

УДК 681.51:004.896
DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.4.16>

КОНСТРУКТИВНИЙ АНАЛІЗ БЮДЖЕТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИМИ ПЛАТФОРМАМИ

Янко А. С. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0000-0003-2876-9316

Михайліченко О. В. – аспірант кафедри автоматики, електроніки
та телекомунікацій Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0009-0009-3512-0030

Крук О. О. – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій
Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
ORCID ID: 0009-0000-7503-5249

Метою даного дослідження є визначення оптимальних критеріїв удосконалення функціональних можливостей та конструктивних особливостей бюджетних робототехнічних платформ. Це включає вивчення існуючих бюджетних рішень, їх аналіз з точки зору ефективності, функціональності, надійності та можливостей подальшого удосконалення. Предметом статті є конструктивні рішення та підходи до удосконалення функціональних можливостей бюджетних робототехнічних платформ. Сюди входить аналіз різних типів конструкцій, вибір матеріалів, архітектура системи, програмне забезпечення, засоби управління, сенсори та інші компоненти, які впливають на ефективність робототехнічних платформ. Дослідження зосереджене на визначенні основних критеріїв, які забезпечують оптимальне співвідношення ціни та якості, а також можливостей для подальшого удосконалення без значного збільшення витрат. Об'єктом дослідження є бюджетні робототехнічні платформи, призначені для різних сфер використання, що відповідають вимогам мінімальної вартості проєктування, виробництва та експлуатації, що робить їх доступнішими для широкого кола користувачів, але не накладає суттєвих обмежень на їх функціональні можливості та надійність. Визначені в рамках дослідження критерії надають цілісне уявлення про те, на що слід звертати увагу при проєктуванні та удосконаленні бюджетних робототехнічних платформ. Це дозволяє збалансувати вартість та якість, забезпечити необхідну функціональність і надійність, а також створити робототехнічну систему, що відповідає сучасним вимогам і стандартам. Використання цих критеріїв надає можливість створення ефективних рішень, які можуть бути впроваджені в різних галузях, забезпечуючи при цьому економічну ефективність та високоефективні технічні характеристики. Аналіз бюджетних рішень відкриває нові можливості для розробників, забезпечуючи гнучкість у виборі компонентів, які відповідають специфічним вимогам проєкту.

Ключові слова: бюджетні рішення, конструктивні обмеження, масштабованість, модульність, оптимальний критерій, робототехнічна платформа, спеціалізований мікроконтролер.

Yanko A. S., Mykhailichenko O. V., Kruk O. O. Constructive analysis of budget decisions for managing robots to determine the optimum criteria for improving functional capabilities and constructive features of robotic platforms

The purpose of the research is to determine the optimal criteria for improving the functional capabilities and design features of low-cost robotic platforms. This includes the study of existing budget solutions, their analysis from the point of view of efficiency, functionality, reliability and opportunities for further improvement. The subject of the article is constructive solutions and approaches to improving the functionality of low-cost robotics platforms. This includes analysis

of different types of structures, material selection, system architecture, software, controls, sensors, and other components that affect the performance of robotic platforms. The research is focused on identifying the main criteria that provide the optimal value for money, as well as opportunities for further improvement without significantly increasing costs. The object of the research is budget robotic platforms designed for various fields of use that meet the requirements of the minimum cost of design, production and operation, which makes them more accessible to a wide range of users, but does not impose significant restrictions on their functionality and reliability. The criteria determined within the framework of the study provide a holistic view of what should paid attention be designing and improving budget robotics platforms. This allows you to balance cost and quality, ensure the necessary functionality and reliability, as well as create a robotic system that meets modern requirements and standards. The use of these criteria provides an opportunity to create effective solutions that can be implemented in various industries, while providing economic efficiency and high-performance technical characteristics. Analysis of budget decisions opens up new opportunities for developers, providing flexibility in choosing components that meet specific project requirements.

