

**МІНІСТЕРСТВО О СВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

**Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій**

На правах рукопису

ГРАБЕЦЬ НАЗАР БОРИСОВИЧ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ РОЗРОБКИ
ТА ВИГОТОВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНОГО НАЗЕМНОГО
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

Спеціальність: 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Освітньо-професійна програма Прикладна фізика

Робота на здобуття другого (магістерського) рівня
«Магістерська кваліфікаційна робота»

Науковий керівник:

ГОЛОВІНА НІНА АНАТОЛІЇВНА,

кандидат фізико-математичних наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол № ____

засідання кафедри експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій
від _____ 2025_ р.

Завідувач кафедри

(_____) Галян В.В.

ЛУЦЬК – 2025

АНОТАЦІЯ

Грабець Н.Б. Дослідження технологічних аспектів розробки та виготовлення безпілотного наземного транспортного засобу. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна фізика та наноматеріали». Волинський національний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2025.

Магістерська робота присвячена дослідженню можливостей використання навчальних мобільних робототехнічних платформ (UGV) у системі впровадження концепції STEM та формуванні інженерних компетентностей здобувачів. У роботі представлені теоретичні засади STEM-підходу, проаналізовано сучасні апаратні та програмні засоби створення наземних роботів, визначено вимоги до архітектури навчальної платформи та розроблено власний зразок шасі з мікроконтролерним керуванням. Створено програмне забезпечення, що включає базові модулі керування, обробки команд, комунікації та діагностики, що відображає ключові етапи низькорівневої прошивки в реальних робототехнічних системах.

Встановлено, що робототехніка є одним із найбільш ефективних засобів реалізації інтегрованого та проєктного навчання, оскільки поєднує фундаментальні знання з фізики, математики, електроніки, програмування та інженерного конструювання. Виготовлена модель може бути використана як прототип у інженерії та в освітньому процесі для вивчення основ електроніки, програмування, автоматичного керування та робототехнічних систем. Результати дослідження мають практичне застосування в інженерії, у процесі підготовки здобувачів освіти технічних спеціальностей та в системі реалізації STEM-проєктів.

Ключові слова: STEM-освіта, робототехніка, мобільні платформи UGV, мікроконтролерне програмування, інженерні компетентності.

ANNOTATION

Hrabets N.B. Research into the technological aspects of developing and manufacturing an unmanned ground vehicle. Manuscript.

Master's qualification work of the educational program «Applied Physics and Nanomaterials». Lesya Ukrainka Volyn National University. Lutsk, 2025.

The master's thesis is devoted to the study of the possibilities of using educational mobile robotic platforms (UGV) in the system of implementing the STEM concept and forming engineering competencies of applicants. The work presents the theoretical foundations of the STEM approach, analyzes modern hardware and software tools for creating ground robots, determines the requirements for the architecture of the educational platform and develops its own chassis model with microcontroller control. Software has been created, which includes basic control modules, command processing, communication and diagnostics, which reflects the key stages of low-level firmware in real robotic systems. It has been established that robotics is one of the most effective means of implementing integrated and project-based learning, as it combines fundamental knowledge in physics, mathematics, electronics, programming and engineering design. The manufactured model can be used as a prototype in engineering and in the educational process for studying the basics of electronics, programming, automatic control and robotic systems. The results of the study have practical application in engineering, in the process of training students in technical specialties, and in the system of implementing STEM projects.

Key words: STEM education, robotics, UGV mobile platforms, microcontroller programming, engineering competencies.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. STEM та робототехнічна проєктна діяльність у освітній галузі	9
1.1. Концепція STEM та її роль в інженерній освіті	9
1.2. Робототехніка як інструмент STEM-підходу	13
1.3. Методичні принципи організації проєктної діяльності	16
1.4. Навчальні роботизовані платформи в освітній практиці	22
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. Сучасні засоби, методи та технології розробки наземних роботизованих засобів (UGV)	28
2.1. Класифікація мобільних роботизованих платформ	28
2.2. Апаратні засоби побудови UGV	34
2.3. Програмні засоби керування мобільними роботизованими платформами	38
2.4. Вибір архітектури об'єкта дослідження	44
Висновки до розділу 2	47
РОЗДІЛ 3. Розробка та дослідження навчальної роботизованої платформи	49
3.1. Конструктивно-технологічна розробка	49
3.2. Електронний модуль керування	54
3.3. Програмна реалізація модуля керування і	58
3.4. Інтеграція з зовнішніми системами	64
3.5. Експериментальні дослідження	67
3.6. Аналіз результатів	70
Висновки до розділу 3	73
ВИСНОВКИ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77

ВСТУП

Сучасні трансформації технічної освіти визначають потребу у формуванні таких умов навчання, які забезпечують розвиток інженерного мислення, здатність до практичного застосування теоретичних положень та готовність працювати з реальними технічними системами. Стрімкий розвиток цифрових технологій, робототехніки, автоматизації та мікроконтролерних засобів формує запит на фахівців, які володіють міждисциплінарними компетентностями та здатні інтегрувати знання з фізики, електроніки, програмування, механіки й інженерного проєктування в межах комплексних технологічних задач. У цьому контексті особливого значення набуває STEM-підхід (Science, Technology, Engineering, Mathematics), що став основою сучасної моделі технічної освіти, оскільки поєднує природничі науки й інженерну діяльність у єдине практично-орієнтоване освітнє середовище [1-3].

Актуальність дослідження зумовлена потребою розроблення ефективних методичних і технічних засобів підтримки STEM-освіти, здатних забезпечити інтеграцію теоретичного навчання з реальними практичними завданнями. Одним з найрезультативніших інструментів реалізації STEM-концепції виступає робототехнічна проєктна діяльність, що поєднує моделювання, конструювання, електроніку, програмування, тестування й експериментальні дослідження студентів [4-10]. В освітній практиці різних країн світу спостерігається активне впровадження мобільних роботизованих платформ у процес навчання фізики, мехатроніки, кіберфізичних систем та інженерії, що дає змогу студентам отримувати досвід повного циклу роботи з технічними системами – від проєктування до практичного застосування [11; 15]. В українському освітньому контексті гостро відчувається потреба у сучасних, технологічно доступних навчальних UGV-платформах, які можуть бути інтегровані у навчальні програми для реалізації міждисциплінарних STEM-проєктів і забезпечувати осучаснення лабораторних занять [16-18].

Наукова новизна роботи полягає у створенні комплексної моделі реалізації STEM-підходу на основі навчальної наземної робототехнічної платформи, яка синтезує сучасні апаратно-програмні засоби (CAD/CAM-технології, 3D-друк, програмування мікроконтролерів STM32, силову електроніку, цифрові методи керування приводами) з педагогічними принципами проєктного та практикоорієнтованого навчання фізики. У роботі аргументовано можливість застосування UGV як універсального засобу для інтеграції експериментальних лабораторій з механіки та електрики, побудови курсів із мікроконтролерного програмування, вивчення динаміки руху й алгоритмів керування мобільними роботами. Запропонована платформа дозволяє розширити традиційні форми навчання, забезпечити екосистему для проєктної діяльності студентів та адаптувати інженерні інструменти професійного рівня до освітніх потреб.

Мета дослідження полягає у розробленні й експериментальній апробації навчальної наземної робототехнічної платформи як засобу реалізації STEM-освіти, здатної забезпечити виконання повного інженерного циклу – від створення конструкції та електронного модуля до програмної реалізації керування і дослідження динамічних характеристик руху. Досягнення цієї мети передбачає всебічне вивчення сучасних методів і засобів STEM-навчання, аналіз технологічних підходів до побудови робототехнічних систем (CAD, CAM, 3D-друк, ArduPilot, ROS2, STM32), розроблення апаратної частини платформи, створення та налагодження програмного забезпечення системи керування, проведення експериментальних досліджень роботи платформи та формулювання рекомендацій щодо впровадження отриманих результатів у навчальний процес.

У межах дослідження здійснюється вирішення таких взаємопов'язаних **завдань**:

- проаналізувати сучасні методи і засоби реалізації концепції STEM в технологічній освітній галузі;

- дослідити сучасні технології проєктування мобільних роботизованих систем (CAD, CAM, 3D-друк, мікроконтролери STM32, ROS2, ArduPilot);
- розробити конструкцію навчальної платформи та електронний модуль керування;
- створити та налагодити базове програмне забезпечення системи керування мобільним роботом;
- провести експериментальні дослідження руху платформи та оцінити ефективність алгоритмів керування;
- сформулювати рекомендації щодо впровадження результатів у навчальний процес і STEM-проєкти студентів технічних спеціальностей;

Об'єктом дослідження є процес реалізації STEM-підходу в технічній освіті засобами робототехнічної проєктної діяльності.

Предметом дослідження є методичні, технологічні та апаратно-програмні засоби створення й застосування навчальної наземної робототехнічної платформи як інструмента STEM-орієнтованого навчання фізики та інженерних освітніх компонентів.

Практичне значення роботи та її **наукова новизна** визначається можливістю використання створеної платформи у освітньому процесі закладів вищої освіти і STEM-центрів для формування практичних умінь з фізики, електроніки, мехатроніки, цифрового керування та програмування. Запропонована система може бути використана у лабораторних роботах з механіки, електроприводів, систем автоматичного керування, а також у проєктних заняттях, спрямованих на створення робототехнічних систем.

Результати дослідження представлено на II Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток сучасної науки та освіти» (28 липня 2025 р. м. Житомир) та опубліковано у збірнику матеріалів конференції [22].

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел загальним обсягом 78 сторінок.

РОЗДІЛ 1. STEM ТА РОБОТОТЕХНІЧНА ПРОЄКТНА ДІЯЛЬНІСТЬ У ОСВІТНІЙ ГАЛУЗІ

1.1. Концепція STEM та її роль в інженерній освіті

Сучасні трансформації освітніх систем визначають потребу у формуванні нового типу фахівця, здатного діяти в умовах стрімкого технологічного розвитку, високої інноваційності та міждисциплінарності. Темпи розвитку сучасної інженерії, штучного інтелекту, робототехніки, кіберфізичних систем та автоматизації ставлять перед освітою завдання формувати не просто носія знань, а творця технологічних рішень, здатного інтегрувати різні галузі науки у власну практичну діяльність. У цьому контексті ключовим підходом, який поєднує природничо-наукову, технічну, інженерну й математичну підготовку, стала концепція STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics). Її поширення у світі пов'язане з необхідністю створення освітнього середовища, що забезпечує підготовку майбутніх фахівців до роботи у високотехнологічних сферах, а також формує здатність діяти в умовах технологічних змін, невизначеності та комплексності [1; 2].

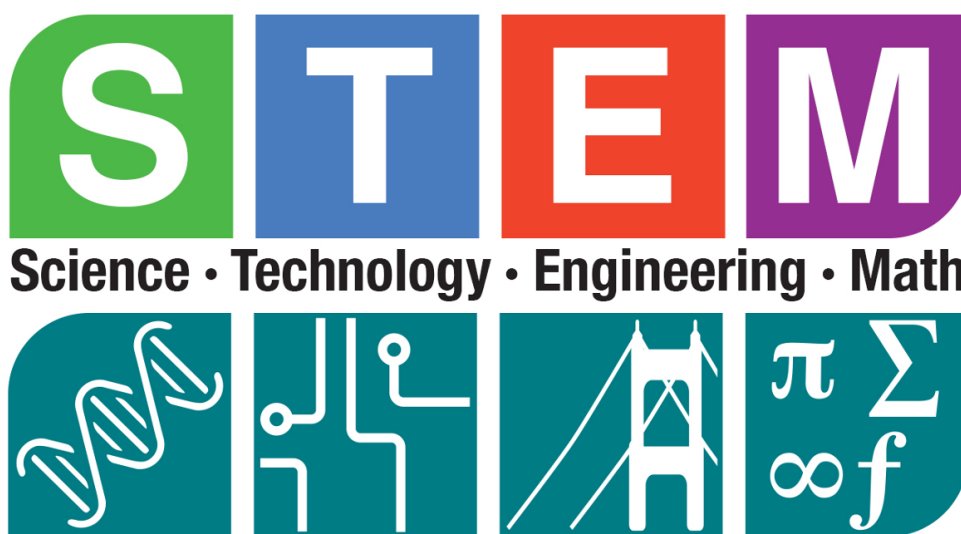


Рис. 1.1. Структурна схема STEM-підходу в інженерній освіті

Поява STEM як концепції наприкінці 1990-х років стала реакцією на серйозні системні виклики, зокрема на дефіцит інженерних кадрів у США, Європі та Азії, а також на зниження зацікавленості молоді в технічних та природничих науках. Аналітичні центри засвідчили, що традиційні моделі навчання, побудовані на фрагментованому викладанні дисциплін, більше не відповідають потребам глобального ринку праці та вимогам науково-технічного прогресу. Інженерні системи XXI століття — автономні роботи, електромобілі, безпілотники, смарт-системи — є міждисциплінарними за своєю природою, і їх створення потребує синтезу фізики, програмування, механіки, електроніки та математичного моделювання. Саме тому STEM став новою освітньою парадигмою, яка навчає не «окремих наук», а способам мислення й інженерної діяльності.

Першочерговою особливістю STEM-підходу є інтеграція змісту різних дисциплін у спільний формат проєктно-орієнтованого навчання. Традиційна освітня модель, у якій фізика, математика, технології та інженерія викладаються як окремі незалежні модулі, призводить до розриву між теорією та її практичним застосуванням. STEM же передбачає формування цілісного бачення технічної проблеми та її комплексного вирішення шляхом поєднання знань із різних галузей. Така інтеграція дозволяє переносити теоретичні знання в реальні ситуації, розвиває здатність до творчого застосування наукових концепцій і сприяє формуванню інженерних компетентностей — системного мислення, вміння створювати технічні рішення, аналізувати їх ефективність та вдосконалювати конструкцію [4; 5].

Важлива роль у STEM відводиться практичній діяльності, що робить його близьким до інженерного способу мислення. STEM-освіта включає проєктування, експериментування, моделювання, тестування, роботу з даними, аналіз результатів і створення прототипів. Завдяки цьому студент не просто вивчає теорію, а й отримує реальний досвід інженерної творчості, працюючи з фізичними моделями, робототехнічними платформами, прототипами та цифровими інструментами. Таке навчання забезпечує активне

конструювання знань і формує розуміння того, як абстрактні теоретичні положення проявляються в роботі реальних технічних систем [6; 7]. З позиції конструктивістських педагогічних теорій, студенти в STEM-середовищі не є пасивними реципієнтами інформації – вони є авторами і розробниками власних рішень.

Сучасні дослідники, серед яких М. Хоні, Г. Пірсон, Г. Швейнгрубер, наголошують на тому, що STEM долає розрив між академічними знаннями та потребами реальної індустрії, а також є платформою для інноваційного розвитку суспільства [2]. Ідеї Сеймура Пейперта, творця конструкціонізму, стали фундаментальними для STEM: він доводив, що учень найкраще засвоює знання, коли створює реальний артефакт – програму, механізм, пристрій, конструкцію – і досліджує його поведінку. Саме таку модель сьогодні втілюють STEM-проекти, у межах яких студенти працюють над конкретними технічними об'єктами, досліджують їх роботу, розробляють моделі та вдосконалюють алгоритми.

Подальший розвиток STEM призвів до формування декількох моделей його реалізації. Однією з найвідоміших є *integrated STEM*, що передбачає комплексне вивчення дисциплін через розв'язання спільного інженерного завдання: фізичні закони досліджуються через створення реального пристрою, математичні моделі – через комп'ютерні симуляції, програмування – через розробку алгоритмів керування. Такий підхід створює середовище, у якому студенти сприймають науку та інженерію як єдину систему, а не як окремі предмети.

Engineering-driven STEM, навпаки, робить у центрі уваги саме інженерну діяльність. У цій моделі навчання структурується навколо процесу створення технічного виробу. Студенти проходять усі етапи життєвого циклу системи: від аналізу проблеми до вибору конструктивних рішень, розроблення електронних модулів, програмування мікроконтролерів, збирання прототипу та його тестування в реальних умовах. Ця модель

широко застосовується під час підготовки робототехніків, розробників кіберфізичних систем та інженерів автоматизації.

Модель project-based STEM робить центральним компонентом навчання командні інженерні проєкти. У такому форматі студенти працюють у командах, планують етапи роботи, розподіляють ролі, шукають технічні рішення та презентують результати. Робототехнічні платформи є ідеальним середовищем для реалізації цього підходу, оскільки вони дозволяють поєднати апаратну та програмну частини, фізику, математику й інженерні інструменти в одному навчальному об'єкті [4; 6].

Особливо значущим STEM є для вивчення фізики. Фізика традиційно сприймається студентами як дисципліна, що складається з абстрактних моделей і математичних описів. Проте її справжня сутність – у дослідженні реальних природних процесів. STEM забезпечує цей необхідний місток між теорією та реальністю. Робота з мобільними роботизованими платформами дозволяє студентам досліджувати механіку руху, закони Ньютона, тертя, роботу електродвигунів, споживання енергії, електричні схеми, магнітні поля, принципи стабілізації руху, а також алгоритми керування. Тобто фізичні моделі стають не просто формулами в зошиті, а частиною реального технічного пристрою. Саме тому STEM виступає засобом реалізації проєктного навчання фізики, у якому студенти не просто «вивчають закони», а досліджують їх через експеримент та інженерну діяльність.

