

Необхідно розробити програмне забезпечення для побудови карт приміщень і локалізації робота. Необхідно реалізувати алгоритми одночасної локалізації та картографування, адаптовані для функціонування в приміщеннях з присутністю людей, з можливістю фільтрації динамічних об'єктів і підтримки актуальності карт при змінах в навколишньому середовищі.

Потрібно розробити алгоритми планування траєкторій і уникнення перешкод з урахуванням соціальних аспектів взаємодії з людьми. Необхідно реалізувати різні режими руху, включаючи переміщення до цільової точки, слідування за людиною і патрулювання заданої території. Слід забезпечити плавність руху і природну поведінку робота в людському середовищі.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РУХОМОЇ ПЛАТФОРМИ

2.1 Розробка загальної структурної схеми

Для вирішення поставлених технічних завдань була розроблена структурна схема (рис 2.1) із дворівневою архітектурою системи управління. Верхній рівень базується на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi, який забезпечує виконання обчислювально інтенсивних операцій, включаючи обробку сенсорних даних, реалізацію навігаційних алгоритмів, планування глобальних маршрутів, функціонування веб-сервера з програмним інтерфейсом для дистанційного керування, а також виконує роль Modbus-клієнта в системі міжкомпонентної взаємодії.

Нижній рівень архітектури реалізований на базі мікроконтролера Pyboard з процесором STM32, що забезпечує функціонування в режимі жорсткого реального часу. Даний рівень відповідає за безпосереднє управління руховими приводами через генерацію широко-імпульсної модуляції, опитування ультразвукових датчиків і інерційного вимірювального блоку, а також за виконання команд, що надходять від верхнього рівня через послідовний інтерфейс UART.

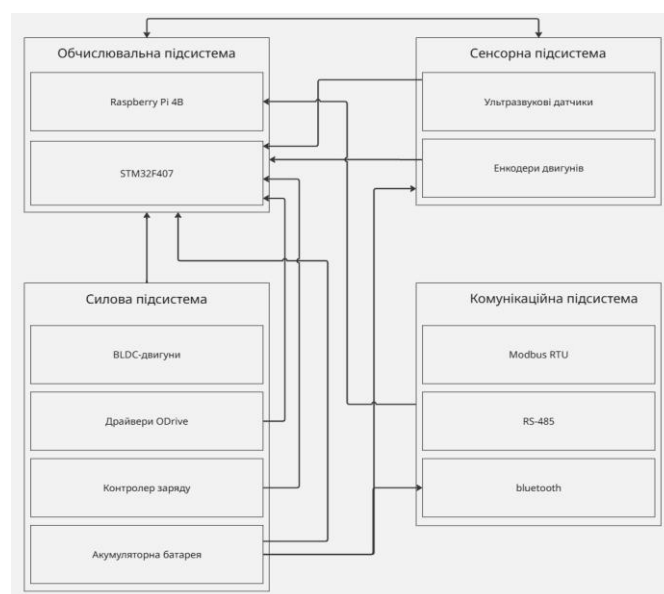


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема рухомої платформи

2.2 Розрахунок колісної рами

Механічна конструкція платформи розроблена з урахуванням вимог до вантажопідйомності 30 кг і необхідності розміщення всіх електронних компонентів системи. Основою конструкції служить прямокутна рама з алюмінієвого профілю, що забезпечує оптимальне співвідношення характеристик міцності і маси конструкції.

Для забезпечення стійкості при максимальному навантаженні була визначена оптимальна ширина колісної бази за формулою (2.1)

$$W = \sqrt{\frac{2hmg}{F_{max}}}, \quad (2.1)$$

де W – ширина колісної бази;

h – висота центру мас;

m – загальна маса системи;

g – прискорення вільного падіння;

F_{max} – максимальна сила тяги.

Враховуючи технічне завдання, приймаємо:

– $m = 30$ кг (максимальне навантаження) + 20 кг (власна маса платформи)
= 50 кг;

– $h = 0,35$ м (приблизна висота центру мас навантаженої платформи);

– $F_{max} = 150$ Н (визначено на основі характеристик обраних двигунів).

Підставляючи ці значення, отримуємо:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,35 \cdot 50 \cdot 9,81}{150}} \approx 0,48.$$

Отже, мінімальна ширина колісної бази повинна становити 0,48 м. З урахуванням запасу стійкості та конструктивних особливостей приймаємо

ширину колісної бази 0,5 м.

Для діаметра коліс враховуємо типові перешкоди в приміщеннях (пороги, кабельні канали) та вимоги до кліренсу платформи. Оптимальним вибором є колеса діаметром 150-200 мм, що забезпечить кліренс приблизно 50-75 мм.

2.3 Проектування механічної конструкції

Механічна конструкція рухомої платформи розроблена з урахуванням вимог до вантажопідйомності 30 кг, компактних габаритів для пересування у приміщеннях, а також забезпечення стабільності та маневреності. Загальний вигляд платформи та її ключові елементи відображені на кресленні (рис. 2.2).

Основні габаритні розміри та пропорції:

- довжина платформи: 600 мм;
- ширина платформи: 500 мм;
- загальна висота: 215 мм.

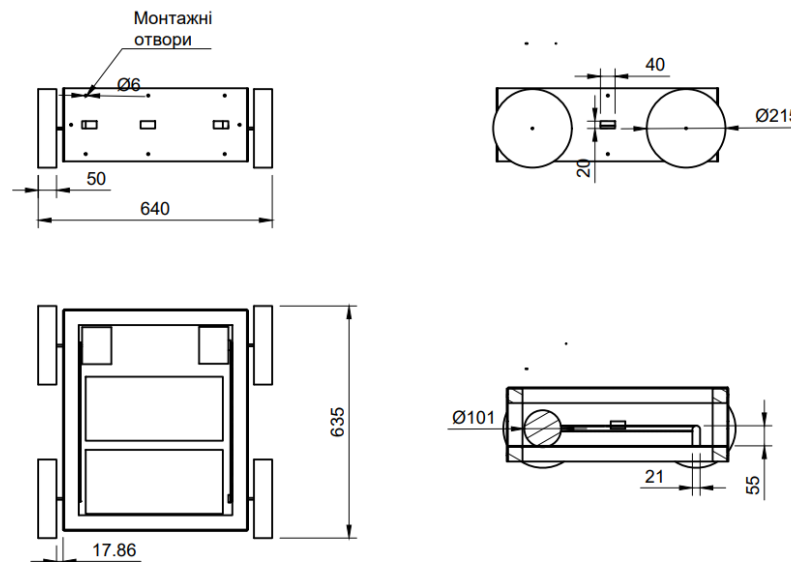


Рисунок 2.2 – Ескіз рухомої платформи

Конструкція рухомої платформи являє собою просторовий каркас, зібраний на зварювальному з'єднанні з алюмінієвого конструкційного

профілю перетином 40x40 мм (рис 2.3), що забезпечує високу міцність каркасу.