Key words: *budget solutions, constructive limitations, scalability, modularity, optimal criteria, robotics platform, specialized microcontroller.*

Вступ. У сучасному світі робототехніка відіграє все більш важливу роль у різних галузях, таких як промисловість, сільське господарство, охорона здоров'я, освіта, військова справа тощо. Робототехніку можна назвати напрямком DDD – dull, dirty and dangerous, тобто там, де праця займає багато часу, брудна або небезпечна, саме там потрібні робототехнічні платформи. Однією з ключових тенденцій сьогодення є зниження витрат на розробку та виробництво робототехнічних систем, що стало можливим завдяки зростанню конкуренції серед виробників компонентів, таких як мікроконтролери, датчики та інші елементи управління. Пошук бюджетних рішень стає все більш актуальним, адже вони дозволяють малим і середнім підприємствам, а також стартапам, реалізувати свої ідеї, не вдаючись до великих фінансових інвестицій. Водночас, вибір оптимального мікроконтролера або іншого компонента є критично важливим для забезпечення надійності та продуктивності робототехнічних систем [1].

Дослідження конструктивних аспектів бюджетних рішень для керування роботами також може спростити процес вибору між різними платформами, що забезпечить більшу адаптивність і можливість швидкого реагування на зміни у вимогах ринку. Аналіз функціональних можливостей і конструктивних особливостей надасть цінні рекомендації для розробників, які прагнуть оптимізувати свої проекти, впроваджуючи новітні технології без значних фінансових витрат. Крім того, розробка нових підходів до керування роботами, які базуються на бюджетних рішеннях, може стимулювати розвиток інновацій в цій сфері, зокрема шляхом створення нових моделей програмного забезпечення для управління та інтеграції. Це відкриває можливості для дослідження нових алгоритмів, які можуть підвищити продуктивність автоматизованих систем і знизити їх енергоспоживання.

Зважаючи на постійне зростання технологічних вимог до робототехнічних систем, актуальним є питання забезпечення їхньої надійності та довговічності [2]. Бюджетні платформи повинні відповідати вимогам щодо якості та стабільності роботи, навіть за умови використання менш дорогих матеріалів та компонентів. Це вимагає розробки нових підходів до проектування та виробництва таких систем, що включає оптимізацію конструкції, використання інноваційних матеріалів та технологій, а також застосування передових методів контролю якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень у сфері бюджетних робототехнічних платформ виявляє широкий спектр наукових праць, що присвячені різним аспектам проектування, розробки та впровадження таких систем.

У дослідженні [3] запропоновано удосконалення конструктивних особливостей наземних роботизованих платформ, а саме запропоновано дизайн платформи, апаратні компоненти, архітектура програмного забезпечення та схема керування. Проте в рамках даного дослідження не було досліджено оптимальні критеріїв удосконалення функціональних можливостей роботизованих платформ.

Опен-сорсний проєкт [4] виведений як результат аналізу різних конструкційних рішень та керування для отримання робототехнічної платформи зі зменшенням загальної ціни продукту та з забезпеченням певного рівня надійності та модульності, як основних критеріїв. Однак запропоноване рішення має вигреш лише вартості робототехнічної платформи, основні технічні характеристики у порівнянні з аналогами не покращуються.

В дослідженні [5] представлено фреймворк із відкритим кодом для розробки оптимальних конструкцій для крокуючих роботів. Конструкційні параметри, наприклад, довжина сполучення, трансмісія (сукупність агрегатів, призначених для передавання крутного моменту від двигуна до ведучих коліс) та параметри пружини, оптимізовані для визначених користувачем показників, таких як мінімізація споживання енергії або пікового крутного моменту приводу. Автори покращують вищеописані параметри, при цьому не пропонують доступних в плані фінансових затрат рішень для реалізації крокуючих роботів.

Створення модулю контролю для функціонування колісної робототехнічної платформи на базі критеріїв енергоефективності та надійності розкрито у дослідженні [6]. Симуляція показує, що порівняно з традиційним PID-регулюванням, запропоноване FNNC-регулювання дає можливість зменшити час наростання, залишаючи платформу в стабільному стані. Критерій бюджетних рішень для реалізації запропонованих розробок не пропонується.

