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

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«___»_____20__ 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 керування роботом кур’єром»

Виконав (-ла):
студент (-ка) IV курсу, групи ПМ-01
Ванда Арсен Андрійович _____

Керівник:
к.т.н., доцент
Писарець Анна Валеріївна _____

Рецензент:
доцент, к.т.н., доцент
Мокійчук Валентин Михайлович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	А4	ДПБ.ПМ-01.04.1760.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	66	
3	А1	ДПБ.ПМ-01.04.1760.01.000.СК	Складальний кресленик	1	
4	А2	ДПБ.ПМ-01.04.1760.01.001.	Корпус	1	
5	А3	ДПБ.ПМ-01.04.1760.01.002.	Кришка	1	
6	А3	ДПБ.ПМ-01.04.1760.01.003.	Колесо	1	
7	А2	ДПБ.ПМ-01.04.1760.02.000.СхС	Схема структурна	1	
8	А2	ДПБ.ПМ-01.04.1760.03.000.СхФ	Схема функціональна	1	
9	А1	ДПБ.ПМ-01.04.1760.04.000.	Результати моделювання	1	

				ДПБ.ПМ-01.04.1760.01.000.ПЗ		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-01	
Н/контр.						
Зав.каф.						

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система керування роботом кур’єром»

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Ванді Арсену Андрійовичу

1. Тема проєкту «Система керування роботом-кур’єром», керівник проєкту Писарець Анна Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом проєкту 30 травня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту: маса вантажу 5 кг; габаритні розміри посилки 30 см х 20 см х 15 см; максимальна маса робота з вантажем 50 кг; місткість бака для зберігання вантажу 20 л; енергоємність батареї 500 Вт·год; середня потужність, яку споживає робот, 100 Вт; дальність доставки на одній зарядці 20 км.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд існуючих систем керування роботами-кур'єрами. Розробка схеми системи керування роботом-кур'єром. Математична модель системи керування роботом-кур'єром. Моделювання роботи системи керування роботом-кур'єром. Перелік використаних джерел. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 5.1. Система керування роботом-кур'єром. Структурна схема. 1 арк. ф. А2. 5.2. Система керування роботом-кур'єром. Функціональна схема. 1 арк. ф. А2. 5.3. Система керування роботом-кур'єром. Складальне креслення. 1 арк. ф. А1. 5.4. Робочі креслення деталей. 1 арк. ф. А1. 5.5. Система керування роботом-кур'єром. Моделювання процесу навантаження робота. 1 арк. ф. А1. 5.6. Графічні матеріали. 1 арк. ф. А1.

6. Дата видачі завдання 15 лютого 2024_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Ознайомлення з завданням дипломного проєкту та постановка задач	До 15.04.2024	
2	Огляд літературних джерел та аналіз існуючих аналогів	До 22.04.2024	
3	Розробка схеми системи та опис її елементів	До 04.05.2024	
4	Розробка математичної моделі системи	До 15.05.2024	
5	Моделювання роботи системи	До 24.05.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	До 29.05.2024	
7	Оформлення графічних матеріалів	До 03.05.2024	

Студент Арсен ВАНДА

Керівник Анна ПИСАРЕЦЬ

АНОТАЦІЯ

Ця бакалаврська робота присвячена розробці системи керування роботом-кур'єром, що є актуальною проблемою в сучасному світі автоматизації та розвитку технологій. У роботі проводиться аналіз існуючих систем керування роботами-кур'єрами, включаючи огляд сучасних рішень для автономної навігації, порівняння систем від різних виробників та визначення основних вимог до таких систем.

Далі розглядається розробка схеми системи керування, включаючи структурну схему, опис основних елементів та функціональну схему взаємодії цих елементів. Після цього в роботі будуються математичні моделі системи, такі як кінематична модель робота, динамічна модель, модель системи навігації та локалізації, а також модель уникнення перешкод.

Останній розділ роботи присвячений моделюванню роботи системи керування, включаючи розробку симуляційного середовища, тестування алгоритмів навігації та локалізації, моделювання руху робота в різних умовах та аналіз результатів моделювання з подальшою оптимізацією параметрів системи.

У висновках наводяться основні висновки роботи та рекомендації для подальших досліджень у цій області. Використані джерела та додатки також надаються для підтримки отриманих результатів та досліджень.

Ця робота має значення для розвитку автономних систем доставки та вирішення проблем ефективності та безпеки у сфері логістики та транспорту.

Ключові слова: Робот-кур'єр, Система керування.

ABSTACT

This bachelor's thesis is dedicated to the development of a robotic courier service system, which is an urgent problem in the current world of automation and the development of technology. The robot is conducting an analysis of existing systems for navigation by robotic curators, including a review of current solutions for autonomous navigation, the upgrading of systems from various robots and the identification of the main benefits of such systems.

Below is a breakdown of the heating system diagram, including a structural diagram, a description of the main elements and a functional diagram of the interaction of these elements. After that, the robot will contain mathematical models of the system, such as a kinematic model of the robot, a dynamic model, a model of the navigation and localization system, as well as a unique transcoding model.

The remaining section of the robot is devoted to the modeling of the robot system of the caravan system, including the development of the simulation core, testing of navigation and localization algorithms, modeling of the robot’s movements in different minds and analysis of the results of further modeling optimizing system parameters.

The conclusions provide the main conclusions of the work and recommendations for further research in this area. References and appendices are also provided to support the findings and research.

This work is important for the development of autonomous delivery systems and for solving efficiency and safety problems in the field of logistics and transport.

Keywords: Robot courier, Control system.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DoS – Denial of Service (Відмова в обслуговуванні)

DDoS – Distributed Denial of Service (Розподілена відмова в обслуговуванні)

FPR – False Positive Rate (Рівень хибних спрацьовувань)

GPS – Global Positioning System (Глобальна система позиціонування)

IDS – Intrusion Detection System (Система виявлення вторгнень)

IMU – Inertial Measurement Unit (Інерційний вимірювальний блок)

ITG – Injected Traffic Generator (Генератор вхідного трафіку)

LiDAR – Light Detection and Ranging (Лазерний далекомір)

ROS – Robot Operating System (Операційна система для роботів)

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping (Одночасна локалізація та картографування)

SQL – Structured Query Language (Структурована мова запитів)

TPR – True Positive Rate (Рівень успішного виявлення)

VFH – Vector Field Histogram (Гістограма векторного поля)

DWA – Dynamic Window Approach (Метод динамічного вікна)

RRT – Rapidly-exploring Random Trees (Швидко досліджуючі випадкові дерева)

ЗМІСТ

Вступ 11
1. Огляд існуючих систем керування роботами-кур'єрами 13
1.1. Технології та алгоритми для автономної навігації роботів 13
1.2. Роботи-кур'єри Starship Technologies 14
1.3. Amazon Scout 16
1.4. Робот Nuro 17
1.5. Роботи Kiwi 19
1.6. Порівняльний аналіз існуючих рішень 21
1.7. Вимоги до система керування роботом-кур'єром 24
Висновки до розділу 1 26
2. Розробка схеми системи керування роботом-кур'єром 27
2.1. Блок керування рухом 29
2.2. Блок навігації та локалізації 30
2.3. Блок сенсорів 32
2.4. Блок зв'язку та передачі даних 33
Висновки до розділу 2 40
3. Математична модель системи керування роботом-кур'єром 41
3.1. Кінематична модель робота-кур'єра 41
3.2. Динамічна модель робота-кур'єра 43
3.3. Модель системи навігації та локалізації робота-кур'єра 44
3.4. Модель системи уникнення перешкод робота-кур'єра 46
3.5. Модель взаємозв'язку вхідних та вихідних сигналів 48
Висновки до розділу 3 52

4. Моделювання роботи системи керування роботом-кур'єром 53
4.1. Вихідні дані та вимоги до робота-кур'єра 53
4.2. Моделювання процесу навантаження робота 55
4.3. Вибір електродвигунів 62
4.4. Вибір акумуляторів 64
Висновки до розділу 4 66
Висновки 67
Список використаних джерел 68
Додатки 11
Додаток А 11

ВСТУП

Сучасний світ переживає бурхливий розвиток технологій, які змінюють наше повсякденне життя та спосіб ведення бізнесу. Однією з таких технологій є роботи-кур'єри, які здатні автономно доставляти товари та послуги, забезпечуючи швидкість, ефективність та безпеку доставки. Використання роботів-кур'єрів стає все більш актуальним у контексті зростаючої потреби в автоматизації логістичних процесів, зменшення витрат та підвищення якості обслуговування. Останніми роками спостерігається значне збільшення обсягу онлайн-замовлень, що призводить до необхідності створення нових методів доставки, здатних відповідати високим вимогам сучасного споживача. Автономні роботи-кур'єри є одним із перспективних рішень цієї проблеми, оскільки вони можуть працювати цілодобово, не потребують відпочинку та здатні забезпечити швидке і безпечне переміщення товарів у складних міських умовах.

Система керування роботом-кур'єром є складним і багатогранним завданням, яке включає в себе автономну навігацію, локалізацію, уникнення перешкод, ефективне керування енергетичними ресурсами та забезпечення зв'язку в режимі реального часу. Для успішної реалізації таких систем необхідно поєднання знань у галузі робототехніки, комп'ютерного зору, штучного інтелекту та телекомунікацій. Автономна навігація є однією з ключових задач, оскільки робот повинен бути здатним орієнтуватися у складному та динамічному середовищі, що вимагає використання передових алгоритмів для побудови карт та планування маршрутів. Локалізація дозволяє роботу точно визначати своє місцезнаходження, використовуючи дані з різних сенсорів та первинних перетворювачів, що забезпечує точність руху та зменшує ймовірність зіткнень з перешкодами.

Метою даної роботи є розробка системи керування роботом-кур'єром, яка забезпечить автономну доставку вантажів у міському середовищі з високим рівнем безпеки та ефективності. Для досягнення цієї мети проведено детальний

аналіз існуючих рішень, розроблено структурну та функціональну схеми системи, створено математичні моделі для опису руху та поведінки робота, а також виконано моделювання роботи системи за різних умов. Аналіз існуючих рішень включає огляд сучасних технологій автономної навігації, порівняння систем керування різних виробників та визначення основних вимог до системи керування роботом-кур'єром.

Результати цієї роботи сприятимуть подальшому розвитку технологій автономної доставки, зокрема, впровадженню роботів-кур'єрів у реальні логістичні процеси. Це, в свою чергу, відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та якості обслуговування клієнтів у різних сферах економіки. Крім того, використання роботів-кур'єрів може сприяти зменшенню транспортних витрат та зниженню викидів парникових газів, що є важливим фактором у контексті глобальних екологічних викликів. Успішна реалізація системи керування роботом-кур'єром вимагає інтеграції різних технологій та підходів, що робить цю роботу актуальною та важливою для подальших досліджень та розробок у галузі робототехніки та автоматизації логістичних процесів.

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ-КУР'ЄРАМИ

Автономна навігація є ключовим аспектом функціонування роботів-кур'єрів, оскільки вона дозволяє їм самостійно переміщуватися у складних середовищах, уникати перешкод та досягати цілей доставки. Сучасні рішення для автономної навігації базуються на різних технологіях та алгоритмах, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

1.1. Технології та алгоритми для автономної навігації роботів

Технології та алгоритми для автономної навігації роботів охоплюють Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), навігацію за маршрутом, поведінкою, з використанням машинного навчання тощо [1]:

— *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):* Дозволяє роботу одночасно будувати карту середовища та визначати своє положення на ній. SLAM використовує різні типи сенсорів, такі як LiDAR, камери, ультразвукові сенсори, для збору інформації про навколишній світ. Алгоритми SLAM обробляють ці дані, створюючи точну карту та оцінюючи положення робота в режимі реального часу.

— *Навігація за маршрутом:* Передбачає попереднє визначення маршруту, яким має рухатися робот. Робот використовує GPS або інші системи позиціонування для визначення свого місця розташування та слідкування за заданим маршрутом. Цей метод є простим у реалізації, але може бути неефективним у динамічних середовищах, де з'являються нові перешкоди.

— *Навігація на основі поведінки:* Базується на створенні набору правил та поведінкових реакцій, які дозволяють роботу реагувати на різні ситуації під час руху. Наприклад, робот може мати правила для уникнення перешкод, пошуку шляху, зупинки перед перехрестями тощо. Цей

метод є гнучким та адаптивним, але може бути складним у налаштуванні та оптимізації.

— *Навігація з використанням машинного навчання:* Використовує алгоритми машинного навчання для аналізу даних з сенсорів та прийняття рішень щодо руху робота. Наприклад, нейронні мережі можуть бути навчені розпізнавати різні типи перешкод та визначати оптимальні шляхи обходу. Цей метод є перспективним, але вимагає великої кількості даних для навчання та може бути ресурсоємним [8].

Розглянемо приклади існуючих роботів-кур’єрів.

1.2. Роботи-кур'єри Starship Technologies

Одним із лідерів у розробці та впровадженні роботів-кур'єрів є Starship Technologies (Рис 1.1.). Їхні роботи використовують передові технології автономної навігації, щоб ефективно доставляти товари у міських умовах.