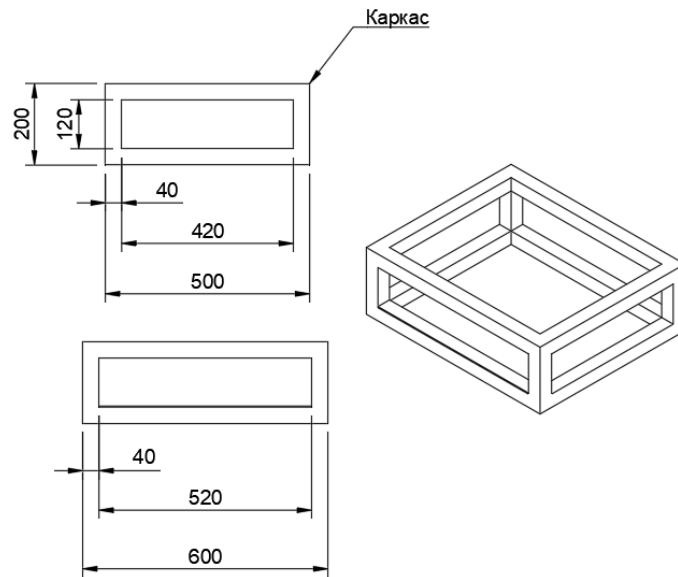


Рисунок 2.3 – креслення каркасу

Основою для монтажу служить дно (рис 2.4), виготовлене з алюмінієвого листа товщиною 3 мм, яке кріпиться до каркаса методом зварювання.

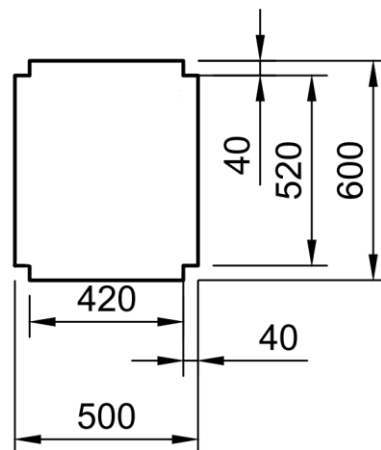


Рисунок 2.4 – дно каркасу

Всередині платформи розміщена ремінна передача (рис 2.5), вали якої встановлені в стандартних підшипникових вузлах, надійно закріплених на алюмінієвому дні для забезпечення точності передачі (рис 2.6).

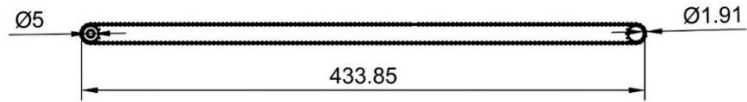


Рисунок 2.5 – ремінна передача

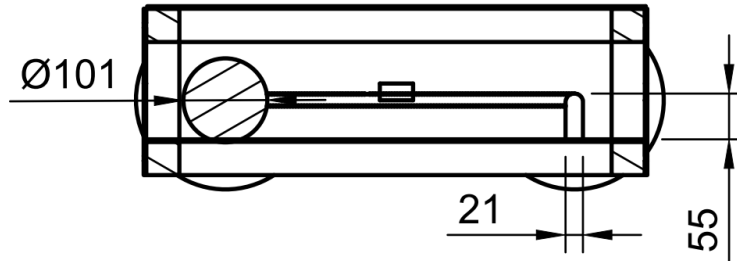


Рисунок 2.6 – мобільна платформа в розрізі

Зовнішнє облицювання корпусу виконане з пластикових панелей фронтальні/задні (рис 2.7), та бічні (рис 2.8), являються ідентичними та кріпляться безпосередньо до профілю.

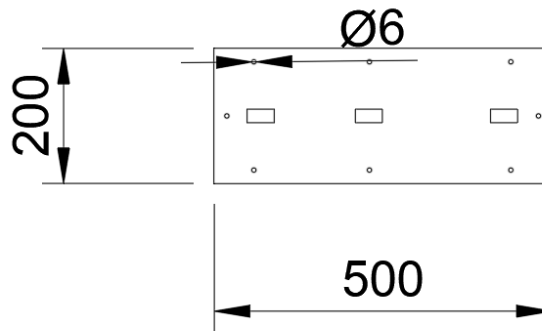


Рисунок 2.7 – фронтальна/задня монтажна панель

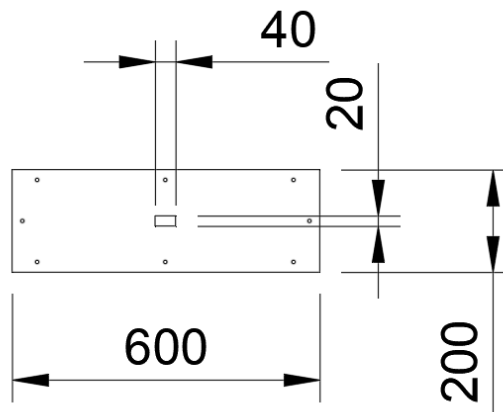


Рисунок 2.8 – бічні монтажні панелі

Для цього використовуються гвинти з напівкруглою голівкою M5x50, що вкручуються у відповідні гайки M5, забезпечуючи надійне та естетичне з'єднання. По периметру кришок розташовані отвори для монтажу навігаційних датчиків.

Платформа має чотириколісну базу з диференціальним приводом, що забезпечує високу маневреність і можливість повороту на місці. На кресленні видно дві пари коліс, попарно заблокованих між собою по лівій і правій стороні платформи. Задні колеса є ведучими, а передні колеса виконують опорно-дублюючу функцію.

Оскільки двигуни розташовані всередині платформи і приводять в рух колеса однієї сторони, реалізований механізм передачі обертання між колесами по одній осі. Це досягається за допомогою шестерень, встановлених на осях кожного колеса, і ременя, що з'єднує ці шестерні. Таким чином, обидва колеса з боків рухаються синхронно, забезпечуючи диференціальний привід, де швидкість і напрямок руху контролюються незалежними двигунами для лівої і правої сторін. Це мінімізує втрати при передачі крутного моменту, спрощує конструкцію, забезпечує хорошу енергоефективність і низьку вартість проєкту.