На основі аналізу досліджень [3-6], можна зробити висновок, що при розробці та проєктуванні сучасних робототехнічних платформ питанню аналіз бюджетних рішень та вибору оптимальних критеріїв удосконалення функціональних можливостей та конструктивних особливостей приділяється незначна увага. Невирішеність цього питання, не дозволяє в повній мірі розробникам робототехнічних платформ збалансувати вартість і якість, забезпечити необхідну функціональність і надійність, а також створити систему, що відповідає сучасним ринковим вимогам. Використання цих критеріїв надає можливість створення ефективних рішень, які можуть бути впроваджені в різних галузях, забезпечуючи при цьому економічну ефективність та високі технічні характеристики.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів. Розглянемо різні бюджетні рішення, які можна використовувати для створення та керування робототехнічними платформами в першу чергу необхідно звернути увагу на форм-фактор контролера, що показує технічні можливості, а також накладає загальні конструктивні обмеження. Визначимо, що малорозмірними типами контролерів на ринку являються Arduino Nano, Arduino Micro та Arduino Pro Mini, які підійдуть для використовуються в малих проєктах з малим набором функціональних можливостей. Більші плати створені для розширення кількості входів/виходів для забезпечення масштабованості проєктів.

Представимо одним рисунком 1 порівняння розмірів різних конструктивних контролерів серії MCU, при цьому необхідно враховувати, що не всі виробники вказують коректну інформацію про розміри. При проєктуванні робототехнічних платформ необхідно здійснювати уточнення фізичних розмірів обраних друкованих плат (англ. printed circuit board, PCB).

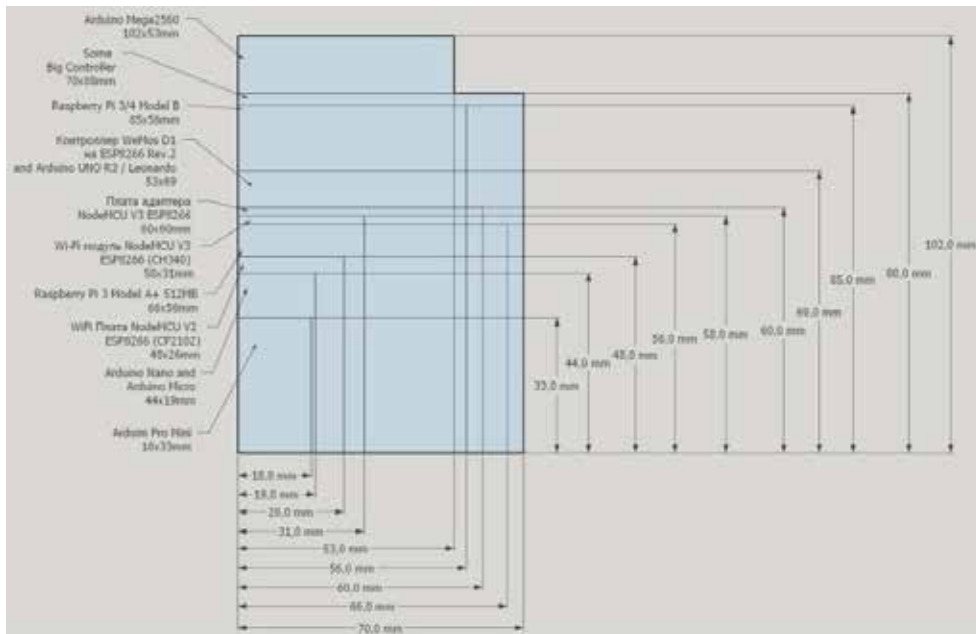


Рис. 1. Розміри плат PCB деяких популярних модулів MCU

Відповідно до критеріїв популярності та дешевизни практичними рішеннями є Arduino та Raspberry Pi. Найсуттєвіша відмінність між Arduino та Raspberry Pi полягає в тому, що перший є мікроконтролером, який може виконувати лише скомпільований код C, тоді як другий може додатково функціонувати як автономна система. Тим не менш, Raspberry Pi не завжди є кращим вибором для різноманітних систем, про що свідчать слабкі сторони, недосконалість сценаріїв застосування тощо. Плати Arduino насамперед показують себе у двох аспектах: по-перше, вони пропонують попередньо встановлені можливості обробки, включаючи периферійні пристрої (введення/виведення та інтерфейси), привабливі навіть для тих, хто має обмежені знання електроніки. По-друге, ключовою перевагою цих італійських платформ є їхнє спеціально створене середовище розробки, яке містить інтерфейс програмування, забезпечений готовими до використання бібліотеками, що спрощує процес кодування. Крім того, оскільки інтегроване середовище розробки IDE написана мовою Java, що являється є кросплатформною та має узгоджені інтерфейси для Windows, Linux і macOS.