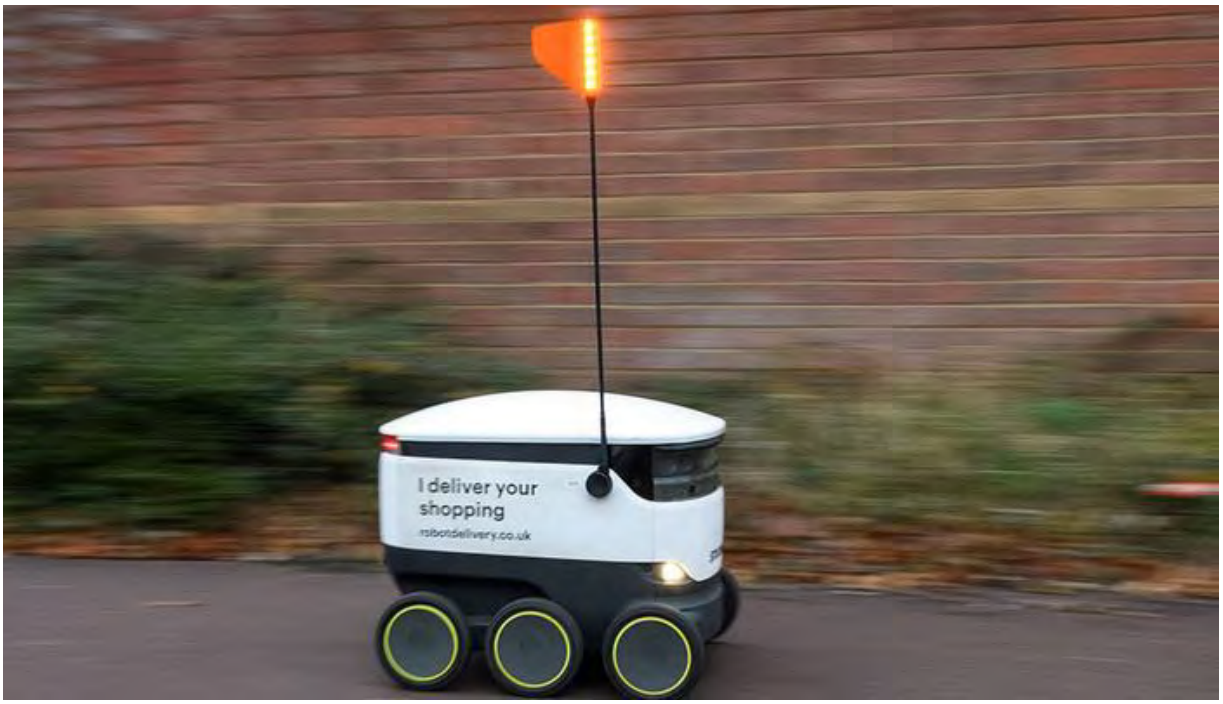

Рис.1.1 – Робот Starship [2]

Основними особливостями системи навігації Starship Technologies є використання:

— SLAM для побудови карти середовища та визначення свого положення дозволяє роботам адаптуватися до змін у навколишньому середовищі та уникати непередбачених перешкод;
— камер високої роздільної здатності для розпізнавання об'єктів, таких як пішоходи, велосипедисти, автомобілі, та прийняття рішення щодо безпечного маневрування;
— ультразвукових сенсорів для виявлення перешкод на близькій відстані та уникнення зіткнень.
— GPS: Використовується для визначення загального місцезнаходження робота та планування маршруту.
— алгоритмів машинного навчання для аналізу даних та допомоги роботам приймати оптимальні рішення щодо руху та поведінки.

Переваги системи Starship Technologies**:**

— Висока точність навігації та надійність доставки;
— Безпека як для самого робота, так і для оточуючих, створює оснащеність численними системами безпеки, включаючи камери, ультразвукові сенсори та аварійне гальмування;
— Використання SLAM та машинного навчання сприяє адаптації робота до різних умов середовища та вирішенню нестандартних ситуацій;
— Роботи Starship є електричними, що робить їх більш екологічними порівняно з традиційними кур'єрськими службами, які використовують автомобілі.

Роботи Starship Technologies вже активно використовуються для доставки їжі та невеликих посилок у багатьох містах світу. Вони успішно працюють на території університетських кампусів, у житлових районах та бізнес-центрах.

Starship Technologies є яскравим прикладом успішного застосування сучасних технологій автономної навігації для створення ефективних та надійних роботів-кур'єрів. Їхній досвід може бути корисним для подальшого розвитку та вдосконалення систем керування роботами-кур'єрами.

1.3. Amazon Scout

Робот Amazon Scout представляє собою інноваційну розробку компанії Amazon у сфері автономних роботів-кур'єрів (Рис 1.2). Ці компактні шестиколісні роботи призначені для доставки невеликих посилок безпосередньо до дверей клієнтів.

Рис.1.2 – Робот Amazon Scout [3]

Ключові особливості системи навігації Amazon Scout окреслюються наступним [4]:

— Оснащеність різноманітними датчиками, включаючи камери, ультразвукові сенсори та LiDAR (Light Detection and Ranging), які забезпечують всебічне сприйняття навколишнього середовища.

— застосування передових алгоритмів машинного навчання, що дозволяє роботу аналізувати дані, розпізнавати перешкоди (пішоходи, тварини, інші транспортні засоби), обирати безпечні маршрути та приймати рішення в режимі реального часу.

— Система глобального позиціонування (GPS) використовується для визначення місцезнаходження робота та планування оптимального маршруту доставки.

— робот постійно підтримує зв'язок з хмарою, що дозволяє операторам відстежувати його рух, контролювати стан та надавати підтримку у разі потреби.

Переваги системи Amazon Scout:

— Ефективність. Роботи Scout можуть працювати цілодобово, доставляючи посилки швидко та ефективно, знижуючи навантаження на традиційні служби доставки.

— Безпека. Система навігації Scout розроблена з урахуванням найвищих стандартів безпеки. Роботи рухаються з пішохідною швидкістю, а численні датчики допомагають їм уникати зіткнень.

— Зручність для клієнтів. Доставка посилок безпосередньо до дверей клієнта, що забезпечує зручність та гнучкість у отриманні замовлень.

— Екологічність. Будучи електричними, роботи Scout не створюють викидів, що сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

Amazon активно тестує та впроваджує Scout у різних регіонах США. Компанія постійно вдосконалює систему навігації та функціональні можливості робота, прагнучи зробити його більш ефективним та універсальним.

Amazon Scout є яскравим прикладом того, як сучасні технології можуть бути використані для створення інноваційних рішень у сфері доставки. Роботи-кур'єри, такі як Scout, мають значний потенціал для трансформації логістики та покращення обслуговування клієнтів.

1.4. Робот Nuro

Nuro являє собою технологічну компанію, яка розробляє та впроваджує автономні транспортні засоби для доставки товарів, зокрема продуктів харчування та ліків. Їхні роботизовані кур'єри (Рис 1.3) призначені для пересування міськими вулицями та забезпечення швидкої та зручної доставки "останньої милі".

Рис.1.3 – Робот Nuro [5]

Ключові особливості системи навігації Nuro:

— Nuro Driver™ - власна автономна технологія Nuro, яка використовує комплексний підхід для безпечної та ефективної навігації.

— *Комплекс сенсорів.* Роботи Nuro оснащені широким спектром сенсорів, включаючи LiDAR, радари, камери та ультразвукові сенсори. Це забезпечує їм 360-градусний огляд та можливість виявляти об'єкти на різних відстанях та за різних умов освітлення.

— *Надмірність та безпека.* Архітектура Nuro Driver™ розроблена таким чином, щоб уникнути єдиної точки відмови, що підвищує безпеку руху та робить її надійнішою.

— *Штучний інтелект (ШІ).* Системи сприйняття та поведінки Nuro базуються на ШІ, який дозволяє роботам навчатися та покращувати свої навички на основі зібраних даних. Це дозволяє їм адаптуватися до нових ситуацій та умов дорожнього руху.

— *Картографування високої точності.* Nuro створює детальні карти районів обслуговування, що дозволяє їхнім роботам точно визначати своє місцезнаходження та планувати оптимальні маршрути.

Переваги системи Nuro:

— *Безпека.* Nuro приділяє велику увагу безпеці, розробляючи свої автономні транспортні засоби з урахуванням найвищих стандартів.

— *Ефективність.* Роботи Nuro можуть здійснювати доставки швидше та ефективніше, ніж традиційні кур'єрські служби, особливо в умовах міського трафіку.

— *Зручність.* Клієнти можуть отримувати свої замовлення в зручний для них час та місце, без необхідності особисто відвідувати магазин.

— *Екологічність.* Роботи Nuro є електричними, що робить їх більш екологічними порівняно з традиційними автомобілями доставки.

— *Доступність.* Nuro прагне зробити свої послуги доступними для широкого кола клієнтів, включаючи людей з обмеженими можливостями.

Nuro вже здійснює комерційні доставки у партнерстві з такими компаніями, як Kroger та Domino's Pizza. Компанія активно розширює свою діяльність, отримуючи дозволи на роботу в різних штатах США.

Nuro є одним з лідерів у розробці автономних транспортних засобів для доставки товарів. Їхній підхід, що поєднує передові технології, безпеку та зручність, має потенціал змінити спосіб, яким ми отримуємо товари та послуги.

1.5. Роботи Kiwi

Kiwi – стартап, який спеціалізується на доставці їжі та інших товарів за допомогою невеликих автономних роботів, що пересуваються тротуарами (Рис. 1.4). Компанія зосереджується на обслуговуванні університетських кампусів та закритих територій, пропонуючи швидку та зручну доставку для студентів та персоналу [6].

Рис.1.4 – Робот Kiwi [6]

Основні особливості системи навігації Kiwi:

— *GPS та навігація за маршрутом.* Роботи Kiwi використовують GPS для визначення свого місцезнаходження та слідування попередньо заданому маршруту. Це дозволяє їм доставляти замовлення точно та ефективно.

— *Камери та сенсори.* Kiwi-боти оснащені камерами та сенсорами, які допомагають їм розпізнавати перешкоди (пішоходи, велосипедисти, інші об'єкти) та уникати зіткнень.

— *Дистанційний моніторинг.* Оператори можуть віддалено відстежувати рух роботів та контролювати їх стан. Це дозволяє забезпечити безпеку та ефективність доставки.

— *Просте управління через за стосунок.* Користувачі можуть легко замовляти доставку та відстежувати її статус через мобільний застосунок Kiwi.

Переваги системи Kiwi:

— *Швидкість та зручність.* Kiwi-боти дозволяють доставляти замовлення швидко та зручно, не вимагаючи від користувачів витрачати час на похід до магазину чи кафе.

— *Доступність.* Kiwi пропонує свої послуги за доступними цінами, роблячи їх привабливими для студентів та інших клієнтів з обмеженим бюджетом.

— *Екологічність.* Роботи Kiwi є електричними, що сприяє зменшенню забруднення повітря та шуму у містах.

— *Інноваційність.* Використання роботів для доставки їжі є інноваційним підходом, який привертає увагу та створює позитивний імідж компанії.

Kiwi успішно працює у більш ніж 30 університетських кампусах по всьому світу, включаючи США, Канаду, Тайвань та країни Європи. Компанія постійно вдосконалює своїх роботів та розширює зону обслуговування [7].

Kiwi є прикладом успішного застосування роботів-кур'єрів для доставки їжі та інших товарів у закритих територіях. Компанія демонструє, як інноваційні технології можуть змінити сферу логістики та покращити повсякденне життя людей.

1.6. Порівняльний аналіз існуючих рішень

Вибір оптимального рішення для автономної навігації залежить від конкретних вимог та умов експлуатації робота-кур'єра. Необхідно враховувати такі фактори, як тип середовища, наявність перешкод, вимоги до точності та швидкості навігації, а також вартість та складність реалізації.

Таблиця 1.1 Характеристики роботів-кур'єрів* [2, 3, 5, 6]

Характеристика **	**1**	**2**	**3**	**4**
Тип робота				
Маленький, шестиколісний	+	+		+
Автомобільний			+	
Середовище роботи				
Міські тротуари	+	+		
Міські дороги		+	+	
Закриті території				+

Продовження табл. 1.1

Характеристика	**1**	**2**	**3**	**4**
Технології навігації				
SLAM	+			
Камери	+	+	+	+
Ультразвукові сенсори	+	+	+	+
GPS	+	+	+	+
LiDAR		+	+	
Машинне навчання		+		
Радари			+	
ШІ				
Переваги				
Точність	+			
Надійність	+			
Безпека	+	+	+	
Адаптивність	+			
Екологічність	+	+	+	+
Зручність		+	+	+
Ефективність		+	+	
Доступність			+	
Швидкість				+
Інноваційність				+
Недоліки				
Обмежена вантажопідйомність	+	+		+
Обмежена швидкість	+	+		
Висока вартість			+	
Обмежена доступність			+	
Обмежена зона роботи				+

Продовження табл. 1.1

Характеристика	**1**	**2**	**3**	**4**
Застосування				
Доставка їжі	+			+
Невеликі посилки	+	+		+
Продукти			+	
Ліки			+	

*Примітка: 1 - Starship Technologies [2]; 2 - Amazon Scout [3]; 3 – Nuro [5]; 4 – Kiwi[6];

** знак «+» свідчить про наявність ознаки

Аналіз характеристик різних роботів-кур’єрів свідчить про наступне:

— *Starship Technologies та Amazon Scout:* Обидві компанії пропонують схожі за розміром та функціональністю роботи, призначені для доставки невеликих посилок тротуарами. Проте, Amazon Scout використовує більш передові технології, такі як LiDAR та машинне навчання, що може забезпечити йому перевагу у складних умовах.

— *Nuro:* Роботи Nuro відрізняються автомобільним форм-фактором, що дозволяє їм перевозити більші вантажі та рухатися дорогами. Вони також використовують широкий спектр датчиків та ШІ, що робить їх більш безпечними та ефективними, але й дорожчими.

— *Kiwi:* Kiwi орієнтується на закриті території, такі як університетські кампуси, де умови руху простіші. Це дозволяє їм використовувати більш прості та доступні технології навігації, що робить їх послуги більш доступними для споживачів.

Вибір оптимальної системи керування роботом-кур'єром залежить від конкретних потреб та умов застосування. Для міської доставки на тротуарах підійдуть роботи Starship Technologies або Amazon Scout. Якщо потрібна доставка більших вантажів або рух дорогами, то Nuro може бути кращим

варіантом. Для закритих територій з простими умовами руху оптимальним вибором можуть стати роботи Kiwi.

1.7. Вимоги до система керування роботом-кур'єром

Система керування роботом-кур'єром повинна відповідати ряду вимог, щоб забезпечити ефективну, безпечну та надійну роботу за реальних умов. Ці вимоги можна розділити на кілька категорій:

1. Навігація та локалізація:

— *Точність.* Система повинна забезпечувати високу точність визначення місцезнаходження робота та побудови маршруту. Це особливо важливо в умовах щільної міської забудови та наявності перешкод.

— *Надійність.* Система повинна бути стійкою до впливу зовнішніх факторів, таких як зміни погоди, освітлення, наявність перешкод тощо. Вона повинна забезпечувати надійну роботу в різних умовах експлуатації.

— *Адаптивність.* Система повинна вміти адаптуватися до змін у навколишньому середовищі, наприклад, до появи нових перешкод або змін маршруту.

— *Швидкість.* Система повинна забезпечувати швидке планування маршруту та прийняття рішень щодо руху робота, щоб забезпечити своєчасну доставку.

2. Уникнення перешкод:

— *Ефективність.* Система повинна вміти ефективно виявляти та класифікувати різні типи перешкод, такі як пішоходи, велосипедисти, автомобілі, тварини тощо.

— *Безпека:* Система повинна забезпечувати безпечне маневрування робота в умовах наявності перешкод, уникаючи зіткнень та аварійних ситуацій.

— *Гнучкість.* Система повинна вміти адаптуватися до різних типів перешкод та обирати оптимальні стратегії їх обходу.

