

DOI: 10.18372/2310-5461.71.21452

УДК: 004.312.46:004.738.5:004.41 (045)

М. В. Куклінський, канд.техн.наук, доцент

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0002-2028-9206>

e-mail: m.kuklinskyi@duikt.edu.ua;

Б. І. Сverdлюк, аспірант

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0001-2863-9215>

e-mail: b.sverdliuk@duikt.edu.ua;

Ю. К. Каграманова, аспірантка

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0000-3776-2250>

e-mail: y.kahramanova@duikt.edu.ua;

А. І. Бондаренко, аспірант

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0007-7493-4294>

e-mail: a.bondarenko@stud.duikt.edu.ua

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОРТАТИВНИХ НАВЧАЛЬНО-ІГРОВИХ КОНСОЛЕЙ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

Вступ

Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та вбудованих обчислювальних систем істотно розширив сферу застосування портативних мікроконтролерних платформ [1–3]. Пристрої, які раніше використовувалися переважно для запуску ігор, нині виконують функції універсальних програмно-апаратних комплексів, придатних для навчання, експериментальних досліджень, створення прототипів і розробки прикладного програмного забезпечення. Значну роль у цьому відіграє поява сучасних мікроконтролерів різних архітектур, зокрема ATmega, ARM Cortex-M0+, ESP32 та ESP32-S3, що забезпечують високий рівень продуктивності при компактних розмірах і низькому енергоспоживанні.

Сучасні портативні консолі оснащуються кольоровими дисплеями, засобами бездротового зв'язку, підтримкою карт пам'яті та можливістю підключення додаткових модулів. Завдяки цьому вони наближаються за функціональністю до компактних одноплатних комп'ютерів, залишаючись доступними для широкого кола користувачів. На відміну від традиційних комерційних ігрових систем, більшість таких платформ орієнтована на спільноту розробників, STEM-освіту, швидке прототипування IoT-пристроїв, вивчення вбудованих систем і проведення досліджень у сфері інформаційної безпеки.

Кожна з існуючих платформ характеризується власним поєднанням технічних параметрів, серед яких обчислювальна потужність, обсяг оперативної та постійної пам'яті, наявність модулів Wi-Fi і Bluetooth, підтримка карт MicroSD, а також особливості програмної екосистеми. Це зумовлює необхідність їх комплексного порівняння з метою визначення переваг і обмежень різних апаратних рішень.

Постановка проблеми

Наявність значної кількості портативних мікроконтролерних платформ із різними апаратними та програмними характеристиками ускладнює обґрунтований вибір пристрою для конкретних завдань. Окремі технічні показники не дають змоги повною мірою оцінити функціональний потенціал таких систем, а відсутність єдиного підходу до їх порівняння ускладнює визначення переваг і обмежень кожної платформи.

Тому актуальним завданням є формування сукупності критеріїв та методу комплексного оцінювання, що дозволить систематизувати портативні навчально-ігрові консолі й визначити найбільш доцільні сфери їх практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток портативних ігрових консолей тривалий час відбувався в межах закритих програмно-апаратних екосистем, де користувачі могли лише

використовувати вже створений виробником контент. Ситуація суттєво змінилася після широкого поширення доступних і продуктивних мікроконтролерів сімейств ESP8266 та ESP32 [4, 5], а також завдяки розвитку концепції Open Hardware [6], яка надала розробникам можливість вільно створювати власні апаратні рішення та модифікувати існуючі конструкції. Використання відкритих ліцензій значно спростило проектування друкованих плат, адаптацію схемотехнічних рішень і проведення експериментів без обмежень, характерних для закритих платформ.

Одночасно активно розвивалися й програмні засоби. Поява середовищ розробки Arduino IDE та PlatformIO зробила програмування мікроконтролерних систем доступним для широкого кола користувачів [7]. Відкритий вихідний код бібліотек і програмних компонентів сприяв швидкому обміну досвідом, повторному використанню програмних рішень та їх подальшому вдосконаленню, що перетворило процес розроблення на колективну діяльність світової спільноти розробників.

Сучасні портативні консолі, побудовані на базі мікроконтролерів, вже не обмежуються виконанням функцій ігрових пристроїв. Вони являють собою універсальні програмно-апаратні платформи, придатні для створення власних програм, інтерактивних застосунків і вбудованих систем. Завдяки відкритій архітектурі такі пристрої підтримують інтеграцію із зовнішніми датчиками, сенсорами та виконавчими механізмами [1], що суттєво розширює сферу їх використання. Це відкриває широкі можливості для їх застосування у STEM-освіті [8–10], під час створення прототипів пристроїв Інтернету речей, а також для реалізації різноманітних інженерних та дослідницьких проєктів.

Методика порівняльного аналізу

У межах цього дослідження виконано порівняльний аналіз сучасних відкритих платформ, призначених для розроблення портативних електронних пристроїв. Основною метою є систематизація відомостей про їхні апаратні та програмні характеристики, що дозволяє оцінити придатність кожної платформи для різних практичних завдань з урахуванням продуктивності, енергоефективності, можливостей розширення та зручності програмної розробки.

До порівняння включено як компактні рішення на базі мікроконтролера ATmega32U4 (наприклад, Arduboy FX), так і сучасні високопродуктивні пристрої на основі ESP32, серед яких ODROID-GO, Lilka та M5Stack Cardputer. Особливу увагу приділено архітектурі процесора, обсягу оперативної та постійної пам'яті, автономності роботи, а також підтримці бездротових технологій Wi-Fi

і Bluetooth, які є визначальними для розроблення сучасних IoT-пристроїв, мобільних застосунків і портативних ігрових систем.

Основні технічні особливості портативних пристроїв

Порівняльний аналіз охоплює широкий спектр сучасних портативних платформ – від простих 8-бітних ігрових консолей до багатофункціональних пристроїв на базі мікроконтролерів ESP32, які застосовуються не лише для ігор, а й у навчальних проєктах, системах Інтернету речей (IoT) та розробленні відкритих програмно-апаратних рішень (DIY).

Платформи на базі ESP32 (ODROID-GO, Lilka, LilyGO T-Embed, ESPlay V2, KittenBot Meowbit) є найбільш функціональними серед досліджуваних пристроїв завдяки інтегрованій підтримці бездротових технологій Wi-Fi та Bluetooth, що забезпечує їх використання у мережевих застосунках і IoT-системах.

- *Lilka* (ESP32-S3) відзначається універсальністю застосування. Пристрій придатний як для створення ігор, так і для навчальних STEM-проєктів та розроблення IoT-застосунків. Додатковою перевагою є підтримка мов програмування Lua та Rust.

- *ODROID-GO* (ESP32-WROVER) поєднує доступну вартість із достатньо високою продуктивністю, що робить його ефективною платформою для реалізації DIY-проєктів, навчання програмуванню та швидкого прототипування IoT-пристроїв.

- *LilyGO T-Embed* (ESP32-S3) є одним із найбільш економічних рішень серед сучасних ESP32-платформ. Підтримка MicroPython і Espruino спрощує процес створення програмного забезпечення та робить пристрій привабливим для початківців.

- *M5Stack Cardputer* та *M5Stack Faces Kit* орієнтовані на використання як компактні кишенькові комп'ютери та модульні центри керування IoT-пристроями. Завдяки розвиненій системі розширення вони забезпечують підключення різноманітних периферійних модулів і датчиків.

До окремої категорії належать портативні пристрої, побудовані на класичних мікроконтролерах, зокрема Arduboy FX, Gamebuino Classic, Makerbuino, Gamebuino Meta та Pokitto.

- *Arduboy FX* (ATmega32U4) реалізує концепцію мінімалістичної портативної консолі. Використання монохромного OLED-дисплея та простого апаратного забезпечення робить її зручною платформою для навчання основам програмування і розроблення нескладних ігор.

- *Gamebuino Classic* та *Makerbuino* мають значну освітню цінність. Особливістю Makerbuino є постачання у вигляді комплекту для самостійного

складання, що дозволяє користувачам отримати практичний досвід монтажу електронних компонентів. Обидві платформи сумісні з бібліотекою програмного забезпечення Gamebuino, що забезпечує широкий вибір готових ігор та прикладів програм.