Всередині платформи передбачено місце для розміщення комплектуючих і акумуляторних батарей (рис. 2.5). Це рішення забезпечує низький центр ваги і захист компонентів.

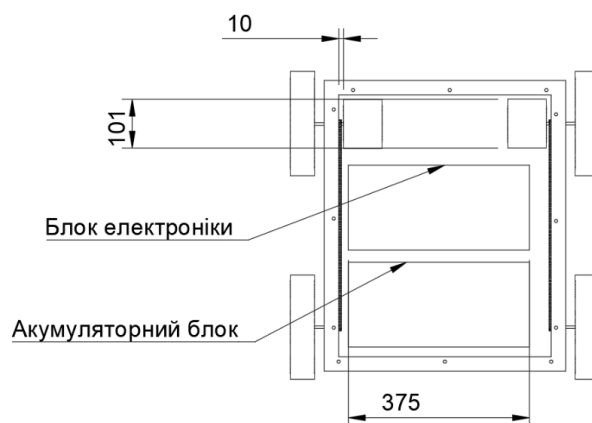


Рисунок 2.5 – Розташування компонентів

2.4 Розробка архітектури системи керування

Система управління є центральним елементом, що забезпечує інтеграцію всіх функціональних підсистем робототехнічного комплексу. Запропонований розподіл завдань між двома контролерами спрямований на оптимізацію використання обчислювальних ресурсів. Raspberry Pi виконує складні алгоритмічні операції, не пов'язані з жорсткими часовими обмеженнями, в той час як мікроконтролер Pyboard/STM32 забезпечує детерміновану і швидку реакцію на події, що є критично важливим для управління рухом.

Істотним елементом архітектури є вирішення проблеми недостатньої кількості портів вводу-виводу на мікроконтролері нижнього рівня для підключення восьми ультразвукових датчиків, що вимагають шістнадцять сигнальних ліній. Дана технічна проблема вирішується шляхом інтеграції розширювача портів I/O Expander MCP23017, який підключається через інтерфейс I2C і надає додаткові шістнадцять ліній загального призначення. Це демонструє практичний інженерний підхід до подолання апаратних обмежень системи.

3 ПРОГРАМНА ТА АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Опис середовища розробки та симуляції

Для реалізації та валідації проекту застосовувалися два основних програмних рішення, що забезпечують комплексний підхід до розробки робототехнічної системи.

Платформа Webots являє собою професійне симуляційне середовище для моделювання робототехнічних систем. Даний інструмент використовувався для створення віртуального прототипу мобільної платформи, дослідження динамічних характеристик руху, а також для розробки і налагодження алгоритмів управління і обходу перешкод в реалістичному тривимірному середовищі. Застосування симуляційного підходу забезпечило можливість верифікації програмної логіки на етапі, що передуює виготовленню фізичного макета.

Програмний пакет Fritzing служив інструментом для проектування електронних схем і компоновочних рішень. Дане рішення застосовувалося для створення деталізованої електричної принципової схеми і діаграми фізичних з'єднань всіх компонентів системи. Використання даного інструменту дозволило візуалізувати підключення компонентів і забезпечити коректність електричних з'єднань.

3.2. Апаратна реалізація

Для візуалізації апаратної реалізації системи та забезпечення коректності електричних з'єднань, було розроблено схему розміщення компонентів. Ця схема, створена за допомогою програми Fritzing, відображає взаємодію ключових елементів рухомої платформи: одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4B, що виступає як контролер верхнього рівня, та мікроконтролера Pyboard з сімейства STM32, який є контролером нижнього рівня. Крім того, на схемі детально показано підключення ультразвукових

датчиків HC-SR04, драйвера двигунів L298N (що використовується як тимчасовий заміник основного драйвера) та розширювача портів MCP23017. Така візуалізація дозволяє краще зрозуміти фізичну інтеграцію та зв'язок апаратних модулів системи (рис. 3.1).

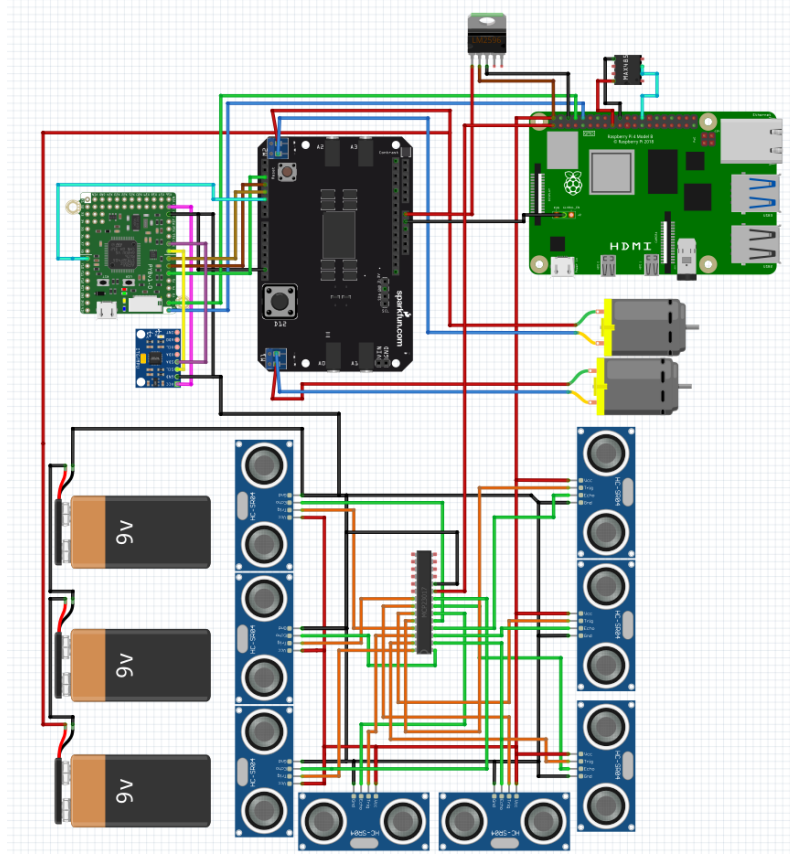


Рисунок 3.1 – Макетна плата з'єднань комплектуючих

В якості контролера верхнього рівня застосовується одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4B, що забезпечує виконання високорівневих обчислювальних завдань. Функції контролера нижнього рівня покладені на плату Pyboard з мікроконтролером сімейства STM32, відповідальну за операції реального часу.