3. Безпека.

— *Захист від злому.* Система повинна бути захищена від несанкціонованого доступу та злому, щоб запобігти крадіжці вантажу або використанню робота у зловмисних цілях.

— *Аварійне гальмування.* Система повинна мати функцію аварійного гальмування, яка спрацьовує у разі виникнення небезпечної ситуації, наприклад, при ризику зіткнення.

— *Дистанційний контроль.* Система повинна дозволяти оператору дистанційно контролювати рух робота та втручатися у його роботу у разі потреби.

4. Інші вимоги.

— *Вантажопідйомність.* Система повинна забезпечувати достатню вантажопідйомність для перевезення різних типів вантажів.

— *Автономність*. Система повинна забезпечувати достатню автономність робота, тобто час роботи без підзарядки, щоб він міг виконувати завдання доставки без перерв.

— *Вартість.* Система повинна бути економічно ефективною, щоб забезпечити конкурентоспроможність робота-кур'єра на ринку.

— *Інтерфейс користувача.* Система повинна мати зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача для замовлення доставки та відстеження статусу замовлення.

Врахування цих вимог при розробці системи керування роботом-кур'єром дозволить створити ефективний, безпечний та надійний продукт, здатний успішно конкурувати на ринку та задовольняти потреби користувачів..

Висновки до розділу 1

Узагальнено відомості про сучасний стан систем керування роботами-кур'єрами, що дозволило зробити наступні висновки:

- застосування різноманітних підходів, методів та технологій забезпечує ефективність автономної доставки;
- точність, надійність та адаптивність зазначених роботів забезпечуються застосуванням технологій навігації, таких як SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), маршрутизація та поведінкова навігація;
- коло задач, що вирішуються роботом-кур’єром, визначається умовами його використання;
- вимоги до системи керування роботом-кур'єром окреслюються навігацією та локалізацією, уникненням перешкод, безпекою, автономністю, вантажопідйомністю тощо.

2. РОЗРОБКА СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-КУР'ЄРОМ

Система керування роботом-кур'єром містить: блок керування, блок навігації та локалізації; блок сенсорів; блок зв'язку та передачі даних; блок живлення; блок двигунів та шасі (рис. 2.1).

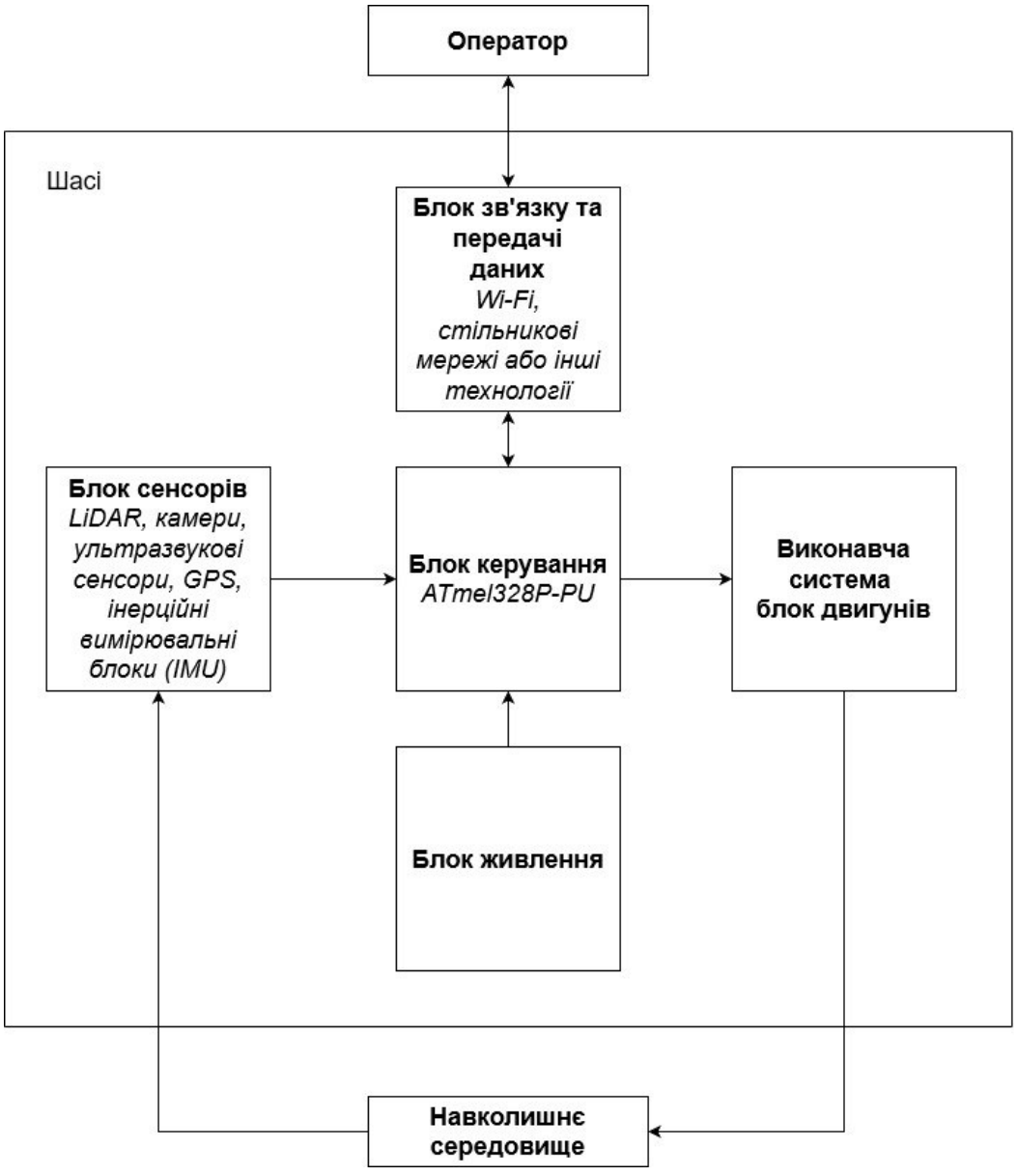

Рис. 2.1 – Структурна схема

Блок керування *(керуючий контролер)* – приймає рішення щодо руху та поведінки на основі даних з сенсорів та інформації про завдання доставки; відповідає за планування маршруту, керування двигунами, прийняття рішень щодо уникнення перешкод та взаємодію з іншими компонентами системи.

Блок навігації та локалізації відповідає за визначення місцезнаходження робота та побудову карти навколишнього середовища; використовує дані з первинних перетворювачів, таких як GPS, LiDAR, камери, та алгоритми SLAM для точного позиціонування та орієнтації робота у просторі.

Блок сенсорів містить різноманітні первинні перетворювачі, які збирають інформацію про навколишнє середовище. До них можуть належати:

— *LiDAR* (лазерний далекомір) – використовує лазерні імпульси для вимірювання відстані до об'єктів та створення детальної 3D-карти оточення. LiDAR забезпечує високу точність та деталізацію, що робить його незамінним для навігації та уникнення перешкод.

— *камери* – дозволяють роботу "бачити" навколишній світ, розпізнавати об'єкти (пішоходів, велосипедистів, автомобілі, дорожні знаки) та оцінювати відстань до них. Камери можуть бути монокулярними (одна камера) або стереоскопічними (дві камери), що дозволяє отримувати інформацію про глибину.

— *ультразвукові сенсори* – випромінюють ультразвукові хвилі та вимірюють час їхнього відбиття від об'єктів, що дозволяє визначити відстань до них. Ультразвукові сенсори ефективні для виявлення перешкод на близькій відстані (до кількох метрів)..

— *GPS* – визначає географічні координати робота з точністю до кількох метрів. GPS є важливим джерелом інформації для планування маршруту та навігації на великі відстані.

— *інерційні вимірювальні блоки (IMU)* – включають акселерометри та гіроскопи, які вимірюють прискорення та кутову швидкість робота. Ці дані використовуються для оцінки руху робота у просторі та корекції похибок інших датчиків.

Блок зв'язку та передачі даних – забезпечує зв'язок робота з оператором та хмарними сервізами; може використовувати Wi-Fi, стільникові мережі або інші технології для передачі даних про стан робота, маршрут, місцезнаходження та інші параметри.

Блок живлення забезпечує електроживлення для всіх компонентів системи.

Шасі забезпечують фізичну платформу для робота.

Блок двигунів відповідає за переміщення робота.

Функціонування системи керування роботом-кур'єром відбувається наступним чином. Блок керування отримує дані з первинних перетворювачів та блоку навігації, обробляє їх та приймає рішення щодо руху робота; передає команди на блок двигунів, який забезпечує переміщення робота відповідно до заданого маршруту та з урахуванням перешкод. Блок зв'язку забезпечує обмін даними між роботом та оператором, дозволяючи контролювати його роботу та отримувати інформацію про його стан.

2.1. Блок керування рухом

Основні функції блоку керування рухом:

1. *Планування маршруту.* На основі інформації про початкову та кінцеву точки маршруту, а також даних з блоку навігації та локалізації, здійснюється розрахунок оптимальної траєкторії руху робота. При цьому враховуються такі фактори, як відстань, час, наявність перешкод, обмеження швидкості тощо.
2. *Керування двигунами.* Блок керування генерує команди для двигунів робота, забезпечуючи його рух по заданому маршруту. Він контролює швидкість, прискорення та напрямок руху, а також забезпечує плавне маневрування та зупинку.
3. *Уникнення перешкод*. За даними від сенсорів (LiDAR, камери, ультразвукові сенсори) блок керування виявляє перешкоди на шляху робота та приймає рішення щодо їх уникнення. Це може включати зміну маршруту, уповільнення або зупинку робота.
4. *Виконання завдань доставки*. Блок керування контролює процес доставки, включаючи під'їзд до точки призначення, відкриття та закриття відсіку для вантажу, взаємодію з клієнтом (наприклад, через мобільний застосунок) та підтвердження доставки.

5. *Моніторинг стану робота*. Блок керування постійно відстежує стан робота, зокрема рівень заряду батареї, температуру компонентів, стан сенсорів тощо. У разі виникнення несправностей або аварійних ситуацій, він може ініціювати відповідні дії, наприклад, зупинку робота або відправку сигналу тривоги оператору.

Реалізація блоку керування рухом. Блок керування рухом може бути реалізований за допомогою спеціалізованого мікроконтролера або мікрокомп'ютера, на якому виконується програмне забезпечення, що реалізує вищезазначені функції. Програмне забезпечення може включати алгоритми планування маршруту, управління двигунами, обробки даних з датчиків, машинного навчання тощо.

Вимоги до блоку керування рухом:

— Висока обчислювальна потужність (для обробки великих обсягів даних з датчиків та виконання складних алгоритмів);
— Низьке енергоспоживання (для забезпечення тривалої автономної роботи робота);
— Надійність та безпека (для забезпечення безперебійної роботи та запобігання аварійним ситуаціям).

Блок керування рухом є ключовим елементом системи керування роботом-кур'єром, від якого залежить ефективність, безпека та надійність його роботи. Ретельна розробка та оптимізація цього блоку є запорукою успішного функціонування робота-кур'єра в реальних умовах.

2.2. Блок навігації та локалізації

Основними функціями цього блоку є:

1. *Локалізація:* Визначення поточного положення робота у просторі з високою точністю. Для цього можуть використовуватися різні технології, такі як:
   — *GPS (Global Positioning System):* Дозволяє визначити географічні координати робота з точністю до кількох метрів.

— *SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):* Алгоритми SLAM одночасно будують карту середовища та визначають положення робота на ній. Вони використовують дані з LiDAR, камер та інших первинних перетворювачів для створення детальної карти та відстеження руху робота в режимі реального часу.

— *Візуальна одометрія:* Використовує камери для відстеження руху робота шляхом аналізу змін у зображеннях.

— *Інерційні вимірювальні блоки (IMU):* Вимірюють прискорення та кутову швидкість робота, що дозволяє оцінити його переміщення у просторі.

2. *Картографування:* Побудова карти навколишнього середовища, на якій відображаються перешкоди, дороги, будівлі та інші об'єкти. Карта може бути двовимірною (2D) або тривимірною (3D), залежно від використовуваних сенсорів та алгоритмів.
3. *Планування маршруту:* На основі карти та інформації про початкову та кінцеву точки маршруту, блок навігації розраховує оптимальний шлях руху робота.
4. *Оновлення карти:* Карта середовища повинна постійно оновлюватися, щоб відображати зміни, що відбуваються у навколишньому середовищі. Йдеться про виникнення нових перешкод, зміну дорожньої розмітки тощо.

Реалізація блоку навігації та локалізації. Блок навігації та локалізації може бути реалізований за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке працює на бортовому комп'ютері робота. Програмне забезпечення обробляє дані з сенсорів, використовує алгоритми SLAM, візуальної одометрії та інші методи для визначення положення робота та побудови карти.

Вимоги до блоку навігації та локалізації:

- Точність (висока точність локалізації та картографування є критично важливою для безпечної та ефективної роботи робота-кур'єра).

- Надійність (система повинна бути стійкою до впливу зовнішніх факторів та забезпечувати надійну роботу за різних умов).
- Швидкість (алгоритми локалізації та картографування повинні працювати в режимі реального часу, щоб забезпечити своєчасне прийняття рішень щодо руху робота).
- Ефективність (алгоритми повинні бути обчислювально ефективними, щоб не перевантажувати обчислювальні ресурси робота).

Блок навігації та локалізації є основою для автономної роботи робота-кур'єра. Його ефективність та надійність безпосередньо впливають на якість виконання завдань доставки та безпеку руху робота.

2.3. Блок сенсорів

Блок сенсорів та датчиків є "органами чуття" робота-кур'єра, які дозволяють йому сприймати навколишній світ та збирати інформацію, необхідну для навігації, локалізації, уникнення перешкод та виконання завдань доставки.

Окрім зазначених раніше сенсорів (LiDAR, камери, ультразвукові сенсори, GPS, Інерційні вимірювальні блоки) Робот-кур'єр може бути оснащений додатковими первинними перетворювачами, а саме:

— *сенсори дотику* - виявляють зіткнення з перешкодами;
— *сенсори температури* - контролюють температуру компонентів робота;
— сенсори вологості - вимірюють вологість навколишнього середовища;
— *інфрачервоні сенсори* - виявляють теплові сигнатури об'єктів.

До блоку сенсорів висуваються наступні вимоги:

— Точність та надійність (сенсори повинні забезпечувати точні та надійні дані про навколишнє середовище, незалежно від умов освітлення, погоди та інших факторів).
— Широкий діапазон вимірювань (сенсори повинні мати достатній діапазон вимірювань, щоб покрити всі можливі сценарії руху робота);
— Швидкість (сенсори повинні забезпечувати швидке зчитування даних, щоб блок керування міг приймати рішення в режимі реального часу).