- *Gamebuino Meta* і *Pokitto*, побудовані на енергоефективних мікроконтролерах ARM Cortex-M0+, забезпечують вищу продуктивність порівняно з 8-бітними рішеннями та добре підходять для навчальних STEM-проектів і створення класичних портативних ігор. Водночас відсутність інтегрованих модулів Wi-Fi та Bluetooth обмежує їх використання у сучасних мережевих застосуваннях.

Scratch Arcade Programming Learning Machine вирізняється насамперед освітньою спрямованістю. Вища вартість пристрою пояснюється його орієнтацією на вивчення візуального програмування в середовищі Scratch, що робить платформу зручною для початкового навчання дітей і початківців основам алгоритмізації та програмування.

Узагальнені технічні характеристики досліджуваних платформ, відомості щодо підтримуваних програмних середовищ, комплектів розробки програмного забезпечення (SDK) та інших особливостей наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика портативних навчально-ігрових пристроїв на базі мікроконтролерів

Назва консолі	Ціна	Процесор / Контролер	Екран / MicroSD	Акумулятор	Звук	Кнопки	Інтерфейси та розширення
ODROID-GO Game Kit	\$32	ESP32-WROVER, 16 MB, 80–240 MHz	2.4" TFT LCD 320×240, MicroSD – Yes (SPI)	Li-Po 3.7 V, 1200 mAh	8 Ω, 0.5 W speaker	Menu, Volume, Select, Start, A, B, D-pad	I ² C, GPIO, SPI, IRQ (3.3 V)
Lilka	\$32 (kit)	ESP32-S3-WROOM-1-N16R8	1.69" TFT 280×240, MicroSD – Yes	Li-Po 3.7 V, 1000 mAh	8 Ω, 1 W speaker	Select, Start, Power, A, B, C, D + 4 buttons	I ² C, SPI, UART
Scratch Arcade Programming Learning Machine	\$99	ESP32-S3	320×240 TFT LCD	800 mAh Li-ion	2.5 mm headphone jack	Joystick, A, B, X, Y, FN, Boot, Power, Reset	Multifunction expansion port
Arduboy FX	\$79	ATmega32U4, 32 KB Flash, 2.5 KB RAM, 1 KB EEPROM	128×64 OLED, MicroSD – No	180 mAh Li-Po	Piezo speaker	6 tactile buttons	–
M5Stack Cardputer	\$30	ESP32-S3FN8	ST7789V2, 1.14", 240×135, MicroSD – Yes	120 mAh + 1400 mAh (base)	8 Ω 1 W, I ² S NS4168	Keyboard (56 keys), Reset, User button	HY2.0-4P (Grove), EXT 2.54-14P, I ² C, SPI, PWM, UART
M5Stack Faces Kit	\$79	ESP32 240 MHz (M5Stack Core)	2" IPS 320×240, MicroSD – Yes	600 mAh	Speaker 1W-0928	3 custom buttons, keyboard	USB Type-C, Grove, I ² C, Bus/GPIO
LilyGO T-Embed	\$29	ESP32-S3	1.9" IPS TFT 170×320, MicroSD	900 або 1300 mAh	8 Ω, 1 W	Encoder, Reset, Boot	Grove, GPIO 2.54 mm (8 pin)
ESPlay Micro V2	\$33	ESP32-WROVER, 16 MB Flash + 8 MB PSRAM	2.4" ILI9341 TFT, MicroSD – Yes	Невідомо	3.5 mm headphone jack	9 buttons	PCF8574 I ² C GPIO

Закінчення таблиці 1

Назва консолі	Ціна	Процесор / Контролер	Екран / MicroSD	Акумулятор	Звук	Кнопки	Інтерфейси та розширення
GAMEbuino Classic	\$41	ATmega328P	Nokia 5110 LCD 84×48, MicroSD – Yes	Li-Po 3.7 V, 600 mAh	Piezo beeper	7 buttons (D-pad + A/B/C)	6-pin header: I ² C/SPI/GPIO, VCC, GND, optional cartridge
Makerbuino	\$70	ATmega328P @ 16 MHz	Nokia 5110 LCD 84×48, MicroSD – Yes	Li-Po 3.7 V, 600 mAh	0.5 W speaker, 3.5 mm audio	7 buttons (D-pad + A/B/C)	6-pin header, I ² C, SPI, GPIO, PWM, Super Duper Link Cable
Pokitto	€50	ARM Cortex-M0+ @ 48 MHz (NXP LPC1114U68)	1.8" TFT 220×176, microSD	Li-Po 850 mAh (знімний)	Speaker + headphone jack	D-pad, A/B/C, Power	GPIO, I ² C, SPI, UART, PWM, ADC, USB
GAMEbuino Meta	€75	ARM Cortex-M0+ (ATSAMD21)	1.8" 160×128, Memory Card 8 GB	900 mAh Li-Po	1 W speaker, Class-D amp, 3.5 mm jack	D-pad, A, B, Home, Menu	Arduino-compatible GPIO (3.3 V), SPI, I ² C, UART, Backpack
KittenBot Meowbit	\$35	ESP32-PICO @ 240 MHz	1.54" TFT 240×240, microSD	Li-Po 400 mAh	Speaker + headphone jack	D-pad, A/B, Power	GPIO, I ² C, SPI, UART, PWM, ADC, USB

За результатами порівняльного аналізу технічних характеристик встановлено, що сучасні портативні пристрої на базі мікроконтролерів є багатофункціональними програмно-апаратними платформами, сфера застосування яких виходить далеко за межі ігрових систем. Ефективність використання відкритих платформ визначається не лише апаратними характеристиками, а й рівнем

розвитку програмної екосистеми, що включає доступність комплектів розробника (SDK), якість мікропрограмного забезпечення, наявність бібліотек та активність спільноти розробників.

Залежно від основного призначення досліджувані пристрої можна поділити на декілька функціональних категорій (табл. 2).

Таблиця 2

Основні сфери застосування портативних навчально-ігрових консолей на базі мікроконтролерів

Консоль	Категорія					
	Програмування	Ігри	IoT / Автоматизація	DIY / Прототипування	STEM / Освіта	Пентест / Кібербезпека
ODROID-GO Game Kit	✓	✓	●	●	●	●
Lilka	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Scratch Arcade Programming Learning Machine	✓	✓	●	●	✓	●
Arduboy FX	✓	✓	●	✓	●	●
M5Stack Cardputer	✓	●	✓	✓	●	✓
M5Stack Faces Kit	✓	●	✓	✓	✓	✓
LilyGO T-Embed	✓	●	✓	✓	●	✓
ESPlay Micro V2	✓	✓	●	✓	●	●

Закінчення табл. 2

Консоль	Категорія					
	Програмування	Ігри	IoT / Автоматизація	DIY / Прототипування	STEM / Освіта	Пентест / Кібербезпека
GAMEbuino Classic	✓	✓	●	●	✓	●
Makerbuino	✓	✓	●	✓	✓	●
GAMEbuino Meta	✓	✓	●	●	✓	●
Pokitto	✓	✓	●	✓	✓	●
KittenBot Meowbit	✓	✓	●	●	✓	●

До універсальних платформ для розроблення DIY-проектів та систем Інтернету речей (IoT) належать Lilka, M5Stack та LilyGO T-Embed, які побудовані на мікроконтролерах сімейства ESP32 і підтримують широкий спектр задач, зокрема автоматизацію технологічних процесів, швидке прототипування електронних систем, мережеві застосунки та засоби діагностики.

Освітній сегмент представлений платформами Makerbuino, KittenBot і Scratch Arcade, які орієнтовані на початкове навчання програмуванню та практичне освоєння принципів роботи вбудованих систем.

До категорії класичних ігрових платформ належать ODROID-GO, Arduboy, GAMEbuino та Pokitto, що використовуються переважно для створення портативних ігор, емуляції ретро-консолей та розроблення програмного забезпечення для систем з обмеженими апаратними ресурсами.