Сенсорна підсистема включає інерційний вимірювальний блок MPU-6050 для визначення орієнтації платформи і вісім ультразвукових датчиків HC-SR04 для виявлення перешкод в навколишньому просторі. Для вирішення проблеми недостатньої кількості портів вводу-виводу інтегрований розширювач MCP23017, що забезпечує додаткові лінії цифрового інтерфейсу (рис. 3.2).

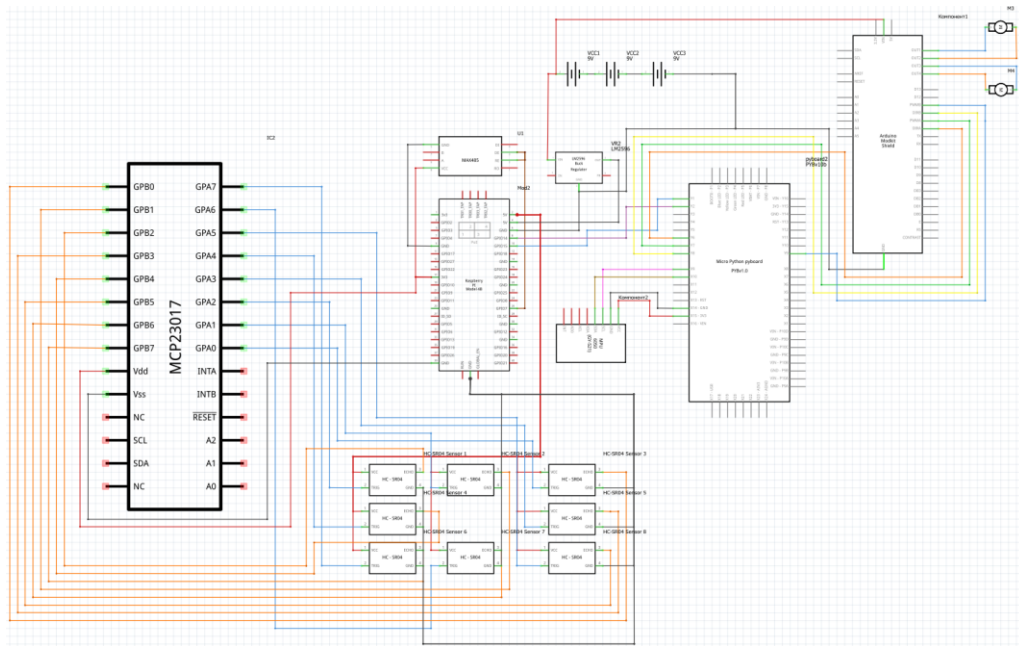


Рисунок 3.2 – Електрична схема рухомої платформи

Приводна система базується на двох безколекторних двигунах постійного струму, керованих через спеціалізований драйвер-контролер. У макетній реалізації застосовується альтернативне рішення на основі мікросхеми L298N в якості тимчасової заміни основного драйвера. Для реалізації протоколу Modbus в системі міжкомпонентної взаємодії використовується інтерфейсна мікросхема MAX485. Інтеграція всіх перерахованих компонентів здійснена відповідно до електричної схеми. Обрані компоненти із їх описом у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Фінальний перелік компонентів

Компонент	Модель	Призначення
Головний контролер	Raspberry Pi 4B	Навігація, A*, API, Modbus Master
Контролер нижнього рівня	Pyboard v1.1	Керування моторами, опитування сенсорів
Розширювач портів	MCP23017	Підключення УЗ-датчиків
IMU	MPU-6050	Орієнтація, одометрія
УЗ-датчики	HC-SR04 (8 шт.)	Локальне уникнення перешкод
Драйвер моторів	L298N Shield (замінник)	Керування потужністю моторів
Перетворювач RS-485	MAX485	Реалізація Modbus RTU
Перетворювач напруги	LM2596	Стабілізація живлення 5V

3.3. Розрахунок та моделювання системи керування

Для забезпечення стабільності та якості керування рухом мобільної платформи були застосовані методи теорії автоматичного керування. У процесі синтезу системи керування була розроблена математична модель руху платформи, що враховує кінематичні та динамічні характеристики системи.

Передавальна функція каналу управління швидкістю представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з виразом (3.1)

$$W_v(s) = \frac{K_v}{T_v \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

де K_v – коефіцієнт підсилення;

T_v – постійна часу.

На основі даної моделі було виконано синтез ПІД-регулятора для контуру управління швидкістю руху. Налаштування коефіцієнтів регулятора здійснювалося із застосуванням інженерного методу Зіглера-Нікольса, що забезпечило отримання розрахункових значень параметрів: пропорційний коефіцієнт $K_p = 7,5$, інтегральний коефіцієнт $K_i = 15,96$ і диференціальний коефіцієнт $K_d = 0,85$.

Моделювання перехідного процесу замкнутої системи з отриманими параметрами продемонструвало прийнятні динамічні характеристики. Час перехідного процесу становить приблизно 0,35 секунди, а перерегулювання не перевищує 18 відсотків, що забезпечує необхідну плавність руху робототехнічної системи

Для забезпечення оптимальних динамічних характеристик системи необхідно здійснити синтез ПІД-регулятора. Застосуємо інженерний метод Зіглера-Нікольса для налаштування параметрів регулятора. Він передбачає поступове збільшення коефіцієнта до моменту, коли система почне коливатися.

За методом Зіглера-Нікольса, спочатку визначаємо критичне підсилення

$K_{кр}$, при якому система знаходиться на межі стійкості, та відповідний період коливань $T_{кр}$.

Для системи, згідно з розрахунками:

$$K_{кр} = 37,5$$

$$T_{кр} = 0,94 \text{ с}$$

Параметри ПД-регулятора за методом Зіглера-Нікольса:

$$K_p = 0.2 * K_{кр} * 37,5 = 7,5$$

$$K_i = \frac{K_p}{0,5 * T_{кр}} = \frac{7,5}{0,5 * 0,94} = 15.96$$

$$K_d = K_p * 0,125 * T_{кр} = 7,5 * 0,125 * 0,94 = 0,85$$

Проведемо перевірку якості перехідного процесу (рис. 3.3) з отриманими параметрами.