— Енергоефективність (сенсори повинні бути енергоефективними, щоб не зменшувати час автономної роботи робота).
— Інтеграція (сенсори повинні бути легко інтегровані з іншими компонентами системи керування).

Вибір та комбінація датчиків залежить від конкретних вимог до робота-кур'єра та умов його експлуатації. Правильно підібраний набір датчиків забезпечить роботу необхідною інформацією для безпечної та ефективної роботи.

2.4. Блок зв'язку та передачі даних

Основні функції блоку зв'язку та передачі даних:

1. Телеметрія. Робот постійно передає дані про свій стан (рівень заряду батареї, швидкість, місцезнаходження, стан сенсорів тощо) оператору або хмарному сервісу. Це дозволяє відстежувати роботу робота, діагностувати можливі проблеми та вчасно реагувати на них.
2. Отримання команд керування. Оператор може дистанційно керувати роботом, надсилаючи йому команди через блок зв'язку. Це може бути корисно в ситуаціях, коли робот зіткнувся з непередбачуваною перешкодою або потребує корекції маршруту.
3. Оновлення програмного забезпечення та карт. Блок зв'язку дозволяє оновлювати програмне забезпечення робота та карти місцевості "по повітрю", без необхідності фізичного доступу до нього. Це забезпечує актуальність програмного забезпечення та покращує навігацію.
4. Взаємодія з іншими роботами. У разі використання групи роботів-кур'єрів, блок зв'язку забезпечує їх координацію та обмін даними. Це дозволяє оптимізувати маршрути, уникати конфліктів та підвищувати ефективність роботи всієї системи.
5. Взаємодія з інфраструктурою. У майбутньому роботи-кур'єри зможуть взаємодіяти з елементами інфраструктури, такими як світлофори,

дорожні знаки, зарядні станції тощо. Блок зв'язку буде забезпечувати обмін даними з цими елементами.

Для забезпечення зв'язку можуть використовуватися різні технології, такі як:

— *Wi-Fi.* Забезпечує високошвидкісний зв'язок на невеликих відстанях, що підходить для закритих територій або міських середовищ з розвиненою Wi-Fi інфраструктурою.
— *Стільникові мережі* (4G/5G). Забезпечують зв'язок на великих відстанях та в різних умовах, що робить їх універсальним рішенням для роботів-кур'єрів.
— *Bluetooth.* Використовується для зв'язку на короткій відстані, наприклад, для взаємодії з клієнтом під час доставки.
— *Інші технології*. У майбутньому можуть з'явитися нові технології зв'язку, спеціально розроблені для потреб роботів та автономних транспортних засобів.

Вимоги до блоку зв'язку та передачі даних:

— Надійність. Зв'язок повинен бути надійним та стабільним, щоб забезпечити безперебійну роботу робота та передачу важливих даних.
— Безпека. Дані, що передаються через блок зв'язку, повинні бути захищені від несанкціонованого доступу та злому.
— Енергоефективність. Блок зв'язку повинен бути енергоефективним, щоб не скорочувати час автономної роботи робота.
— Сумісність. Блок зв'язку повинен бути сумісним з різними протоколами та стандартами зв'язку, щоб забезпечити взаємодію з різними пристроями та системами.

Блок зв'язку та передачі даних є важливою складовою системи керування роботом-кур'єром. Він забезпечує зв'язок робота з зовнішнім світом, що дозволяє контролювати його роботу, оновлювати програмне забезпечення та взаємодіяти з іншими системами.

Функціональна схема є ключовим елементом при розробці системи керування роботом-кур'єром, оскільки вона описує основні процеси та їх взаємодію без вдавання у технічні деталі компонентів. Функціональна схема рис.

2.2. дозволяє зрозуміти загальний принцип роботи системи, показуючи послідовність дій, які виконує робот від отримання команди до завершення доставки. У нашому випадку функціональна схема демонструє, як різні блоки системи взаємодіють між собою, забезпечуючи надійне та ефективне виконання поставлених завдань.

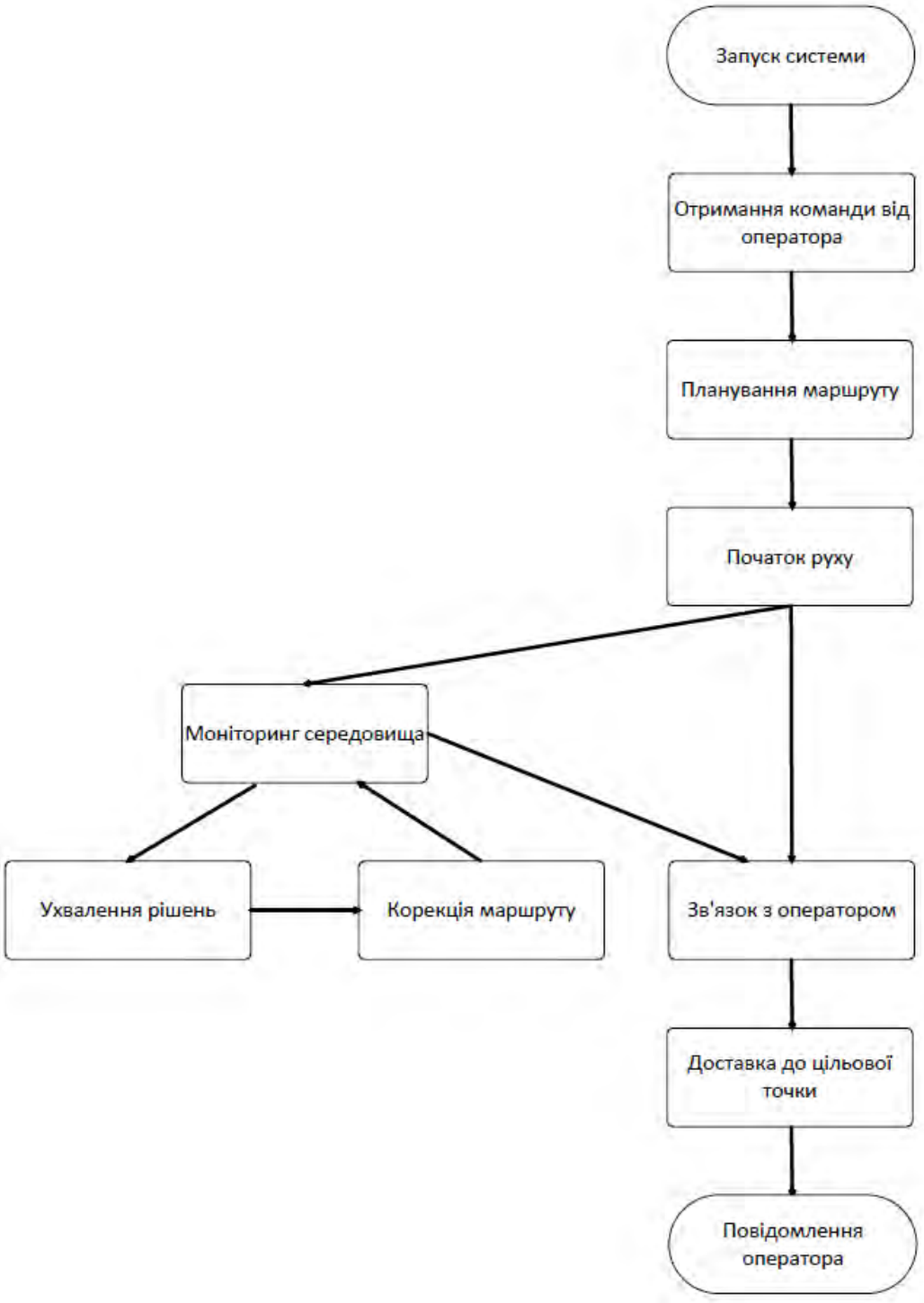

Рис. 2.2 - Функціональна схема

Запуск системи – на цьому етапі робот включається, здійснюється початкове завантаження всіх необхідних компонентів, проводиться самодіагностика системи для перевірки справності всіх блоків і підсистем. Після завершення діагностики система готова до роботи.

Отримання команди від оператора – оператор використовує інтерфейс для передачі команди на початок доставки. Команда надходить через блок зв'язку та передачі даних до блоку керування, де обробляється та готується до виконання.

Планування маршруту – блок керування, отримавши команду від оператора, починає планування оптимального маршруту доставки. Він використовує дані GPS та попередньо завантажені карти місцевості для визначення найкоротшого та найефективнішого шляху до цільової точки.

Початок руху – після планування маршруту блок керування передає команди виконавчій системі для початку руху. Виконавча система активує двигуни, і робот починає рухатись за запланованим маршрутом.

Моніторинг середовища – під час руху блок сенсорів постійно збирає інформацію про навколишнє середовище. Використовуються такі сенсори як LiDAR, камери та ультразвукові сенсори для виявлення перешкод та інших об'єктів на шляху.

Ухвалення рішень – блок керування обробляє дані, отримані від сенсорів, аналізує їх і приймає рішення щодо корекції маршруту у випадку виявлення перешкод. Якщо необхідно, блок керування перераховує маршрут.

Корекція маршруту – у разі виявлення перешкод блок керування адаптує маршрут відповідно до нових умов і передає оновлені команди виконавчій системі для продовження руху.

Зв'язок з оператором – блок зв'язку та передачі даних підтримує постійний зв'язок з оператором, передаючи інформацію про статус доставки, поточне місцезнаходження робота та можливі проблеми.

Доставка до цільової точки – після прибуття до цільової точки блок керування передає команду на зупинку виконавчій системі. Двигуни робота зупиняються, і доставка вважається завершеною.

Повідомлення оператора – робот через блок зв'язку інформує оператора про успішне завершення доставки. Оператор отримує підтвердження та може дати роботу нові завдання.

Функціональна схема роботи робота-кур'єра описує послідовність дій та основні процеси, що відбуваються під час виконання завдання доставки. Робота починається із запуску системи та перевірки всіх компонентів. Після цього оператор надсилає команду на початок доставки через інтерфейс зв'язку.

Блок керування, отримавши команду, починає планувати маршрут, використовуючи дані GPS та карти. Після планування маршруту блок керування передає команди виконавчій системі, і робот починає рух.

Під час руху робот постійно здійснює моніторинг навколишнього середовища за допомогою сенсорів (LiDAR, камери, ультразвукові сенсори). Дані від сенсорів передаються до блоку керування, який аналізує їх та ухвалює рішення щодо необхідності корекції маршруту у випадку виявлення перешкод. Якщо перешкода виявлена, блок керування перераховує маршрут та передає нові команди виконавчій системі.

Паралельно з цим блок зв'язку та передачі даних постійно підтримує зв'язок з оператором, інформуючи його про статус доставки та можливі проблеми. Після прибуття до цільової точки блок керування передає команду на зупинку виконавчій системі.

На завершення роботи робот повідомляє оператора про успішне завершення доставки та готовність до нових завдань. Ця функціональна схема показує, як робот-кур'єр виконує свої завдання, взаємодіючи з оператором та навколишнім середовищем, забезпечуючи безпечну та ефективну доставку.

На основі наведеного вище аналізу було визначено конфігурацію системи керування роботом-кур'єром, яка включає:

Блок керування:

— Мікроконтролер: ATmel328P-PU

— Процесор: Raspberry Pi 4

— Пам'ять: 32GB microSD карта

— Інтерфейси вводу/виводу: GPIO порти, USB

Блок навігації та локалізації:

— GPS модуль: 1 шт., u-blox NEO-6M

— Інерційна навігаційна система: 1 шт., MPU-9250

— Камери: 2 шт., Raspberry Pi Camera Module v2 (передня та задня)

— Лідар: 1 шт., RPLIDAR A1

Блок сенсорів:

— Ультразвукові датчики: 4 шт., HC-SR04 (по одному на кожну сторону робота)

— Інфрачервоні датчики: 2 шт., Sharp GP2Y0A21YK0F (передній та задній)

— Датчики відстані: 4 шт., VL53L0X Time-of-Flight (ToF) (по одному на кожну сторону робота)

— Камери: 2 шт., Raspberry Pi Camera Module v2 (передня та задня, зазначені в навігації та локалізації)

— Температурні датчики: 1 шт., DHT22

Блок зв'язку та передачі даних:

— Wi-Fi модуль: 1 шт., ESP8266

— Bluetooth модуль: 1 шт., HC-05

— Модуль мобільного зв'язку: 1 шт., SIM800L

Блок живлення:

— Акумуляторні батареї: 4 шт., Li-ion 18650

— Система управління живленням: 1 шт., BMS (Battery Management System)

— Зарядний пристрій: 1 шт., Li-ion зарядний модуль TP4056

Блок двигунів та шасі:

— Електродвигуни: 4 шт., N20 DC мотор (по одному на кожне колесо)

— Колеса: 4 шт., All Terrain Wheels

— Система підвіски: незалежна підвіска для кожного колеса

Ця конфігурація забезпечує необхідну функціональність для ефективної роботи робота-кур'єра, включаючи автономну навігацію, збирання даних про навколишнє середовище та стабільну комунікацію з оператором.

Висновки до розділу 2

Розроблено структурну схему системи керування роботом-кур'єром, яка забезпечує ефективну та надійну роботу робота за реальних умов експлуатації. Основою роботи системи є взаємодія між кількома основними блоками: керування, сенсорів, зв'язку та передачі даних, живлення та виконавчою системою.

Розглянуто можливі варіанти структурного складу зазначених блоків.

Наведено опис функціонування системи, що відображає послідовність дій та основні процеси, що відбуваються під час виконання завдання доставки.

Запропоновано побудову системи керування роботом-кур'єром з використанням мікроконтролеру ATmel328P-PU, мікрокомп’ютера Raspberry Pi 4, та 32GB microSD карти.

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-КУР'ЄРОМ

Система керування роботом-кур’єром містить множину підсистем, кожна з яких відповідає за певний аспект функціонування робота: рух робота у просторі описується кінематичною та динамічною моделями; визначення положення робота у просторі та побудова карти навколишнього середовища – моделлю системи навігації та локалізації; виявлення перешкод на шляху та реакція на них формалізується моделлю системи уникнення перешкод тощо.

Усе це керується моделлю взаємозв'язку вхідних та вихідних сигналів системи керування роботом-кур'єром.