Порівняння програмних екосистем сучасних навчально-ігрових платформ свідчить, що найпоширенішою мовою програмування залишається

Arduino C/C++ [7] [11]. Більшість досліджених консолей, серед яких ODROID-GO Game Kit, M5Stack Cardputer, LilyGO T-Embed та ESPlay Micro V2, підтримують стандартні формати вихідного коду й мікропрограм, зокрема .ino, .cpp та .bin (табл. 3).

Найбільш різноманітною програмною екосистемою характеризується M5Stack Faces Kit, який підтримує NodeJS, Basic, .NET, Arduino та MicroPython, що дозволяє використовувати його як універсальну платформу для професійної розробки. Водночас окремі пристрої мають власні спеціалізовані програмні середовища. Так, Lilka підтримує розроблення застосунків мовами Lua, C/C++, JavaScript (.mjs) та Rust, тоді як Scratch Arcade орієнтована виключно на використання візуального середовища Scratch (формат .sb3) і призначена насамперед для початкового навчання програмуванню.

Таблиця 3

Підтримка мов програмування, форматів файлів та онлайн-емуляції для портативних мікроконтролерних платформ

Консоль	Підтримувані формати файлів	Підтримувані мови програмування	Онлайн-емулятор
ODROID-GO Game Kit	.ino, .cpp, .bin	Arduino C/C++, CircuitPython, Go	✓
Lilka	.lua, .bin, .wad	Lua, C/C++, JavaScript (.mjs), Rust	●
Scratch Arcade Programming Learning Machine	.sb3	Scratch	●
Arduboy FX	.hex	Arduino C/C++	✓
M5Stack Cardputer	.ino, .cpp, .bin	Arduino C/C++, MicroPython	●
M5Stack Faces Kit	.ino, .cpp, .bin	Arduino C/C++, MicroPython, NodeJS, BASIC, .NET Framework	●
LilyGO T-Embed	.ino, .cpp, .bin	Arduino C/C++, MicroPython, Espruino	●
ESPlay Micro V2	.ino, .cpp, .bin	Arduino C/C++	●
GAMEbuino Classic	.ino, .h	Arduino C/C++	●

Закінчення табл. 3

Консоль	Підтримувані формати файлів	Підтримувані мови програмування	Онлайн-емулятор
Makerbuino	.ino, .h	Arduino C/C++	
GAMEbuino Meta	.ino, .h	Arduino C/C++	
Pokitto	.cpp, .h	C++, Python / MicroPython	
KittenBot Meowbit	.mkb, .hex	Arduino C/C++, MicroPython, MakeCode	

Можливість онлайн-емуляції програмного забезпечення реалізована лише для платформ Go Play, Arduboy FX та GAMEbuino Meta, що значно спрощує процес розроблення й тестування програм без необхідності використання фізично-го пристрою. Для сімейства GAMEbuino характерною є сумісність між поколіннями завдяки використанню форматів .ino та .h, що забезпечує перенесення раніше створених проєктів без істотних змін. Крім того, ODROID-GO підтримує розроблення із застосуванням CircuitPython та мови Go, а платформи Pokitto і KittenBot Meowbit сумісні з MicroPython, що підвищує їхню привабливість для освітніх проєктів і навчальних курсів [10], [12].

Комплексне оцінювання технічних характеристик

Для об'єктивного порівняння апаратних можливостей мікроконтролерів було використано рейтингову систему оцінювання, у якій кожна характеристика оцінювалася за трибальною шкалою (від 1 до 3 балів). Найвищий результат – 22 бали – отримав мікроконтролер ESP32-S3-WROOM-1-N16R8, який оснащений двоядерним процесором із тактовою частотою 240 МГц, 16 МБ флеш-пам'яті, 512 КБ оперативної пам'яті, 8 МБ PSRAM, а також підтримує бездротові інтерфейси Wi-Fi і Bluetooth 5. Незначно поступаються йому ESP32-S3 (21 бал) та ESP32-WROVER (19 балів), що мають близькі технічні характеристики, проте використовують модуль Bluetooth 4 (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльне оцінювання мікроконтролерів, що використовуються у портативних навчально-ігрових консолях

Мікроконтролер	Архітектура	Частота	Flash-пам'ять	RAM	PSRAM	Периферія	Підключення	Енергоспоживання	Загальна оцінка (бал)
ESP32-S3-WROOM-1-N16R8	3 (Dual LX7)	3 (240 МГц)	3 (16 МБ)	3 (512 КБ)	3 (8 МБ вбудована)	3	3 (Wi-Fi + Bluetooth 5)	1	22 (3)
ESP32-S3 / ESP32-S3FN8	3 (Dual LX7)	3 (240 МГц)	3 (8–16 МБ)	3 (512 КБ)	2 (підтримується)	3	3 (Wi-Fi + Bluetooth 5)	1	21 (3)
ESP32-WROVER (16 МБ Flash + 8 МБ PSRAM)	2 (Dual LX6)	3 (240 МГц)	3 (16 МБ)	2 (520 КБ)	3 (8 МБ вбудована)	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4)	1	19 (2)
ESP32-WROVER (80–240 МГц)	2 (Dual LX6)	3 (240 МГц)	3 (16 МБ)	2 (520 КБ)	2 (підтримується)	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4)	1	18 (2)
ESP32 240 МГц / ESP32-PICO @ 240 МГц	2 (Dual LX6)	3 (240 МГц)	2 (4 МБ)	2 (520 КБ)	1 (відсутня)	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4)	1	16 (2)
ARM Cortex-M0+ (ATSAMD21 / LPC1114U68)	2 (M0+)	1 (≈48 МГц)	2 (256/512 КБ)	2 (32/64 КБ)	1 (немає)	2	1 (немає вбудованих модулів)	2	13 (2)
ESP8266 (80/160 МГц)	1 (Single Xtensa)	2 (160 МГц)	2 (4–16 МБ)	1 (50 КБ)	1 (немає)	2	2 (лише Wi-Fi)	2	13 (1)
ATmega32U4 (32 КБ Flash, 2.5 КБ RAM)	1 (8-біт AVR)	1 (≈16 МГц)	1 (32 КБ)	1 (2,5 КБ)	1 (немає)	1	1 (немає)	3	10 (1)
ATmega328P / ATmega328P @ 16 МГц	1 (8-біт AVR)	1 (16 МГц)	1 (32 КБ)	1 (2 КБ)	1 (немає)	1	1 (немає)	3	10 (1)

Мікроконтролери середнього класу сімейства ESP32 набрали від 16 до 18 балів. Для них характерні 4 МБ флеш-пам'яті та відсутність зовнішньої PSRAM, що дещо обмежує можливості роботи зі складними застосунками. ARM Cortex-M0+ отримав 13 балів завдяки енергоефективній архітектурі та тактовій частоті 48 МГц, однак не має вбудованих засобів бездротового зв'язку. ESP8266 із результатом 13 балів підтримує Wi-Fi, але через обсяг оперативної пам'яті лише 50 КБ значно поступається сучасним представникам сімейства ESP32.

Найнижчі показники продемонстрували класичні 8-бітні мікроконтролери ATmega32U4 та ATmega328P, які отримали по 10 балів. Їхні технічні характеристики – тактова частота 16 МГц, 32 КБ флеш-пам'яті та лише 2–2,5 КБ оперативної пам'яті без підтримки бездротових інтерфейсів – достатні переважно для навчальних проєктів і створення нескладних ігор. Отримані результати свідчать, що продуктивність сучасних мікроконтролерів приблизно утричі перевищує можливості традиційних 8-бітних платформ, що підтверджує суттєвий технологічний прогрес у розвитку портативних мікроконтролерних систем.

На основі результатів порівняльного аналізу, наведених у попередній таблиці (рис. 1), побудовано радіальну діаграму, яка узагальнює технічні характеристики чотирьох найпоширеніших мікроконтролерів.

