

УДК 004.35:681.518

doi: 10.32620/akt.2024.5.12

О. О. ВДОВІЧЕНКО, А. Є. ПЕРЕПЕЛИЦІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## АНАЛІЗ НОМЕНКЛАТУРИ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕЛЕМЕНТІВ ДОМАШНЬОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

**Предметом** вивчення в статті є перелік сучасних мікроконтролерів для побудови домашньої автоматизації, вбудованих систем та компонентів Internet of Things (IoT) і технології для їх програмування. **Метою** роботи є аналіз елементної бази сучасних мікроконтролерів для побудови компонентів систем IoT та домашньої автоматизації з урахуванням наявних ресурсів та апаратної реалізації інтерфейсів. **Завдання:** визначити терміни і вагомлі для практичного застосування риси мікроконтролера; провести аналіз елементної бази та переліку сучасних виробників найбільш розповсюджених мікроконтролерів; проаналізувати особливості мікроконтролерів AVR; виконати аналіз переваг мікроконтролерів STM32; провести аналіз можливостей мікроконтролерів ESP32; виконати порівняння апаратних ресурсів цих трьох груп поширених мікроконтролерів. Відповідно до поставлених завдань, були отримані наступні **результати**. Проведено аналіз чотирнадцяти провідних виробників мікроконтролерів з урахуванням розрядностей, набору серій та сімейств пристроїв. Виділено основні характеристики та вимоги до практичного застосування мікроконтролерів як для створення вбудованих систем, так і для навчання та проектування. Виявлено причини значної поширеності застосування спільнотою мікроконтролерів AVR для навчання та ознайомлення з програмуванням. Проаналізовано можливості апаратних ресурсів та переваг застосування набору серій моделей групи мікроконтролерів STM32 у вбудованих системах. Встановлено доцільність використання мікроконтролерів ESP32 для побудови компонентів систем IoT та пристроїв з доступом в Інтернет. Виконано порівняння апаратних ресурсів мікроконтролерів трьох виробників з урахуванням доступного обсягу пам'яті програми, кількості інтерфейсів і виводів. **Висновки.** Головний внесок і наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що проведений аналіз дозволяє спростити процес прийняття рішення щодо вибору необхідної елементної бази з числа сучасних мікроконтролерів для побудови компонентів систем домашньої автоматизації та інтернету речей з урахуванням наявних апаратних ресурсів, кількості виводів і наявності апаратних інтерфейсів. Це знижує необхідні трудовитрати на початкових етапах проектування таких систем, а також під час перенесення на нову елементну базу та середовища проектування вже існуючого проекту.

**Ключові слова:** мікроконтролер; AVR; STM32; ESP32; ARM; Arduino; апаратні ресурси; компоненти розумного будинку; побутова автоматизація; пристрої з доступом в Інтернет; Інтернет речей; IoT.

### Вступ

Під час створення різноманітних вбудованих рішень та виконавчих пристроїв у складі розумного будинку існує необхідність у використанні відтворених дешевих апаратних реалізацій. Їх основою можуть бути мікроконтролери [1]. Вони використовуються в різних галузях, включаючи вбудовані та бортові рішення для аерокосмічних систем [2], що вимагає врахування особливих умов експлуатації під час проектування [3], а також для промислового інтернету речей (IIoT), моніторингу та керування двигуном, енергетичних установок [4].

Розвиток самих мікроконтролерів та об'єднання компаній, що виробляли такі продукти, призводять

до необхідності в періодичній актуалізації кожного набору номенклатури мікроконтролерів. Це необхідно для збереження тривалої можливості використання конкретної моделі в ланцюжках постачання для розроблення та підтримки вбудованих систем.

Практично наявних моделей мікроконтролерів для застосування в домашніх системах автоматизації та системах із доступом в Інтернет не так багато.

Під час вибору конкретних серій і сімейств таких пристроїв на етапі розроблення системи, необхідно розуміти які можливі варіанти елементної бази існують для вибору [5]. Для цього необхідно провести класифікацію наявних мікроконтролерів, доступних при побудові систем домашньої автоматизації та подібної електроніки.