Однак простота плат Arduino не завжди є перевагою. Хоча IDE надійно підтримує апаратні диски, починаючим програмістам може бути складно отримати знання про традиційне написання коду цим шляхом. Покладання виключно на готові до використання бібліотеки створює ризик обійти незалежне програмування, потенційно звужуючи сферу можливих дій. Іншим обмеженням Arduino є випадкова необхідність розширити налаштування плати мікроконтролера за замовчуванням за допомогою додаткових інтерфейсів і функцій введення/виведення. Хоча стандартизоване апаратне забезпечення дозволяє легко оновлювати через Shields, витрати на проєкт можуть зрости при включенні додаткових модулів, таких як Ethernet, світлодіоди та інші модулі.

Відмінною рисою Raspberry Pi є готове до розгортання апаратне забезпечення, що позбавляє користувачів важкої роботи зі збирання технологічної основи для проєктів DIY. На відміну від плат Arduino, Raspberry Pi містить усі необхідні компоненти, що дозволяє автономно працювати з цим міні-комп'ютером. Крім того, більшість моделей оснащені стандартними мережевими функціями (Ethernet, WLAN або обидва) – лише у версіях A та A++ Pi 1 разом з урізаним Pi Zero немає таких інтерфейсів. Завдяки таким функціям Raspberry Pi може подвоювати роль платформи програмування та центру програм, починаючи від приватних хмар і веб-серверів до серверів VPN на Raspberry Pi.

Однією з головних подібностей між Arduino та Raspberry Pi є те, що вони обидва працюють за принципом «підключи та працюй», що усуває потребу в конструюванні та тестуванні електронних схем або паянні друкованих плат. Розбіжності в їхніх реальних програмах головним чином впливають із фундаментальних відмінностей між Raspberry Pi та Arduino: плати Arduino, будучи мікроконтролерами, можуть виконувати заздалегідь визначені програми майже без затримки. Середовище розробки, що укомплектоване великою кількістю готових до використання бібліотек економить значну кількість зусиль програмування. З іншого боку, Raspberry Pi, як міні-комп'ютер зі своєю ОС, може виконувати складніші завдання, як-от запуск кількох програм паралельно або послідовно. Крім того, стандартно поставляється з різними інтерфейсами та портами (HDMI, WiFi, LAN), тоді як плати Arduino потребують додаткових щитів для забезпечення цих функцій.

Визначимо, що якщо потрібен простий та надійний мікроконтролер для виконання завдань в реальному часі, то потрібно обрати Arduino. Arduino підходить для проєктів з обмеженим бюджетом та простими вимогами. З іншого боку, якщо потрібно створити більш складні проєкти, які вимагають повноцінного операційного середовища, то Raspberry Pi може бути більш підходящим варіантом.

Одним із комбінованих по функціоналу мікроконтролерів є серія STM32. Завдяки архітектурі ARM Cortex-M ці мікроконтролери пропонують високу продуктивність, енергоефективність і надійність, а також мають вбудований стек. Крім того, вони мають апаратну підтримку обробки векторів переривань, що забезпечує швидку та ефективну обробку даних. Ця архітектура є однією з найпопулярніших для вбудованих систем і мікроконтролерів, які використовуються в різних сферах, таких як автомобільна, медична. Однією з головних переваг ARM Cortex-M є його простота та ефективність. Ці аспекти дозволяють процесору виконувати велику кількість дій швидко та ефективно та з високою продуктивністю і низьким енергоспоживанням [7].