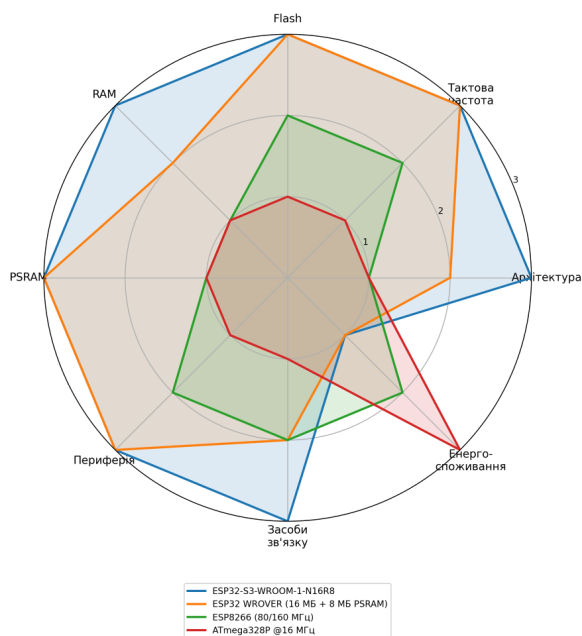


Рис. 1. Радіальна діаграма порівняльного оцінювання мікроконтролерів за основними технічними характеристиками.

Для оцінювання використано вісім ключових критеріїв: архітектура процесора, тактова частота, обсяг Flash-пам'яті, оперативної пам'яті (RAM), PSRAM, можливості периферії, підтримка засобів

бездротового зв'язку та енергоефективність. Кожен параметр оцінювався за тривірневою шкалою від 1 до 3 балів.

- ESP32-S3-WROOM-1-N16R8 (синій колір) продемонстрував найкращі результати. За всіма досліджуваними характеристиками мікроконтролер отримав максимальну оцінку 3 бали, що графічно відображено у вигляді правильного восьмикутника. Такий результат свідчить про збалансоване поєднання високої продуктивності, значного обсягу пам'яті, широких можливостей периферії, підтримки сучасних засобів бездротового зв'язку та ефективного енергоспоживання.

- ESP32-WROVER (зелений колір) має близькі до лідера характеристики, однак за параметрами архітектури, обсягу Flash-пам'яті та оперативної пам'яті його оцінено у 2 бали, тоді як інші показники залишаються на високому рівні.

- ESP8266 (помаранчевий колір) характеризується менш збалансованими технічними можливостями. Найкращі оцінки (2 бали) він отримав за тактову частоту, обсяг Flash-пам'яті та підтримку Wi-Fi, тоді як архітектура, обсяг оперативної пам'яті та відсутність PSRAM обмежують його потенціал, що відображено мінімальною оцінкою 1 бал за відповідними критеріями.

- ATmega328P (червоний колір) продемонстрував найнижчі результати серед досліджуваних мікроконтролерів. За всіма оцінюваними параметрами він отримав лише 1 бал, що відповідає найменшій площі радіальної діаграми. Незважаючи на обмежені апаратні можливості, цей мікроконтролер залишається популярним у навчальних проєктах, простих вбудованих системах і пристроях, де не потрібні висока продуктивність або мережеві функції.

Площа синього багатокутника на радіальній діаграмі приблизно у дев'ять разів перевищує площу червоного, що наочно демонструє суттєву різницю в технічних можливостях сучасних 32-бітних мікроконтролерів порівняно з класичними 8-бітними архітектурами.

Для комплексного оцінювання досліджуваних портативних консолей було розроблено систему рейтингового аналізу, що охоплює дев'ять критеріїв. Кожен із них оцінювався за шкалою від 0 до 3 балів. До системи оцінювання включено характеристики процесора, обсяг пам'яті, тип дисплея (3 бали – кольоровий, 1 бал – монохромний), наявність бездротових інтерфейсів, ємність акумулятора, організацію системи керування, аудіопідсистему (3 бали – динамік і роз'єм для навушників, 2 – лише динамік, 1 – лише аудіороз'єм, 0,5 – п'єзодинамік), підтримку карт пам'яті MicroSD (3 бали – наявна, 0 балів – відсутня), а також можливості апаратного розширення.

Найвищу сумарну оцінку – 23 бали – отримали платформи Lilka та LilyGO T-Embed, побудовані на мікроконтролері ESP32-S3. Високий результат пояснюється наявністю кольорового дисплея, підтримкою Bluetooth 5.0, акумуляторів ємністю понад 1000 мА·год, слота MicroSD та повноцінної аудіосистеми.

M5Stack Cardputer, який набрав 21,5 бала, поступається лідерам лише через невелику ємність вбудованого акумулятора (120 мА·год), однак компенсує цей недолік повнорозмірною клавіатурою та інфрачервоним інтерфейсом, що значно розширює функціональні можливості пристрою.

Консоль ODROID-GO отримала 21 бал завдяки акумулятору підвищеної ємності (1200 мА·год), хоча загальний рейтинг дещо знижують використання Bluetooth 4.2 та відсутність роз'єму для підключення навушників.

До середнього сегмента належать M5Stack Faces Kit (19 балів), ESPlay Micro V2 і KittenBot Meowbit (по 18 балів), а також Scratch Arcade

Programming Learning Machine, GAMEbuino Meta та Rokitto, які отримали по 17 балів. Ці пристрої поєднують достатній рівень продуктивності з широкими функціональними можливостями, хоча за окремими характеристиками поступаються флагманським платформам.

Найнижчі результати продемонстрували консолі на базі 8-бітних мікроконтролерів. Makerbuino отримав 10 балів, GAMEbuino Classic – 9,5 бала, а Arduboy FX – лише 5,5 балів. Основними причинами низьких оцінок є використання монохромних дисплеїв, обмежені апаратні ресурси, а також відсутність підтримки MicroSD у Arduboy FX. Співвідношення максимального та мінімального рейтингу становить приблизно 4,6:1, що підтверджує суттєве технологічне розшарування між простими навчальними платформами та сучасними багатофункціональними системами, оснащеними інтерфейсами GPIO, Grove та засобами бездротового зв'язку (табл. 5).

Таблиця 5

Комплексне оцінювання технічних характеристик портативних навчально-ігрових консолей

Консоль	Про- цесор	Пам'ять	Дис- плей	Бездрото- вий зв'язок	Акумуля- тор	Керу- вання	Аудіо	Micro SD	Розши- рення	За- гальна оцінка
ODROID-GO	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4.2)	2 (1200 мА·год)	1 (D-pad)	2 (динамік)	3	2 (GPIO + Grove)	21
Lilka	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 5)	2 (1000 мА·год)	2 (клавіатурний тип)	3 (зумер + динамік + аудіо-роз'єм)	3	2 (GPIO + Grove)	23
Scratch Arcade	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 5)	1 (800 мА/год)	2 (джойстик)	1 (роз'єм 3,5 мм)	0	2 (GPIO + Grove)	17
Arduboy FX	1	0,5	1	0 (лише USB)	1 (180 мА·год)	1 (D-pad)	0,5 (зумер)	0	0	5
M5Stack Cardputer	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 5 + IR)	0,5 (120 мА·год + док-станція)	2 (клавіатура)	3 (динамік + аудіо-роз'єм)	3	2 (GPIO + Grove)	21,5
M5Stack Faces	2	2	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4.2)	1 (600 мА·год)	2 (клавіатура)	2 (динамік)	3	2 (GPIO + Grove)	19
LilyGO T-Embed	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 5)	2 (900–1300 мА·год)	2 (енкодер)	3 (динамік + аудіо-роз'єм)	3	2 (GPIO + Grove)	23
ESPlay Micro V2	3	3	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth 4.2)	1 (дані відсутні)	1 (D-pad)	1 (роз'єм 3,5 мм)	3	1 (I ² C-розширювач)	18

Закінчення табл. 5

Консоль	Про- цесор	Пам'ять	Дис- плей	Бездрото- вий зв'язок	Акумуля- тор	Керу- вання	Аудіо	Micro SD	Розши- рення	За- гальна оцінка
Gamebuino Classic	1	1	1	0 (без безд- ротового зв'язку)	1 (600 мА·год)	1 (D-pad)	0,5 (зу- мер)	3	1 (роз'єм Header)	9,5
Makerbuino	1	1	1	0 (без безд- ротового зв'язку)	1 (600 мА·год)	1 (D-pad)	1 (роз'єм 3,5 мм)	3	1 (роз'єм Header)	10
Gamebuino Meta	2	2	3	0 (без Wi- Fi/Bluetooth)	2 (900 мА·год)	1 (D-pad)	3 (ди- намік + аудіо- роз'єм)	3	1 (GPIO Header)	17
Pokitto	2	2	3	0 (без безд- ротового зв'язку)	2 (850 мА·год)	1 (D-pad)	3 (ди- намік + аудіо- роз'єм)	3	1 (роз'єм Header)	17
KittenBot Meowbit	2	2	3	2 (Wi-Fi + Bluetooth)	1 (400 мА·год)	1 (D-pad)	3 (ди- намік + аудіо- роз'єм)	3	1 (GPIO Header)	18

Для наочного порівняння платформ і сприянню об'єктивному аналізу їхніх функціональних можливостей сформовано теплову карту (Heat

Map), побудовану на основі єдиної системи критеріїв оцінювання з таблиці 5 (рис. 2).