Для відповіді на запитання щодо можливості практичного використання мікроконтролерів відповідно до їх вартості та апаратних ресурсів необхідно провести класифікацію наявних мікроконтролерів.

Для можливості практичного використання такої класифікації необхідно визначити апаратні ресурси, що надаються, середовища програмування та інструменти завантаження коду в мікроконтролер, а також наявність доступних бібліотек для них. Слід ураховувати, що з плином часу відбуваються зміни у політиках компаній, відбуваються їх об'єднання, а в деяких випадках вони припиняють своє існування.

Тому **актуальним** завданням є розгляд існуючого списку мікроконтролерів з точки зору їх практичного застосування при побудові компонентів розумного будинку, коли потрібно приймати рішення стосовно того який саме мікроконтролер вибрати. Тому необхідно мати і результати їх порівняння.

Зіставлення такої деталізованої інформації про апаратні ресурси в рамках класифікації дасть змогу відкрити нові горизонти для ухвалення рішень і вибору мікроконтролерів для проектів вбудованих систем на етапі їх створення. Головна мета при цьому – це зниження трудовитрат у процесі прийняття рішення під час вибору таких мікроконтролерів.

**Метою даної роботи** є аналіз елементної бази сучасних мікроконтролерів для побудови компонентів систем IoT та домашньої автоматизації з урахуванням наявних ресурсів та апаратної реалізації інтерфейсів.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні **завдання**:

- 1) визначити терміни і вагомості для практичного застосування риси мікроконтролера;
- 2) провести аналіз елементної бази та переліку сучасних виробників найбільш розповсюджених мікроконтролерів;
- 3) проаналізувати головні особливості мікроконтролерів AVR;
- 4) виконати аналіз переваг мікроконтролерів STM32;
- 5) провести аналіз можливостей мікроконтролерів ESP32;
- 6) виконати порівняння апаратних ресурсів цих трьох груп поширених мікроконтролерів.

**Структура цієї статті** включає шість основних розділів. У першому розділі визначаються важливі для застосування терміни та параметри. У другому розділі виконується аналіз існуючих виробників мікроконтролерів. Далі у трьох наступних розділах надаються результати аналізу найбільш поширених мікроконтролерів для платформ швидкого проектування конкретних виробників. У шостому розділі представлені основні результати роботи, включаючи порівняння їх ресурсів, що спрощує процес вибору.

## 1. Визначення головних термінів та рис для застосування мікроконтролерів

**Визначення термінів** дозволяє встановити значення терміна та однаково його розуміти при порівнянні мікроконтролерів від різних виробників.

**Серія** об'єднує набір мікроконтролерів з майже однаковим ім'ям або частиною маркування. Між пристроями різних серій можуть існувати якісні відмінності. Наприклад, серії ATtiny та ATmega.

**Сімейство** поєднує мікроконтролери з майже однаковою архітектурою і набором інструкцій. Між пристроями з одного сімейства можуть існувати кількісні відмінності. Наприклад, пристрої сімейства ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P [6] схожі та відрізняються кількістю різних видів пам'яті.

**Мікроконтролер** це мікросхема, яка містить мікропроцесорне ядро, пам'ять програми, зовнішні порти, елементи периферії та інші апаратні ресурси.

**Пам'ять програми** це енергонезалежний обсяг де знаходиться код програми у вигляді машинних інструкцій, а також може бути розташований код завантажувача [7]. Майже у всіх побутових рішеннях зараз ця пам'ять виробляється за технологією Flash.

**Енергонезалежна пам'ять** це обсяг адресного простору, який можна перезаписувати для збереження налаштувань конкретного екземпляра пристрою. Зазвичай ця пам'ять виробляється за технологією Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM) [8], що забезпечує до ста тисяч циклів перезапису, що вдесятеро більше ніж у Flash.

**Статична пам'ять** або **пам'ять змінних**, яку деякі джерела називають оперативною, у тому числі, зберігає стек під час виконання програми. Вона реалізована за енергозалежною технологією Static Random-Access Memory (SRAM). Цей тип апаратних ресурсів мікроконтролерів критично важливий при обробці масивів та реалізації складних алгоритмів.