3.1. Кінематична модель робота-кур'єра

Кінематична модель робота-кур'єра описує його рух у просторі без урахування сил та моментів, що викликають цей рух (рис. 3.1). Вона встановлює зв'язок між положенням, швидкістю та прискоренням робота, а також кутами повороту його коліс.

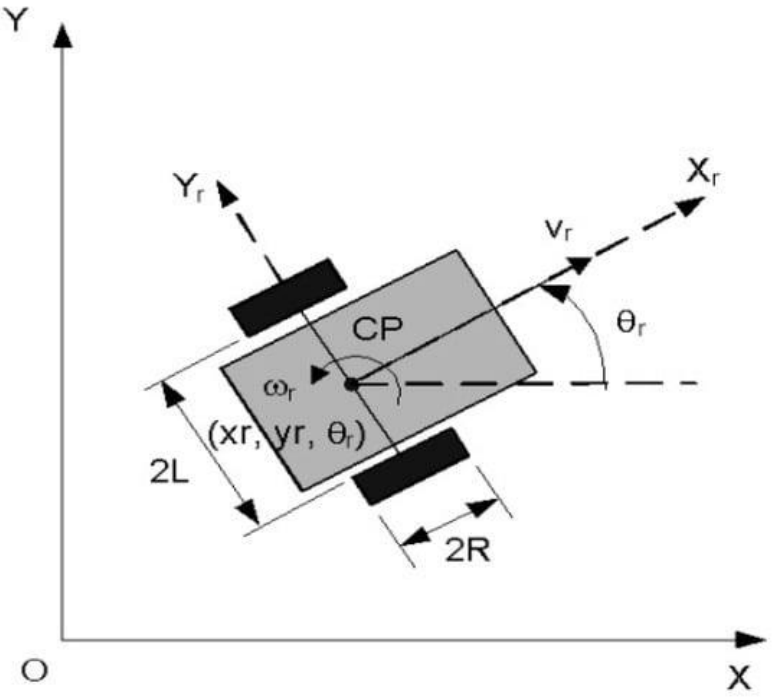

Рис. 3.1 - Кінематична модель [11]

Для спрощення моделі зробимо кілька припущень:

— Робот рухається по пласкій поверхні;

— Відсутнє ковзання коліс;

— Робот має диференціальний привід (два колеса, які можуть обертатися незалежно одне від одного).

Розглянемо робота з диференціальним приводом, що має два колеса, розташовані на відстані L одне від одного. Положення робота у глобальній системі координат визначається координатами (x, y) та кутом повороту θ.

Швидкість робота v та кутова швидкість ω пов'язані зі швидкостями обертання коліс ωL (ліве колесо) та ωR (праве колесо) наступними рівняннями:

$$v = (\omega R + \omega L) * R / 2;$$

$$\omega = (\omega R - \omega L) * R / L;$$

де R – радіус коліс.

Зв'язок між швидкістю та положенням робота описується диференціальними рівняннями:

$$x' = v * \cos(\theta),$$

$$y' = v * \sin(\theta),$$

$$\theta' = \omega,$$

де x', y' та θ' – похідні від координат та кута повороту за часом.

Кінематична модель дозволяє розрахувати траєкторію руху робота на основі заданих швидкостей обертання коліс. Це важливо для планування маршруту та керування рухом робота. Наприклад, для того, щоб робот рухався прямолінійно, необхідно забезпечити рівні швидкості обертання обох коліс. Для повороту робота необхідно змінити різницю швидкостей обертання коліс.

Кінематична модель не враховує динамічні ефекти, такі як інерція та тертя, які можуть впливати на рух робота. Для більш точного опису руху робота необхідно використовувати динамічну модель.

3.2. Динамічна модель робота-кур'єра

Динамічна модель робота-кур'єра описує взаємозв'язок між силами, що діють на робота, та його рухом. Вона враховує такі фактори, як маса робота, інерція, тертя, а також зовнішні сили, такі як сила тяжіння та сили реакції опори. До припущень, зроблених при побудові кінематичної моделі, додається розташування центру мас робота на вісі, що з'єднує центри коліс.

Динамічна модель робота-кур'єра може бути описана за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду. Ці рівняння встановлюють зв'язок між узагальненими координатами системи (в нашому випадку це координати x, y та кут повороту θ), узагальненими швидкостями та узагальненими силами

$$d/dt\ (\partial L/\partial q') - \partial L/\partial q = Q$$

де L - функція Лагранжа, q - узагальнена координата, q' - узагальнена швидкість, Q - узагальнена сила.

Функція Лагранжа для робота-кур'єра має вигляд:

$$L = T - V$$

де T - кінетична енергія робота, V - потенціальна енергія робота.

Кінетична енергія робота складається з кінетичної енергії поступального руху та кінетичної енергії обертання:

$$T = 1/2 * m * v^2 + 1/2 * I * \omega^2$$

де m - маса робота, v - лінійна швидкість робота, I - момент інерції робота відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас, ω - кутова швидкість робота.

Потенціальна енергія робота дорівнює нулю, оскільки ми припускаємо, що робот рухається по плоскій поверхні.

Узагальнені сили, що діють на робота, включають сили тяги двигунів τL та τR, а також сили тертя Ff.

Після підстановки виразів для кінетичної та потенціальної енергії у рівняння Лагранжа та проведення диференціювання отримаємо систему диференціальних рівнянь, що описує динаміку робота-кур'єра.

Динамічна модель дозволяє врахувати вплив сил та моментів на рух робота, що робить її більш точною порівняно з кінематичною моделлю. Це важливо для розробки ефективних алгоритмів керування рухом робота, особливо в умовах, коли необхідно враховувати динамічні обмеження, такі як максимальне прискорення або максимальна сила тяги двигунів.

Наведена динамічна модель є спрощеною і не враховує деякі фактори, такі як нерівність поверхні, деформація коліс, неточність вимірювання сенсорів тощо. Для більш точного моделювання необхідно враховувати ці фактори, що ускладнює модель та вимагає додаткових даних.

3.3. Модель системи навігації та локалізації робота-кур'єра

Модель системи навігації та локалізації робота-кур'єра описує, як робот визначає своє положення у просторі та будує карту навколишнього середовища. Ця модель є важливою складовою системи керування, оскільки вона забезпечує інформацію, необхідну для планування маршруту та уникнення перешкод.

Основними компонентами моделі є:

1. *Модель вимірювання.* Описує, як сенсори робота збирають інформацію про навколишнє середовище. Наприклад, LiDAR вимірює відстань до об'єктів, камера отримує зображення, GPS визначає координати тощо.
2. *Модель руху.* Описує, як робот переміщується у просторі. Вона може базуватися на кінематичній або динамічній моделі робота, описаних раніше.
3. *Алгоритм локалізації.* Використовує дані з сенсорів та модель руху для оцінки поточного положення робота. Існує кілька підходів до локалізації, таких як:
   — *Фільтр Калмана* – рекурсивний алгоритм, який оцінює стан системи (положення робота) на основі попередньої оцінки та нових вимірювань.

— SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) – алгоритм, який одночасно будує карту середовища та визначає положення робота на ній.

— *Візуальна одометрія* – використовує камери для відстеження руху робота шляхом аналізу змін у зображеннях.

4. *Алгоритм картографування.* Використовує дані з сенсорів та інформацію про положення робота для побудови карти середовища. Карта може бути двовимірною (2D) або тривимірною (3D), залежно від використовуваних датчиків та алгоритмів.

Приклад моделі на основі SLAM. Одним з найпоширеніших підходів до навігації та локалізації роботів-кур'єрів є SLAM. Розглянемо приклад такої моделі:

1. *Вимірювання.* LiDAR сканує оточення та отримує хмару точок, що представляють відстань до об'єктів.
2. *Локалізація.* Алгоритм SLAM порівнює поточну хмару точок з попередніми та оцінює переміщення робота.
3. *Картографування.* Алгоритм SLAM об'єднує хмари точок з різних позицій робота та будує карту середовища.
4. *Корекція.* Якщо GPS доступний, його дані використовуються для корекції оцінки положення робота.

Вимоги до моделі:

— *Точність.* Модель повинна забезпечувати високу точність локалізації та картографування, особливо в умовах обмеженої видимості або за наявності динамічних перешкод.

— *Надійність.* Модель повинна бути стійкою до похибок вимірювань та змін у навколишньому середовищі.

— *Обчислювальна ефективність.* Алгоритми локалізації та картографування повинні бути обчислювально ефективними, щоб працювати в режимі реального часу на обмежених ресурсах робота.

Модель системи навігації та локалізації може бути вдосконалена шляхом застосування:

— *Більш точних сенсорів.* Наприклад, LiDAR з більшою роздільною здатністю або камери з кращими характеристиками.

— *Більш досконалих алгоритмів.* Наприклад, алгоритми SLAM, які враховують семантичну інформацію про об'єкти (наприклад, тип об'єкта: дерево, будівля, людина).

— *Комбінації різних сенсорів.* Наприклад, поєднання LiDAR та камер для отримання більш повної інформації про середовище.

Вдосконалення моделі системи навігації та локалізації дозволить підвищити точність, надійність та ефективність роботи робота-кур'єра.

3.4. Модель системи уникнення перешкод робота-кур'єра

Модель системи уникнення перешкод робота-кур'єра описує, як робот виявляє та реагує на перешкоди на своєму шляху, щоб забезпечити безпечний та ефективний рух. Ця модель є важливою складовою системи керування, оскільки вона дозволяє роботу уникати зіткнень з пішоходами, велосипедистами, автомобілями, тваринами та іншими об'єктами.

Основні компоненти моделі:

1. *Виявлення перешкод.* Використовує дані з сенсорів (LiDAR, камери, ультразвукові сенсори) для виявлення об'єктів у навколишньому середовищі. Алгоритми обробки зображень та аналізу даних LiDAR дозволяють класифікувати об'єкти та визначити відстань до них, швидкість та напрямок руху.
2. *Оцінка небезпеки.* Визначає, чи є виявлений об'єкт перешкодою для робота та наскільки він небезпечний. Це може враховувати такі фактори, як відстань до об'єкта, його швидкість та напрямок руху, а також розмір та форму робота.

3. *Планування шляху обходу.* Якщо об'єкт визначено як перешкоду, алгоритм планування шляху розраховує новий маршрут, який дозволяє роботу обійти перешкоду безпечно та ефективно.
4. *Виконання маневру обходу.* Робот виконує маневр обходу, керуючись командами від блоку керування рухом. Це може включати зміну швидкості, напрямку руху або зупинку.

Приклади алгоритмів уникнення перешкод:

— *Потенційні поля.* Кожна перешкода створює відштовхуюче поле, а ціль - притягуюче поле. Робот рухається вздовж результуючого поля.

— *VFH (Vector Field Histogram).* Створює гістограму напрямків руху, враховуючи перешкоди, та вибирає напрямок з найменшою ймовірністю зіткнення.

— *DWA (Dynamic Window Approach).* Оцінює можливі траєкторії руху робота в межах вікна часу та вибирає найкращу з урахуванням безпеки та ефективності.

— *RRT (Rapidly-exploring Random Trees).* Алгоритм пошуку шляху, який будує дерево можливих траєкторій та вибирає найкращу з урахуванням обмежень.

Вимоги до моделі:

— *Надійність.* Система повинна надійно виявляти перешкоди та уникати зіткнень навіть у складних умовах (наприклад, при поганій видимості або наявності рухомих об'єктів).

— *Безпека.* Система повинна забезпечувати безпеку руху робота та оточуючих людей.

— *Ефективність.* Алгоритми уникнення перешкод повинні працювати швидко та ефективно, щоб не затримувати доставку.

— *Адаптивність.* Система повинна вміти адаптуватися до різних типів перешкод та умов середовища.

Модель системи уникнення перешкод може бути вдосконалена шляхом:

— *Використання більш досконалих сенсорів.* Наприклад, LiDAR з більшою роздільною здатністю або камери з кращими характеристиками.

— *Застосування алгоритмів машинного навчання.* Для класифікації об'єктів та прогнозування їх руху.

— *Врахування семантичної інформації.* Наприклад, розуміння того, що людина з дитячою коляскою вимагає більшої обережності, ніж самотня людина.

— *Інтеграція з іншими системами.* Наприклад, з системою керування трафіком для отримання інформації про дорожню ситуацію.

Вдосконалення моделі системи уникнення перешкод є важливим напрямком розвитку роботів-кур'єрів, оскільки це дозволить підвищити їх безпеку та ефективність у реальних умовах.

3.5. Модель взаємозв'язку вхідних та вихідних сигналів

Модель взаємозв'язку вхідних та вихідних сигналів системи керування роботом-кур'єром описує як дані, отримані з сенсорів та інших джерел, перетворюються на команди управління двигунами та інші дії робота. Ця модель є ключовою для розуміння того, як система керування приймає рішення та реагує на зміни в навколишньому середовищі.

Вхідні сигнали:

— *Дані з сенсорів.* LiDAR, камери, ультразвукові сенсори, GPS, IMU, інфрачервоні сенсори, датчики відстані та температурний датчик надають інформацію про навколишнє середовище, положення та стан робота.

— *Інформація про завдання.* Адреса доставки, бажаний час прибуття, особливі інструкції тощо.

— *Команди оператора.* Оператор може дистанційно керувати роботом або надавати йому додаткові інструкції.

— *Дані з хмарних сервісів.* Інформація про дорожню ситуацію, прогноз погоди, оновлення карт тощо.

Вихідні сигнали:

— *Команди керування двигунами.* Швидкість, напрямок руху, прискорення, гальмування.

— *Команди керування іншими системами.* Відкриття/закриття відсіку для вантажу, включення/виключення сигналізації, взаємодія з інтерфейсом користувача тощо.

— *Дані для оператора та хмарних сервісів.* Інформація про стан робота, його місцезнаходження, маршрут, виконання завдання тощо.

Вхідні сигнали обробляються різними компонентами системи керування:

— *Блок сенсорів* збирає та попередньо обробляє дані з сенсорів.

— *Блок навігації та локалізації* визначає положення робота та будує карту середовища.

— *Блок уникнення перешкод* виявляє та класифікує перешкоди, планує шляхи обходу.

— *Блок керування рухом* приймає рішення щодо руху та поведінки робота на основі даних з інших блоків та інформації про завдання.

На основі оброблених даних блок керування рухом формує вихідні сигнали, які передаються на двигуни та інші системи робота.

Приклад:

1. **Вхід:** LiDAR виявляє перешкоду на шляху робота.
2. **Обробка:** Блок уникнення перешкод класифікує перешкоду та розраховує шлях обходу.
3. **Вихід:** Блок управління рухом передає команду двигунам змінити напрямок руху та обійти перешкоду.