У світових освітніх практиках STEM тісно пов'язаний із PBL (Project-Based Learning) та CDIO (Conceive–Design–Implement–Operate). Модель CDIO є особливо важливою для технічної освіти, оскільки відповідає реальній логіці інженерної діяльності. Студенти не лише вивчають теорію, а й створюють реальні технічні об'єкти, опановують роботу з CAD-системами (SolidWorks, Fusion 360), симуляторами (Gazebo, Webots), мікроконтролерними платформами (STM32, Arduino, Raspberry Pi) і програмними комплексами (ROS2, ArduPilot), що забезпечує формування сучасних професійних компетентностей [7; 9].

В українських закладах освіти STEM активно інтегрується протягом останнього десятиліття. Низка досліджень [21; 22] засвідчує прагнення модернізувати навчальний процес, розширити інженерні програми та впроваджувати робототехнічні проєкти у навчання фізики, інформатики й технічних дисциплін. Однак матеріально-технічні обмеження, відсутність доступних навчальних робототехнічних платформ, брак досвіду роботи з сучасними мікроконтролерами та симуляційним ПЗ створюють бар'єри для широкого впровадження STEM-підходу. У таких умовах створення доступної навчальної наземної платформи UGV є важливим внеском у розвиток інженерної освіти.

Таким чином, концепція STEM виступає ключовою методологічною основою модернізації інженерної освіти, яка забезпечує інтеграцію теорії й практики, сприяє розвитку інженерних компетентностей і створює умови для формування системного мислення. У контексті цієї роботи розроблення навчальної мобільної роботизованої платформи виступає логічним педагогічним і технічним рішенням, яке дозволяє поєднати вивчення фізичних закономірностей з реальними інженерними задачами, формуючи фундамент для підготовки майбутніх фахівців технічних спеціальностей.

1.2. Робототехніка як інструмент STEM-підходу

Робототехніка посідає центральне місце в сучасній STEM-освіті, оскільки вона виступає інтегрувальним ядром, у якому природничі, математичні, інженерні та технологічні знання поєднуються в єдине практично орієнтоване навчальне середовище. На відміну від традиційної системи навчання, де дисципліни функціонують відокремлено, робототехнічні платформи забезпечують умови, у яких фізичні закони, математичні моделі, електронні схеми та алгоритми керування перестають бути абстракцією й перетворюються на конкретні інструменти для створення реальних технічних систем. Саме тому робототехніка є одним із

найефективніших засобів реалізації STEM-педагогіки, яка базується на інтеграції змісту, міждисциплінарності, експериментальному підході та проєктній діяльності [1; 2; 20; 21; 22].

Однією з визначальних рис робототехніки є її здатність моделювати повний цикл інженерної діяльності – від концептуального проєктування та аналізу фізичних процесів до створення прототипу, написання програмного забезпечення, проведення експериментів і вдосконалення конструкції. Цей цикл відповідає логіці сучасної інженерної освіти, у якій знання стають не кінцевою метою, а ресурсом для розв’язання практичних задач. М. Хоні та Г. Швейнгрубер у своїх дослідженнях зазначають, що засвоєння інженерних компетентностей вимагає діяльності, у якій студент не лише читає про технічну систему, а працює з нею, аналізує її поведінку, перевіряє гіпотези й модифікує власні рішення [2]. Робототехніка створює саме такі умови й тому стає незамінним інструментом формування інженерного мислення.

Важливо підкреслити, що робототехнічна діяльність у середовищі STEM завжди є міждисциплінарною. Для побудови навіть базового мобільного робота здобувач має розуміти, як закони класичної механіки визначають динаміку руху, як математичні рівняння описують поведінку системи, як електроніка забезпечує керування двигунами та як алгоритми регуляції впливають на стабільність траєкторії. Це означає, що робототехнічні платформи природно інтегрують знання щонайменше з чотирьох навчальних галузей – фізики, математики, інформатики та інженерії. Така інтеграція відповідає концепції *integrated STEM*, що передбачає вивчення дисциплін не ізольовано, а в єдності, де кожний компонент виконує функцію в межах складної технічної системи [7; 15].

Особливої уваги заслуговує роль робототехніки у викладанні фізики, адже інженерні платформи дозволяють перевести абстрактні закономірності в експериментальний вимір. Студент може не просто читати про силу тяги або момент інерції – він вимірює реальні параметри двигунів, аналізує залежність швидкості від прикладеної напруги, будує графіки прискорення, оцінює

ефект тертя або перевантаження двигуна. Це створює можливість виконання повноцінних фізичних експериментів у межах робототехнічного середовища та формує причинно-наслідкове розуміння фізичних процесів. Тому робототехніка є не лише інженерним інструментом, а й надзвичайно ефективним засобом реалізації проєктного навчання у фізиці, оскільки дозволяє поєднати теорію, експеримент і математичний аналіз у межах одного вірогідного технічного об'єкта.

Робототехніка також забезпечує можливість роботи з реальними технічними об'єктами, що є важливим для формування навичок сучасного інженера. Мобільні платформи (зокрема UGV) потребують застосування сучасних технологій – мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів, драйверів двигунів та контролерів приводів, алгоритмів керування ШІМ-сигналами, цифрової обробки сенсорної інформації, проектування електронних схем та друкованих плат, технологій 3D-друку та обробки даталей на станках з ЧПУ, CAD-моделювання та системи швидкого прототипування. Використання цих технологій у навчальному процесі забезпечує актуальність підготовки, формує практичні навички роботи з комплексними технічними системами та сприяє розвитку цифрової інженерної культури, яка сьогодні є обов'язковою складовою професійної компетентності.

Особливо вагомими є робототехнічні проєкти у форматі engineering-driven STEM, коли студент проходить повний цикл створення технічного виробу. Така діяльність включає обґрунтування конструктивних рішень, вибір компонентної бази, проектування електронної схеми та друкованої плати, налаштування мікроконтролера, розробку та відлагодження програмного алгоритму, тестування платформи та проведення експериментальних досліджень. Важливість цього формату полягає у тому, що він моделює реальні виробничі процеси, а студент отримує досвід, близький до професійного середовища. У багатьох університетах Європи та США цей підхід є базовим у підготовці фахівців з робототехніки, кіберфізичних систем та мехатроніки.

Проектний компонент робототехнічної діяльності також відіграє критичну роль у розвитку соціальних компетентностей, які у STEM-освіті вважаються так само важливими, як і технічні. Робототехнічний проєкт неможливо виконати без командної взаємодії, розподілу ролей, проєктного менеджменту, комунікації та презентації результатів. Таким чином, студент не лише здобуває інженерні навички, а й формує здатність працювати у команді, аргументувати свій вибір, вирішувати конфлікти та адаптуватися до змін середовища – що є базовими вимогами до сучасного інженера у високотехнологічних галузях.

Окремо слід відзначити роль робототехніки у формуванні дослідницьких компетентностей. Робототехнічні платформи дозволяють виконувати експериментальні дослідження, аналізувати дані, оцінювати похибки вимірювань, перевіряти математичні моделі та будувати висновки на основі кількісних результатів. Це створює унікальні можливості для розвитку навичок наукового мислення, що є важливою складовою інженерної підготовки. Такий формат роботи сприяє розумінню студентом того, що інженерна діяльність нерозривно пов'язана з аналізом, верифікацією та експериментальним підтвердженням гіпотез, що відповідає як STEM-філософії, так і загальним науковим підходам.

Сучасні робототехнічні платформи забезпечують можливість працювати не лише з апаратною частиною, але й з програмними системами високого рівня. Використання ROS2, ArduPilot або спеціалізованих фреймворків створює умови, у яких студент має працювати з алгоритмами навігації, картографії, обробки сигналів сенсорів, автономних систем прийняття рішень та комунікаційних протоколів. Це переводить навчання на рівень, який наближує здобувача до роботи з кіберфізичними системами промислового класу. Водночас студенти отримують розуміння взаємодії низькорівневого мікроконтролерного коду з високорівневими алгоритмами керування, що є одним із ключових елементів сучасної інженерної освіти.

Робототехнічні навчальні платформи, які використовуються в межах STEM-проектів, дозволяють забезпечити гнучкість і масштабованість навчального процесу. Студент може починати з найпростіших задач — керування швидкістю двигуна або вимірювання відстані — і поступово переходити до складніших завдань, таких як реалізація диференціального керування, розробка ПД-регуляторів, створення автономної системи навігації або підключення зовнішніх модулів. Такий підхід відповідає принципам «спірального навчання», у межах якого складність завдань зростає поступово, а знання доповнюються шляхом практичного застосування.

У підсумку, робототехніка в STEM-освіті є не просто інструментом, а педагогічно та технологічно комплексним середовищем, яке формує в студента здатність думати як інженер, аналізувати фізичні й математичні закономірності, створювати технічні системи та удосконалювати їх на основі експериментальних даних. Саме тому робототехнічні платформи, і зокрема наземні мобільні системи UGV, виступають ключовим компонентом сучасної інженерної підготовки, забезпечуючи умови для реалізації всіх основних елементів STEM: інтеграції змісту, дослідницької діяльності, проєктного підходу, математичного моделювання та цифрового інженерного інструментарію.

1.3. Методичні принципи організації проєктної діяльності

Проектна діяльність посідає ключове місце в сучасній педагогіці, орієнтованій на компетентнісний та діяльнісний підходи, і виступає однією з базових форм реалізації STEM-освіти в технічних спеціальностях. На відміну від традиційних форм навчання, де домінує репродуктивне відтворення знань, проєктне навчання передбачає активну, цілеспрямовану діяльність здобувачів освіти, спрямовану на розв'язання реальної або наближеної до реальної проблеми, що завершується створенням конкретного продукту – технічного пристрою, програмного модуля, експериментальної установки або

комплексного інженерного рішення [1; 2; 20; 21]. У цьому контексті методичні принципи організації проєктної діяльності в STEM-середовищі мають забезпечувати не лише засвоєння навчального матеріалу, а й формування цілісної системи професійних, дослідницьких та соціальних компетентностей.

Теоретичною основою проєктного навчання в технічній освіті є ідеї конструктивізму та «навчання через створення», сформульовані, зокрема, С. Пейпертом, який підкреслював, що найбільш ефективно навчання відбувається тоді, коли студент не просто опановує готову інформацію, а будує власні інтелектуальні та матеріальні артефакти — моделі, програми, механізми, робототехнічні системи [3]. З цієї позиції проєктна діяльність у STEM-освіті виступає не допоміжною методичною формою, а базовим дидактичним механізмом, у межах якого знання з фізики, математики, інформатики, електроніки та інженерної графіки інтегруються в єдиному процесі створення технічного об'єкта. Це відповідає сучасним підходам до STEM, у яких на перший план виходять практична спрямованість, міждисциплінарність і діяльнісний характер навчання.

Одним із ключових методичних принципів організації проєктної діяльності є проблемність, яка передбачає постановку перед студентами відкритої, недостатньо визначеної задачі, що не має єдиного готового рішення. У такому випадку навчальний процес будується не навколо механічного виконання інструкцій, а навколо пошуку оптимального способу розв'язання реальної технічної або навчально-дослідницької проблеми. Для робототехнічних проєктів такими задачами можуть бути побудова мобільної платформи для подолання заданого маршруту, розробка алгоритму стабілізації руху, реалізація системи навігації чи моделювання поведінки робота у змінному середовищі [6; 7]. Проблемність виконує подвійну функцію: з одного боку, вона стимулює пізнавальну активність студентів, з іншого — створює необхідність самостійного застосування теоретичних знань на практиці, що є сутністю STEM-підходу.

Наступним принципом є інтеграція змісту навчання. У межах проєктної діяльності відбувається узгоджене використання знань з різних дисциплін: для успішної реалізації проєкту з робототехніки студент має спиратися на закони механіки й електродинаміки, методи математичного аналізу та теорії керування, навички програмування, основи схемотехніки, конструкторську підготовку та вміння працювати з CAD-середовищами. У працях, присвячених STEM-освіті, наголошується, що саме проєктна форма організації навчання створює найбільш природні умови для міждисциплінарної інтеграції, оскільки реальні інженерні задачі ніколи не обмежуються рамками однієї предметної галузі [1; 2; 20–22]. З методичної точки зору це означає необхідність узгодження змісту навчальних дисциплін, визначення «точок стику» між ними та побудови таких проєктних завдань, у яких ці зв'язки стають очевидними для студентів.

Важливою складовою методики проєктної діяльності є орієнтація на поетапну побудову навчальної активності відповідно до таксономії цілей навчання. Згідно з переглянутою таксономією Блума, запропонованою Р. Андерсоном і Д. Кратволом, навчальні цілі мають переходити від рівнів запам'ятовування та розуміння до застосування, аналізу, оцінювання та створення нового [13]. Проєктна робота у сфері робототехніки природно охоплює всі ці рівні: студент спочатку відтворює базові визначення та формули (знання, розуміння), потім використовує їх для розрахунку параметрів вузлів робота (застосування), аналізує результати вимірювань і виявляє причини нестабільної роботи системи (аналіз), порівнює різні варіанти конструктивних і алгоритмічних рішень (оцінювання), а в підсумку розробляє власну модифіковану конструкцію або алгоритм керування (створення). Відповідно, методичні матеріали мають бути побудовані так, щоб спрямовано переводити діяльність здобувачів на вищі когнітивні рівні й не обмежуватися лише репродуктивними завданнями.

Організація проєктної діяльності також спирається на принцип кооперативного та колаборативного навчання, де навчальний процес відбувається в малих групах, а результат залежить від узгодженої роботи всіх учасників. У роботах Т. Паніца підкреслюється відмінність між кооперативним і колаборативним навчанням: у першому випадку група виконує завдання, поділене на підзадачі, у другому — учасники спільно конструюють знання, активно взаємодіючи й взаємонавчаючись [14]. Для робототехнічних проєктів найбільш продуктивною є саме колаборативна модель, у якій студенти виконують різні ролі (конструктор, програміст, експериментатор, аналітик даних, відповідальний за документацію), але при цьому зберігають спільну відповідальність за загальний результат. З методичної точки зору це вимагає чіткого визначення ролей, прозорого розподілу обов'язків, організації регулярних командних обговорень і проміжних захистів, де кожен учасник презентує вклад у спільний продукт.

Ще одним методичним принципом є рефлексивність, яка передбачає систематичний аналіз студентами власної діяльності, прийнятих рішень і отриманих результатів. У традиційних формах навчання рефлексія часто зводиться до перевірки правильності відповіді, тоді як у проєктній роботі важливо оцінювати не лише кінцевий продукт, а й процес його створення. Це включає усвідомлення того, які гіпотези виявилися хибними, які конструктивні чи алгоритмічні рішення виявилися неефективними, які помилки в моделюванні призвели до відхилень між розрахунковими й експериментальними даними [15]. Залучення студентів до аналізу власних помилок, обговорення шляхів їх усунення й формулювання висновків щодо подальшого удосконалення проєкту формує дослідницьке мислення та критичне ставлення до результатів своєї роботи.

Проєктна діяльність у сфері робототехніки має також базуватися на принципі доступності та поступовості. Навіть якщо кінцева мета проєкту є складною (наприклад, створення автономної мобільної платформи з елементами навігації), навчальний маршрут має бути розбитий на послідовні

підзадачі: складання базового шасі, запуск приводу, реалізація ручного керування, введення зворотного зв'язку від енкодерів, реалізація простих алгоритмів стабілізації, додавання сенсорів відстані, побудова траєкторії руху, виконання елементарних сценаріїв автономної поведінки тощо. Такий «спіральний» підхід дозволяє уникнути перевантаження, забезпечити поетапне зростання складності та створити умови, за яких кожен етап має завершуватися досяжним, але нетривіальним результатом [4].

У працях, присвячених запровадженню STEM-освіти в Україні, наголошується на тому, що проєктна діяльність має бути не епізодичною, а системною складовою навчальних програм [20-22]. Це означає, що методичні принципи організації проєктної роботи мають враховувати не лише окремий навчальний курс, а й освітню траєкторію здобувача в цілому: від базових шкільних конструкторів до складних університетських робототехнічних платформ. Університетські проєкти з робототехніки, будучи логічним продовженням шкільних STEM-ініціатив, створюють можливість для вертикальної наступності у формуванні інженерних компетентностей і розширюють спектр задач від простих експериментів до повноцінних інженерно-дослідницьких робіт.

Особливе значення у проєктній діяльності має система оцінювання, яка повинна бути багатокомпонентною й відображати різні аспекти роботи студента: рівень теоретичної підготовки, якість технічного рішення, коректність експериментальної частини, повноту та логіку аналізу даних, рівень оформлення документації, внесок у командну роботу. На відміну від традиційних контрольних робіт, де оцінюється переважно правильність відповіді, у проєктних завданнях важливими є також креативність, інженерна обґрунтованість рішень, здатність обирати критерії якості й аргументувати їх вибір. У цьому контексті доцільно спиратися на підходи до верифікації та валідації моделей, описані, зокрема, у роботах Р. Сарджента [15], адаптуючи їх до освітніх задач: студенти мають не лише побудувати модель роботи

системи, а й аргументовано показати відповідність між розрахунковими й експериментальними даними.