Мікроконтролерів STM32 забезпечують високий рівень безпеки, наприклад на рівні апаратного захисту, також відбувається AES шифрування даних. Даний тип мікроконтролерів має розміри схожі з розмірами плат Arduino і тому має такі самі обмеження форм-фактору.

Мікроконтролери STM32 засновані на 32-бітних RISC ядрах ARM Cortex M0/M0+, M3, M4 і M7 і поділяються на 4 основні сімейства: Для бездротових рішень: STM32WB3 і STM32WL3. Енергоефективні: STM32L0, STM32L1, STM32L5, STM32L4 і STM32L4+. Стандартні: STM32F0, STM32G0, STM32F1, STM32F3 і STM32G4. Високопродуктивні: STM32F2, STM32F4, STM32F7 і STM32H7. Ядра Cortex-M0-M7 відрізняються продуктивністю (Cortex-M0 – 0.84 DMIPS / МГц, Cortex-M3/M4 – 1.25DMIPS / МГц), системою команд і деякими особливостями ядра (чим більше номер ядра, тим більше продуктивність і більше функцій).

Спеціалізований мікроконтролер ESP32 – це Wi-Fi мікроконтролер китайського виробника Espressif з двоядерним 32-розрядним процесором Tensilica Xtensa LX6 та 520 Кб пам'яті SRAM. Контролер має тактову частоту до 240 МГц залежно від режиму споживання енергії. Даний тип мікроконтролерів став популярний за рахунок дешевизни, а також доступності та контролю на відстані за допомогою Bluetooth та Zigbee і тмоу потребують додаткові моделі для контролю на відстані. Для розробки підтримується Arduino IDE та PlatformIO. Мікроконтролери цієї серії широко використовуються в проєктах промислової автоматики, а саме робототехніці. Слід наголосити, що в більшості Інтернет-ресурсах наявна неточна інформація по ESP32, написана авторами з низькою кваліфікацією. Здебільшого називають ESP32 платою, але це є серія мікроконтролерів.

На основі проведеного аналізу виведемо оптимальні критерії мікроконтролерів для удосконалення функціональних можливостей та конструктивних особливостей робототехнічних платформ. Ключовими обмежувальними характеристиками для можливості подальшого удосконалення є продуктивність та обчислювальна потужність мікроконтролеру, що залежить від наступного:

1. Розрядність процесора: мікроконтролери бувають 8-бітними, 16-бітними та 32-бітними. Розрядність визначає обсяг даних, який мікроконтролер може обробляти за один такт. 8-бітні (наприклад, AVR): менш потужні, використовуються для простих задач, таких як керування світлодіодами або простими сенсорами; 32-бітні (наприклад, ARM Cortex-M): мають вищу продуктивність і можуть виконувати складні обчислення, обробляти сигнали з високою частотою та працювати з великими обсягами даних.

2. Швидкість обробки даних: тактова частота визначає, скільки операцій мікроконтролер може виконати за дуже короткий проміжок часу. Наприклад, мікроконтролер з тактовою частотою 72 МГц може виконувати до 72 мільйонів інструкцій за секунду. Висока тактова частота (більше 48 МГц) необхідна для задач, що потребують швидкої обробки даних, наприклад, для управління роботом в реальному часі або обробки великих масивів даних (відеосигналу). Більш низька тактова частота підходить для простих задач, де не потрібна швидка реакція системи.

3. Оперативна пам'ять (RAM): використовується для зберігання тимчасових даних під час виконання програм. Більший обсяг RAM дозволяє виконувати складніші алгоритми і працювати з більшими обсягами даних. Для базових задач може вистачати 2-8 КБ RAM. Для більш складних задач, таких як обробка даних з кількох сенсорів одночасно, потрібно 32-128 КБ RAM.

4. Постійна пам'ять (Flash/EEPROM): використовується для зберігання програмного коду та конфігурацій. Більший обсяг пам'яті дозволяє зберігати більш об'ємний програмний код, а також великі бібліотеки. Для простих програм може вистачати 16-32 КБ Flash. Для розширених функцій і бібліотек, що забезпечують роботу з сенсорами, комунікаційними модулями та іншими пристроями, потрібно 256-512 КБ Flash.