Схема на рис. 3.2. ілюструє функціональну взаємодію основних компонентів системи керування роботом-кур'єром:

1. *Блок управління рухом.* Центральний елемент системи, який приймає рішення щодо руху та поведінки робота. Він отримує дані про положення та карту від блоку навігації, дані з сенсорів, а також команди від оператора та оновлення через блок зв'язку. На основі цієї інформації

блок управління формує команди для двигунів та інших систем робота, а також передає дані про стан та телеметрію оператору.

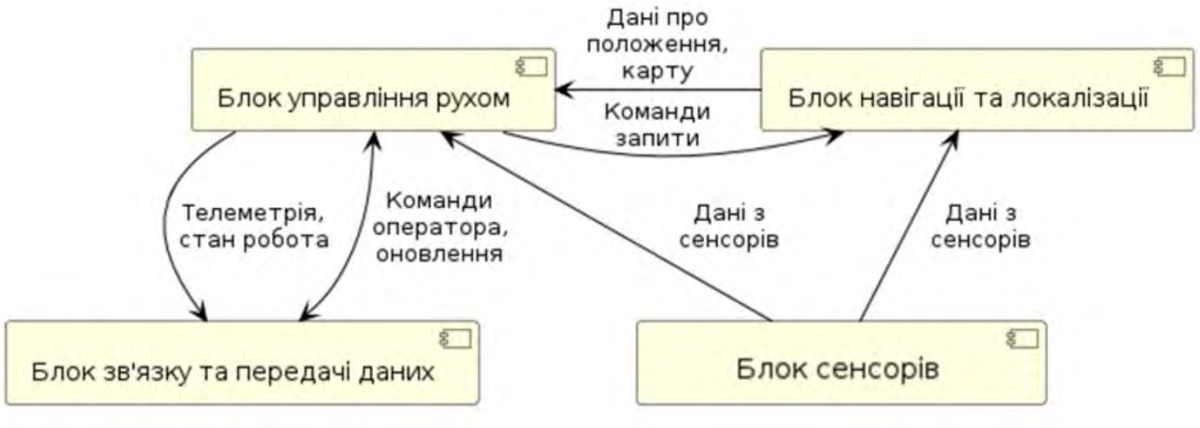

Рис. 3.2 – Схема функціональної взаємодії основних компонентів

2. *Блок навігації та локалізації.* Відповідає за визначення місцезнаходження робота та побудову карти навколишнього середовища. Отримує дані з сенсорів та обробляє їх за допомогою алгоритмів SLAM або інших методів. Надає блоку управління рухом інформацію про поточне положення робота та карту.
3. *Блок сенсорів та датчиків.* Містить різноманітні сенсори (LiDAR, камери, ультразвукові сенсори, GPS, IMU), які збирають дані про навколишнє середовище та стан робота. Передає ці дані блоку навігації та блоку управління рухом.
4. *Блок зв'язку та передачі даних.* Забезпечує обмін даними між роботом та зовнішнім світом. Отримує команди від оператора та оновлення програмного забезпечення, а також передає телеметрію та дані про стан робота.

Взаємодія зазначених компонентів системи відбувається так:

— *Блок управління рухом* надсилає команди та запити до *блоку навігації*, отримуючи у відповідь дані про положення та карту.

— *Блок сенсорів* передає дані з сенсорів як *блоку навігації*, так і *блоку управління рухом.*

— *Блок зв'язку* обмінюється інформацією з *блоком управління рухом*, отримуючи команди та оновлення, а також передаючи дані про стан робота.

Ця схема демонструє основні інформаційні потоки в системі керування роботом-кур'єром та взаємодію між ключовими компонентами.

Висновки до розділу 3

Система керування роботом-кур’єром складається з множини підсистем, кожна з яких відповідає за певний аспект функціонування робота.

У розділі наведено кінематичну модель робота-кур'єра, яка описує його рух у просторі за припущень, що робот рухається пласкою поверхнею, ковзання коліс відсутнє, робота оснащено диференціальним приводом, а також динамічну модель робота-кур'єра, яка описує взаємозв'язок між силами, що діють на робота, та його рухом.

Розглянуто основні компоненти моделей системи навігації та локалізації робота-кур'єра й системи уникнення перешкод, вимоги до зазначених моделей та шляхи їх вдосконалення.

Виявлено взаємозв'язок вхідних та вихідних сигналів системи керування роботом-кур'єром, вивчено функціональну взаємодію основних компонентів системи.

4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-КУР'ЄРОМ

Моделювання роботи системи керування роботом-кур’єром передбачає комплексний підхід до розв’язання задач, пов'язаних з вибором компонентів та оптимізацією їх роботи. Це забезпечує ефективне функціонування робота в реальних умовах.

Моделювання роботи системи керування роботом-кур’єром передбачає розв’язання наступних задач:

- аналіз початкових даних (характеристики вантажу, вимоги до функціональності робота;
- створення 3D-моделі робота;
- моделювання процесу навантаження робота;
- вибір електродвигунів;
- вибір акумуляторів.

4.1. Вихідні дані та вимоги до робота-кур'єра

Характеристики вантажу:

- *Маса:* 5 кг (враховуючи середню вагу замовлень з ресторанів та магазинів).
- *Габаритні розміри:* 30x20x15 см (для розміщення типових пакетів та коробок з продуктами).
- *Тип вантажу:* Різноманітні товари, включаючи продукти харчування, готові страви, невеликі посилки тощо.
- *Умови зберігання:* Забезпечення збереження вантажу під час транспортування (захист від погодних умов, ударів тощо).

Вимоги до робота:

- *Швидкість руху:*

- *Мінімальна:* 4 км/год (для забезпечення своєчасної доставки).
- *Максимальна:* 10 км/год (для безпечного руху у міських умовах).

– *Дальність ходу на одному заряді:* 30 км (для покриття типових маршрутів доставки у межах міста).

– *Місткість акумулятора:* Розрахунок ємності акумулятора, виходячи з дальності ходу та споживання енергії компонентами робота.

– *Час зарядки:* Не більше 4 годин (для швидкого відновлення працездатності).

– *Навігація та локалізація:*

- Використання GPS, інерційних перетворювачі, камер та інших сенсорів для точної навігації та визначення місцезнаходження.
- Можливість створення та оновлення карт місцевості.
- Адаптація до змін умов руху (дорожні роботи, перешкоди тощо).

– *Уникнення перешкод:*

- Виявлення та класифікація перешкод (пішоходи, транспортні засоби, тварини тощо).
- Алгоритми безпечного та ефективного обходу перешкод.
- Забезпечення безпеки руху для оточуючих.

– *Зв'язок:*

- Надійний зв'язок з оператором (Wi-Fi, 4G).
- Можливість віддаленого керування та моніторингу.
- Передача даних про стан робота та вантажу.

– *Безпека:*

- Захист від несанкціонованого доступу до вантажу.
- Системи аварійного гальмування та оповіщення.

- Захист від вандалізму та крадіжок.

– *Інші вимоги:*

- Стійкість до погодних умов (дощ, сніг, спека).
- Можливість руху по різних типах покриття (асфальт, тротуарна плитка, бруківка).
- Простота обслуговування та ремонту.
- Привабливий та ергономічний дизайн.

Враховуючи ці вихідні дані та вимоги, можна розробити ефективну та безпечну систему керування роботом-кур'єром, адаптовану до умов міського середовища в Україні.

4.2. Моделювання процесу навантаження робота

Основна мета моделювання навантаження робота – визначення максимально можливої маси вантажу, що доставляється. Розрахунок відбувається після створення складання об’ємної моделі робота у застосунку SolidWORKS 2020. В даному випадку 3D модель робота має у своєму складі: корпус та кришку виготовлені з пластику Nylon 101, антену з пластику ABS, 4 стандартні двигуни, 4 колеса, що складаються з покришок виготовлених з нейлону 6/10 та корпусу з сталі холоднотянутої.

Моделювання починається з підключення додаткових інструментів, для цього у налаштування обираємо «Додавання» та обираємо SOLIDWORKS Simulation (рис. 4.1).

Заходимо у вкладку Simulation та додаємо нове дослідження рис. 4.2.

Для моделювання навантаження нам потрібен буде статичний аналіз рис. 4.3. Статичний аналіз містить в собі дослідження внутрішніх напружень, переміщень елементів під дією навантажень та деформації елементів конструкції, що моделюється [27].

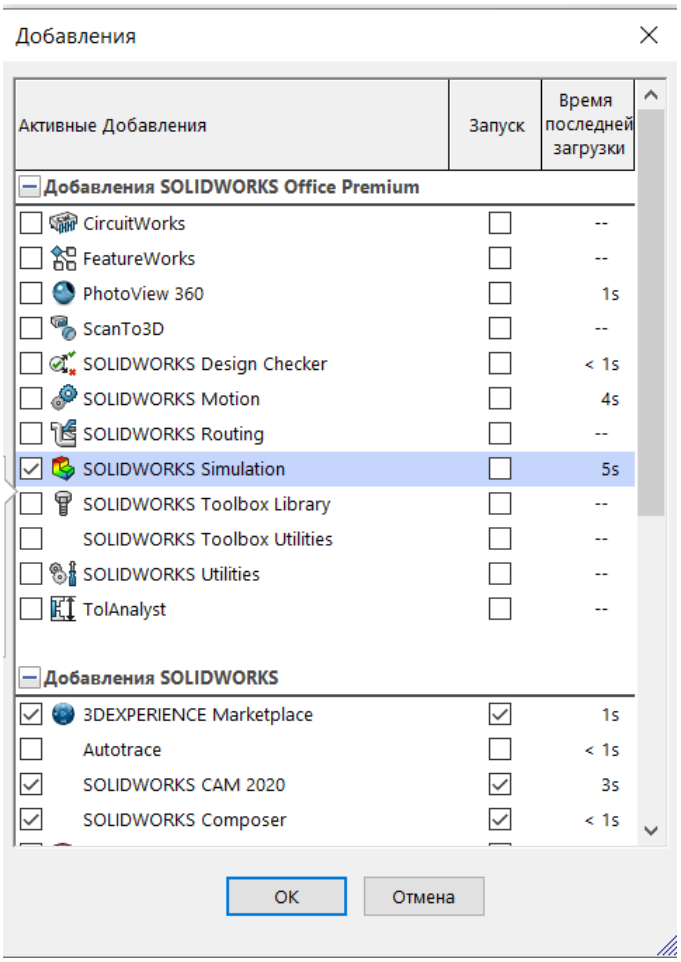

Рис. 4.1 – Додавання додаткового пакету інструментів для моделювання

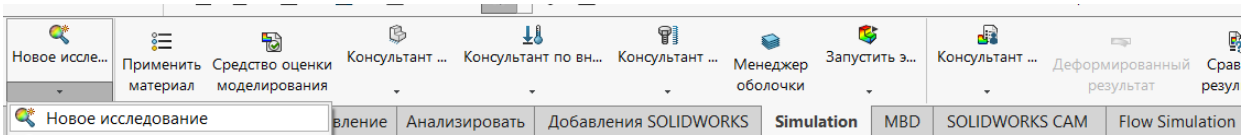

Рис. 4.2 – Створення нового дослідження

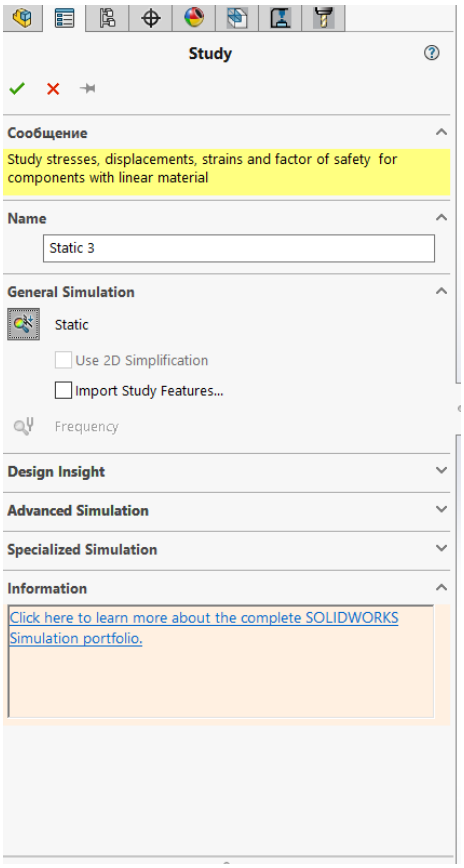

Рис. 4.3 – Створення статичного аналізу

Далі потрібно перевірити чи всі деталі мають матеріали, для цього у пункті Parts (рис. 4.4). Якщо матеріали не зазначено, то додаємо їх вручну, через ПКМ на деталь і пункт «Застосувати/Редагувати матеріал».

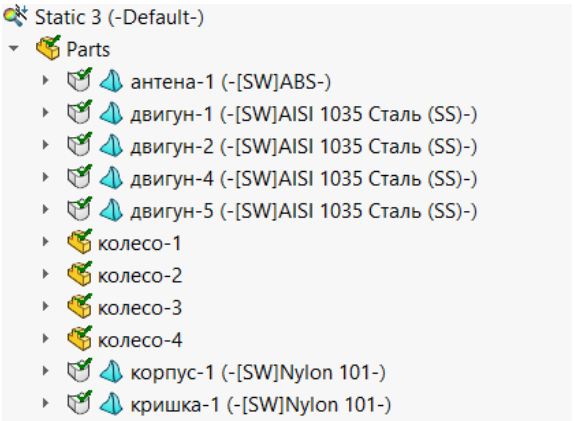

Рис. 4.4 – Перевірка наявності матеріалів у деталях

Далі треба вказати кріплення деталей, оскільки робот у нас їздить, то він має підшипники на колесах, тому маємо вказати це кріплення, для цього натискаємо ПКМ на Fixtures -> Bearing Fixture рис. 4.5. Обираємо 4 колеса.