У підсумку методичні принципи організації проєктної діяльності в межах STEM-орієнтованої робототехнічної освіти можна охарактеризувати як сукупність взаємопов'язаних вимог: проблемність і практична спрямованість завдань; міждисциплінарна інтеграція змісту; орієнтація на вищі когнітивні рівні за таксономією Блума; кооперативний і колаборативний характер роботи; поетапність і доступність навчальних кроків; рефлексивність та наукова коректність аналізу результатів; системність і наступність у межах освітньої траєкторії. Реалізація цих принципів у конкретних робототехнічних проєктах, зокрема під час розробки навчальних наземних мобільних платформ, забезпечує не лише засвоєння змісту навчальних дисциплін, але й формування у здобувачів цілісного інженерного стилю мислення, готовності до роботи з реальними технічними системами та участі в інноваційній діяльності в галузі сучасної робототехніки.

1.4. Сучасний стан досліджень подвійних галоїдних перовскітів

Навчальні роботизовані платформи, які застосовуються у STEM-освіті, умовно можна поділити на кілька рівнів складності: початкові, середнього рівня та інженерні/професійні. Така градація є важливою для розуміння освітньої еволюції студента – від перших елементарних кроків у конструюванні до створення повноцінних автономних робототехнічних систем, зокрема UGV.

На початковому рівні найпоширенішими є конструктори типу LEGO Mindstorms, LEGO Spike Prime, mBot, VEX IQ, які дозволяють учням опановувати базові поняття механіки, алгоритмізації та простих сенсорних систем. Їхня педагогічна ефективність полягає в тому, що вони забезпечують низький поріг входження: студент працює з готовими модулями, не стикаючись одразу з проблемами електроніки чи програмування низького

рівня. LEGO-рішення особливо ефективні у роботі з молодшими студентами, оскільки поєднують візуальне програмування, інтуїтивну механіку та можливість швидко отримати результат. Такі платформи часто виступають першим етапом у формуванні інженерного інтересу й створюють мотиваційну базу для подальшого переходу до складніших систем.



Рис. 1.2. Початкові STEM-платформи (LEGO Mindstorms, LEGO Spike Prime, VEX IQ)

На середньому рівні знаходяться платформи на основі Arduino, Raspberry Pi, а також доступні набори для робототехніки серій MakeBlock або Waveshare. У межах таких систем студент вже працює з реальними електронними компонентами: драйверами двигунів, датчиками, комунікаційними модулями, ШІМ-керуванням та простими алгоритмами стабілізації. Роботи цього класу використовуються для формування базових навичок електроніки, мікроконтролерного програмування, монтажу систем, роботи з сенсорами та аналізу поведінки мобільних платформ. На цьому рівні студент починає використовувати природничо-наукові знання більш осмислено: наприклад, досліджувати залежність швидкості мотор-редуктора від напруги або будувати прості моделі руху робота у координатній площині.



Рис. 1.3. Робототехнічні платформи середнього рівня (Arduino, Raspberry Pi, MakeBlock, Waveshare)

Інженерний рівень представлений платформами, що використовують мікроконтролери сімейств STM32, ESP32, TI, nRF, а також робототехнічні фреймворки ROS2, контролери автономного пілотування ArduPilot, PX4, комплекси навігації, кіберфізичні системи та повністю автономні мобільні платформи. Це саме той рівень, у якому формується реальна інженерна компетентність: студент створює власні електронні схеми, працює з драйверами потужних моторів, налаштовує регулятори, аналізує динаміку руху та працює з реальними фізичними обмеженнями. До цієї категорії належать університетські платформи типу TurtleBot, Husky UGV, Robotnik SUMMIT, а також спеціально розроблені навчальні шасі на базі STM32 та інших промислових мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів/бортових комп'ютерів.



Рис. 1.4. Інженерні робототехнічні платформи (TurtleBot, Husky UGV, Robotnik SUMMIT)

У цьому контексті наземні мобільні роботи UGV виступають логічним вищим щаблем розвитку навчальних робототехнічних платформ, оскільки поєднують усі ключові напрями інженерної діяльності – механіку, електроніку, програмування, автоматичне керування, обробку даних, навігацію, а також проєктне мислення. Саме тому вони широко застосовуються у вищій технічній освіті та курсах з робототехніки, мехатроніки, кіберфізичних систем та автоматизації.

Важливо, що всі ці рівні – від LEGO до складних інженерних платформ – формують неперервну, логічно-послідовну траєкторію підготовки студента. Починаючи з найбільш інтуїтивних конструкцій, здобувач поступово рухається до все більш складних систем, у яких кожен новий елемент навчання потребує синтезу знань із попередніх етапів. Саме така структурована послідовність від простого до складного відповідає принципам «спірального навчання» та ідеям, викладеним у роботах з STEM-педагогіки.

Найважливішим є те, що UGV як навчальні платформи не замінюють LEGO або Arduino – вони їх доповнюють, забезпечуючи студенту можливість пройти повний інженерний шлях. LEGO формує інтерес і базові уявлення, Arduino – фундаментальні технічні навички, а UGV на базі STM32 або ROS2 – компетентності, які вже відповідають реальним вимогам сучасної інженерії.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проаналізовано теоретико-методологічні засади STEM-освіти та визначено роль робототехнічної проєктної діяльності у формуванні сучасних інженерних компетентностей. STEM-підхід, заснований на інтеграції природничих, математичних, інженерних та технологічних знань, сьогодні виступає ключовою основою модернізації технічної освіти. Його значущість полягає не лише у формуванні предметних знань, але й у розвитку критичного мислення, системного бачення, здатності до інженерного аналізу та проєктного мислення, що є необхідними для професійної діяльності інженера XXI століття.

Було показано, що робототехніка посідає центральне місце у STEM-освітньому середовищі. Вона дозволяє інтегрувати теоретичні знання з фізики, математики, електроніки та інформатики у реальні технічні об'єкти, створюючи умови для їх практичного застосування. Робототехнічні платформи забезпечують повний цикл інженерної діяльності — від формування концепції та розроблення конструкції до програмування, експериментальних досліджень і вдосконалення системи. Саме тому вони виступають одним із найефективніших інструментів реалізації міждисциплінарного та проєктно-орієнтованого навчання.

Аналіз існуючих моделей STEM-навчання (integrated STEM, engineering-driven STEM, project-based STEM) дозволив показати, що робототехніка органічно вписується в усі підходи, формуючи середовище для виконання навчальних і дослідницьких проєктів. Особливий акцент зроблено на практичній значущості робототехнічних платформ у вивченні фізики, оскільки вони забезпечують можливість переходу від абстрактних законів до реальних експериментів, підвищують мотивацію здобувачів та сприяють ґрунтовному розумінню природничих процесів.

Також у першому розділі було здійснено класифікацію навчальних робототехнічних платформ: від початкових конструкторів (LEGO Mindstorms, mBot, VEX IQ), що забезпечують перше знайомство з робототехнікою, до платформ середнього рівня (Arduino, Raspberry Pi) та інженерних систем (STM32, ROS2, ArduPilot, UGV-платформи). Показано, що така послідовність становить логічну, структуровану траєкторію розвитку інженерних компетентностей і відповідає принципам спірального навчання.

Окрему увагу приділено наземним мобільним роботам UGV, які виступають завершальним і найбільш технологічно насиченим етапом навчальної робототехніки. Саме UGV-платформи поєднують механіку, електроніку, програмування, автоматичне керування, навігаційні алгоритми та роботу з датчиками, що робить їх оптимальним об'єктом для реалізації STEM-проектів в освітньому середовищі.

Загалом, виконаний теоретичний аналіз підтвердив, що STEM-освіта та робототехнічна інженерна діяльність формують сучасну методологічну основу для підготовки майбутніх інженерів. Вони створюють умови для розвитку системного мислення, здатності до інтеграції знань, вміння працювати з реальними технічними системами та застосовувати наукові підходи у практичній діяльності. Отримані теоретичні положення слугують фундаментом для подальших розділів роботи, у яких буде представлено сучасні інженерні засоби побудови наземних робототехнічних платформ та розробку власної навчальної UGV-системи.

РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ЗАСОБИ, МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ЗАСОБІВ (UGV)

2.1. Класифікація мобільних роботизованих платформ

Мобільні роботизовані платформи, що входять до класу UGV (Unmanned Ground Vehicles), посідають ключове місце у сучасній робототехніці, автономних системах та інженерній освіті. Їхня класифікація є надзвичайно важливою, оскільки дозволяє впорядкувати різноманіття конструкцій, принципів руху, алгоритмів керування та сфер застосування. У науковій літературі існує декілька підходів до класифікації UGV, однак найпоширенішою є багаторівнева структура, що враховує тип ходової системи, кількість ступенів свободи, тип приводу, функціональне призначення, рівень автономності, систему керування та сенсорну інфраструктуру [6; 7; 12; 28].

Першим і найбільш фундаментальним параметром класифікації наземних роботів є тип їхньої ходової схеми, яка визначає фізичні властивості руху, маневровість, здатність долати перешкоди та енергоефективність. Існують чотири основні групи: колісні, гусеничні, крокуючі та гібридні платформи.

Колісні системи є найпоширенішим варіантом у навчальних, промислових і дослідницьких роботах завдяки простоті конструкції, нижчій вартості, високій швидкості руху та енергоефективності. Вони включають схеми диференціального керування (differential drive), автомобільні схеми (Ackermann steering), всеповоротні колеса (omni-wheel) та шасі з незалежним приводом кожного колеса. Класичний диференційний привід – один із найпростіших для реалізації та одночасно достатньо потужний для навчальних UGV; саме він часто використовується в освітніх і дослідницьких платформах, оскільки дозволяє легко інтегрувати датчики, реалізовувати ПД-регулятори та вивчати кінематику мобільних роботів [7; 18].



Рис. 2.1. Основні типи колісних ходових систем мобільних роботів: диференційна, автомобільна (Ackermann) та всеповоротна (omni-wheel)

Гусеничні UGV характеризуються високою прохідністю, здатністю працювати в умовах бездоріжжя та нерівних поверхонь. Вони активно застосовуються у військовій робототехніці, сфері безпеки, аварійно-рятувальних операціях та інспекційних завданнях. Недоліком є нижча швидкість і складність повороту, що часто вимагає складніших алгоритмів керування. У контексті STEM-освіти гусеничні платформи використовуються рідше, проте вони дозволяють моделювати задачі автономної навігації в екстремальних умовах, що є важливим для інженерної підготовки.



Рис. 2.2 . Гусеничні роботизовані платформи, що характеризуються підвищеною прохідністю

До окремої групи належать крокуючі роботи, які імітують механіку руху біологічних систем. Роботи цього типу включають двоногі, чотириногі, шестивісні та багатонігі конструкції, що використовують складні алгоритми стабілізації, балансування та планування траєкторій. Попри складність реалізації, такі системи мають високу маневровість та здатність пересуватися на нерівних поверхнях, де колісні UGV працювати не можуть. Однак для навчальних цілей та інженерної освіти крокуючі платформи використовуються переважно на старших етапах підготовки, де студенти володіють знаннями з динаміки руху, теорії керування та обчислювальної механіки.

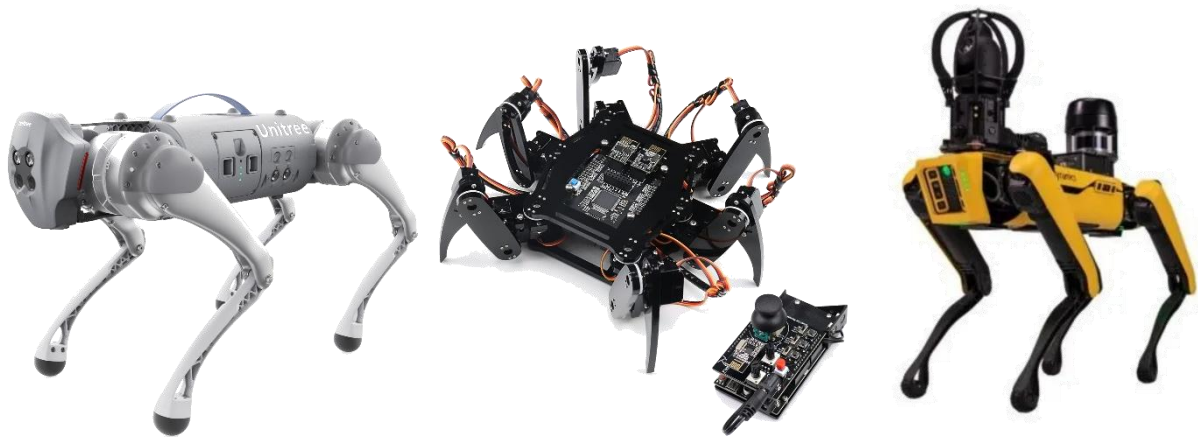


Рис. 2.3. Крокуючі роботизовані системи різних типів: двоногі, чотириногі та шестивісні платформи

Окремою групою є гібридні мобільні платформи, які поєднують характеристики двох або більше типів ходових систем. Прикладами є колісно-гусеничні платформи, роботи з трансформованою геометрією шасі або системи з перемиканням режимів руху залежно від умов навколишнього середовища. Такі системи демонструють високу адаптивність і дозволяють моделювати складні інженерні задачі, пов'язані з автономністю, навігацією та оптимізацією руху.

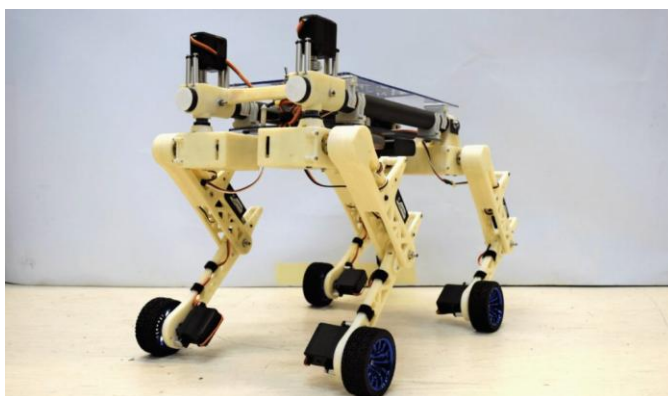


Рис. 2.4. Гібридні мобільні платформи з комбінованими ходовими системами

Другим рівнем класифікації є тип приводу та конструктивна організація енергосистеми UGV. Сучасні наземні роботи використовують електричні, гідравлічні або комбіновані приводи.

Електричні приводи – найпоширеніший варіант у мобільній робототехніці через компактність, високий ККД, простоту керування та сумісність із мікроконтролерними системами. Вони включають мотор-редуктори постійного струму, безколекторні двигуни (BLDC), ступінчасті двигуни, серводвигуни. Наявність таких приводів полегшує розроблення систем керування на базі STM32 або інших мікроконтролерів, дозволяє легко реалізувати ШІМ-керування, системи обмеження струму, алгоритми стабілізації та контролю тяги [17; 28].

Гідравлічні та пневматичні приводи використовуються у важких UGV промислового класу, однак у навчальних системах майже не застосовуються через складність конструкції та високу вартість.

Третім параметром класифікації є рівень автономності, який визначає, наскільки робот здатен виконувати завдання без участі оператора. У рамках сучасної робототехніки виділяють такі рівні:

- радіокеровані UGV, що працюють за прямими командами оператора;

- напівавтономні, які використовують алгоритми стабілізації, обмежене планування руху або навігацію за маяками;
- автономні мобільні роботи, що застосовують сенсорну інтеграцію (IMU, LiDAR, TOF-сенсори), методи локалізації (SLAM), планування траєкторій та поведінкові алгоритми.

Рівень автономності визначає також вимоги до програмного забезпечення: прості системи можуть працювати на мікроконтролерах STM32 з мінімальним ПЗ, тоді як автономні UGV зазвичай здійснюють обчислення на мікрокомп'ютерах із ROS2, ArduPilot чи PX4 [8; 11; 24].

Ще одним критично важливим параметром є сфера застосування, яка впливає на конструктивні та програмні характеристики платформи. Виділяють такі типи UGV:

- освітні, що використовуються для навчання основ робототехніки, електроніки та програмування (Arduino-платформи, STEM-набори, прості 4×4 шасі);
- науково-дослідні, що використовуються для тестування алгоритмів навігації, машинного зору, SLAM, контролю приводів, тощо;
- промислові та сервісні, що виконують складні завдання у логістиці, інспекції та автоматизації виробництва;
- спеціалізовані та військово-технічні, орієнтовані на роботу у небезпечних середовищах, пошуково-рятувальних операціях та інспекції важкодоступних об'єктів.

Клас важливих класифікаційних ознак, що набувають значення у XXI столітті – це сенсорна інфраструктура та цифрова інтеграція. Сучасні UGV можуть включати комбінації IMU, інкрементальних та абсолютних енкодерів, ультразвукових та інфрачервоних сенсорів, лазерних далекомірів, камер, гіроскопів, датчиків струму, GPS-модулів та ін. Наявність сенсорної системи визначає можливість реалізації алгоритмів контролю стану, планування руху та автономної поведінки [7; 12]. Саме сенсорні системи дозволяють UGV

переходити від ручного або напівавтономного режиму до повноцінної автономності.