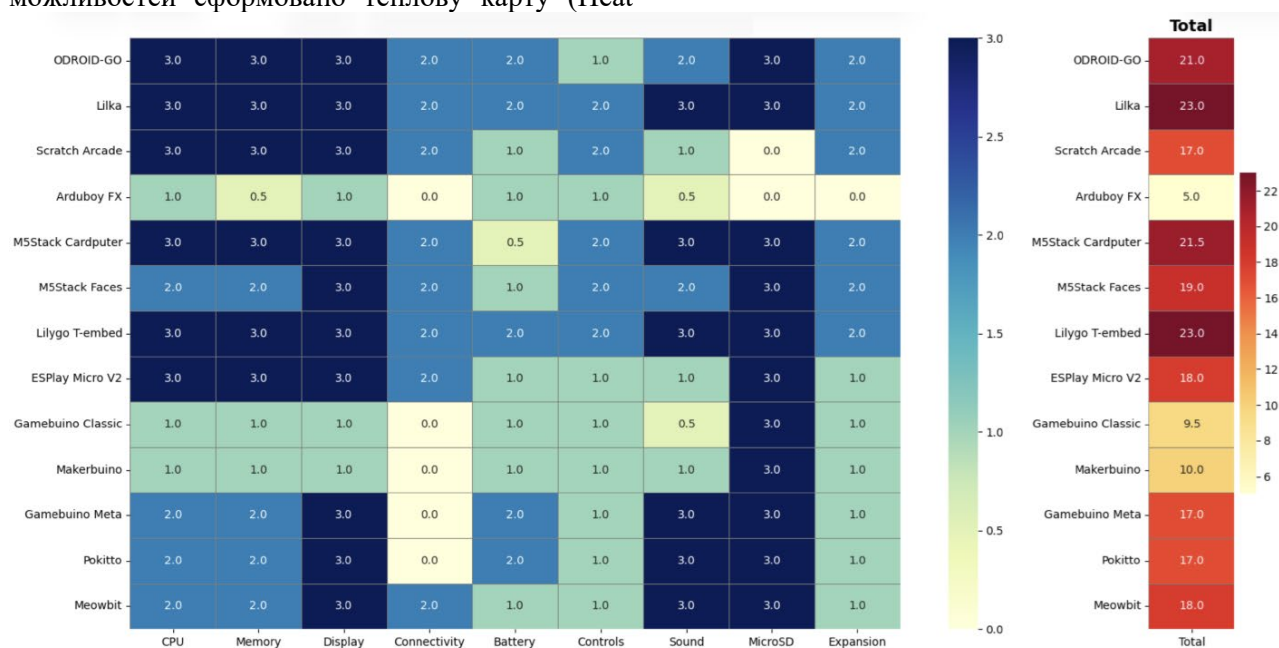


Рис. 7. Теплова карта комплексного оцінювання технічних характеристик портативних навчально-ігрових консолей

На рис. 8 наведено діаграму залежності між вартістю портативних консолей та їхньою інтегральною технічною оцінкою. Кожна точка відповідає окремій моделі пристрою, при цьому по горизонтальній осі відкладено її ринкову ціну, а по вертикальній – сумарний рейтинг, отриманий за результатами комплексного оцінювання. Сірі пунктирні лінії відображають середні значення вартості та технічної оцінки, що дає змогу швидко ви-

значити пристрої, показники яких перевищують або не досягають середнього рівня.

Разом із тим наведена діаграма характеризує лише технічні параметри та ціновий сегмент досліджуваних платформ. Реальна цінність кожної консолі значною мірою визначається також рівнем розвитку програмної екосистеми, доступ-

ністю засобів розробки, активністю спільноти користувачів і простотою створення власного програмного забезпечення.

Наприклад, ESPlay Micro V2, незважаючи на достатньо конкурентоспроможні технічні характеристики, має відносно невелику спільноту роз-

робників. Водночас Arduboy FX, який поступається сучасним платформам за апаратними можливостями та має вищу вартість, залишається популярним завдяки простоті створення ігор, широкому набору навчальних матеріалів і активній спільноті користувачів.

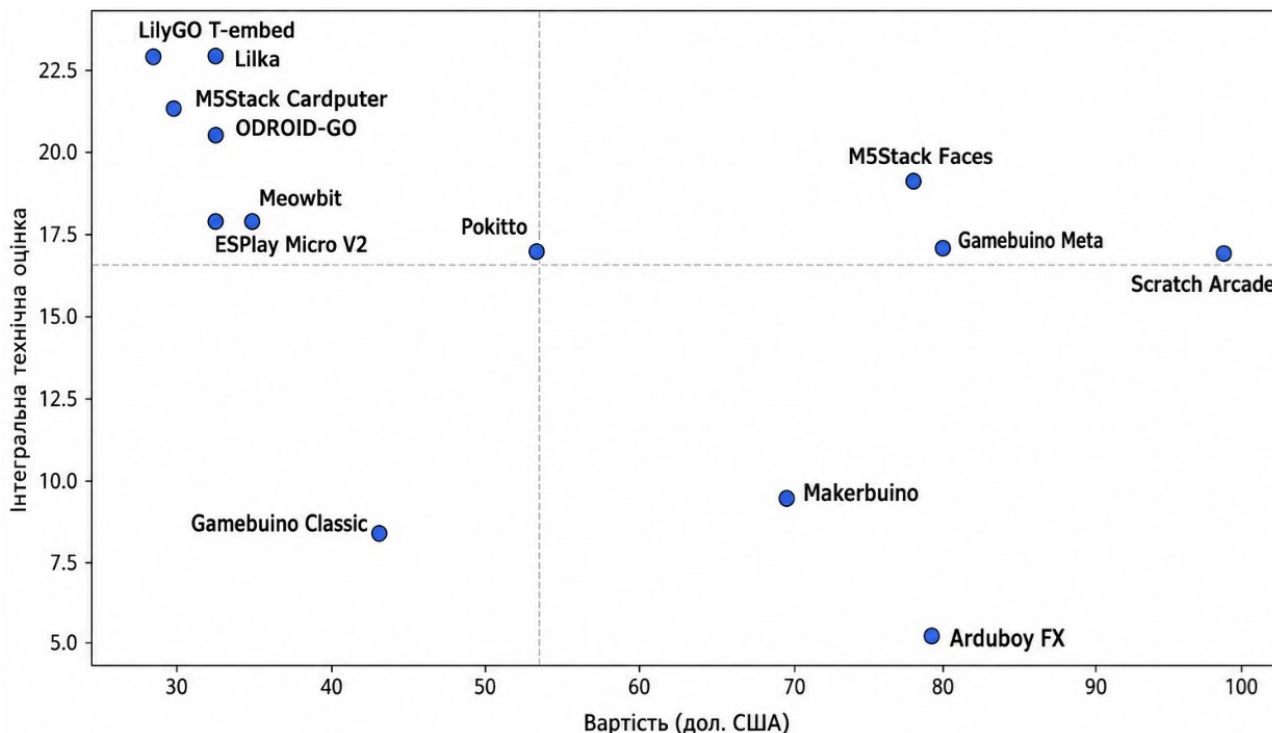


Рис. 8. Залежність між вартістю та інтегральною технічною оцінкою портативних навчально-ігрових консолей

Проведене дослідження засвідчило, що сучасний ринок портативних навчально-ігрових консолей характеризується значним різноманіттям апаратних і програмних рішень. Вибір конкретної платформи визначається не лише її технічними характеристиками або ціною, а насамперед сферою майбутнього застосування та потребами користувача. Кожен із розглянутих пристроїв має власну концепцію використання та орієнтований на виконання певного кола завдань.