**Одноразово програмована пам'ять** якщо і є у складі апаратних ресурсів мікроконтролера, то її обсяг зазвичай досить невеликий. До неї можна записувати унікальні ідентифікатори або параметри.

**Проведення дослідження** передбачає виконання порівняльного аналізу з урахуванням вимог до основних апаратних ресурсів мікроконтролерів залежно від сфери їх застосування, та відокремлення характерних рис програмного забезпечення (ПЗ) інтегральних середовищ та їх операційних систем.

Тому, важливо відокремити такі параметри, як обсяг Flash пам'яті, EEPROM та SRAM. Також для використання важлива кількість виводів, підтримка інтерфейсів, напруга живлення і частота тактування. Застосування недорогих мікроконтролерів у складі комплектів швидкого проектування залучає ширше коло розробників і також є критерієм порівняння [9].

## 2. Аналіз виробників мікроконтролерів

На поточний момент існує велика кількість виробників мікроконтролерів [10], продукція котрих має широкий спектр форм та способів застосувань. Серед них можна виділити наступні компанії.

**Microchip Technology** виробляє мікроконтролери PIC, dsPIC, AVR та SAM, інтегральні схеми змішаних сигналів, аналогові та Flash-IP [11, 12].

**STMicroelectronics** виробляє інтегральні схеми для спеціальних застосувань, пам'ять (включаючи EEPROM), мікроконтролери STM32 (на основі ARM Cortex), мікропроцесори, транзистори, смарт-карти.

**Texas Instruments** розробляє аналогові мікросхеми і вбудовані процесори, мікроконтролери серії MSP430 та серії Tiva C (ARM Cortex M4) [13].

**NXP Semiconductors** – це виробник процесорів, датчиків, аналогових мікросхем, модулів зв'язку і мікроконтролерів серій LPC (ARM Cortex) та i.MX.

**Zilog** пропонує мікропроцесори, мікроконтролери та спеціалізовані вбудовані системи на кристалі (SoC). Відомі завдяки серіям Z80 та Z8.

**Renesas Electronics** пропонує аналогові та змішані інтегральні схеми, пристрої пам'яті, SoC та мікроконтролери серій RX, RL78 та RZ (ARM).

**Infineon Technologies** випускає мікроконтролери XMC (на основі ARM Cortex) і Aurix, силові напівпровідники та датчики.

**Espressif Systems** є відомою завдяки серії мікросхем ESP8266, ESP32, ESP32-S, ESP32-C та ESP32-H, популярними для бездротового зв'язку, низького енергоспоживання та AIoT-розробок.

**Cypress Semiconductor** (частина Infineon) випускає флеш-пам'ять, мікроконтролери F-RAM і SRAM Traveo, PSoC, PMIC, сенсорні контролери, бездротові рішення BLE Bluetooth та USB-з'єднання.

**Atmel** (тепер частина Microchip) виробляє мікроконтролери (8-розрядні AVR, 32-розрядні AVR та 32-розрядні ARM, а також Intel 8051), радіочастотні пристрої, включаючи Wi-Fi, пристрої EEPROM та флеш-пам'яті, симетричні та асиметричні мікросхеми безпеки, сенсорні датчики і контролери, та інше.

**Silicon Labs** виробляє мікроконтролери, бездротові системи і модулі, включаючи серію EFM32.

**Analog Devices** пропонує інтегральні схеми аналогової, змішаної та цифрової обробки сигналів, що використовуються в електронному обладнанні.

**Maxim Integrated** (частина Analog Devices) пропонує мікросхеми аналогові, цифрові, інтерфейсні, для керування живленням та акумуляторами, датчики, комунікаційні рішення, системи безпеки та мікроконтролери SigmaDSP, ADSP-21xx, Blackfin.

**Nuvoton Technology** виробляє клавіатурні та вбудовані контролери для мобільних платформ, модулі TPM і мікроконтролери серії NuMicro.