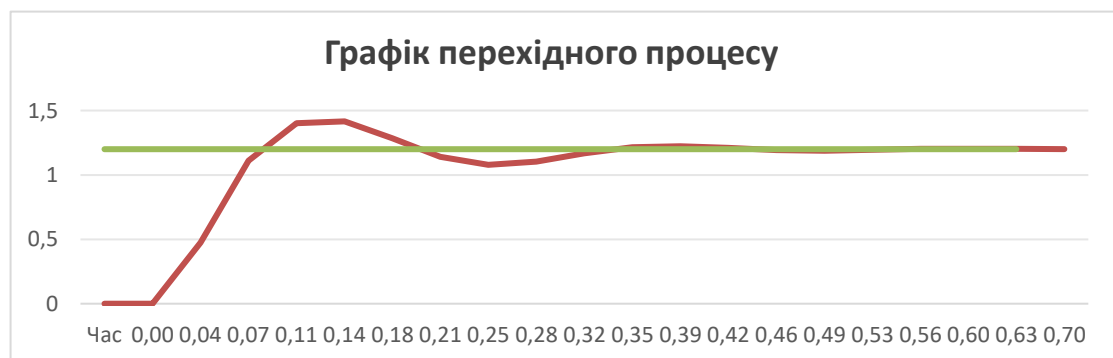


Рисунок 3.3 – Графік перехідного процесу замкненої системи керування швидкістю

Передаточна функція замкненої системи:

$$W_3(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)} \quad (3.2)$$

Часові характеристики перехідного процесу:

- час перехідного процесу: $t_{\Pi} \approx 0,35$ с;
- перерегулювання: $\sigma \approx 18\%$;
- час наростання: $t_{\text{н}} \approx 0,09$ с.

Отримані характеристики задовольняють вимогам до системи керування, забезпечуючи достатню швидкодію та стійкість до збурень.

Аналогічно проведено розрахунки для системи керування кутовою швидкістю платформи, що дозволило отримати параметри ПІД-регулятора для каналу керування поворотом: $K_p = 18,2$ $K_i = 40,1$ $K_d = 2,1$

Розроблена система керування забезпечує стабільність руху платформи при навантаженні до 30 кг та дозволяє реалізувати точне позиціонування в приміщеннях із перешкодами.

3.4 Розробка програмних алгоритмів керування та навігації

Програмне забезпечення, реалізоване на Python, є ядром інтелектуальної поведінки платформи. Воно побудоване на кількох ключових алгоритмах.

3.4.1. Машина станів

Для керування поведінкою робота реалізовано машину скінченних станів (рис. 3.4). Вона визначає логіку дій платформи в залежності від поточних умов. Основні стани:

- дослідження - стан, в якому робот рухається прямо доти, доки не отримає нову ціль або не виявить перешкоду;
- навігація до цілі – стан, який активується при отриманні координат цілі. У цьому стані робот слідує по шляху, розрахованому планувальником.
- уникнення перешкоди – стан, який активується, коли будь-який з передніх УЗ-датчиків фіксує перешкоду ближче порогового значення. Робот зупиняється і виконує маневр об'їзду.

– застрягання – стан, що включається, якщо робот протягом певного часу не фіксує зміни свого положення, що свідчить про застрягання. Виконується агресивний маневр для вивільнення.



Рисунок 3.4 – UML-діаграма станів робота

3.4.2 Алгоритм планування шляху A*

Для знаходження оптимального маршруту від поточної точки до заданої цілі використовується алгоритм A* (рис 3.5). Цей алгоритм обрано через його повноту та оптимальність у пошуку найкоротшого шляху на сіткових картах. Принцип його роботи базується на оціночній функції

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (3.3)$$

де $g(n)$ – вартість шляху від стартової точки до поточної комірки n .

$h(n)$ – евристична оцінка вартості шляху від поточної комірки n до цілі (зазвичай, евклідова відстань).

Алгоритм під час роботи переглядає сусідні до поточної комірки вузли, обираючи той, у якого значення функції $f(n)$ є мінімальним, доки не досягне цільової точки.

18.0 G:5 H:13	16.0 G:4 H:12	16.0 G:5 H:11	16.0 G:6 H:10	16.0 G:7 H:9	16.0 G:8 H:8	16.0 G:9 H:7					
16.0 G:4 H:12	14.0 G:3 H:11	14.0 G:4 H:10	14.0 G:5 H:9	14.0 G:6 H:8	14.0 G:7 H:7	14.0 G:8 H:6					
14.0 G:3 H:11	12.0 G:2 H:10	12.0 G:3 H:9		14.0 G:7 H:7	14.0 G:8 H:6	14.0 G:9 H:5		18.0 G:15 H:3	18.0 G:16 H:2		
12.0 G:2 H:10	10.0 G:1 H:9	10.0 G:2 H:8		14.0 G:8 H:6	14.0 G:9 H:5	14.0 G:10 H:4		16.0 G:14 H:2	16.0 G:15 H:1	16.0 G:16 H:0	
12.0 G:1 H:11		10.0 G:1 H:9		16.0 G:9 H:7	16.0 G:10 H:6	16.0 G:11 H:5		16.0 G:14 H:3	16.0 G:14 H:2	16.0 G:15 H:1	18.0 G:16 H:2
14.0 G:2 H:12	12.0 G:1 H:11	12.0 G:2 H:10		16.0 G:8 H:8	16.0 G:9 H:7	16.0 G:10 H:6	16.0 G:11 H:5	16.0 G:12 H:4	16.0 G:13 H:3	16.0 G:14 H:2	18.0 G:15 H:3
16.0 G:3 H:13	14.0 G:2 H:12	14.0 G:3 H:11		16.0 G:7 H:9	16.0 G:8 H:8	16.0 G:9 H:7	16.0 G:10 H:6	16.0 G:11 H:5	16.0 G:12 H:4	16.0 G:13 H:3	18.0 G:14 H:4
18.0 G:4 H:14	16.0 G:3 H:13	16.0 G:4 H:12	16.0 G:5 H:11	16.0 G:6 H:10	16.0 G:7 H:9	16.0 G:8 H:8	16.0 G:9 H:7	16.0 G:10 H:6	16.0 G:11 H:5	16.0 G:12 H:4	18.0 G:13 H:5

Рисунок 3.5 – Ілюстрація роботи алгоритму A* на сітці

На зазначеному рисунку зазначено алгоритм пошуку маршруту A*. На якому ми бачимо блоки:

- комірка в списку на перевірку (■);
- вже перевірені комірки (■);
- початкова точка(■);
- перешкода (■);
- найкращий маршрут (■);
- кінцева точка(■).

3.4.3. Алгоритм уникнення перешкод

Реактивне уникнення перешкод базується на даних з 8 УЗ-датчиків. Коли передній датчик фіксує перешкоду, робот зупиняється і аналізує показники з бічних датчиків, щоб визначити, в якому напрямку більше вільного простору. Після цього виконується поворот у вибраному напрямку з подальшим рухом уперед, щоб обійти перешкоду. Цей підхід забезпечує швидке реагування на динамічні об'єкти.