Основні особливості досліджуваних платформ можна узагальнити таким чином:

- ODROID-GO Game Kit – відкрита платформа для самостійного складання, призначена для емуляції класичних ігрових систем та реалізації DIY-проектів.
- Lilka – універсальна навчально-ігрова консоль, що поєднує можливості програмування, STEM-освіти, IoT та розроблення власних застосунків.
- Scratch Arcade Programming Learning Machine – готовий навчальний пристрій, орієнтований на дітей і початківців, які вивчають програмування у середовищі Scratch.

- Arduboy FX – компактна енергоефективна консоль на базі Arduino, призначена для створення власних ігор і навчання програмуванню в умовах обмежених ресурсів.

- M5Stack Cardputer – портативний міні-комп'ютер із клавіатурою, орієнтований на розроблення IoT-рішень, мережних застосунків і систем автоматизації.

- M5Stack Faces Kit – модульна платформа зі змінними панелями, призначена для швидкого прототипування електронних систем.

- LilyGO T-Embed – високопродуктивна платформа для створення IoT-пристроїв, програмування мовою Rust та експериментальної розробки.

- ESPlay Micro V2 – доступна за ціною відкрита консоль, орієнтована на ентузіастів ретро-ігор і незалежних розробників.

- GAMEbuino Classic – навчальна консоль для опанування Arduino та практичного вивчення основ мікроконтролерної техніки.

- Makerbuino – комплект для самостійного складання, що поєднує навчання електроніці, монтажу та програмуванню.

- GAMEbuino Meta – удосконалена версія GAMEbuino Classic із підвищеною продуктивністю та збільшеним обсягом пам'яті, призначена для реалізації складніших програмних проєктів.

- Pokitto – енергоефективна навчальна консоль, придатна для розроблення двовимірних і простих тривимірних ігор.

- KittenBot Meowbit – навчальна платформа формату micro:bit, що підтримує блокове програмування та орієнтована насамперед на дітей і початківців.

Консолі на базі ESP32 як платформи Інтернету речей

Порівняння технічних характеристик різних платформ дозволило визначити, що найкращі результати продемонстрували консолі, побудовані на базі мікроконтролерів сімейства ESP32. Це обумовлює необхідність переходу від загального аналізу портативних консолей до детального дослідження можливостей самої платформи ESP32, яка сьогодні є основою більшості сучасних відкритих програмно-апаратних рішень.

Мікроконтролери сімейства ESP32 сьогодні належать до найпопулярніших рішень серед розробників вбудованих систем завдяки поєднанню невисокої вартості, високої продуктивності та широких функціональних можливостей [4] [13]. Вони підтримують роботу з різноманітними середовищами розроблення, зокрема ESP-IDF, Arduino та іншими програмними платформами, а також використовуються у більшості сучасних пристроїв Інтернету речей, обладнаних бездротовими інтерфейсами Wi-Fi. Важливою перевагою ESP32 є наявність розвиненої програмної екосистеми, до якої входять такі відкриті проєкти, як ESPHome, Tasmota, Node-RED, ESPEasy, ESPLink і OpenMQTTGateway [2] [12]. Використання цих платформ значно скорочує час розроблення IoT-застосунків завдяки застосуванню конфігураційних файлів, графічних інтерфейсів, а також засобів блокового та потокового програмування, що мінімізує потребу у написанні великого обсягу низькорівневого програмного коду.

У цьому контексті портативна консоль на базі ESP32 може розглядатися як компактна мобільна лабораторія для розробника. Поєднання мікроконтролера, дисплея, автономного живлення та інтерфейсів GPIO забезпечує можливість швидкого створення прототипів, підключення датчиків і виконавчих пристроїв, а також тестування й налагодження систем безпосередньо в польових умовах.

Розроблення програмного забезпечення для ESP32 здійснюється двома основними підходами. Перший передбачає використання Low-Code-технологій, які значно спрощують процес створення

застосунків і роблять його доступним навіть для користувачів без глибоких знань програмування. Такий підхід дозволяє зосередитися на логіці роботи системи, залишаючи реалізацію низькорівневих механізмів програмним платформам. Другий підхід базується на класичному програмуванні мовами C та C++, що забезпечує повний контроль над апаратними ресурсами пристрою, сприяє глибокому розумінню архітектури мікроконтролера, алгоритмів та структур даних, а також формує фундаментальні інженерні компетенції. Поєднання обох підходів створює сприятливі умови для розвитку технічної творчості та розроблення ефективних систем Інтернету речей.

Однією з характерних особливостей сучасних платформ, побудованих на базі ESP32, є підтримка моделей виконання програм без обов'язкового етапу традиційної компіляції. Наприклад, для Arduboy достатньо завантажити готовий двійковий файл, Lilka підтримує виконання сценаріїв мовою Lua, а MicroPython і CircuitPython [14] [12] дозволяють запускати програми шляхом простого копіювання файлів на пристрій, що реалізовано, зокрема, для платформ сімейства Raspberry Pi Pico. Подібний підхід використовує і Espruino, який забезпечує безпосереднє виконання програм мовою JavaScript на мікроконтролерах ESP32. Це значно прискорює процес експериментування, перевірки нових ідей та створення дослідних зразків без необхідності використання складних інструментів компіляції.

Такий принцип роботи відкриває можливість реалізації спрощеної моделі поширення програмного забезпечення, аналогічної магазинам мобільних застосунків. Користувачі можуть завантажувати, оновлювати та запускати готові програми з централізованих репозиторіїв, наприклад GitHub, що значно полегшує обмін програмними рішеннями між розробниками. Використання компактних і зрозумілих сценаріїв також сприяє відкритості програмного коду, його швидкій модифікації та розвитку спільних проєктів. Особливо зручними для таких завдань є середовища MicroPython і CircuitPython, які поєднують простий синтаксис мови Python з інтерактивним інтерфейсом REPL, що забезпечує взаємодію з пристроєм у режимі реального часу під час тестування та налагодження програм.

Ще однією перевагою багатьох ESP32-платформ є підтримка модульного розширення апаратної частини без необхідності виконання паяння. Наприклад, екосистема M5Stack містить широкий набір готових модулів, серед яких датчики, акумуляторні блоки, контролери електродвигунів, GPS-приймачі, а також модулі бездротового

зв'язку LoRa і GSM. Аналогічні можливості забезпечує й платформа Lilka, для якої спільнотою користувачів створено низку додаткових модулів, зокрема FM-радіоприймач і модуль Meshtastic. Це підтверджує високу адаптивність консолей на базі ESP32 до реалізації різноманітних проєктів у сферах Інтернету речей, автоматизації технологічних процесів, робототехніки та вбудованих інформаційно-керуючих систем.

Розроблення власного мікропрограмного забезпечення.

Створення або адаптація мікропрограмного забезпечення (firmware) відкриває широкі можливості для використання мікроконтролерів ESP32 у спеціалізованих прикладних системах. Залежно від поставлених завдань програмне забезпечення може реалізовувати як окремі функції (наприклад, керування сервоприводами), так і комплексні програмні комплекси, що підтримують керування верстатами з числовим програмним керуванням (CNC), моніторинг бездротових мереж, передавання пакетів ELRS, побудову mesh-мереж та інші сервіси.