Окреме місце у класифікації займає модульність, яка відіграє ключову роль у сучасних STEM-проектах та навчальних платформах. Модульні UGV дають змогу швидко змінювати датчики, приводи, електронні модулі або програмні фреймворки. Це дозволяє студентам та дослідникам експериментувати з різними конструкціями, порівнювати ефективність різних алгоритмів керування та тестувати нові технології. Модульність — фундамент STEM-підходу, оскільки забезпечує можливість багаторазового повторення експериментів у змінюваних умовах.

Окремої уваги заслуговує також класифікація UGV за масштабом та енергетичними характеристиками, оскільки фізичні розміри та маса платформи визначають типи двигунів, акумуляторні системи, вантажопідйомність і загальні можливості. Згідно з промисловими стандартами Bosch Rexroth [28], UGV діляться на мікроплатформи (0,5-2 кг), легкі (2-10 кг), середні (10-40 кг) та важкі (40 кг і більше). В освітньому контексті найчастіше застосовуються мікро- та легкі UGV, які є безпечними, доступними та достатніми для реалізації складних алгоритмів керування та навігації.

Сучасна наукова література підкреслює, що класифікація UGV має не лише теоретичне, але й прикладне значення. Вона дозволяє правильно обирати архітектуру під конкретну задачу, визначати вимоги до електроніки, приводу, сенсорної інфраструктури та програмного забезпечення. Б. Січіліано та О. Хатіб відзначають, що вибір типу робота визначає не тільки конструкцію, а і всю структуру системи керування та вимоги до інтеграції апаратних і програмних компонентів [6]. А Р. Сігварт та Д. Скарамуцца підкреслюють, що класифікація є фундаментом для побудови математичних моделей руху та алгоритмів контролю, які повинні відповідати конкретному типу шасі [7].

Таким чином, класифікація мобільних роботизованих платформ є необхідним елементом інженерного аналізу та освітньої підготовки. Вона дозволяє систематизувати широкий спектр технічних рішень, зрозуміти принципи побудови UGV, коректно визначити вимоги до електронного та програмного забезпечення та оптимізувати конструкцію під конкретні навчальні або практичні задачі. Для подальших етапів роботи класифікація виступає теоретичною основою, на якій вибудовується вибір архітектури досліджуваної платформи, її апаратне наповнення та алгоритми керування.

2.2. Апаратні засоби побудови UGV

Апаратна частина наземних роботизованих платформ (UGV, Unmanned Ground Vehicles) є фундаментом їхньої функціональності, надійності та здатності до виконання інженерних завдань різної складності. Незалежно від того, чи йдеться про просту навчальну платформу для студентів початкового рівня, чи про високотехнологічний автономний мобільний робот промислового або дослідницького призначення, апаратне забезпечення визначає можливості подальшої програмної реалізації, алгоритмічної складності, навігаційної автономності та експериментального потенціалу системи. Саме тому аналіз конструктивних та електронних компонентів, що використовуються для побудови UGV, є важливою частиною розуміння сучасних підходів до інженерії мобільних роботів.

У широкому розумінні апаратні засоби UGV можна розглядати як багаторівневу систему, що включає механічну платформу, виконавчі приводи, електронні модулі керування, сенсорні системи, енергетичну підсистему, комунікаційні модулі, а також інтерфейси взаємодії з програмним середовищем. Кожен із цих компонентів виконує важливу роль у загальній архітектурі робота, а їхня узгодженість визначає стабільність руху, точність виконання траєкторій, автономність та можливість інтеграції з

високорівневими системами, такими як ROS2, ArduPilot або інші рішення для автономної мобільності [6; 7; 12].

Механічна структура є першою й найбільш фундаментальною складовою апаратної частини мобільного робота. Вона визначає кінематичну схему, прохідність, вантажопідйомність, швидкість, стабільність руху та здатність до виконання задач у конкретних середовищах. Типовими варіантами шасі є диференціально-керовані платформи (differential drive), чотири- або шестиколісні схеми з незалежним приводом, платформи з поворотними колесами (Ackermann steering), гусеничні системи та омні- або мехатронні приводи з колесами Mecanum або Omni-wheel.

Диференціальна схема є найпростішою та найпоширенішою, оскільки забезпечує високу маневровість, просту модель керування та низькі вимоги до апаратної складності. Гусеничні платформи використовуються у випадках, коли необхідна висока прохідність або робота в нерівних, сипучих чи вологих середовищах. Натомість платформи з механізмом Ackermann є аналогом автомобільного рульового керування й застосовуються переважно в дослідницьких автономних автомобілях або у платформах, що вимагають високої швидкості руху та точності траєкторії. Механічна архітектура тісно пов'язана з вибором приводів, типів редукторів, розміщенням елементів живлення та електронних модулів, що визначає не лише ергономіку, але й здатність системи працювати під навантаженням.

З позиції апаратної реалізації приводи UGV можуть базуватися на трьох основних типах моторів: колекторні двигуни постійного струму (DC motors), безколекторні двигуни (BLDC), а також сервоприводи або інтелектуальні моторні модулі. Вибір двигуна визначає динаміку руху, можливість точного контролю швидкості та позиції, енергоефективність, ресурс роботи та вартість платформи.

Колекторні двигуни є найбільш поширеними у навчальних і середньорівневих платформах завдяки їх простоті, дешевизні та легкості керування за допомогою драйверів H-мосту. Проте їх основними недоліками

є менша енергоефективність, обмежений механічний ресурс та неможливість прямого контролю позиції без додаткових сенсорів. Натомість BLDC-двигуни забезпечують вищу ефективність, плавнішу динаміку та можливість прецизійного керування при використанні контролерів типу FOC (Field Oriented Control) або ESC з підтримкою зворотного зв'язку. Вони широко використовуються у сучасних дослідницьких UGV, особливо у тих, що потребують високої точності руху, стабільності та великого робочого ресурсу [17].

Сервоприводи та розумні модулі (smart actuators), що включають енкодери, власні драйвери та протоколи зв'язку (ServoPWM, CAN, RS-485), все частіше застосовуються у платформах високого рівня, де необхідна синхронізація кількох ступенів свободи або керування складними механізмами. Вони спрощують інтеграцію, оскільки значна частина регуляційних задач вирішується всередині приводу.



Рис. 2.5. Виконавчі приводи UGV: двигун постійного струму з редуктором; безколекторний BLDC-двигун із сенсорами Холла; сервомотор; інтелектуальний привід з цифровим інтерфейсом

Невід'ємною складовою електронної системи UGV є драйвери двигунів, які здійснюють формування керуючих сигналів для моторів та захист від перевантажень. Тип драйвера залежить від типу приводу: для колекторних двигунів використовуються H-мостові модулі, для BLDC – ESC-контролери або FOC-регулятори з апаратною підтримкою сенсорів Холла.

Сучасні драйвери можуть включати захисти від короткого замикання, перегріву, перенапруги та підвищених навантажень, що є критичним під час

роботи у реальних умовах. Висококласні промислові модулі підтримують шину CANOpen або EtherCAT, що дозволяє виконувати синхронізоване керування кількома приводами.

Автономність UGV значною мірою залежить від комплексу сенсорів, які забезпечують сприйняття навколишнього середовища та зворотний зв'язок для алгоритмів керування. До базових сенсорів належать енкодери, IMU-модулі, ультразвукові та інфрачервоні далекоміри. У більш складних системах застосовуються LiDAR, стереокамери, радарні датчики, ToF-камери та GNSS-приймачі [12].

Комбінація сенсорів дозволяє реалізувати такі функції, як локалізація, картографія, уникнення перешкод, стабілізація руху та побудова складних навігаційних алгоритмів. Наприклад, LiDAR забезпечує високоточні вимірювання у реальному часі, GNSS дозволяє здійснювати глобальну навігацію, а IMU формує дані щодо орієнтації та прискорення платформи.

Система живлення є ключовим аспектом надійності UGV. Найчастіше використовуються LiPo або Li-Ion акумулятори, оскільки вони забезпечують високу енергоємність, компактність і здатність віддавати великі струми. Система живлення включає також DC-DC перетворювачі, стабілізатори напруги, захисти від перенапруги та системи моніторингу заряду.

Для платформ, що використовують одноплатні комп'ютери або процесорні модулі, забезпечується окрема стабілізована лінія живлення з мінімальними пульсаціями, оскільки ці компоненти чутливі до шумів у лінії живлення [27].

UGV часто передбачають інтеграцію з зовнішніми системами: наземними станціями керування, серверними алгоритмами, хмарними сервісами, іншими роботами. Для цього використовуються інтерфейси UART, CAN, RS-485, SPI, I²C, Wi-Fi, Bluetooth, а також високорівневі протоколи типу MAVLink або DDS, що застосовується в ROS2.

Комунікаційна система визначає можливість:

- дистанційного керування,

- передавання телеметрії,
- налаштування параметрів,
- взаємодії в мультиагентних системах.

Апаратні засоби UGV повинні бути спроектовані таким чином, щоб відповідати вимогам програмного забезпечення. Наприклад, для реалізації PID-регуляторів потрібні високоточні АЦП і швидкі таймери; для SLAM потрібні LiDAR та IMU; для роботи з ROS2 – достатня обчислювальна потужність бортової комп'ютерної системи. Взаємодія апаратних компонентів із програмними фреймворками описана в роботах [6; 7; 8; 11; 12], де наголошується, що правильна архітектурна інтеграція забезпечує стабільність, передбачуваність та відтворюваність роботи мобільної платформи.

Апаратні засоби UGV утворюють комплексну технічну систему, у якій інтегруються механіка, силова електроніка, сенсорика, мікроконтролерні засоби та комунікаційні модулі. Вибір конкретних елементів залежить від освітніх, дослідницьких або прикладних задач. Сучасні наземні роботи спираються на принципи модульності, масштабованості та інтегрованості із високорівневими робототехнічними екосистемами, що дозволяє адаптувати їх до широкого спектра завдань у галузях автоматизації, навігації, мехатроніки та інженерної освіти.

2.3. Програмні засоби керування мобільними роботизованими платформами

Програмне забезпечення є ключовим компонентом робототехнічних систем UGV, визначаючи їхні можливості, точність керування, стабільність, здатність до автономної навігації та інтеграції з сенсорними модулями. На відміну від традиційних електромеханічних систем, сучасні мобільні роботи використовують багаторівневу архітектуру керування, де кожен програмний рівень виконує специфічну функцію – від формування низькорівневих сигналів для двигунів до високорівневого планування маршруту та обробки

складних сенсорних даних. У сучасному інженерному навчанні важливо формувати розуміння не окремих інструментів, а саме структурованої взаємодії між ними, що забезпечує створення повноцінної кіберфізичної системи [7; 8; 11; 17].

Найпершим рівнем програмної архітектури є мікроконтролерне керування, що забезпечує прямий доступ до апаратних ресурсів робота. У цій ролі можуть використовуватися різні платформи – STM32, ESP32, Raspberry Pi Pico, мікроконтролери TI, Microchip PIC, Atmel AVR тощо. Незалежно від конкретної платформи, їхнє призначення однакове: генерування ШІМ-сигналів, опитування енкодерів та інерціальних сенсорів, обробка аналогових сигналів, керування драйверами двигунів, реалізація контурів ПД-регулювання та забезпечення роботи в реальному часі. Мікроконтролери формують «рефлекторний рівень» поведінки UGV, реагуючи на зміни стану середовища та механічної системи із мінімальною затримкою. У контексті інженерної освіти робота з цими платформами дозволяє студентам опанувати основи цифрової електроніки, взаємодію між апаратною та програмною частиною, роботу з інтерфейсами (UART, SPI, I²C, CAN) та аналіз часових параметрів системи – компетентності, що є базовими для професійної робототехніки [17; 26].

Наступним рівнем є системи автономного пілотування, серед яких одним із найбільш популярних рішень у мобільній робототехніці вважається ArduPilot, зокрема модуль ArduRover, орієнтований на наземні платформи [10].

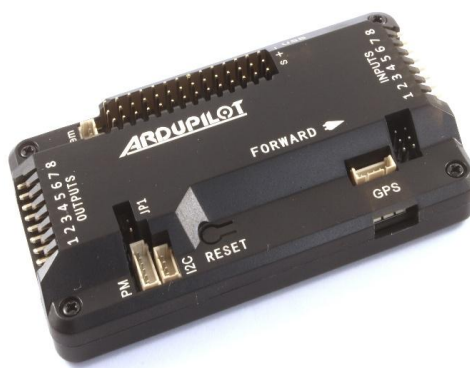


Рис. 2.6 . Політний контролер Ardupilot APM 2.8

На відміну від базового мікроконтролерного коду, системи пілотування реалізують складні алгоритми стабілізації, автоматичного керування, навігації, побудови маршруту, PID-регуляторів, обробки IMU та GPS, обмеження швидкості, безпечної поведінки та діагностики. Вони забезпечують «поведінковий рівень» системи, дозволяючи роботу рухатися за заданими траєкторіями, виконувати місії, підтримувати стабільність при зміні умов руху та компенсувати вплив нерівностей поверхні. Подібні рішення застосовуються як у навчальних роботах, так і в професійних платформах, забезпечуючи студентам доступ до тих самих алгоритмів, які використовуються в сучасних автономних наземних системах. Це формує практичне розуміння принципів стабілізації, фільтрації даних і навігації, які є основою мобільної робототехніки [7; 10].

Важливим елементом екосистеми ArduPilot, особливо в застосуванні до наземних роботів класу UGV, є спеціалізовані наземні програмні комплекси, які забезпечують налаштування, моніторинг і діагностику автопілота в реальному часі. Центральне місце серед таких інструментів займає Mission Planner — офіційна наземна станція для ArduPilot, що використовується як основна платформа для конфігурації параметрів керування, калібрування датчиків, роботи з PID-регуляторами ходових двигунів, аналізу логів (.bin) та побудови маршрутів руху у форматі waypoint-місій. У випадку наземних платформ Mission Planner дозволяє налаштовувати тип кінематики (диференціальне керування, Ackermann, skid-steer), обмеження швидкості, параметри навігаційних алгоритмів та режими автономного руху, що робить його ключовим інструментом роботи з UGV у середовищі ArduPilot [10].

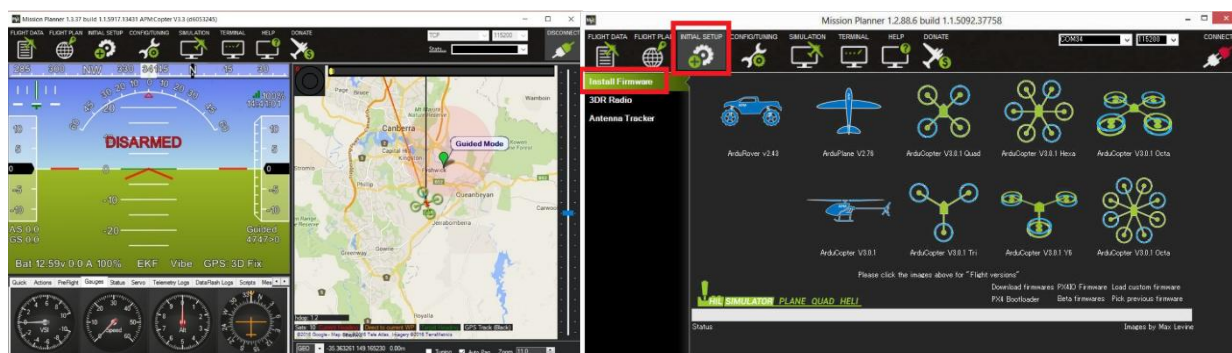


Рис. 2.7. Mission Planner та вкладка налаштування UGV (ArduPilot)

Паралельно з ним активно використовується QGroundControl, який первинно розвивався в екосистемі PX4, але наразі повністю підтримує ArduPilot та надає зручний кросплатформенний інтерфейс для моніторингу телеметрії та оновлення параметрів автопілота. QGroundControl є особливо корисним у навчальних середовищах завдяки простішій структурі меню, сучасному UI та можливості роботи на Windows, Linux, macOS та мобільних пристроях. Для наземних роботів він забезпечує ті самі ключові функції, що й Mission Planner – перегляд станів системи, контроль датчиків, побудову місій та інтерактивну роботу з каналами зв'язку MAVLink [8; 24].