3.5 Реалізація інтерфейсів взаємодії

Для забезпечення узгодженої роботи всіх компонентів рухомої платформи та можливості її інтеграції у більші системи було реалізовано кілька рівнів комунікаційних інтерфейсів. Вони забезпечують як внутрішньосистемний обмін даними між контролерами, так і зовнішнє керування та моніторинг.

3.5.1 Внутрішньосистемна комунікація (UART)

Основою взаємодії між верхнім (Raspberry Pi) та нижнім (Pyboard) рівнями керування є асинхронний послідовний інтерфейс UART. Цей вибір обґрунтований простотою реалізації та достатньою швидкістю для передачі команд.

Принцип роботи: Raspberry Pi, виконуючи високорівневі завдання (наприклад, розрахунок шляху за алгоритмом A*), формує узагальнені команди (наприклад, "рухатися до точки X,Y" або "почати маневр об'їзду"). Ці команди у вигляді текстових рядків або бінарних пакетів надсилаються по UART на Pyboard.

Завдання Pyboard: мікроконтролер нижнього рівня отримує ці команди, парсить їх і трансформує у низькорівневі керуючі сигнали (PWM та DIR) для драйвера моторів, забезпечуючи виконання в режимі реального часу.

Такий розподіл дозволяє розвантажити головний процесор від завдань жорсткого реального часу і підвищити надійність системи керування рухом.

3.5.2 API для віддаленого керування (HTTP)

Для забезпечення гнучкості керування та можливості інтеграції з сучасними системами моніторингу на Raspberry Pi було реалізовано легковагий веб-сервер з REST API. Сервер написано на мові Python з використанням стандартної бібліотеки `http.server`. Він створює кілька кінцевих точок (endpoints) для взаємодії:

- /api/set_goal: Приймає JSON-об'єкт з координатами нової цілі для роботи.
- /api/set_mode: Дозволяє віддалено перемикати режими роботи (наприклад, 'exploring', 'navigating', 'stop').
- /api/status: Віддає поточний стан роботи, включаючи його координати, швидкість та активний режим у форматі JSON.
- /api/sensors та GET /api/obstacles: Надають детальну телеметрію з датчиків та згенеровану карту перешкод.

Цей API є основою для роботи командного центру оператора.

3.5.3 Промисловий інтерфейс (Modbus RTU)

З метою забезпечення сумісності з промисловим обладнанням та іншими вузлами робототехнічної системи було передбачено реалізацію протоколу Modbus RTU. Апаратною базою для цього слугує мікросхема-перетворювач MAX485, підключена до другого UART-порту Raspberry Pi.

Було розроблено карту реєстрів Modbus (табл 3.2), що дозволяє керувати основними функціями платформи та отримувати телеметрію.

Таблиця 3.2 – Карта реєстрів Modbus для керування платформою

Адреса	Тип	Призначення	Доступ
0	Coil	Аварійна зупинка	Read/Write
1	Coil	Дозвіл руху	Read/Write
1000	Holding Register	Цільова лінійна швидкість	Read/Write
1002	Holding Register	Цільова кутова швидкість	Read/Write
2000	Input Register	Поточна позиція X	Read-Only
2002	Input Register	Поточна позиція Y	Read-Only
2004	Input Register	Заряд батареї (%)	Read-Only

Така реалізація дозволяє легко інтегрувати платформу в існуючі SCADA-системи або керувати нею за допомогою стандартних промислових контролерів.

3.5.4 Командний центр оператора (Веб-додаток)

Для візуалізації телеметрії, моніторингу стану робота та відправки команд керування було розроблено веб-додаток, що виконує функції командного центру. Інтерфейс, реалізований за допомогою HTML, CSS та JavaScript, звертається до API, що працює на Raspberry Pi, і в реальному часі відображає ключові параметри: поточне положення робота, стан системи, дані з усіх 8 ультразвукових датчиків та карту перешкод. На рисунку 3.6 представлено головну панель управління веб-додатку.

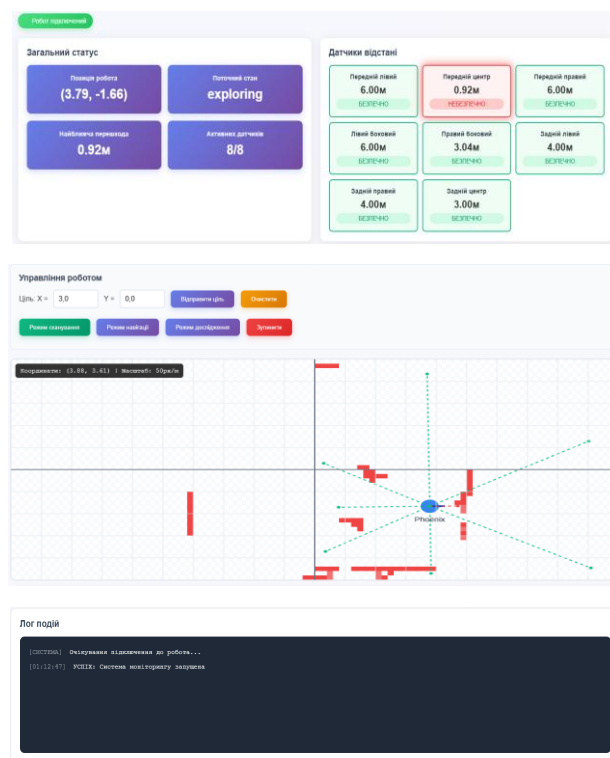


Рисунок 3.6 – Головна панель веб-додатку для моніторингу та керування

Як видно з рисунка, інтерфейс складається з кількох логічних блоків:

– панель загального стану (рис. 3.7): відображає координати робота, його поточний стан (наприклад, “exploring”) та дані про найближчу перешкоду;