Сучасні портативні консолі на базі ESP32 підтримують одночасне використання декількох варіантів мікропрограмного забезпечення, що забезпечує швидке перемикання між різними режимами роботи пристрою. Відкриті проєкти Bruce, Meshtastic та Micro Hydra демонструють різні підходи до реалізації подібних систем і можуть бути адаптовані для інших апаратних платформ. Модульний принцип побудови програмного забезпечення забезпечує незалежне функціонування окремих компонентів, зокрема підсистем збору даних, мережових протоколів, користувацького інтерфейсу та системи зберігання інформації, що значно спрощує тестування, супровід і модернізацію програм.

Для розроблення мікропрограм зазвичай використовуються середовища PlatformIO або ESP-IDF, а підтримка технології OTA (Over-the-Air) разом із резервними образами програмного забезпечення забезпечує безпечне оновлення без ризику втрати працездатності пристрою. У більшості випадків початкове встановлення або оновлення мікропрограми здійснюється через дротове з'єднання з персональним комп'ютером.

Вбудований механізм оновлення мікропрограмного забезпечення. Більшість сучасних пристроїв на базі ESP32 містять вбудований механізм оновлення мікропрограм, який виконує функції завантажувача (bootloader). Його робота не залежить від основної програми: система самостійно завантажує нову версію мікропрограми, перевіряє її цілісність і записує до вільної області Flash-пам'яті,

не порушуючи роботу поточної версії програмного забезпечення.

Платформи сімейства M5Stack додатково оснащені графічним меню, яке дозволяє обирати мікропрограми з карти пам'яті MicroSD або завантажувати їх безпосередньо із сервісу M5Burner. Після вибору необхідної версії система автоматично очищає службові розділи пам'яті, записує новий образ, перевіряє його цілісність і запускає оновлене програмне забезпечення без використання кабельного з'єднання.

Типовою особливістю архітектури ESP32 є підтримка подвійної схеми OTA-оновлення, коли у Flash-пам'яті зберігаються дві незалежні копії програмного забезпечення – активна та резервна. Під час оновлення нова версія записується до резервного розділу, після чого система виконує її тестовий запуск. Якщо завантаження завершується успішно, резервна копія стає основною; у разі виникнення помилки автоматично відновлюється попередня версія. Такий механізм істотно підвищує надійність оновлення та практично усуває ризик втрати працездатності пристрою.

Використання ESPHome. Платформа ESPHome автоматизує процес створення мікропрограм шляхом перетворення конфігураційних файлів формату YAML у готові двійкові файли для мікроконтролерів сімейств ESP та Raspberry Pi RP2040. Такий підхід дозволяє створювати власні IoT-пристрої на базі окремих плат, перепрограмувати готові комерційні вироби або використовувати обладнання, сертифіковане за програмою Made for ESPHome.

Однією з ключових переваг ESPHome є повна інтеграція із системою домашньої автоматизації Home Assistant, що забезпечує централізоване керування всіма підключеними пристроями. Для портативних консолей на базі ESP32 додатковою перевагою є наявність дисплеїв і кнопок керування. Використання графічної бібліотеки LVGL дозволяє створювати сучасні інтуїтивно зрозумілі інтерфейси користувача без значних витрат часу на розроблення.

Консолі на базі ESP32 як інструменти дослідження бездротових мереж

Портативні консолі на основі ESP32 можуть застосовуватися як компактні програмно-апаратні комплекси для аналізу бездротового середовища та дослідження мережевої інфраструктури.

Такі пристрої використовуються під час діагностики власних мереж, навчальних лабораторних робіт та проведення досліджень інформаційної безпеки у межах офіційно дозволених середовищ.

Одним із базових інструментів є ARP-сканування, яке дозволяє виявляти активні вузли локальної мережі, отримуючи їх IP- та MAC-адреси. Такий підхід використовується для інвентаризації мережевої інфраструктури й допускається лише за наявності відповідних повноважень адміністратора мережі.

Іншим напрямом є пасивний моніторинг трафіку стандарту IEEE 802.11, під час якого аналізуються службові кадри бездротової мережі. Це дозволяє отримувати службову інформацію, зокрема рівень сигналу (RSSI), номер каналу, тип кадру та часові характеристики передачі, що є корисним для побудови карт покриття та оцінювання ефективності роботи бездротової мережі.

Для навчальних цілей також можуть демонструватися принципи роботи атак типу Deauthentication, які ілюструють потенційні вразливості бездротових мереж шляхом примусового розриву з'єднання клієнтів із точкою доступу. Подібні механізми повинні розглядатися виключно з навчальною або дослідницькою метою, оскільки їх застосування щодо сторонніх мереж без відповідного дозволу є незаконним.

Крім того, ESP32-платформи можуть використовуватися для моделювання передавання Beacon-кадрів з метою аналізу завантаженості радіоефіру, дослідження механізмів Probe Request, що демонструють особливості роботи клієнтських пристроїв під час пошуку відомих мереж, а також виконання спрощеного сканування мережевих портів для оцінювання доступних мережевих сервісів. Усі подібні операції повинні виконуватися виключно за наявності офіційного дозволу власника досліджуваної системи.

Також важливою функцією таких платформ є ведення журналів подій із збереженням параметрів мережі, зокрема SSID, MAC-адрес, значень RSSI та інших службових характеристик, що використовуються для аналізу якості покриття та ефективності роботи мережі.

Під час зберігання подібних даних необхідно забезпечувати анонімізацію інформації, яка може містити персональні або конфіденційні відомості.

Висновки

Проведене дослідження показало, що сучасні портативні консолі на базі мікроконтролерів давно перестали бути виключно ігровими пристроями. Сьогодні вони є багатофункціональними програмно-апаратними платформами, які поєднують можливості навчання, розроблення систем Інтернету речей (IoT), швидкого прототипування та реалізації творчих проєктів у середовищі DIY.

У результаті аналізу тринадцяти найпоширеніших навчально-ігрових консолей на основі дев'я-

ти мікроконтролерів було визначено основні тенденції розвитку цього сегмента та виявлено чіткий розподіл консолей за функціональним призначенням.

Отримані результати підтвердили, що універсальні рішення сьогодні переважно будуються на мікроконтролерах сімейства ESP32, які завдяки високій продуктивності та інтегрованим бездротовим інтерфейсам стали фактичним стандартом для більшості сучасних відкритих платформ.

Комплексне оцінювання технічних характеристик засвідчило істотну перевагу сучасних 32-бітних мікроконтролерів над традиційними 8-бітними рішеннями. За розробленою системою критеріїв співвідношення інтегральних показників між платформами на базі ATmega та ESP32-S3 становить приблизно 1 до 4,6, що відображає значний технологічний прогрес сучасних мікроконтролерних систем.

Найвищі результати отримали платформи Lilka та LilyGO T-Embed, які набрали по 23 бали. Їхня перевага обумовлена використанням мікроконтролера ESP32-S3, підтримкою сучасних бездротових технологій, наявністю інтерфейсів розширення та широкими можливостями інтеграції із зовнішніми пристроями.

Водночас результати дослідження показали, що успіх платформи визначається не лише її технічними характеристиками. Так, Arduboy FX, незважаючи на порівняно скромні апаратні ресурси, залишається популярним завдяки активній спільноті користувачів, доступності навчальних матеріалів та простоті створення власних програм, що свідчить про важливість концепції платформи поряд із її технічними параметрами.

Однією з ключових особливостей сучасних платформ на базі ESP32 є поєднання функцій портативної консолі та повноцінного пристрою Інтернету речей. Підтримка виконання програм без традиційної компіляції із застосуванням Lua, MicroPython або JavaScript, а також використання вбудованих механізмів безпечного оновлення мікропрограмного забезпечення створюють умови для швидкого розповсюдження програм, спрощують процес розроблення та суттєво знижують поріг засвоєння цих платформ початківцями.