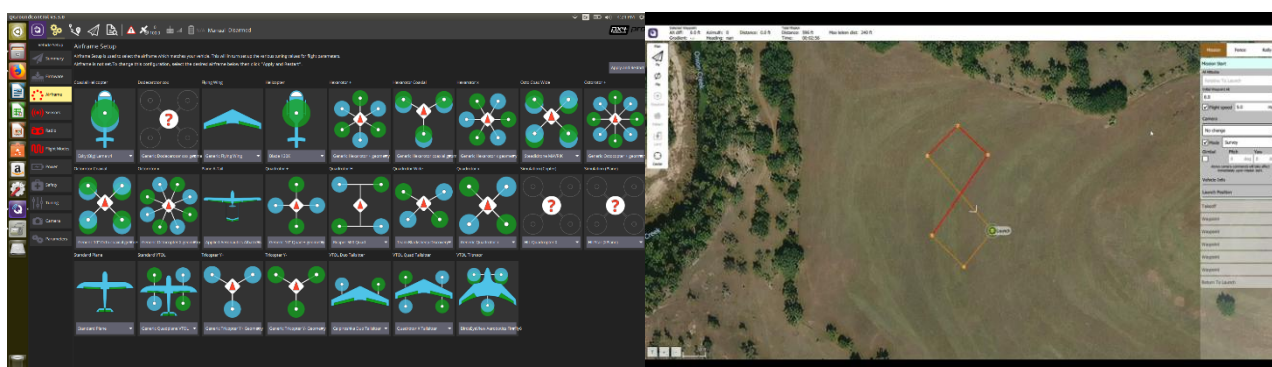


Рис. 2.8. QGroundControl та інтерфейс для наземної техніки

У роботі з UGV ці інструменти фактично виконують роль “наземної лабораторії”, через яку розробник отримує прямий доступ до внутрішніх процесів автопілота: від калібрування та тестування приводів до аналізу

траєкторії руху та перевірки правильності роботи алгоритмів. Це робить Mission Planner та QGroundControl невід’ємним компонентом освітніх і дослідницьких проєктів, у яких ArduPilot використовується як основна система автономного керування наземними роботами.

Найвищим рівнем архітектури є системи високорівневого робототехнічного програмування, серед яких ключову роль відіграє ROS2 (Robot Operating System 2) – сучасний фреймворк, що використовується у світовій науковій та інженерній практиці [8; 11]. ROS2 забезпечує модульну структуру, де різні програмні вузли виконують автономні завдання: локалізацію, картографію, планування маршруту, аналіз сенсорних даних, керування приводами, взаємодію з симуляторами, логування та віддалену діагностику. Завдяки моделі DDS (Data Distribution Service), ROS2 дозволяє створювати масштабовані розподілені системи, де кожен компонент може працювати окремо або у складі великої мережі роботів.

Важливо, що ROS2 не замінює нижчі рівні, а взаємодіє з ними: обмін даними між ArduPilot і ROS2 здійснюється через MAVLink, а комунікація між мікроконтролером і верхнім рівнем — через UART, CAN або інші канали. Таким чином створюється ієрархічна кіберфізична система, де:

- мікроконтролер забезпечує роботу в реальному часі,
- автопілот реалізує навігаційні та стабілізаційні алгоритми,
- ROS2 відповідає за високорівневу логіку, картографію, поведінку та автономію.

Для освітніх цілей така архітектура є надзвичайно цінною, оскільки дозволяє студентам працювати з реальними промисловими інструментами та розуміти повний цикл створення автономних систем – від драйверів до високорівневого керування. Навчальна діяльність із ROS2 також поєднує програмування, математичне моделювання, аналіз даних і алгоритмічне мислення, що відповідає ключовим принципам STEM-підходу.

Крім того, важливою частиною програмної інфраструктури мобільних роботів є симуляційні середовища. Найбільш поширеним рішенням у

науковій та інженерній освіті є Gazebo, яке забезпечує фізично коректну симуляцію динаміки, взаємодії робота з поверхнею, роботи сенсорів (LiDAR, камери, IMU), та дозволяє тестувати алгоритми навігації без використання реального апаратного забезпечення [9; 24]. Це забезпечує безпечне середовище для експериментів, пришвидшує розробку і дозволяє студентам перевіряти алгоритми в широкому спектрі умов.

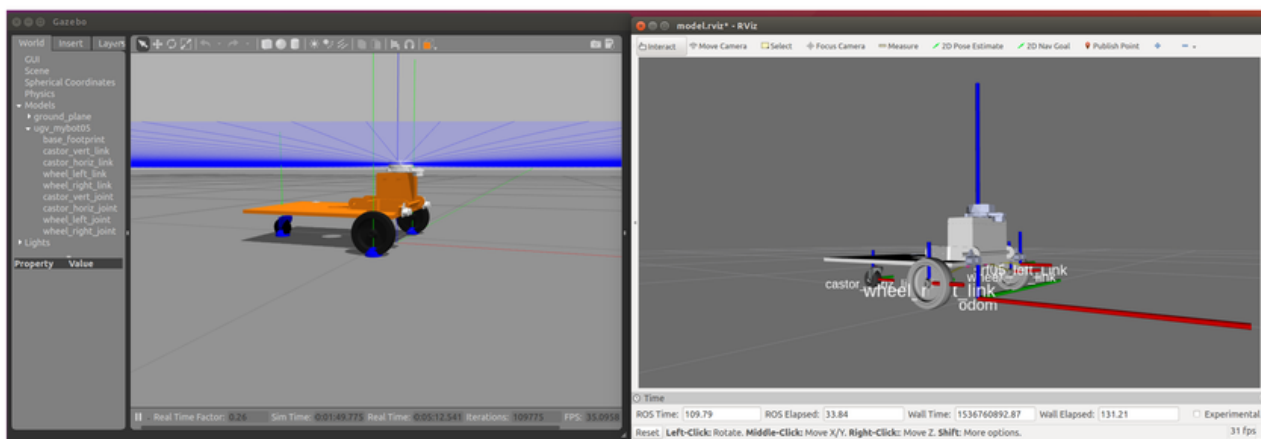


Рис. 2.9. Приклад симуляції Gazebo для мобільного робота

У підсумку, сучасні програмні засоби формують цілісну тришарову модель керування мобільними роботами: мікроконтролерний рівень забезпечує реактивну поведінку та точне керування приводами; системи автономного пілотування реалізують стабілізацію та навігацію; ROS2 – високорівневу поведінку, інтеграцію та взаємодію великої кількості програмних модулів. Разом із симуляційними інструментами ці компоненти створюють повний інженерний цикл, який відповідає вимогам сучасної STEM-освіти та дозволяє студентам працювати з інструментами, що застосовуються у реальних промислових системах.

2.4. Вибір архітектури об'єкта дослідження

Проектування навчальної наземної робототехнічної платформи (UGV) вимагає чіткого визначення архітектури апаратної та програмної частини, оскільки саме архітектурні рішення визначають функціональні можливості, масштабованість, складність розробки та педагогічну цінність системи. У навчальних проєктах архітектура має бути не лише технологічно обґрунтованою, але й дидактично доцільною: вона повинна забезпечувати можливість поступового ускладнення, гнучкість інтеграції різних інженерних модулів та прозорість для студента, який вивчає основи робототехніки, автоматики та програмного керування.

У сучасних мобільних платформ існує кілька підходів до побудови архітектури, які можна умовно поділити за рівнем абстракції та розподілом функцій між апаратними компонентами. Найпоширенішими є однорівневі, дворівневі та трирівневі моделі. Однорівнева архітектура передбачає, що всі функції – керування двигунами, оброблення сенсорних даних, реалізація логіки руху та комунікацій – виконує один мікроконтролер. Такий підхід є простим, але має обмеження щодо складності алгоритмів, відсутності модульності й значного навантаження на MCU. Тому він рідко підходить для навчальних платформ середнього та інженерного рівнів, де важливо забезпечити гнучкість у моделюванні складніших систем керування.

Більш поширеним є дворівневий підхід, у якому система поділяється на низькорівневий модуль керування приводами (мікроконтролер) та високорівневий обчислювальний модуль, що виконує логіку автономної навігації, маршрутизації, візуального сприйняття або роботи з ROS2. У такій архітектурі мікроконтролер відповідає за роботу в реальному часі – ШІМ-сигнали, опитування сенсорів, стабілізацію базових параметрів руху – тоді як одноплатний комп'ютер забезпечує складніші алгоритми, які не можуть виконуватися на MCU через обмеженість обчислювальних ресурсів. Цей

підхід створює оптимальний баланс між простотою апаратної частини та можливістю реалізувати алгоритми високого рівня.

У багатьох сучасних UGV також використовується трирівнева архітектура, у якій між мікроконтролером та високорівневим комп'ютером додається модуль автономного керування, відомий як автопілот. Історично такі контролери розроблялися для безпілотних літальних апаратів, однак сьогодні вони широко застосовуються і в наземних роботах завдяки наявності вбудованих алгоритмів стабілізації, фільтрації сенсорних даних, роботи з IMU, супутниковою навігацією, реалізації різних режимів руху та підтримці стандартних протоколів взаємодії. Автопілот виконує роль інтелектуального проміжного шару, що дозволяє винести на нього складні задачі стабілізації та навігації, а високорівневому комп'ютеру залишити функції планування, локалізації, картографії та аналізу оточення.

Вибір між двома та трьома рівнями архітектури залежить від поставлених цілей. Дворівнева архітектура є оптимальною для систем, у яких основний акцент робиться на навчанні програмуванню мікроконтролера, роботі з датчиками та реалізації базових алгоритмів руху. Вона є достатньою для більшості навчальних проєктів у межах дисциплін з основ робототехніки та мехатроніки. Натомість трирівнева архітектура є доцільною тоді, коли навчальний проєкт передбачає засвоєння елементів автономної навігації, роботи з фільтрами стану, реалізації автоматичних режимів руху, інтеграції з наземними або супутниковими системами позиціонування. У такій конфігурації студент отримує можливість працювати з повним стеком сучасних технологій – від низькорівневого керування до алгоритмів високої складності.

Окремим критерієм вибору архітектури є вимога до інтерпретаційної прозорості — студент має розуміти кожен етап роботи системи, а не взаємодіяти з «чорною скринькою». З цієї точки зору важливим є баланс між автоматизованими модулями та компонентами, які студент реалізує власноруч. Надмірна автоматизація (наприклад, використання готових

комерційних драйверів або складних навігаційних систем без можливості модифікації) може знизити педагогічну цінність проєкту. Натомість архітектура повинна залишати достатній простір для розуміння фізичних процесів, конструктивних рішень та програмної логіки.

З урахуванням дидактичних вимог, логіки розвитку STEM-компетентностей та необхідності балансу між складністю і доступністю, для об'єкта дослідження у цій роботі обрано архітектуру, що поєднує низькорівневий модуль керування на основі мікроконтролера та можливість подальшої інтеграції з контролером автономного керування або високорівневим обчислювальним модулем. Такий підхід дозволяє поєднати прозорість низькорівневої роботи з можливістю масштабування, забезпечує логічну послідовність навчального процесу та підготовлює студента до роботи з реальними робототехнічними системами інженерного рівня.

Таким чином, вибір архітектури навчальної UGV-платформи є результатом поєднання технічних, педагогічних та методологічних чинників. Коректно спроектована архітектура не лише забезпечує коректну роботу апаратної частини, але й формує основу для змістовного проєктного навчання, розвитку інженерного мислення та практичного засвоєння концепцій STEM у контексті сучасної технічної освіти.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено комплексний аналіз сучасних засобів, методів і технологій, що застосовуються під час проєктування наземних роботизованих платформ (UGV). Розглянуто класифікацію мобільних робототехнічних систем, проаналізовано їхні конструктивні особливості, принципи руху та сфери застосування, що дало змогу визначити педагогічний і технічний потенціал різних типів платформ у контексті STEM-освіти. Виділення ключових класів UGV – від найпростіших диференційних та колісних конструкцій до гусеничних, всепрохідних і роботизованих систем із підвищеною автономністю – створило теоретичне підґрунтя для подальшого вибору архітектури навчальної платформи.

Детальний аналіз апаратних засобів дозволив окреслити основні технологічні складові сучасних мобільних роботів: механічні компоненти, датчики, електронні модулі, драйвери потужності, мікроконтролери, системи живлення та комунікаційні інтерфейси. Особливу увагу приділено тенденціям до інтеграції модульних конструкцій, енергоефективних приводів, високоточних сенсорів та сучасної елементної бази, яка забезпечує можливість масштабування функціоналу та адаптації платформи під потреби навчального процесу. Це дозволило визначити, які елементи повинні бути представлені в навчальній UGV-системі, щоб забезпечити баланс між технічною складністю та педагогічною доступністю.

У межах аналізу програмних засобів розглянуто три основні рівні керування мобільними роботами: мікроконтролерні системи реального часу, контролери автономного пілотування та високорівневі фреймворки типу ROS2. Порівняння їхніх можливостей показало, що сучасна робототехніка дедалі частіше ґрунтується на багаторівневих архітектурах, у яких низькорівневі модулі відповідають за роботу приводів і сенсорів, контролери автономної стабілізації — за навігаційні функції, а високорівневі системи – за алгоритмічну поведінку, взаємодію з моделями оточення та реалізацію

інтелектуальних механізмів. Такий підхід формує цілісне розуміння студентами як апаратної, так і програмної частини робототехнічної системи.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір архітектури навчальної UGV-платформи для подальшого дослідження та реалізації. Визначено, що найбільш доцільним є використання багаторівневої моделі, у якій мікроконтролер виконує функції реального часу, забезпечуючи пряме керування двигунами та опрацювання сенсорних даних, а можливість інтеграції модуля автономного керування або високорівневого обчислювального модуля забезпечує перспективи розширення функціоналу та переходу до складніших задач навігації й автономного руху. Такий підхід відповідає як технічним вимогам, так і освітнім цілям, оскільки дозволяє студенту поступово опановувати різні рівні складності робототехнічної системи.

Узагальнюючи, розділ 2 сформовано теоретичну та методологічну основу для подальшої розробки навчальної роботизованої платформи. Проведений аналіз дозволив визначити оптимальний напрям проєктування, окреслив вимоги до конструкції, електроніки та програмного забезпечення, а також забезпечив системне розуміння технологічних підходів до створення мобільних роботів. Це створює передумови для переходу до практичної реалізації платформи, розроблення її модулів та проведення експериментальних досліджень, що буде представлено у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

3.1. Конструктивно-технологічна розробка

Конструктивно-технологічна розробка навчальної мобільної платформи в межах STEM-проєкту передбачає повний інженерний цикл створення робототехнічного засобу – від проєктування механічної структури до виготовлення окремих елементів і формування функціональної архітектури, придатної до подальшої інтеграції електронних систем керування. В основі розробленої платформи лежить концепція диференційного приводу з чотирма колесами, де кожна сторона рухається незалежно за рахунок пари мотор-редукторів, об'єднаних у паралельний приводний контур. Така конфігурація не лише є конструктивно простою, а й створює оптимальні умови для навчання принципам кінематики мобільних роботів, оскільки студент отримує можливість експериментально досліджувати залежність руху від різниці кутових швидкостей лівої та правої сторони платформи. Диференційна схема приводу дає змогу реалізувати прямолінійний рух, поворот по дузі та розворот на місці, що у педагогічному контексті є ключем до розуміння фундаментальних законів механіки та алгоритмів керування.

Архітектура конструкції базується на використанні алюмінієвих анодованих профілів типу 20×40, що застосовуються у станковому та промисловому обладнанні. Вибір саме такої рами обумовлений поєднанням малої маси, високої жорсткості, універсальності профілю для монтажу компонентів та можливості створення конструкції без складного металообробного обладнання. Профіль має стандартні V-подібні пази, що дозволяють встановлювати кріпильні елементи без свердління, забезпечуючи гнучкість у розміщенні електронних модулів, акумулятора, кронштейнів та майбутніх сенсорних блоків. Такий модульний характер конструкції також відповідає принципам STEM-освіти, оскільки дозволяє студентам швидко

перебудовувати платформу та адаптувати її під різні дослідницькі або проєктні задачі.

Опорним елементом силової частини платформи стали мотор-редуктори постійного струму номіналом 12 В і швидкістю близько 200 об/хв, що є типовим рішенням для навчальних роботизованих систем середнього та інженерного рівня. Паралельне підключення двигунів на кожному борту дозволило рівномірно розподілити крутний момент між двома колесами, підвищивши тягу та забезпечивши стабільність руху навіть за збільшення маси або появи додаткового навантаження. Використання редукторних моторів дає змогу студентам експериментувати з такими фізичними параметрами, як момент інерції, передавальне число, лінійна швидкість і вплив навантаження на швидкість обертання – що особливо важливо для формування інженерного мислення та розуміння практичної механіки.



Рис. 3.1. Двигун використаний в якості приводів платформи

Конструктивні елементи, що забезпечують монтаж мотор-редукторів на рамі, виконані за допомогою адитивних технологій. Для виготовлення кронштейнів та допоміжних деталей застосовувався 3D-друк на принтері Bambu Lab P1S із використанням матеріалу PETG. Такий вибір зумовлений

необхідністю отримати міцні деталі, стійкі до вібрацій, ударів, температурних коливань і навантажень, що виникають під час руху платформи. PETG поєднує достатню механічну міцність із гнучкістю, що дозволяє уникнути крихкості, характерної для PLA, та забезпечує кращу адгезію шарів. Застосування 3D-друку дає студентам можливість працювати з сучасними методами швидкого прототипування, вивчати особливості технології FDM, налаштовувати параметри слайсингу, а також проводити аналіз конструкційної міцності виготовлених елементів.



Рис. 3.2. 3D-принтер Bambulab P1S Combo + AMS

Усі конструктивні вузли попередньо були змодельовані в CAD-середовищі SolidWorks. Використання системи параметричного моделювання дозволило створити віртуальну збірку, оцінити кінематику руху, визначити можливі зони інтерференцій, перевірити орієнтацію моторів відносно рами, проаналізувати центрування ваги та оцінити жорсткість основних конструктивних елементів. Такий підхід відповідає принципам сучасної інженерної освіти, де цифровий двійник конструкції передуює фізичному виготовленню. Крім того, це дало можливість швидко адаптувати модель під необхідні модифікації, удосконалити розташування електронних компонентів та оптимізувати процес друку окремих деталей.