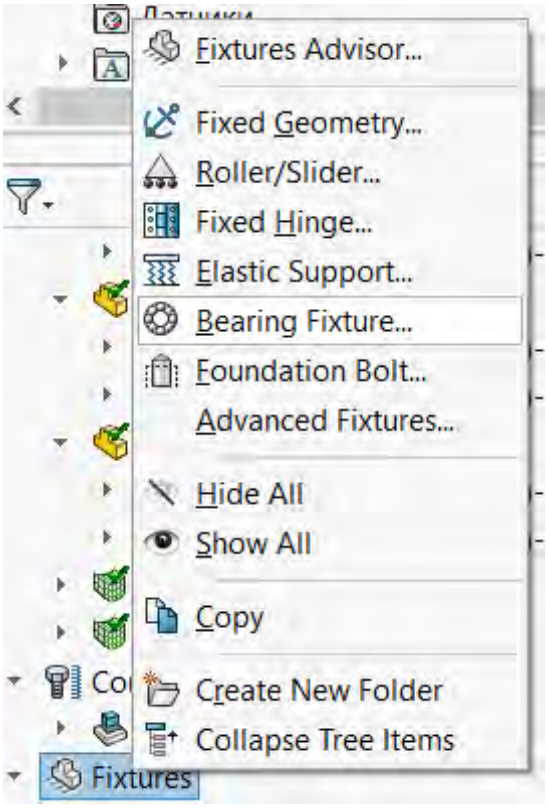

Рис. 4.5 – Створення підшипникових кріплень

Тепер вказуємо які сили діють на збірку. В даному випадку на робота діють сила гравітації та сила тиску вантажу. Для гравітації беремо 9,81 м/с^2, для тиску вантажу розміром 30 см х 20 см х 15 см та масою 5 кг розраховуємо силу дії за формулою:

$$F = m * g = 5 * 9{,}81 = 49{,}05 \text{ Н} . \quad (4.1)$$

Для завдання сили тиску обираємо внутрішню поверхню корпусу, на якій попередньо вирізаємо проєкцію вантажу розміром 30 см х 20 см рис. 4.6.

Наступний етап – створення сітки (рис. 4.7) та запускаємо розрахунок моделі через ПКМ Static -> Run.

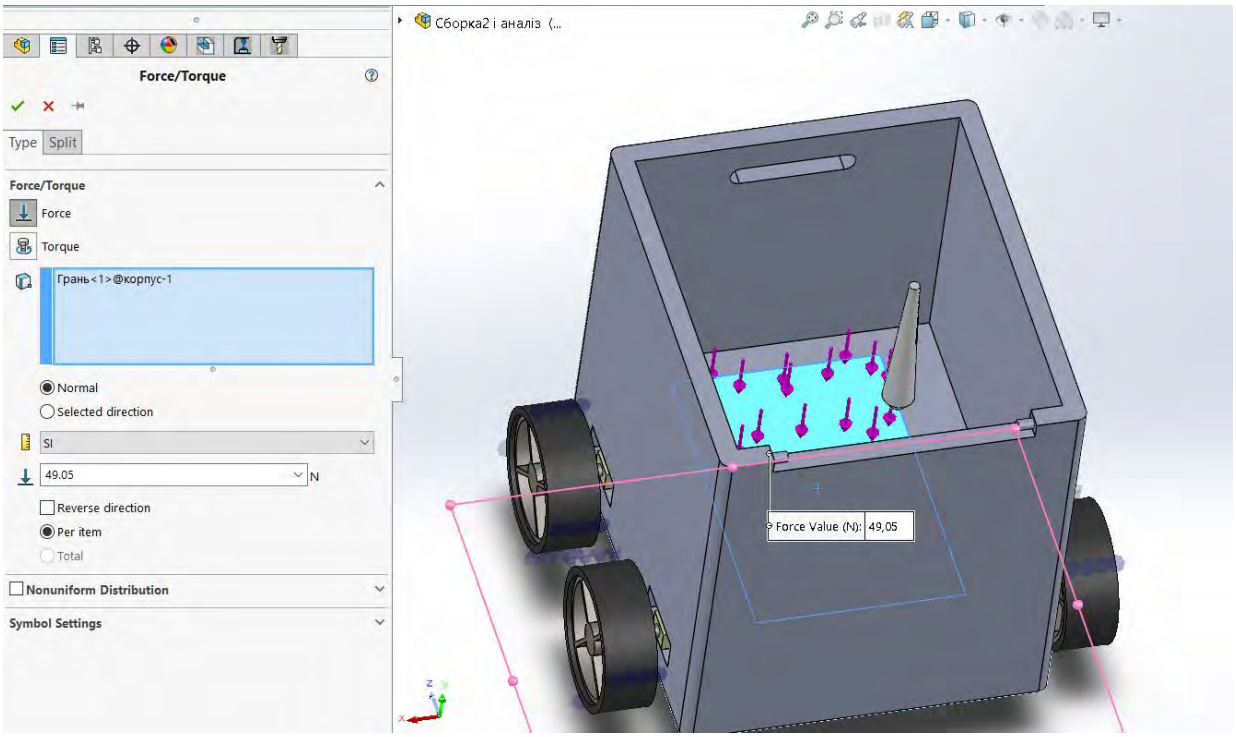

Рис. 4.6 – Створення сили тиску вантажу

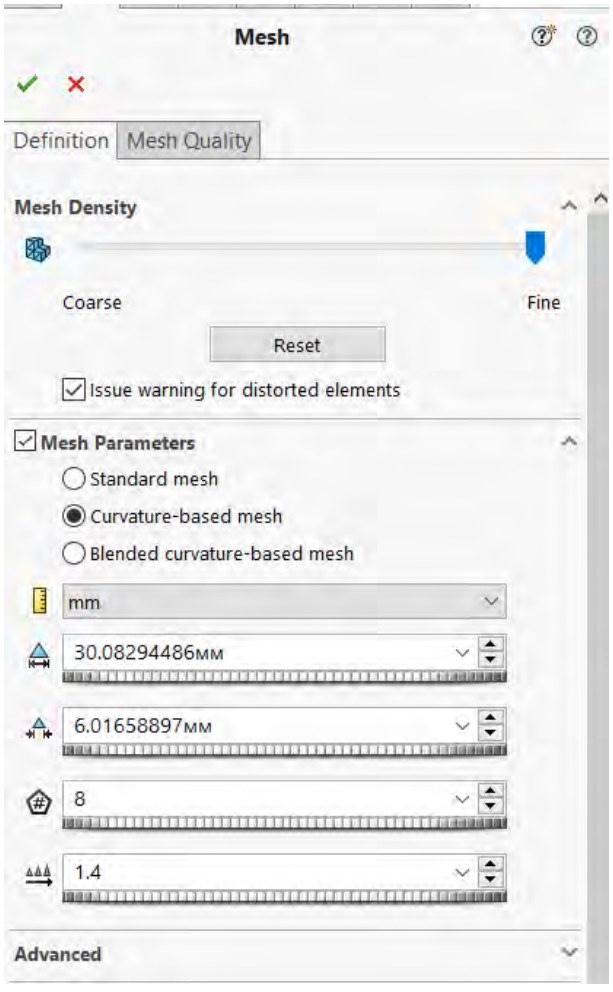

Рис. 4.7 – Створення сітки

В результаті отримаємо три епюри:

Епюра «Напруження» ілюструє розподіл внутрішніх напружень в конструкції (Рис. 4.8).

Епюра «Переміщення» відображає зміну положення кожної точки конструкції по відношенню до початкового стану під дією зовнішніх навантажень (Рис. 4.9).

Епюра «Деформація» показує зміну форми і розмірів елементарних осередків моделі конструкції по відношенню до ненавантаженого стану (Рис. 4.10).

Кожна епюра містить кольорову відлікову шкалу із зазначенням величини змін в конструкції відповідно до кольору ділянки.

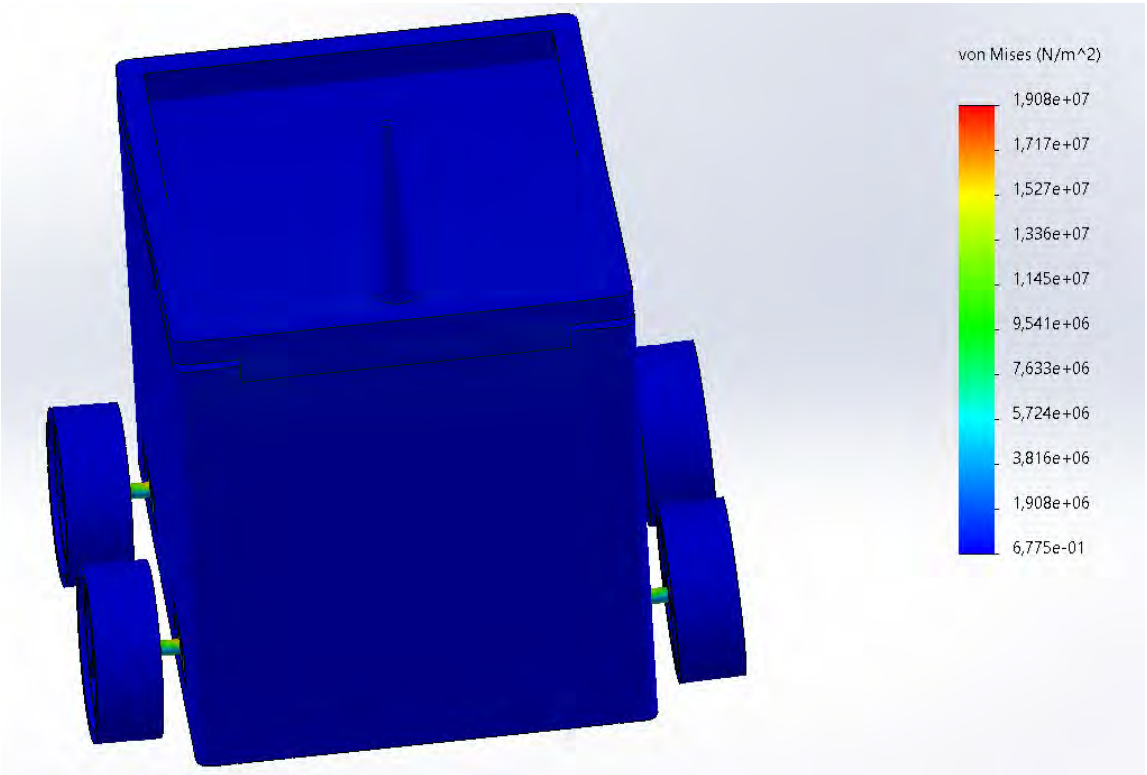

Рис. 4.8 – Епюра «Напруження»

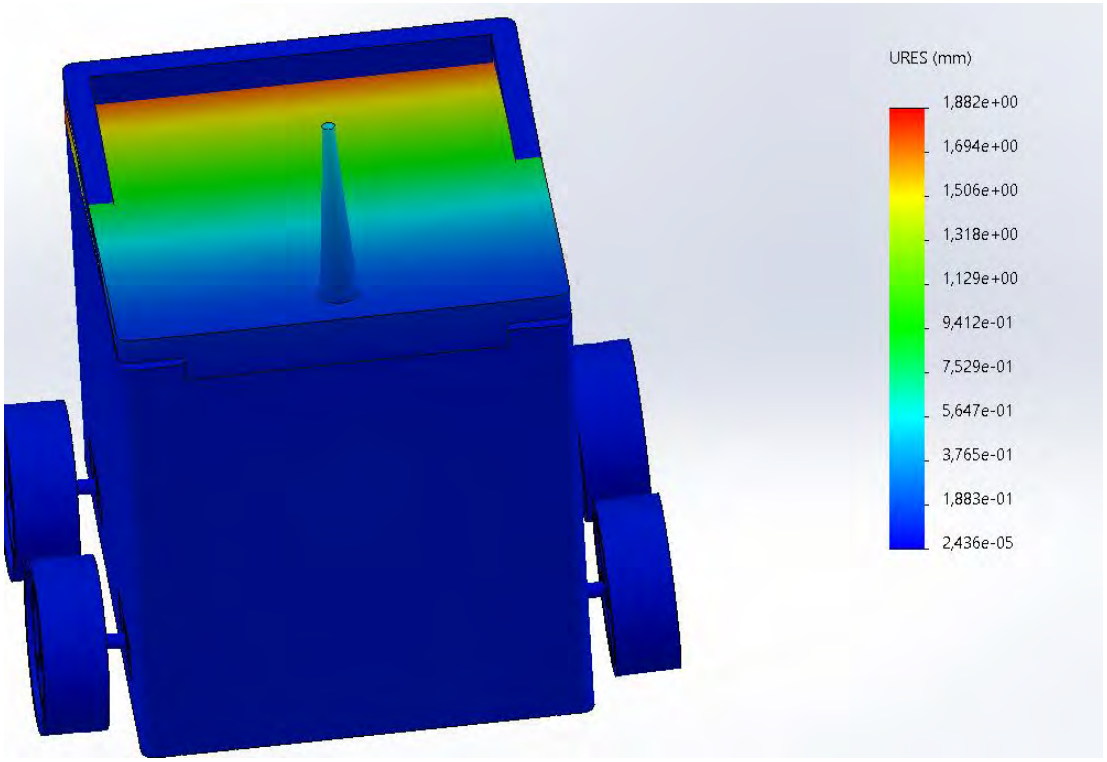

Рис. 4.9 – Епюра «Переміщення»

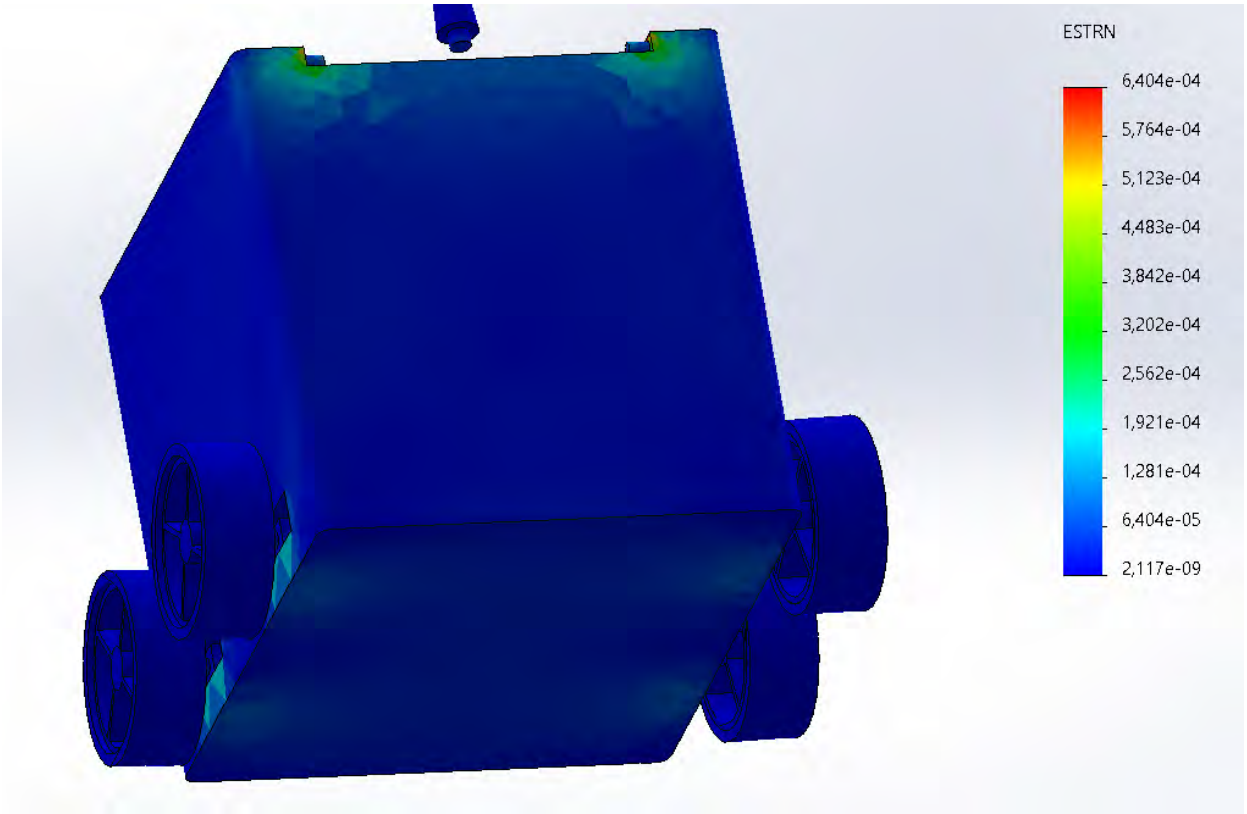

Рис. 4.10 – Епюра «Деформація»

Моделювання показує, що обрана конструкція робота-кур'єра здатна витримувати навантаження 5 кг без значних деформацій або пошкоджень. При

моделюванні враховується тиск на кришку, проте, оскільки ми розглядаємо моделювання для визначення двигунів і підбору матеріалів, значного впливу на кінцевий результат це не має. Тиск іде безпосередньо на робота, і в даному випадку деформацією кришки можна знехтувати.