5. Підтримка багатозадачності: деякі мікроконтролери підтримують багатозадачність, що дозволяє виконувати кілька процесів одночасно. Це важливо для задач, де роботу потрібно одночасно керувати рухом, обробляти дані з сенсорів і забезпечувати комунікацію, що досить актуально для робототехнічних платформ.

6. Реакція на переривання: мікроконтролери повинні швидко реагувати на переривання, наприклад, на сигнали з сенсорів або інших пристроїв. Низька

затримка між виникненням переривання і його обробкою є критичною для робототехнічних платформ реального часу.

Характеристиками для можливості подальшого функціонального удосконалення шляхом додавання нових деталей є:

1. Масштабованість та модульність: оптимальний мікроконтролер має підтримувати широкий набір цифрових і аналогових входів/виходів, таких як UART, SPI, I2C, PWM. Це дозволяє легко підключати різні сенсори, актуатори та інші периферійні пристрої, забезпечуючи масштабованість і гнучкість системи. Мікроконтролери з можливістю підключення додаткових модулів і плат розширення (наприклад, через шини GPIO або спеціалізовані роз'єми) дозволяють легко адаптувати платформу до нових задач або змінювати її функціональність без повного перепроектування.

2. Сумісність та легкість програмування: мікроконтролери, що підтримують програмування на C/C++ (наприклад, використання PlatformIO або Arduino IDE), забезпечують легкість у розробці та інтеграції програмного забезпечення. Це важливо для бюджетних проектів, де швидкість і зручність розробки мають велике значення. А велика кількість готових бібліотек і прикладів коду для роботи з периферією, комунікаційними модулями і сенсорами значно спрощує розробку функціональних можливостей робототехнічних платформ.

3. Наявність апаратної підтримки для спеціальних інструкцій: апаратні прискорювачі для операцій з плаваючою комою, що особливо важливо для обробки сигналів або складних математичних розрахунків.

4. Комунікаційні можливості: мікроконтролери з вбудованою підтримкою Wi-Fi або Bluetooth забезпечують можливості дистанційного керування, збору даних та інтеграції з іншими системами. Наприклад, ESP32 є популярним бюджетним рішенням з вбудованими Wi-Fi та Bluetooth.

5. Гнучкість конструкції: забезпечення гнучкості в підключенні та керуванні різними типами сенсорів і виконавчих механізмів, що дозволяє використовувати робототехнічну платформу для різних завдань без значних модифікацій. Можливість простого оновлення прошивки та достатній запас обчислювальної потужності для адаптації до нових функцій і завдань.

Виведемо додаткові характеристиками для зменшення енергоспоживання:

1. Використання мікроконтролерів з низьким енергоспоживанням: мікроконтролери, такі як STM32 або ESP32, забезпечують енергоефективність завдяки режимам зниженого споживання енергії. Це важливо для автономних робототехнічних систем, де економія енергії дозволяє збільшити тривалість роботи від батарей.

2. Інтеграція режимів енергозбереження: впровадження енергозберігаючих режимів сну та очікування, що знижує споживання енергії під час простою або в моменти низької активності.

Висновки. Визначені критерії надають цілісне уявлення про те, на що слід звертати увагу при проектуванні та удосконаленні бюджетних робототехнічних платформ. Вони дозволяють розробникам збалансувати вартість та якість, забезпечити необхідну функціональність і надійність, а також створити систему, що відповідає сучасним вимогам і стандартам. Використання цих критеріїв надає можливість створення ефективних рішень, які можуть бути впроваджені в різних галузях, забезпечуючи при цьому економічну ефективність та високоєфективні технічні характеристики. Аналіз бюджетних рішень відкриває нові можливості для розробників, забезпечуючи гнучкість у виборі компонентів, які відповідають специфічним вимогам проекту.