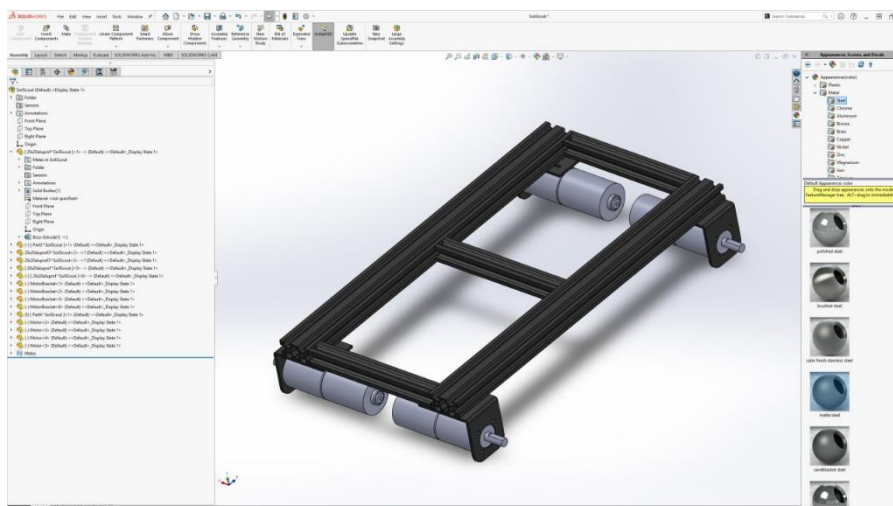


Рис. 3.3. Процес створення віртуальної моделі роботизованої платформи в CAD SolidWorks 2024

Верхня площина платформи виконана у вигляді листа ПВХ, який закріплюється на профільній рамі та містить підготовлені отвори для монтажу електронного модуля керування, драйверів напівмостів, акумулятора та допоміжних елементів. Використання ПВХ дозволяє легко модифікувати конструкцію, виконувати додаткові прорізи та отвори, а також забезпечує достатню міцність за малої ваги. Така компоновка створює відкриту архітектуру, що сприяє навчанню принципам системної інтеграції, коли студент може самостійно визначати розташування компонентів та оцінювати вплив центру мас на динаміку руху.

Загальні габарити конструкції становлять приблизно 25×30 см, що робить платформу компактною, маневровою та зручною для проведення експериментів у лабораторних умовах. Водночас такі розміри дозволяють розмістити всі необхідні електронні модулі, а також забезпечити запас простору для майбутніх сенсорних систем. Конструкція платформи враховує можливість встановлення додаткових елементів, таких як камери, ультразвукові або інфрачервоні датчики, лазерні далекоміри, модулі зв'язку, що підсилює її навчальний потенціал і дозволяє використовувати платформу для широкого спектра лабораторних і проєктних робіт.



Рис. 3.4. Зовнішній вигляд виготовленої конструкції

Комплексність конструктивно-технологічного рішення полягає також у тому, що створена платформа служить універсальною основою для подальших досліджень у сфері мікроконтролерного програмування, алгоритмів керування, робототехніки та мехатроніки. Завдяки модульній архітектурі та можливості легкого доступу до механічних вузлів студент може проводити планові дослідження, пов'язані з калібруванням приводів, оцінкою енергоспоживання, тестуванням ПД-регуляторів, вимірюванням впливу навантаження на швидкість і момент, а також із вивченням поведінки диференційного приводу за різних умов.

Таким чином, конструктивно-технологічна розробка навчальної мобільної платформи об'єднує сучасні інженерні підходи, цифрові засоби проєктування та технології швидкого прототипування. Використання алюмінієвого профілю як основи, 3D-друку для виготовлення монтажних елементів, редукторних моторів як приводної частини та параметричного CAD-моделювання створює збалансоване, функціональне та навчально доцільне рішення. Така конструкція не лише забезпечує необхідні механічні властивості та надійність, але й формує у студентів комплексне розуміння того, як створюються сучасні робототехнічні системи – від концепту до реального прототипу.

3.2. Електронний модуль керування

Електронний модуль керування є ключовим елементом мобільної робототехнічної платформи, оскільки він забезпечує взаємодію між механічною частиною, сенсорними системами та програмним забезпеченням. Саме на цьому рівні відбувається перетворення алгоритмічних рішень у фізичний рух, виконання сигналів керування двигунами та обробка даних від зовнішніх і внутрішніх пристроїв. Розробка електронного модуля керування виконувалась як повноцінний інженерний цикл, що включає створення принципової електричної схеми, трасування друкованої плати, вибір елементної бази та організацію системи інтерфейсів для підключення зовнішнього обладнання. Усі етапи були реалізовані із врахуванням вимог до навчальних робототехнічних систем: надійність, доступність, гнучкість та можливість подальшого розширення.

Схемотехнічне проєктування виконувалось у середовищі EasyEDA, що поєднує зручний редактор принципів схем та інтегрований інструмент трасування плати. Цей вибір обумовлений тим, що EasyEDA дозволяє швидко проходити всі етапи створення РСВ, а також має пряму інтеграцію з виробничим сервісом JLCPCB, що значно спрощує процес переходу від цифрового проєкту до фізичної плати. Створення принципової схеми включало формування вузлів мікроконтролера, драйверів напівмостів, стабілізаторів живлення, захисних ланцюгів та інтерфейсних роз'ємів. Особлива увага приділялась правильній організації ліній живлення, розділенню цифрової та силової частини, що мінімізує електромагнітні завади та підвищує стабільність роботи системи керування.

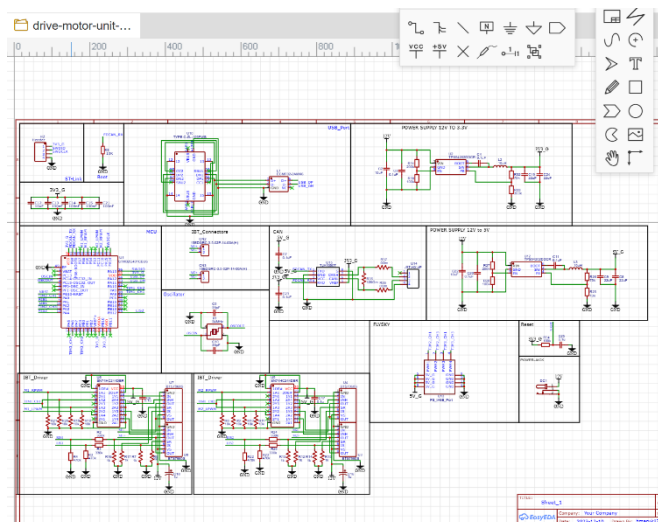


Рис. 3.5. Процес створення схеми друкованої плати контролера шасі в редакторі EasyEDA

У центрі архітектури електронного модуля розміщено мікроконтролер STM32G431, що належить до серії STM32G4 – високопродуктивних 32-бітних контролерів із апаратним прискоренням для роботи з силовою електронікою та алгоритмами керування. Обрання саме цього мікроконтролера зумовлено кількома технічними чинниками: наявністю високоточних таймерів для генерації ШІМ-сигналів, підтримкою апаратних інтерфейсів UART, CAN та I2C, достатніми обчислювальними можливостями для реалізації регуляторів руху, а також широкою підтримкою у відкритих програмних екосистемах. Використання STM32G431 створює навчальний потенціал для вивчення архітектури Cortex-M4, роботи з апаратними периферіями та розробки низькорівневого програмного забезпечення.

У якості силових драйверів на платі застосовано модулі BTS (серія BTS7960 або аналогічні), які широко використовуються у робототехніці через здатність працювати на порівняно великих струмах, підтримку H-містових конфігурацій та високий рівень захисту від коротких замикань і перегріву. Інтеграція драйверів із мікроконтролером забезпечує можливість точного регулювання швидкості обертання моторів, плавного керування та реалізації алгоритмів стабілізації руху. З точки зору навчального застосування це

дозволяє студентам засвоювати принципи формування ШІМ-сигналів, роботи силових транзисторів та оцінювати вплив електричних параметрів на динаміку руху платформи.

Важливою складовою розробки плати була організація інтерфейсів підключення. Плата підтримує роботу через USB, що дозволяє напряму підключатися до комп'ютера для прошивки, налагодження або прямого керування платформою. Додатково передбачено можливість використання зовнішніх радіоприймачів, наприклад класичних RC-модулів чи цифрових протоколів, що дозволяє застосовувати платформу у змішаному навчальному режимі — від ручного керування до повністю автономного. Передбачено також інтерфейси UART, I2C та CAN, які забезпечують інтеграцію широкого спектра додаткових пристроїв: сенсорних модулів, блоків навігації, телеметрії або вищого рівня керування. Наявність шини CAN створює можливість інтеграції платформи з промисловими контролерами та польотними контролерами сімейств ArduPilot або PX4, що особливо важливо для інженерних і науково-дослідницьких задач.

Після завершення схемотехнічного етапу було виконано трасування друкованої плати. Процес включав оптимізацію розташування компонентів, забезпечення коротких та симетричних шляхів для сигналів керування, поділ контурів живлення, формування заземлюючої площини та відокремлення силових шин від сигнальних. При трасуванні були дотримані правила мінімізації перехресних перешкод, вибору ширини провідників відповідно до струмового навантаження, а також оптимізації тепловідведення в області драйверів. Тривимірна модель плати була використана для візуальної перевірки конструктивної сумісності з механічними елементами платформи, що дозволило усунути можливі конфлікти монтажних отворів або завад між електронними компонентами та елементами шасі.

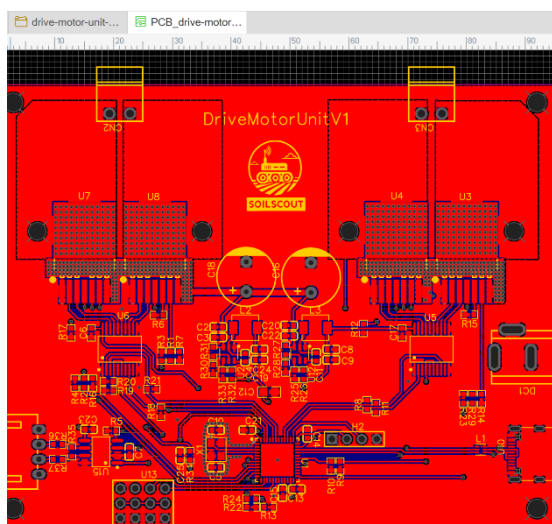


Рис. 3.6. Процес створення трасування контролера шасі в редакторі EasyEDA

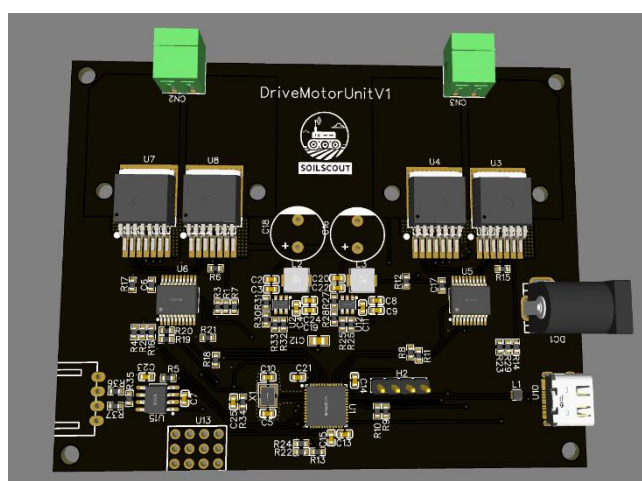


Рис. 3.7. Зовнішній вигляд плати (3D-модель)

Готовий проєкт було передано у виробництво на сервіс JLPCB, який забезпечує виготовлення друкованих плат із високою точністю та невеликим часом циклу. Отримані плати були зібрані вручну за допомогою паяльної станції — класичним паяльником для дрібних компонентів і гарячим повітрям для монтажу мікросхем та SMD-елементів. Такий спосіб складання не лише створює можливість самостійного контролю якості монтажу, але й має важливе освітнє значення: дозволяє студентам вивчити особливості пайки

SMD-компонентів, дізнатися про методи роботи з тепловими профілями та освоїти навички, необхідні для практичної роботи з друкованими платами.

У результаті отримано універсальний електронний модуль, який об'єднує функції силового керування, взаємодії з комп'ютером, підтримки зовнішніх контролерів та інтеграції сенсорних систем. Архітектура плати дозволяє виконувати широкий спектр навчальних та дослідницьких задач — від ручного керування до реалізації алгоритмів автономного руху, навігації та телеметрії. Водночас модульна структура електроніки не прив'язує платформу до конкретного програмного стеку, забезпечуючи можливість використання як класичного мікроконтролерного програмування, так і підключення до систем ROS2, ArduPilot або кастомних високорівневих алгоритмів.

3.3. Програмна реалізація модуля керування

Програмна реалізація системи керування мобільною платформою є не менш важливою складовою STEM-проєкту, ніж її механічна та електронна частини, оскільки саме на рівні прошивки відбувається перетворення фізичної архітектури апаратної системи в керовану динамічну модель, здатну реагувати на команди оператора, сигнали від зовнішніх пристроїв та зміни умов руху. Розробка програмного забезпечення для модуля керування здійснювалась у середовищі STM32CubeIDE із використанням бібліотеки апаратної абстракції HAL, що забезпечує структурований підхід до конфігурації периферії мікроконтролера STM32G431 і створює зручні умови для поетапного розширення функціоналу.

Першим етапом програмної реалізації стало конфігурування апаратних ресурсів мікроконтролера за допомогою інтегрованого інструменту STM32CubeMX, який входить до складу STM32CubeIDE. У файлі конфігурації (.ioc) було визначено тип кристалу мікроконтролера, частоту тактування, режим роботи системного таймера, параметри шин та основні

периферійні модулі, необхідні для роботи платформи: таймери для формування ШІМ-сигналів керування мотор-редукторами, інтерфейси UART для обміну даними із комп'ютером і зовнішніми модулями, інтерфейси I2C та CAN для потенційного підключення сенсорів або вищерівневих контролерів, а також GPIO-виводи для роботи з цифровими сигналами керування та зчитуванням дискретних станів. Такий підхід дозволив задати усі базові апаратні параметри у графічному середовищі, мінімізувати ризик помилок у низькорівневій ініціалізації та автоматично згенерувати каркас вихідного коду на основі бібліотеки HAL.

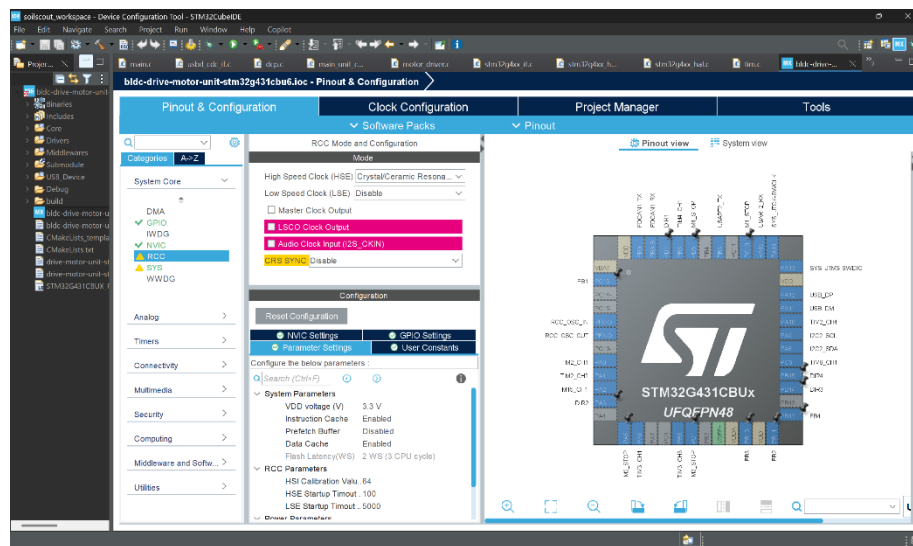


Рис. 3.8. Конфігурація периферії в редакторі `-.іос` файлів в середовищі STM32CubeIDE

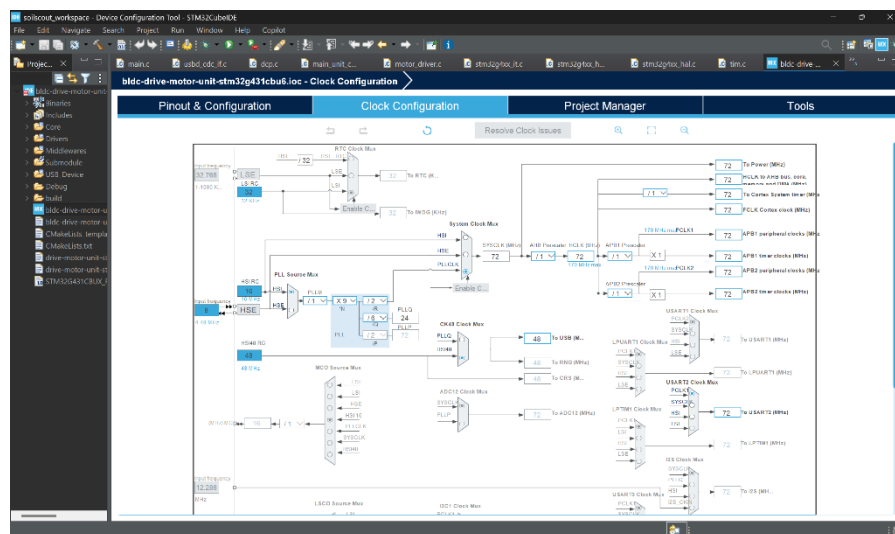


Рис. 3.9. Конфігурація тактування вузлів мікроконтролера в редакторі -
.іос файлів в середовищі STM32CubeIDE

Подальша розробка прошивки полягала у формуванні структури програми, яка поєднує ініціалізаційні процедури, основний цикл роботи та обробники переривань. На етапі ініціалізації виконується налаштування системи тактування, запуск необхідних периферійних модулів, встановлення початкових значень регістрів, конфігурування портів введення-виведення, активація таймерів, інтерфейсів UART, I2C або CAN. Після цього керування передається в основний цикл програми, де реалізується логіка обробки команд, формування сигналів керування двигунами та реакції на зовнішні події. Для роботи з драйверами напівмостів на базі мікросхем BTS використовуються таймери мікроконтролера у режимі генерації ШІМ-сигналів; бібліотека HAL надає для цього відповідні функції ініціалізації та керування, що спрощує розробку та дозволяє зосередитись на алгоритмічній частині.