Якщо корпус і кришка будуть виготовлені з пластмаси (nylon 101), двигуни стандартні сталеві, антена з ABS, а колеса зі сталі холоднотягнутої (покришка з нейлону 6/10), то робот масою 26,7 кг витримує вантаж 5 кг розміром 20 см х 30 см. Проте, необхідно звернути увагу на зони з високими напруженнями (червоного кольору) і переміщеннями для покращення міцності та надійності конструкції.

4.3. Вибір електродвигунів

Електродвигуни N20 DC мають наступні характеристики [28]:

- Номінальна напруга: 6V;
- Номінальна швидкість: 300 об/хв;
- Номінальний момент: 0.1 Нм;
- Споживана потужність: приблизно 1.5W кожен.

Потрібно визначити, чи здатні ці двигуни забезпечити необхідну швидкість та потужність для роботи робота-кур'єра.

Розрахунок потужності. Загальна маса робота разом з вантажем становить:

$$M = 26.7\text{кг} + 5\text{кг} = 31.7\text{кг}. \quad (4.2)$$

Припустимо, що робот рухається зі швидкістю 4 км/год (що еквівалентно 1.11 м/с). Необхідна потужність для подолання тертя та інерції може бути приблизно оцінена за формулою:

$$P = F \cdot v, \quad (4.3)$$

де F - сила тертя, v- швидкість.

Сила тертя може бути оцінена за формулою:

$$F = \mu \cdot M \cdot g, \quad (4.4)$$

де μ - коефіцієнт тертя (припустимо 0.05 для рівної поверхні), g - прискорення вільного падіння (9.81 м/с^2).

У досліджуваному випадку отримуємо

$$F = 0.05 \cdot 31.7 \text{ кг} \cdot 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с2}} = 15.57 \text{ Н}. \quad (4.5)$$

Тепер розрахуємо потужність:

$$P = 15.57\text{Н} \cdot 1.11 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 17.28\text{Вт}. \quad (4.6)$$

Це означає, що сумарна потужність чотирьох двигунів повинна бути не менше 17.28 Вт. Оскільки кожен N20 DC мотор має потужність 1.5 Вт, сумарна потужність чотирьох двигунів буде:

$$4 \cdot 1.5\text{Вт} = 6\text{Вт}, \quad (4.7)$$

цього недостатньо, щоб забезпечити необхідну потужність.

Вибір нових двигунів. Оскільки потужність наявних двигунів недостатня, виберемо нові двигуни, які відповідають вимогам. Розглянемо двигуни з більшою потужністю, наприклад, Pololu 25D DC Motors (12V, 400 об/хв, 1.4 A) [29].

Характеристики:

- Номінальна напруга: 12V;
- Номінальна швидкість: 400 об/хв.;
- Номінальний момент: 0.4 Нм;
- Споживана потужність: 16.8 Вт кожен.

Сумарна потужність чотирьох двигунів:

$$4 \cdot 16.8\text{Вт} = 67.2\text{Вт}. \quad (4.8)$$

Це більше, ніж необхідні 17.28 Вт, тому ці двигуни підходять.

Розрахунок відстані. Для розрахунку відстані, яку може подолати робот з наявними акумуляторами, скористаємося наступною формулою:

$$E = C \cdot V, \quad (4.9)$$

де E – загальна енергія батарей, C – ємність однієї батареї, V – напруга.

Батареї Li-ion 18650 мають ємність 2500 мА·год та напругу 3.7V.

$$E = 4 \cdot 2500 \frac{\text{мА}}{\text{год}} \cdot 3.7\text{В} = 37000 \frac{\text{мА}}{\text{год}}. \quad (4.10)$$

$$\text{В} = 37 \frac{\text{Вт}}{\text{год}}. \quad (4.11)$$

Споживана потужність системи (враховуючи нові двигуни та інші компоненти):

$P\text{система} = 4 \cdot 16.8\text{Вт} + P\text{інших компонентів}$

Припустимо, що інші компоненти споживають 10 Вт:

$P\text{система} = 67.2\text{Вт} + 10\text{Вт} = 77.2\text{Вт}$

Тепер розрахуємо час роботи системи:

$$t = \frac{E}{P} = \frac{37}{77} \approx 0.48\text{год} = 28.8. \quad (4.12)$$

Швидкість робота - 4 км/год, тому відстань буде:

$$d = v \cdot t = 4 \frac{\text{км}}{\text{год}} \cdot 0.48\text{год} \approx 1.92\text{км}. \quad (4.13)$$

Щоб робот-кур'єр міг проїхати хоча б 20 км, необхідно збільшити ємність акумуляторів або зменшити енергоспоживання системи.

4.4. Вибір акумуляторів

1. *Збільшення ємності акумуляторів:*
   - Використання більш потужних акумуляторів.
   - Додавання додаткових акумуляторів.
2. *Зменшення енергоспоживання:*
   - Використання більш енергоефективних компонентів.
   - Оптимізація алгоритмів навігації для зменшення енергоспоживання.

Розрахунок для збільшення ємності акумуляторів

Припустимо, що ми залишаємо енергоспоживання системи без змін і збільшуємо ємність акумуляторів. Щоб визначити необхідну ємність, використаємо такі розрахунки:

1. *Визначення необхідної енергії:*

Для подолання 20 км при швидкості 4 км/год робот буде працювати:

$$t = \frac{4\frac{\text{км}}{\text{год}}}{20\text{км}} = 5\text{год}. \quad (4.14)$$

Сумарна потужність системи (з урахуванням нових двигунів та інших компонентів):

Рсистема=77.2Вт

Необхідна енергія для роботи протягом 5 годин:

$$E\text{необхідна} = P\text{система} \cdot t = 77.2\text{Вт} \cdot 5\text{год} = 386\ \frac{\text{Вт}}{\text{год}}. \quad (4.15)$$

2. *Розрахунок кількості акумуляторів:*

Ємність одного акумулятора 18650 становить 3.7 В * 2.5 А·год = 9.25 Вт·год.

Кількість акумуляторів:

$$N = \frac{E\text{необхідна}}{E\text{одного акумулятора}} = \frac{386\frac{\text{Вт}}{\text{год}}}{9.25\frac{\text{Вт}}{\text{год}}} \approx 42. \quad (4.16)$$

Використання більш потужних акумуляторів

Замість збільшення кількості стандартних акумуляторів можна використовувати більш потужні акумулятори, наприклад, Li-ion акумулятори з ємністю 5000 мА·год (18.5 Вт·год)[30]. В такому випадку необхідна кількість акумуляторів буде меншою:

$$N = \frac{386\frac{\text{Вт}}{\text{год}}}{18.5\frac{\text{Вт}}{\text{год}}} \approx 21. \quad (4.17)$$

Висновки до розділу 4

Ефективне функціонування робота-кур’єра за реальних умов забезпечується застосуванням комплексного підходу до розв’язання задач, пов'язаних з вибором його компонентів та оптимізацією їх роботи.

Проведене моделювання процесу навантаження робота на підґрунті створеної спрощеної 3D-моделі.

За результатами розрахунків потужності двигунів, енергії та ємності акумуляторів обґрунтовано вибір відповідних складових.

ВИСНОВКИ

Головний зміст отриманих у роботі результатів окреслюється наступним.

1. Узагальнено відомості про сучасний стан систем керування роботами-кур'єрами; вимоги, що висуваються до таких систем; коло задач, вирішуваних роботами-кур’єрами; технології навігації, що сприяють ефективності автономної доставки. Здійснено порівняльний аналіз існуючих рішень.

2. Запропоновано структурну схему системи керування роботом-кур'єром, що ґрунтується на взаємодії між блоками керування, сенсорів, зв'язку та передачі даних, живлення та виконавчою системою. Зазначену структуру побудовано на підґрунті мікроконтролеру ATmel328P-PU, мікрокомп’ютера Raspberry Pi 4, та 32GB microSD карти.

3. Розглянуто кінематичну та динамічну моделі руху робота-кур'єра, основні компоненти моделей системи навігації та локалізації робота, а також взаємозв'язок вхідних і вихідних сигналів системи керування роботом.

4. Здійснено моделювання процесу навантаження робота на підґрунті спрощеної 3D моделі. Обґрунтовано вибір двигунів та акумуляторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. What does SLAM stand for in cybersecurity? [Online]. Available: https://yourtechteam.com/blog/slam-cyber-security/
2. Starship Technologies - Starship Robot. [Online]. Available: https://www.wevolver.com/specs/starship-technologies-starship-robot
3. Meet Scout [Online]. Available:

   https://www.aboutamazon.com/news/transportation/meet-scout
4. Amazon is working with communities to build the future of Scout [Online]. Available: https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/amazon-is-working-with-communities-to-build-the-future-of-scout
5. Nuro gets a leg up from arm in launching its third-generation delivery robot. [Online]. Available: https://www.theverge.com/2024/2/22/24079434/nuro-robot-delivery-arm-power-efficiency-range
6. Kiwi's food delivery bots are rolling out to 12 more colleges [Online]. Available: https://techcrunch.com/2019/04/25/kiwis-food-delivery-bots-are-rolling-out-to-12-new-colleges/
7. www.kiwibot.com [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.kiwibot.com/kiwibot-u-program
8. Ющенко, О. С. Робототехніка: сучасний стан та перспективи розвитку. Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", 2(64), 45-52, 2020.
9. Albagul, Abdulgani & Martono, Wahyudi & Muhida, Riza. (2005). Dynamic Modelling and Adaptive Traction Control for Mobile Robots. DOI: 10.5772/4638.
10. Michael Beetz, Towards Comprehensive Computational Models for Plan-Based Control of Autonomous Robots // Lecture Notes in Computer Science, 2605, 514-527, 2005. DOI: 10.1007/978-3-540-32254-2_29.

11. Калінін В. М. Автономна навігація мобільних роботів: методи та алгоритми. Наукові вісті НТУУ "КПІ", 4(122), 87-95, 2019.

12. A. Filipescu, & Viorel Mînzu, & Bogdan Dumitrascu, & Adriana Filipescu, & Eugenia Minca, “Trajectory-tracking and discrete-time sliding-mode control of wheeled mobile robots”, in *2011 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA,* 2011. DOI: 10.1109/ICINFA.2011.5948958.

13. Бондаренко М. Ф. Системи керування роботами: основи та застосування. Київ: Видавництво "Наукова думка", 2018.

14. Ковальчук П. І. Математичне моделювання роботів-маніпуляторів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017.

15. Dragomir, F.; Mincă, E.; Dragomir, O.E.; Filipescu, A. Modelling and Control of Mechatronics Lines Served by Complex Autonomous Systems. *Sensors* 2019, *19*, 3266. https://doi.org/10.3390/s19153266

16. Мельник В. С. Інтелектуальні системи керування роботами. Харків: Видавництво Харківського національного університету радіоелектроніки, 2016.

17. Антонов В. І. Сучасні тенденції розвитку робототехніки. Вісник Національної академії наук України, 10, 34-41, 2015.

18. Кузьменко О. В. Застосування роботів у логістиці та доставці. Науковий вісник Ужгородського національного університету, 25(1), 78-84, 2014.

19. Іванов А. П. Роботи-кур'єри: сучасний стан та перспективи. Вісник Національного транспортного університету, 32, 56-63, 2013.

20. Петренко С. М. Системи технічного зору для роботів. Київ: Видавництво "Техніка", 2012.

21. Сидоренко В. О. Датчики для мобільних роботів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011.

22. Гаврилюк І. В. Алгоритми SLAM для автономної навігації роботів. Наукові праці Донецького національного технічного університету, 15(2), 123-130, 2010.

23. Коваленко А. І. Штучний інтелект у робототехніці. Київ: Видавництво "Академперіодика", 2009.

24. Ткаченко В. М. Системи уникнення перешкод для мобільних роботів. Наукові вісті НТУУ "КПІ", 3(61), 78-85, 2008.

25. Шевченко О. М. Безпека роботів-кур'єрів: проблеми та рішення. Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 598, 98-105, 2007.

26. Павленко І. О. Економічна ефективність використання роботів-кур'єрів. Вісник економіки транспорту і промисловості, 23, 112-118, 2006.

27. Цифрове моделювання об'єктів та динамічних систем. Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Укладач: О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 25-32 с.

28. N20 DC motor with metal gearbox (6V/100RPM/1:100). Online]. Available: https://nettigo.eu/products/n20-dc-motor-with-metal-gearbox-6v-100rpm-1-100

29. 25D Metal Gearmotors. [Online]. Available: https://www.pololu.com/category/115/25d-metal-gearmotors

30. BU-501a: Discharge Characteristics of Li-ion [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/article/bu-501a-discharge-characteristics-of-li-ion

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Специфікація надається за запитом до авторів.