Таким чином, конструктивний аналіз бюджетних рішень є важливим кроком для забезпечення надійності, ефективності та інноваційності в розробці робототехнічних платформ. Це дозволяє створювати конкурентоспроможні рішення, які можуть адаптуватися до змінюваних умов і вимог ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Neupane, S., Mitra, S., Fernandez, I., Saha, S., Mittal, S., Chen, J., Pillai, N., & Rahimi, S. (2024). Security Considerations in AI-Robotics: A Survey of Current Methods, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 12, 22072–22097. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3363657>
2. Грозмані, Я., Майдан, П., Макаришкін, Д., Соколан, К., & Радельчук, Г. (2023). Моделювання автоматичної системи керування автономним мобільним роботом. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 240–244. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-32>
3. Nguyen, T.-T., Somers, L., Bosch, J., De Cubber, G., Janssens, B., & Bruyninckx, H. (2023). Affordable and Customizable Research and Educational Aerial and Surface Vehicles Robot Platforms -first implementation. *17th Mechatronics Forum International Conference*, 11-12 September 2023, Leuven, Belgium. <https://mechatronics2023.eu/>
4. Weerakkodi, N., Zhura, I., Babataev, I., Nazarova, E., Fedoseev, A., & Tsetserukou, D. (2022). HyperDog: An Open-Source Quadruped Robot Platform Based on ROS2 and micro-ROS. *Intelligent Space Robotics*, 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.09171>
5. Chadwick, M., Kolvenbach, H., Dubois, F., Lau, H., & Hutter, M. (2020). Vitruvio: An Open-Source Leg Design Optimization Toolbox for Walking Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6318–6325. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3013913>
6. Wang, X., Tu, C., & Pius, O. (2023). Robot Wheels Controller System. In: Nagar, A.K., Singh Jat, D., Mishra, D.K., Joshi, A. (eds) *Intelligent Sustainable Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*, 579. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7663-6_33
7. Романчук, Р. О. (2023). Особливості та загальні характеристики мікроконтролерів STM32. VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 167–167. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41140>

REFERENCES:

1. Neupane, S., Mitra, S., Fernandez, I., Saha, S., Mittal, S., Chen, J., Pillai, N., & Rahimi, S. (2024). Security Considerations in AI-Robotics: A Survey of Current Methods, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 12, 22072–22097. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3363657> [in English].
2. Hrozmani, Ya., Maidan, P., Makaryshkin, D., Sokolan, K., & Radelchuk, H. (2023). Modeliuvannya avtomatichnoi systemy keruvannya avtonomnym mobilnym robotom [Modeling of the automatic control system of an autonomous mobile robot]. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 240–244. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-32> [in Ukrainian].
3. Nguyen, T.-T., Somers, L., Bosch, J., De Cubber, G., Janssens, B., & Bruyninckx, H. (2023). Affordable and Customizable Research and Educational Aerial and Surface Vehicles Robot Platforms -first implementation. *17th Mechatronics Forum International Conference*, 11-12 September 2023, Leuven, Belgium. <https://mechatronics2023.eu/> [in English]
4. Weerakkodi, N., Zhura, I., Babataev, I., Nazarova, E., Fedoseev, A., & Tsetserukou, D. (2022). HyperDog: An Open-Source Quadruped Robot Platform Based on ROS2 and micro-ROS. *Intelligent Space Robotics*, 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.09171> [in English]

5. Chadwick, M., Kolvenbach, H., Dubois, F., Lau, H., & Hutter, M. (2020). Vitruvio: An Open-Source Leg Design Optimization Toolbox for Walking Robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6318–6325. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3013913> [in English]
 6. Wang, X., Tu, C., & Pius, O. (2023). Robot Wheels Controller System. In: Nagar, A.K., Singh Jat, D., Mishra, D.K., Joshi, A. (eds) *Intelligent Sustainable Systems. Lecture Notes in Networks and Systems*, 579. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7663-6_33 [in English]
 7. Romanchuk, R. O. (2023). Osoblyvosti ta zahalni kharakterystyky mikrokontroleriv STM32 [Features and general characteristics of STM32 microcontrollers]. *VI Mizhnarodna studentska naukovo-tekhnichna konferentsiia «Pryrodnychi ta humanitarni nauky. Aktualni pytannia» – VI International Student Scientific and Technical Conference «Natural and human sciences. Current issues»*, 167–167. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41140> [in Ukrainian].
-