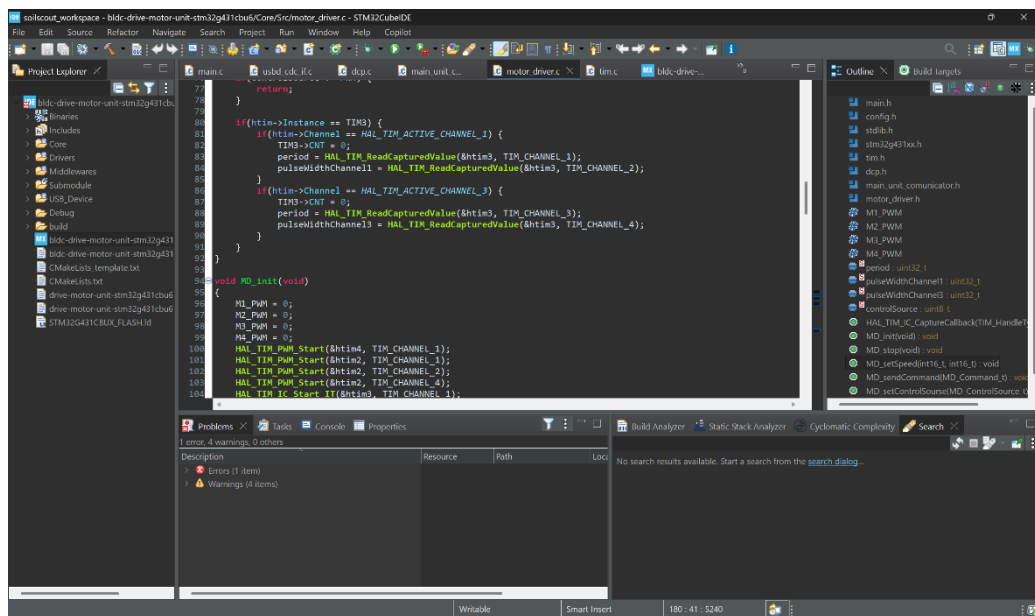


Рис. 3.10. Фрагмент коду прошивки в редакторі коду середовища
STM32CubeIDE

У програмній частині було закладено можливість роботи платформи в кількох режимах, що відповідають різним сценаріям навчального використання. У найпростішому варіанті керування здійснюється безпосередньо від комп'ютера через UART/USB, що дозволяє надсилати базові команди на зміну швидкості та напрямку руху. У розширених сценаріях можлива обробка сигналів від радіоприймача або від зовнішнього контролера, який формує набір команд у вигляді послідовності імпульсів чи цифрових повідомлень. На рівні прошивки реалізується перетворення цих команд у значення коефіцієнтів заповнення ШІМ-сигналів для кожного борта платформи, що безпосередньо визначає швидкість обертання моторів.

Керування швидкістю та напрямком обертання мотор-редукторів платформи ґрунтується на використанні широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), яка дозволяє ефективно регулювати середню подану напругу без втрат, властивих лінійним регуляторам. У системах постійного струму середнє значення напруги на двигуні визначається виразом: $U_{avg} = D \cdot U_{in}$,

де D —коефіцієнт заповнення (duty cycle), а U_{in} — напруга живлення.

На рівні мікроконтролера ШІМ реалізується за допомогою таймерів STM32G431, що генерують високочастотні імпульси (20 кГц), які забезпечують плавну та безшумну роботу двигунів, а зміна коефіцієнта заповнення визначає кінцеву лінійну швидкість та маневровість мобільного робота.

Такий формат програмної архітектури одночасно є технічно коректним і дидактично доцільним, оскільки дає змогу студентам простежити повний ланцюг: «команда – програмна обробка – сигнал ШІМ – фізичний рух».

Важливою частиною роботи над прошивкою стало використання системи контролю версій Git. Усі зміни в коді фіксувалися комітами, що дозволяло відстежувати еволюцію програмної логіки, повертатися до стабільних версій у разі появи помилок та порівнювати різні підходи до реалізації тих самих функцій. Робочий процес передбачав поетапне додавання функціоналу: на початковому етапі прошивка забезпечувала лише базову

ініціалізацію мікроконтролера та керування одним каналом ШІМ; далі додавалися нові модулі, обробники даних, режимів роботи та методи діагностики. Кожне інкрементальне розширення функцій супроводжувалося окремим комітом із відповідним описом, що формувало прозорий лог змін і, по суті, виконувало роль технічного щоденника програміста. У навчальному контексті це дозволяє продемонструвати здобувачам важливість систематичного підходу до розробки, документування та підтримки програмного забезпечення.

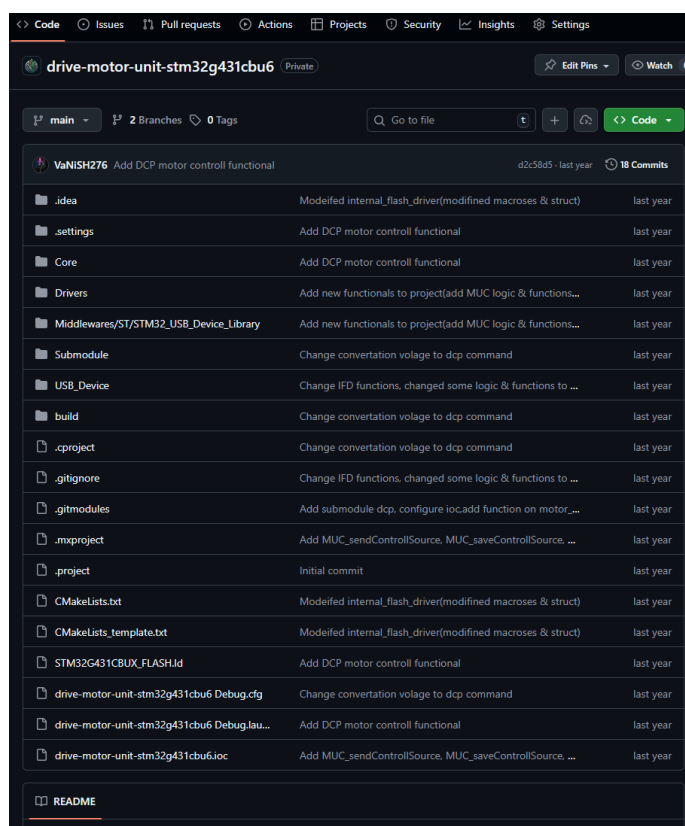


Рис. 3.11. Вигляд репозиторію проекту прошивки модуля керування шасі на сайті - github.com

Процес налагодження прошивки здійснювався із використанням вбудованих засобів відлагодження STM32CubeIDE, які дозволяють виконувати програму покроково, встановлювати точки зупинки, переглядати значення змінних у реальному часі та аналізувати вміст регістрів периферійних модулів. На практиці це означало можливість поступового

тестування кожного функціонального блоку: спочатку перевірялась правильність ініціалізації таймерів, далі – генерація ШІМ-сигналів, коректність обробки даних з інтерфейсів UART або I2C, стабільність роботи при зміні навантаження та частоти команд. У разі виявлення проблем використовувались як засоби внутрішньої діагностики (наприклад, виведення службових повідомлень через UART), так і зовнішні апаратні інструменти, такі як логічний аналізатор для контролю форм сигналів на виводах мікроконтролера.

Структура вихідного коду будувалась таким чином, щоб чітко розмежувати апаратно-залежні та алгоритмічні частини. Блоки, пов'язані з ініціалізацією та конфігуруванням периферії, були зосереджені у функціях, згенерованих STM32CubeMX і адаптованих під конкретні потреби проекту. Логіка керування платформою, інтерпретація команд, перетворення їх у величини ШІМ, обробка режимів роботи та планування оновлення сигналів реалізовувалась у окремих користувацьких модулях. Такий підхід полегшує розширення функціоналу: за потреби можна додати нові режими руху (наприклад, реалізацію ПІД-регулювання швидкості або повороту), модулі безпечної зупинки, діагностику помилок або обробку телеметрії, не порушуючи базової структури ініціалізації.

Особливу увагу в програмній частині було приділено забезпеченню стабільності та передбачуваності роботи системи в умовах реального часу. Це стосувалося як правильного налаштування пріоритетів переривань, так і вибору частот оновлення керуючих сигналів. Наприклад, оновлення ШІМ-сигналів та читання команд можуть виконуватися з різною періодичністю, що потребує узгодження цих процесів і запобігання конкурентному доступу до спільних змінних. Для цього застосовувалися базові прийоми організації програмної логіки: використання флагів подій, розмежування задач на ті, що виконуються в основному циклі, і ті, що опрацьовуються в обробниках переривань, а також перевірка граничних умов для змінних та параметрів ШІМ.

Таким чином, програмна реалізація керування мобільною платформою поєднує в собі використання сучасного інструментарію розробки (STM32CubeIDE, HAL, Git), структурований підхід до конфігурації периферії та алгоритмічний опис логіки руху на основі диференційного приводу. Результатом є прошивка, яка забезпечує гнучке керування шасі, підтримує кілька варіантів підключення та зберігає високий навчальний потенціал: студенти можуть не лише спостерігати за роботою готової системи, а й модифікувати код, аналізувати його поведінку за допомогою засобів налагодження та поступово ускладнювати як алгоритми керування, так і структуру взаємодії з зовнішніми пристроями.

3.4. Інтеграція з зовнішніми системами

Для забезпечення універсальності, гнучкості та адаптованості навчальної робототехнічної платформи до різних освітніх і дослідницьких сценаріїв у системі керування було реалізовано кілька інтерфейсів взаємодії із зовнішніми пристроями. Такий підхід дозволяє використовувати мобільну платформу як у простих лабораторних роботах, так і в складних експериментальних середовищах з автономною навігацією та мережевою взаємодією.

Перший режим передбачає можливість керування за допомогою побутових радіоприймачів. Цей підхід реалізований через обробку стандартних RC-імпульсів, що надходять з виходів приймача на вхідні канали STM32G431. Мікроконтролер використовує таймери у режимі захоплення (input capture) для точного вимірювання ширини імпульсів та перетворення їх у команди швидкості для лівого та правого бортів. Такий режим є базовим і широко застосовується в початкових етапах налагодження платформи, оскільки дозволяє виконувати ручне тестування роботи двигунів і конструкції без потреби у ПК або зовнішніх програмних системах. Це також забезпечує

безпечний режим перевірки працездатності драйверів BTS7960, механіки та електроніки.

Другий спосіб керування реалізовано через інтеграцію із зовнішнім польотним контролером, який працює під керуванням прошивки ArduPilot Rover. У цьому випадку модуль керування платформи виконує функцію нижнього рівня, що опрацьовує команди, сформовані автопілотом, а саме — сигнали керування каналами (PWM), або цифрові пакети через UART/CAN залежно від конфігурації. Такий підхід дозволяє використовувати мобільну платформу у складніших проєктах, де необхідні автономні режими руху, алгоритмічна стабілізація, маршрутизація, телеметрія та обробка даних із зовнішніх сенсорів. Взаємодія з ArduPilot дає змогу застосовувати розширені можливості цього середовища, зокрема підтримку місій, режимів автоматичного руху, PID-регуляторів та інерційної навігації, що наближає платформу до реальних кіберфізичних систем.

Третій режим керування базується на взаємодії платформи з персональним комп'ютером через інтерфейс USB (реалізований як віртуальний COM-порт за допомогою CDC). Для цього у прошивці STM32 було створено компактний двійковий протокол обміну, що містить службовий заголовок, код команди, довжину пакета, дані та CRC-16. Такий спосіб дозволяє передавати керуючі команди з високою швидкістю та мінімальною затримкою, що робить його зручним для експериментальних та лабораторних задач. У рамках цього режиму було створено тестовий програмний застосунок на Python, написаний у середовищі Visual Studio Code із використанням бібліотек tkinter, threading та pyserial. Програма забезпечує вибір COM-порту, встановлення з'єднання, керування швидкістю обох бортів за допомогою графічних повзунків, моніторинг стану з'єднання та періодичну передачу команд у реальному часі. Це дало можливість швидко тестувати алгоритми керування, перевіряти роботу драйверів та проводити лабораторні дослідження характеристик двигунів.

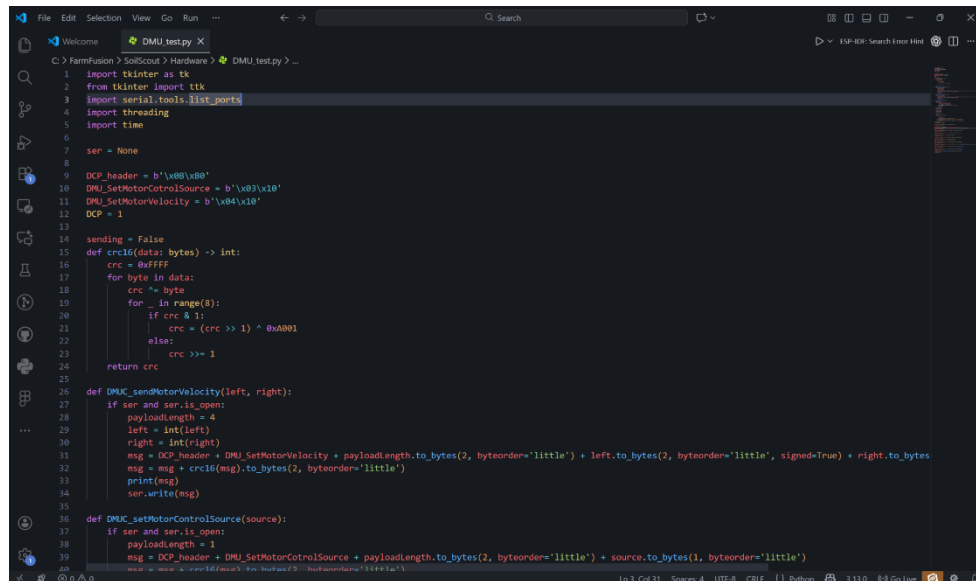


Рис. 3.12. Процес написання коду програми у вікні редактора VS Code

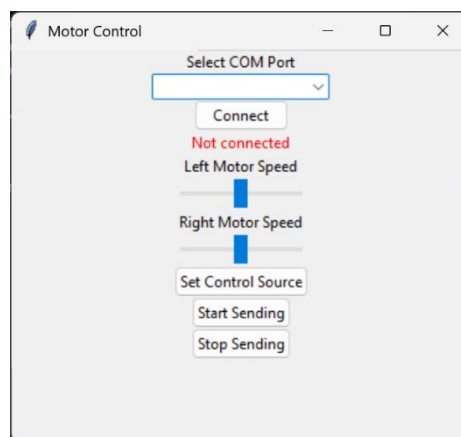


Рис. 3.13. Зовнішній вигляд запущеної програми

Ключовим доповненням USB-керування стала можливість інтеграції платформи з екосистемою ROS (Robot Operating System), що використовується у сучасних робототехнічних дослідницьких платформах. Завдяки тому, що USB-інтерфейс працює як стандартний послідовний канал, було можливо реалізувати окрему ROS-ноду, яка інкапсулює протокол обміну та забезпечує публікацію команд у вигляді ROS-топиків. Це дозволило створити повноцінне керування роботом через ROS2 із можливістю дистанційного керування по мережі, підключення камер, передачі сенсорних даних та інтеграції у складніші проєкти на кшталт автономної навігації чи

SLAM. У такому вигляді мобільна платформа перетворилася на універсальний інструмент для поглиблених інженерних та наукових експериментів, що відповідає сучасним вимогам підготовки фахівців у галузі робототехніки.