Результати аналізу свідчать, що кожна з розглянутих консолей займає власну нішу серед портативних мікроконтролерних пристроїв. ODROID-GO і Lilka доцільно розглядати як універсальні платформи для DIY-проєктів і розроблення вбудованих систем; Scratch Arcade та KittenBot Meowbit найкраще підходять для навчання дітей основам програмування; Arduboy FX сприяє розвитку навичок оптимізації програмного коду та творчого програмування; LilyGO

T-Embed і M5Stack Cardputer забезпечують широкі можливості для створення сучасних IoT-застосунків, перетворюючи компактний портативний пристрій на багатофункціональну платформу для інженерної та дослідницької діяльності.

Перспективними напрямками подальших досліджень є оцінювання якості програмного забезпечення, аналіз активності спільнот розробників, а також створення уніфікованих програмних засобів, які забезпечать перенесення застосунків між різними апаратними платформами з мінімальними змінами програмного коду.

Загалом результати дослідження свідчать про трансформацію портативних мікроконтролерних консолей із вузькоспеціалізованих ігрових пристроїв у відкриті багатофункціональні платформи.

Отримані результати підтверджують, що розвиток відкритих програмно-апаратних платформ сприяє переходу від пасивного використання технологій до їх активного проектування, дослідження та вдосконалення, формуючи підґрунтя для створення інноваційних систем [7] [6].

ЛІТЕРАТУРА

- [1] N. Tsebesebe, K. Mpofu, S. Sivarasu, et al., “Arduino-Based Devices in Healthcare and Environmental Monitoring,” *Discover. Things*, vol. 5, no. 1, p. 11, Nov. 2025. doi: 10.1007/s43926-025-00139-z
- [2] D. Sidik, A. Risal, and A. Hudiah, “IoT-Based Microcontroller Trainer Media: Innovation for Vocational Education Essential Programs,” *J. Innov. Vocat. Educ. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 85–95, Feb. 2024. doi: 10.30605/jiver.v5i1.2384
- [3] R. Dillon, *The Golden Age of Video Games: The Birth of a Multi-Billion Dollar Industry*. Boca Raton, FL, USA: A K Peters/CRC Press, 2011.
- [4] K. Moharkar, “Review on Different Microcontroller Boards Used in IoT,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 10, pp. 234–242, 2022. doi: 10.22214/IJRASET.2022.39778
- [5] B. Burse, K. Doycheva, A. Aicher, and C. Walther, “Evaluation of Low-Cost Microcontroller-Based Electronic Systems for Simple Sensor Node Applications,” 2022. doi: 10.35490/EC3.2022.191
- [6] M. A. Zaggl, T. Schweisfurth, and C. Herstatt, “The Dynamics of Openness and the Role of User Communities: A Case Study in the Ecosystem of Open Source Gaming Handhelds,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 67, no. 3, pp. 712–723, Aug. 2020. doi: 10.1109/TEM.2019.2897900
- [7] H. K. Kondaveeti, N. K. Kumaravelu, S. D. Vanambathina, et al., “A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations,” *SN Comput. Sci.*, vol. 2, no. 5, p. 410, Sep. 2021. doi: 10.1007/s42979-021-00813-y
- [8] L. Xue-ping, Y. Ma, and Y. Fang, “Learning-by-Doing Approach to Teach Microcontroller Course with Portable Training Board,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2529, no. 1, Art. no. 012005, Jul. 2023. doi: 10.1088/1742-6596/2529/1/012005
- [9] B. G. Fernández, X. García, M. J. Santofimia, et al., “Robotics vs. Game-Console-Based Platforms to Learn Computer Architecture,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 63, no. 4, pp. 306–314, Nov. 2020. doi: 10.1109/TE.2020.2974015
- [10] A. F. Mondragon-Torres and A. Becker-Gomez, “So Many Educational Microcontroller Platforms, So Little Time!,” in *Proc. ASEE Annu. Conf. Expo.*, 2012. doi: 10.18260/1-2--21922
- [11] R. Paul, F. Ahmed, M. M. Ahmad, N. Hosen, and A. Rahman, “A Comprehensive Study and Modern Take on Intel 8086 Like Modular Trainer Board System,” in *Proc. RAAICON*, 2021, pp. 6–9. doi: 10.1109/RAAICON54709.2021.9929556
- [12] R. Pereira, C. D. Souza, D. Patiño, and J. C. Lata, “Plataforma de enseñanza a distancia de microcontroladores e Internet de las Cosas,” *Ingenius*, no. 28, Jul. 2022. doi: 10.17163/ings.n28.2022.05
- [13] M. Milota, “Beehive Security System Against Unauthorized Manipulation,” in *Proc. 27th Conf. STUDENT EEICT*, Brno, Czech Republic, 2021, pp. 65–69.
- [14] M. Moskal, T. Ball, A. Chatra, D. Zuniga, et al., “Web-Based Programming for Low-Cost Gaming Handhelds,” in *Proc. 16th Int. Conf. Found. Digit. Games (FDG)*, 2021. doi: 10.1145/3472538.3472572

Куклінський М. В., Сverdлюк Б. І., Каграманова Ю. К., Бондаренко А. І. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОРТАТИВНИХ НАВЧАЛЬНО-ІГРОВИХ КОНСОЛЕЙ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних портативних навчально-ігрових консолей на базі мікроконтролерів, орієнтованих на програмування, STEM-освіту, розроблення систем Інтернету речей (IoT) та реалізацію DIY-проектів. Досліджено технічні характеристики тринадцяти популярних платформ і виконано комплексне оцінювання дев'яти мікроконтролерів за сукупністю апаратних параметрів, зокрема архітектурою, продуктивністю, обсягом пам'яті, підтримкою бездротових технологій, периферійними можливостями та енергоефективністю. Проаналізовано програмні екосистеми досліджуваних платформ, підтримувані мови програмування, засоби розроблення, механізми оновлення мікропрограмного забезпечення та можливості використання відкритих програмно-апаратних рішень. Запропоновано систему інтегрального оцінювання портативних

консолей, побудовано рейтинги, теплові карти та графічні моделі, що дозволили визначити переваги й обмеження різних платформ. Окрему увагу приділено функціональним можливостям мікроконтролерів сімейства ESP32 як універсальної основи сучасних портативних пристроїв, їх застосуванню для створення IoT-систем, розроблення власного мікропрограмного забезпечення, швидкого прототипування, навчання програмуванню та дослідження бездротових мереж. За результатами дослідження визначено найбільш перспективні платформи для різних сфер використання та сформульовано рекомендації щодо їх практичного застосування.

Ключові слова – Інтернет речей; ESP32; портативно-ігрові мікроконтролерні консолі; вбудовані системи; STEM-освіта; програмні екосистеми; бездротові сенсорні мережі.

Kuklinskyi M., Sverdliuk B., Kahramanova Yu., Bondarenko A.
**SYSTEM ANALYSIS AND COMPREHENSIVE EVALUATION OF PORTABLE
EDUCATIONAL GAMING CONSOLES BASED ON MICROCONTROLLERS**

The article presents a comparative analysis of modern portable educational gaming consoles based on microcontrollers intended for programming, STEM education, the development of Internet of Things (IoT) systems, and the implementation of DIY projects. The technical characteristics of thirteen popular platforms were investigated, and a comprehensive evaluation of nine microcontrollers was performed according to a set of hardware parameters, including architecture, performance, memory capacity, support for wireless technologies, peripheral capabilities, and energy efficiency. The software ecosystems of the investigated platforms, supported programming languages, development tools, firmware update mechanisms, and the possibilities of using open hardware and software solutions were analyzed. An integrated evaluation system for portable consoles was proposed, and ratings, heat maps, and graphical models were developed, making it possible to determine the advantages and limitations of different platforms. Particular attention was paid to the functional capabilities of ESP32 family microcontrollers as a universal basis for modern portable devices, their application for creating IoT systems, developing custom firmware, rapid prototyping, programming education, and wireless network research. Based on the results of the study, the most promising platforms for various fields of application were identified, and recommendations regarding their practical use were formulated.

Keywords: Internet of Things; ESP32; portable gaming microcontroller consoles; embedded systems; STEM education; software ecosystems; wireless sensor networks.

Дата першого надходження: 10.07.2026 р.

Дата прийняття до друку: 14.08.2026 р.

Дата публікації: 10.09.2026 р.