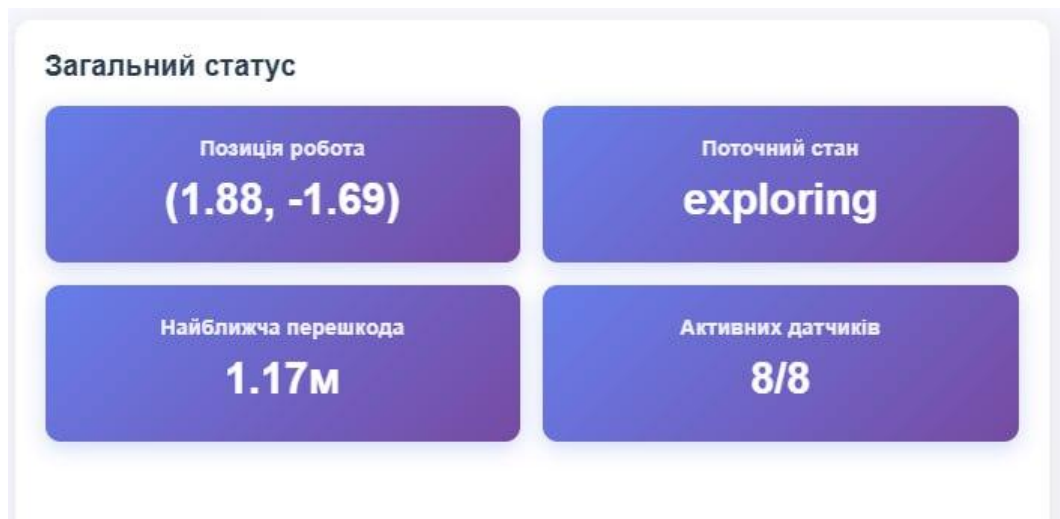


Рисунок 3.7 – Загальний стан системи

– панель датчиків (рис. 3.8): візуалізує дані з кожного з восьми УЗ-датчиків, підсвічуючи небезпечні зони;

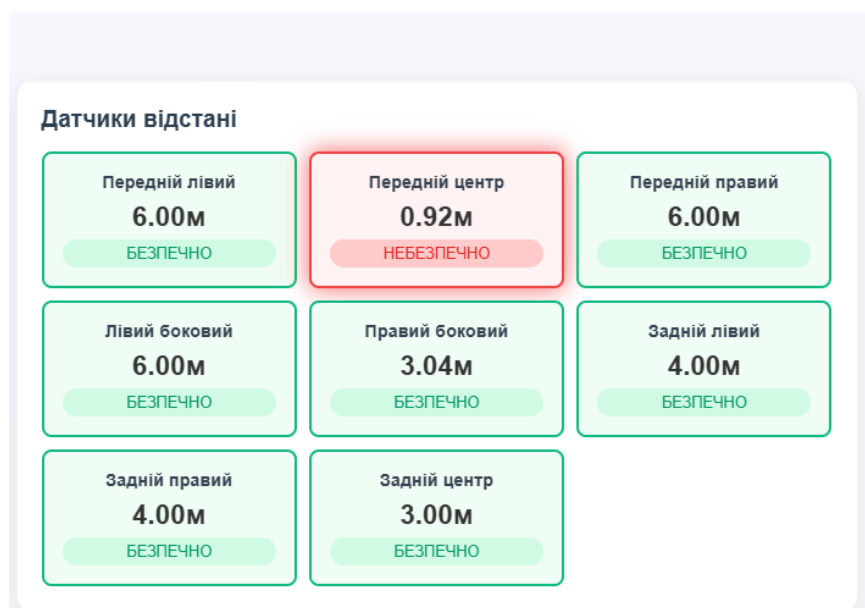


Рисунок 3.8 – Панель датчиків

– блок управління (рис. 3.9): дозволяє оператору задавати координати цілі та перемикати режими роботи. Та інтерактивна карта місцевості, яка показує положення робота, виявлені перешкоди та траєкторію руху в реальному часі (рис. 3.10);

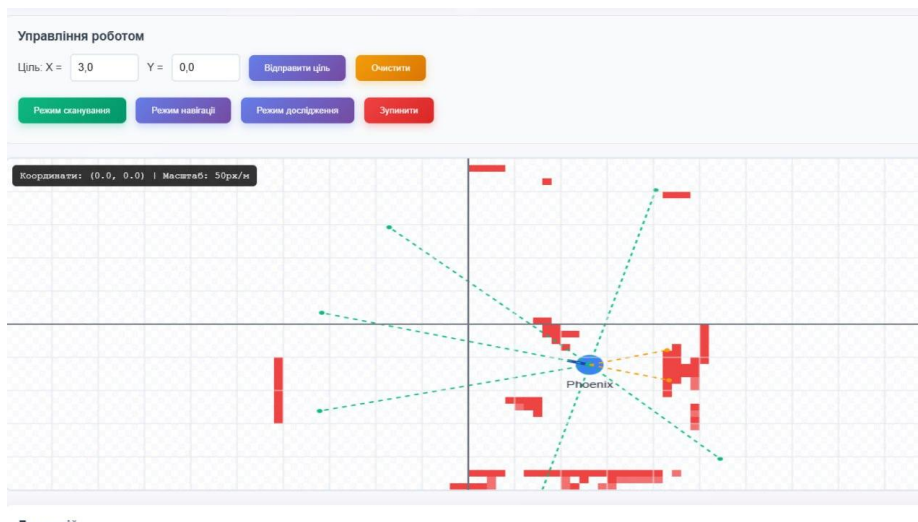


Рисунок 3.9 – Карта місцевості та команди керування роботом

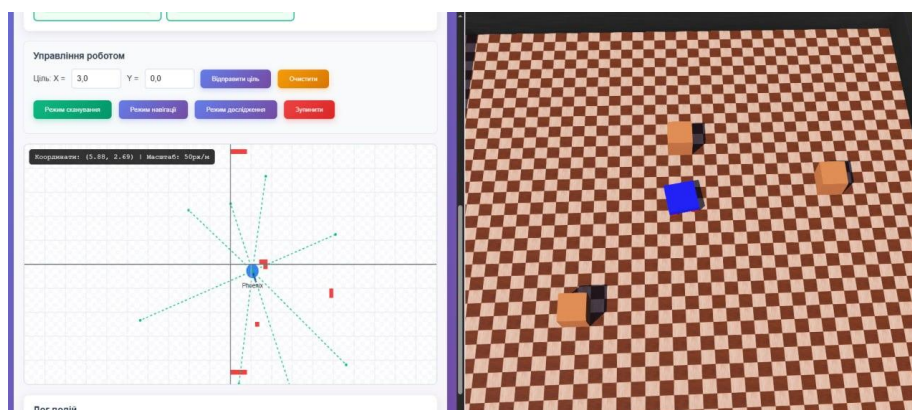


Рисунок 3.10 – Режим симуляції в реальному часі

– лог подій (рис. 3.11): останній блок надає можливість перевіряти логи робота в режимі реального часу для деталізації стану робота.