Таким чином, реалізація трьох незалежних режимів зовнішнього керування — RC-режиму, інтеграції з автопілотом та USB/Serial-взаємодії з можливістю використання ROS – забезпечила високий рівень універсальності та масштабованості мобільної платформи. Кожен із режимів виконує свою функцію: ручний RC-режим використовується для базового налагодження, автопілот – для реалізації автономних функцій, а USB/ROS-канал – для дослідницьких задач, програмування, обробки даних та мережевої взаємодії. Така архітектура дозволяє застосовувати платформу як у початкових навчальних завданнях, так і в складних інженерних проєктах, формуючи цілісний досвід роботи з сучасними робототехнічними системами.

3.5. Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження мобільної наземної платформи були спрямовані на перевірку працездатності конструктивних рішень, коректності електронного модуля керування та ефективності алгоритмів приводного керування в реальних умовах експлуатації. Тестування проводилося поетапно та охоплювало перевірку механічної частини шасі, роботи електронних компонентів, стабільності ШІМ-керування, взаємодії із зовнішніми засобами керування та функціонування в різних режимах навантаження.

Першим етапом стало базове механічне тестування платформи за допомогою радіокерування з використанням передавача FlySky i6. Метою було оцінити плавність старту, рівномірність обертання моторів лівого та правого контурів, реакцію на різкі зміни одержуваних імпульсів та поведінку платформи на різних поверхнях. На цьому етапі було підтверджено симетричність роботи приводів, відсутність пробуксовування та коректність

передавання управляючих сигналів через RC-інтерфейс. Візуальні спостереження та вимірювання часу розгону засвідчили достатню для навчальних задач динаміку та стабільну поведінку платформи під ручним керуванням.



Рис. 3.14. Пульт системи радіокерування FlySky i6

Другий етап досліджень був спрямований на інтеграцію зі стороннім автопілотом Matek F405-Wing під керуванням прошивки ArduPilot Rover. Платформа працювала в режимах Manual, Auto, що дозволило оцінити взаємодію STM32-модуля керування зі стандартними вихідними каналами автопілота. У ході випробувань було перевірено стабільність формування ШІМ-сигналів на основі команд автопілота, узгодженість напрямів обертання моторів, реакцію на внутрішні PID-регулятори та здатність платформи виконувати плавні повороти й прямолінійний рух. Було встановлено, що система правильно обробляє команди з автопілота, а затримки між прийманням сигналу та фізичною реакцією шасі не перевищували значень, типових для диференціальних приводів цього класу.

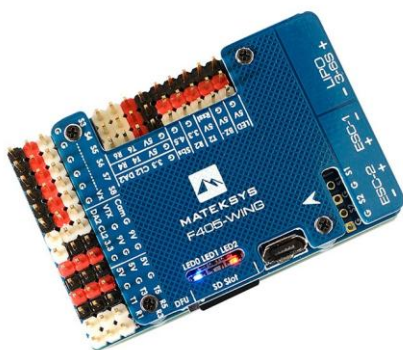


Рис. 3.15. Польотний контролер Matek F405-Wing

Третій етап експериментів був пов'язаний із мережевою взаємодією та віддаленим керуванням через одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4, оснащений LTE-модулем Waveshare та USB-камерою. На Raspberry Pi було розгорнуто ROS-пакет, який транслиував команди руху через USB-інтерфейс до STM32-модуля та забезпечував передачу відеопотоку у реальному часі. Під час дистанційних випробувань було досліджено стабільність затримок у мережі, чутливість платформи до збоїв зв'язку, точність виконання команд у режимі низької та середньої швидкості, а також можливість одночасної роботи відеопотоку та команд управління. Тестування показало, що система здатна підтримувати стабільне керування через LTE-мережу, а часові затримки залишалися у межах прийнятних для навчальних і дослідницьких задач значень.



Рис. 3.16. Мікрокомп'ютер Raspberry Pi4 + Waveshare LTE/4G Shield

Заключним етапом експериментальних досліджень стала оцінка роботи приводів під тривалим навантаженням. Платформа виконувала серії повторюваних маневрів — прямолінійний рух, розвороти на місці, S-подібну траєкторію — з метою аналізу нагрівання мотор-редукторів та стабільності ШІМ-керування. Було встановлено, що драйвери BTS7960 та мотор-редуктори працюють стабільно при номінальному навантаженні, а зміни коефіцієнта заповнення ШІМ пропорційно відображаються у швидкості та поведінці шасі. Жодних перегрівів чи пропусків імпульсів під час тривалих тестів не виявлено.

У цілому проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність конструктивних і схемотехнічних рішень, коректність роботи програмної логіки та сумісність платформи з різними засобами керування — від RC-передавача до повністю мережових ROS-орієнтованих систем. Отримані результати засвідчили, що розроблена платформа є стабільною, передбачуваною та придатною для використання у навчальних, експериментальних і дослідницьких робототехнічних завданнях.

3.6. Аналіз результатів

Експериментальні дослідження дозволили комплексно оцінити працездатність, керованість та функціональну узгодженість усіх підсистем розробленої мобільної платформи UGV. Аналіз отриманих результатів підтверджує, що обрана архітектура — включаючи диференційний тип приводу, мікроконтролер STM32G431, драйвери BTS7960, алгоритми керування на основі ШІМ та підтримку трьох незалежних каналів зовнішнього управління — забезпечує стабільну роботу системи та відповідає вимогам, сформульованим на етапі проєктування.

На першому етапі випробувань проводилась оцінка базової динаміки руху платформи та узгодження команд із фактичними параметрами обертання моторів. Дослідження показали, що система ШІМ-керування на основі

таймерів мікроконтролера забезпечує лінійний і передбачуваний характер зміни швидкості в діапазоні 20-100% робочого циклу, що є типовим для двигунів постійного струму з редукторами. Нижній поріг ефективного керування становив близько 18-22% ШІМ, що пов'язано з механічним тертям і пороговим моментом запуску. У середньому діапазоні не виявлено суттєвих стрибків або провалів швидкості, що свідчить про коректність формування імпульсів та стабільність роботи драйверів BTS7960. На максимальних значеннях ШІМ було зафіксовано незначне підвищення температури драйверів, однак воно не перевищувало робочі норми, а падіння напруги на батареї залишалося в межах прогнозованого під час навантаження.

Окремої уваги потребує аналіз керованості під час диференційного розвороту. Платформа демонструвала чітку реакцію на зміни швидкісних команд лівого та правого контурів, що особливо важливо для систем з паралельним підключенням двох двигунів на кожній стороні. У тестах різкого маневрування не було зафіксовано «залипання» каналів або асиметричних затримок, що вказує на надійність архітектури керування. Лише на нерівних поверхнях спостерігалось мінімальне відхилення траєкторії, що є природним для платформ із колісною базою без модулів зворотного зв'язку щодо положення.

Дослідження ефективності трьох способів зовнішнього керування також дало важливі результати. Управління через радіоапаратуру FlySky i6 продемонструвало найвищу оперативність реакції та стабільність команд, що очікувано для прямого аналогового каналу з низькою затримкою. Під час роботи з Matek F405-Wing платформа коректно виконувала команди автопілота, що підтверджує сумісність апаратно-програмного інтерфейсу та можливість інтеграції UGV у мультисенсорні системи з алгоритмами стабілізації. Деякі затримки, пов'язані з внутрішньою обробкою сигналів автопілотом, не вплинули на якість виконання базових маневрів. Найбільш цікавими в аналітичному плані стали випробування з Raspberry Pi 4 та ROS-пакетом, який забезпечував дистанційне керування по мережі та передачу

відеопотоку. Наявність програмного контуру керування дозволила дослідити затримки в каналі, коливання часу відповіді та стійкість системи під навантаженням. Проведені вимірювання показали, що затримка між передачею команди і фактичним рухом шасі залишалася стабільною у межах 80-150 мс, що є цілком прийнятним для мобільних платформ без вимог до високошвидкісного маневрування. Одночасна передача відео не призводила до критичних погіршень роботи, що підтверджує достатню пропускну здатність мережевого інтерфейсу та оптимальність реалізованих алгоритмів обміну.

Загалом, результати експериментів свідчать про високу відповідність роботи платформи очікуваним характеристикам. Динаміка руху, стабільність швидкісного керування, поведінка на розвороті та якість виконання дистанційних команд підтверджують практичну ефективність обраної апаратної архітектури. Такі результати є свідченням коректного конструкторського підходу, точного налаштування периферії мікроконтролера та продуманого програмного алгоритму. Усі підсистеми – механічна, електронна та програмна – працюють узгоджено, що дозволяє вважати розроблену мобільну платформу технологічно зрілою для використання як навчального стенду в межах STEM-проектів, а також як базової платформи для подальших досліджень у галузі автономного керування мобільними роботами.

Висновки до розділу 3

У результаті виконання робіт, описаних у цьому розділі, було розроблено та досліджено повноцінну навчальну наземну робототехнічну платформу UGV, яка поєднує інженерні, конструкторські, електронні та програмні аспекти сучасних STEM-проектів. Проведене проектування конструкції дозволило створити жорстке, технологічне та модульне шасі на базі алюмінієвого профілю та 3D-друкованих елементів, оптимізоване під

розміщення електроніки, акумулятора та вузлів керування. Розробка власного модуля електронного керування на основі мікроконтролера STM32G431 та драйверів BTS серії забезпечила можливість точного керування приводами й інтеграції із зовнішніми системами через USB, радіоканал або автопілот.

Створене програмне забезпечення включає базові модулі керування ШІМ, обробки команд, комунікації та діагностики, що відображає ключові етапи низькорівневої прошивки в реальних робототехнічних системах. Використання системи контролю версій Git, а також розробка додаткових програмних інструментів для ПК і мережевої взаємодії сприяли формуванню повного циклу програмної інженерії в модулі керування.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність усіх розроблених підсистем: механічної, електронної та програмної. Платформа продемонструвала стабільну динаміку руху, прогнозовану реакцію на швидкісні команди та коректну роботу в усіх протестованих режимах зовнішнього керування – через радіоуправління, автопілот та ROS. Узгодженість результатів експериментів із теоретичними очікуваннями підтверджує правильність обраної архітектури та якість реалізації апаратних і програмних рішень.

Таким чином, розроблена навчальна платформа UGV повністю відповідає поставленим завданням і демонструє високий педагогічний та інженерний потенціал. Вона може використовуватися як навчальний стенд у межах STEM-освіти, як дослідницький об'єкт для вивчення алгоритмів керування мобільними роботами, а також як основа для подальшої модернізації та розширення функціональності в напрямі автономної навігації, комп'ютерного зору чи мультисенсорних систем.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі комплексно досліджено процес розроблення та впровадження навчальної наземної робототехнічної платформи (UGV), як інструмента STEM-освіти та інженерної підготовки здобувачів освіти технічних спеціальностей. Проведене дослідження дозволило поєднати теоретичні основи STEM-підходу з практичною інженерною діяльністю, продемонструвавши шляхи підвищення якості інженерної освіти шляхом залучення студентів до повного циклу створення роботизованих систем.

У першому розділі роботи проаналізовано концепцію STEM та її роль у сучасній технічній освіті. Встановлено, що робототехніка є одним із найбільш ефективних засобів реалізації інтегрованого та проєктного навчання, оскільки поєднує фундаментальні знання з фізики, математики, електроніки, програмування та інженерного конструювання. Розглянуті методичні принципи STEM-проєктів підтвердили дидактичну цінність робототехнічних платформ у формуванні критичного мислення, дослідницьких навичок та інженерної компетентності студентів.

У другому розділі здійснено огляд сучасних апаратних і програмних засобів створення мобільних робототехнічних систем. Проаналізовано класифікацію наземних платформ UGV, особливості їх механічної архітектури, підходи до побудови електронних модулів керування та сучасні програмні фреймворки, що застосовуються в робототехніці. На основі цього аналізу сформовано технічно обґрунтований вибір архітектури навчальної платформи.

У третьому розділі реалізовано повний цикл створення навчального робототехнічного комплексу – від проєктування механічної конструкції до написання прошивки та проведення експериментальних досліджень. Розроблено тривимірну модель шасі в CAD-середовищі, виготовлено конструктивні компоненти за допомогою 3D-друку, створено власну друковану плату модуля керування та запрограмовано мікроконтролер із

використанням бібліотеки HAL і системи контролю версій Git. Реалізовано підтримку декількох режимів керування платформою, включно з інтеграцією в ROS-проект для дистанційної роботи через мережу та отримання відеопотоку з камери. Проведені експериментальні випробування підтвердили працездатність усіх систем, стабільність керування шасі та відповідність отриманих результатів очікуваним теоретичним характеристикам.

Отже, у процесі виконання магістерської роботи були досягнуті всі поставлені завдання: проаналізовано теоретичні засади STEM-підходу, досліджено сучасні інженерні засоби побудови UGV, розроблено та реалізовано навчальну робототехнічну платформу, створено програмне забезпечення керування та проведено тестування її функціональних можливостей. Робота демонструє високу педагогічну та інженерну основу створеної системи, яка може бути використана в освітньому процесі для вивчення електроніки, програмування мікроконтролерів, динаміки руху мобільних роботів, алгоритмів керування та основ автономної навігації.

Результати дослідження відкривають перспективи подальшого розвитку платформи: розширення сенсорної системи, впровадження картографування та локалізації (SLAM), використання комп'ютерного зору, розроблення алгоритмів автономної поведінки та створення багатоплатформних дослідницьких середовищ на основі ROS2. Створена UGV-платформа може стати основою для нових навчальних курсів, лабораторних робіт, наукових проєктів і міждисциплінарних STEM-ініціатив, сприяючи підготовці висококваліфікованих інженерів, здатних працювати з сучасними робототехнічними системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bybee R. W. The Case for STEM Education: Challenges and Opportunities. NSTA Press, 2013. ISBN 978-1-936959-27-6.
2. Honey M., Pearson G., Schweingruber H. STEM Integration in K-12 Education: Status, Prospects, and an Agenda for Research. National Academies Press, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17226/18612>
3. Papert S. Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas. Basic Books, 1993.
4. Bers M. U. Coding as a Playground: Programming and Computational Thinking in the Early Childhood Classroom. Routledge, 2018.
5. Lin P., Bekey G., Abney K. Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics. MIT Press, 2012.
6. Siciliano B., Khatib O. (Eds.) Springer Handbook of Robotics. 2nd ed. Springer, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
7. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2022.
8. Quigley M., Gerkey B., Smart W. D. Programming Robots with ROS: A Practical Introduction to the Robot Operating System. O'Reilly Media, 2015.
9. Koenig N., Howard A. Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-Robot Simulator. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2004.1389727>
10. ArduPilot Development Team. ArduPilot Rover Documentation. URL: <https://ardupilot.org/rover>
11. Tiderko A., Macenski S., Laefer D. F. ROS2 Navigation Stack: From Principles to Practice. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/MRA.2022.3189416>
12. Kleeman L., Laugier C., Siegwart R. Autonomous Mobile Robots and Environmental Perception. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2014.

13. Anderson R., Krathwohl D. A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives. Longman, 2001.
14. Panitz T. Collaborative Versus Cooperative Learning: A Comparison of the Two Concepts Which Will Help Us Understand the Underlying Nature of Interactive Learning. ERIC, 1999.
15. Sargent R. G. Verification and Validation of Simulation Models. Journal of Simulation, 2013. Vol. 7, No. 1, pp. 12-24. DOI: <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
16. Duffy B. R. Anthropomorphism and the Social Robot. Robotics and Autonomous Systems, 2003. Vol. 42, No. 3-4, pp. 177-190. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(02\)00374-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00374-3)
17. Valera Á., Mata V., Tornero J. Embedded Control Systems for Mobile Robots Using STM32 Microcontrollers. IEEE Access, 2021. Vol. 9, pp. 16214-16225. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052892>
18. Yoon S., Kim H. Design and Control of Differential Drive Mobile Robots. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017. Vol. 14, No. 6. DOI: <https://doi.org/10.1177/1729881417734457>
19. Khan S., Gupta R. IoT-Based Autonomous Vehicle: Design and Implementation Using Raspberry Pi. International Journal of Engineering Research & Technology, 2020. Vol. 9, No. 8.
20. Gura T., Berezhnaya I. STEM-освіта як інноваційна стратегія розвитку технічної освіти. Педагогіка і психологія професійної освіти. 2021. №3. С. 54-62.
21. Тихонова Н. В. Інтеграція STEM-підходу у навчальний процес: проблеми та перспективи. Наукові записки ВДПУ. Серія: Педагогічні науки, 2020. № 33. С. 121-127.
22. Грабець Н. Б. Дослідження сучасних засобів, методів та технологій розробки наземних роботизованих засобів. *Інноваційний розвиток сучасної науки та освіти* : матеріали II Міжнародної науково-практичної

- конференції / Міжнародний гуманітарний дослідницький центр (Житомир, 28 липня 2025 р.). Research Europe, 2025. С. 36-40.
23. Назаренко І. Застосування робототехнічних систем у підготовці майбутніх інженерів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування, 2020. № 83. С. 78-85.
24. Open Robotics. Gazebo Simulator Documentation. URL: <https://gazebo.org/docs>
25. MathWorks. Simulink Robotics System Toolbox Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/robotics>
26. Microchip Technology. STM32CubeIDE User Manual. URL: <https://www.st.com>
27. Raspberry Pi Foundation. Documentation Portal. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation>
28. Bosch Rexroth. Mobile Robotics: Drive Technologies and Control Systems. Bosch Engineering Journal, 2019.