Рисунок 3.11 – Логи подій

Такий командний центр є невід'ємною частиною системи, що забезпечує зручну та ефективну взаємодію людини-оператора з робототехнічною платформою.

3.6. Охорона праці

Під час виконання проекту з розробки рухомої платформи для робота-промоутера було забезпечено дотримання вимог охорони праці, зокрема щодо створення безпечного та комфортного робочого середовища. Оцінка умов у лабораторному приміщенні проводилася за двома ключовими напрямками: параметри мікроклімату та рівень штучної освітленості.

Для підтримки оптимального самопочуття та працездатності персоналу, тепловий режим у приміщенні регулювався в межах 22–24 °С в холодну пору року та 23–24 °С в теплу. Відносна вологість повітря підтримувалася на рівні 40–60%, а швидкість руху повітря не перевищувала 0,1 м/с. Зазначені параметри відповідають нормативам, що викладені в ДСТУ EN ISO 7730:2019 «Ергономіка теплового середовища» [10] та ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [11].

Оцінка достатності штучного освітлення проводилася на основі методології, регламентованої в ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [12] та ДСТУ EN 12464-1:2016 «Світло і освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1 [14]. Робочі місця в приміщеннях». Для лабораторного приміщення площею 20 м², оснащеного двома світлодіодними світильниками, було виконано розрахунок очікуваної освітленості за формулою (3.1), де кожен світильник генерує світловий потік 3500 лм.

$$E = \frac{\Phi_{\text{заг}} * N * UF}{S} \quad (3.1)$$

де E – середня освітленість

$\Phi_{\text{заг}}$ – світловий потік однієї лампи

N – кількість ламп

UF – коефіцієнт використання світлового потоку

S – Площа приміщення

Результат розрахунку показав:

$$E = \frac{3500 * 2 * 0.5}{20} = 175 \text{ Лк.}$$

Отримане значення в 175 Лк відповідає нормам для виконання точних робіт з налагодження електронних пристроїв. Таким чином, створені в лабораторії умови, як з погляду мікроклімату, так і освітлення, повністю відповідали санітарно-гігієнічним вимогам, що дозволило безпечно та продуктивно виконувати всі етапи роботи над проєктом.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи був розроблений і представлений проєкт рухомої платформи для робота-промоутера, який повністю відповідає поставленим цілям і завданням. Було вирішено ключове завдання щодо створення технічно і теоретично обґрунтованої конструкції, здатної нести корисне навантаження до 30 кг і інтегруватися в більш складні робототехнічні системи.

На основі аналізу існуючих рішень була обґрунтована і спроектована дворівнева архітектура управління на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi і мікроконтролера Pyboard, що дозволило ефективно розподілити обчислювальні завдання (черга) команд від центру керування до робота. Була розроблена механічна конструкція з диференціальним приводом, а інженерні розрахунки підтвердили її стійкість при максимальному навантаженні. Важливим етапом стало проєктування повної електричної принципової схеми, в рамках якого було знайдено і реалізовано рішення проблеми нестачі портів мікроконтролера шляхом інтеграції I/O-розширювача MCP23017.

Теоретичні основи управління системою були підкріплені розрахунками з теорії автоматичного управління. Була розроблено креслення конструкцію рухомої платформи, програмну реалізація, виконанк на мові Python і протестована в середовищі симуляції Webots, включає в себе складну логіку поведінки на основі кінцевого автомата, алгоритм планування шляху A* і надійні механізми ухилення від перешкод. Для забезпечення інтеграції та управління були реалізовані комунікаційні інтерфейси, включаючи внутрішній протокол UART, зовнішній HTTP API для командного центру і спроектований промисловий інтерфейс Modbus RTU.

Таким чином, представлена робота демонструє цикл розробки: від системного аналізу і постановки завдання до створення готової до фізичної реалізації апаратно-програмної архітектури, що підтверджує досягнення мети кваліфікаційної роботи.

Окрім вирішення поставлених технічних завдань, отримані в ході виконання кваліфікаційної роботи результати роблять внесок у реалізацію національної стратегічної програми. Проект узгоджується із Ціллю сталого розвитку 9: «Промисловість, інновації та інфраструктура», затвердженою Указом Президента України №722/2019. Зокрема, розробка автономної робототехнічної платформи з промисловими інтерфейсами зв'язку та передовими навігаційними алгоритмами підтримує виконання Завдання 9.4, що спрямоване на прискорений розвиток високо- та середньовисокотехнологічних секторів через застосування ІКТ у промисловості та транспорті. Весь процес дослідження та розробки, проведений у стінах університету, є прикладом реалізації принципів Завдання 9.5, оскільки він зміцнює зв'язок між науковими дослідженнями та створенням інноваційних продуктів, тим самим сприяючи розвитку національної інноваційної екосистеми.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.
2. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. Про нас. Офіційний сайт кафедри КІТАМ ХНУРЕ . Режим доступу: <https://tapr.nure.ua/golovna/pro-nas>. Дата доступу: 7.05.2023.
3. Зарубін, І. С. Ефективність використання роботизованих систем у виробництві / І. С. Зарубін та ін. // Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2024: матеріали І-ої Всеукраїнської конференції, Харків, 16-17 травня 2024 (СІТАР-2024). – 2024. – С. 150-153.
4. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 27.11.2020 р. No 400. Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju-osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf
5. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf.
6. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – 151 с. ISBN 978-617-8059-94-1, DOI: 10.30837/978-617-8059-94-1
7. Ємець С. Різновиди та особливості вибору тягового електродвигуна / С.

Ємець, Л. Іванов // Виробництво & Мехатронні Системи 2022 : тези доп. VI-ої Міжнар. конф., 21-22 жовтня 2022 р. – Харків, 2022. – С. 54–56.

8. Поддубняк І. А. Аналіз сучасних мобільних платформ наземних пошукових роботів / І. А. Поддубняк // Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2022) : collection of Students' Scientific Paper. – [Electronic edition]. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics, 2022. – Part 2. – P. 27-32.

9. Паньков А. С. Розроблення програмного модуля комп'ютеризованої системи збору обробки та збереження поточних даних для візуалізації : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / А. С. Паньков ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2025. – 94 с.

10. ДСТУ EN ISO 7730:2019 «Ергономіка теплового середовища» – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28002 (Дата доступу: 20.06.2025)

11. ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=14283 (Дата доступу: 28.05.2025)

12. ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885 (Дата доступу: 20.06.2025)

13. ДСТУ EN 12464-1:2016 «Світло і освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Робочі місця в приміщеннях» – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71838 (Дата доступу: 20.06.2025)

14. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету

[<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с