## 3. Аналіз мікроконтролерів AVR

За результатом проведеного аналізу та порівняння більшості з мікроконтролерів AVR для визначення діапазонів всіх значимих для практичного застосування параметрів та перерахованих вище типів пам'яті встановлено, що вони залежать від конкретної моделі у серії, при цьому для різних видів апаратних ресурсів немає прямої залежності від збільшення номера та кількості флеш пам'яті програми. Результати порівняння, включаючи розміри цих типів пам'яті, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1  
Порівняння трьох серій мікроконтролерів AVR.

№	Серія AVR	Flash, Кб	EEPROM, Кб	SRAM, Кб
1	ATtiny	0,5 – 16	0 – 0,5	0 – 0,5
2	ATmega	4 – 256	0,5 – 4	0,25 – 16
3	ATxmega	16 – 384	1 – 4	1 – 32

Виходячи з узагальнення отриманих результатів порівняння ресурсів, діапазони величин пам'яті (якщо така є) для мікроконтролерів AVR наступні:

– для флеш пам'яті становить від 0,5 КБ до 384 КБ, що дає змогу обирати мікроконтролери як для простих, так і комплексних завдань;

– EEPROM становить від 64 байт до 4 КБ, що є достатнім для зберігання налаштувань, калібрувальних даних та іншої важливої інформації, що вимагає збереження після перезавантаження пристрою;

– SRAM становить від 32 байт до 32 КБ, що забезпечує гнучкість у виборі мікроконтролерів для додатків з різними вимогами до пам'яті для змінних.

**Підтримка USB** у сімействах серії ATmega реалізована у 5 основних моделей: ATmega16U2, ATmega32U2, ATmega32U4 (містить у собі USB, що робить його популярним для USB-пристроїв), ATmega64U2, ATmega128U2. Деякі крихітні ATtiny також підтримують USB, наприклад сімейство ATtiny 25/45/85 [14], що дозволяє створити периферійний пристрій зі стандартним драйвером або виконувати програмування напряму через завантажувач.

Для побудови програматора, такого як клон AVRISP-mkII, може бути застосований пристрій з USB із сімейства AT90USB82/162 [15], яке не належить до жодної з розглянутих серій у таблиці 1.

**Інструменти розроблення** для AVR відрізняються великою різноманітністю, включаючи середовища розроблення, компілятори, відладжувачі та генератори коду. До них відносяться Atmel Studio 4 та наступні на основі Visual Studio, Microchip Studio, Arduino IDE, компілятори AVR-GCC, AVR-DUDE, Веб-редактор коду Atmel START та відладжувачі AVRISP-mkII, JTAGICE-mkII, AVR Dragon, USBasp.

#### 4. Аналіз мікроконтролерів STM32

Мікроконтролери STM32 виготовляються виробником STMicroelectronics та мають широкий діапазон флеш-пам'яті залежно від серії та моделі, що дає змогу використовувати їх у найрізноманітніших застосунках.

**Відсутність вбудованої EEPROM** у складі апаратної реалізації мікроконтролерів STM32, як це реалізовано в інших мікроконтролерах (наприклад, в AVR), потребує програмної реалізації.

Для зберігання енергонезалежних даних, які зберігаються під час вимкнення живлення, можна використовувати емуляцію EEPROM у вбудованій флеш-пам'яті програми.

Для мікроконтролерів STM32 зазвичай виділяють частину флеш-пам'яті, щоб емулювати EEPROM. Це досягається за допомогою спеціальної бібліотеки, що надається STMicroelectronics (наприклад, EEPROM Emulation library). Обсяг, доступний для емуляції EEPROM, залежить від загального обсягу флеш-пам'яті мікроконтролера і того, скільки пам'яті користувач виділить під ці завдання.

Діапазон такого EEPROM під час емуляції може становити від кількох байт до кількох кілобайт, залежно від обсягу доступної флеш-пам'яті мікроконтролера і конфігурації користувача. Наприклад, у мікроконтролері STM32 з 64 КБ флеш-пам'яті можна виділити 1-4 КБ для емуляції EEPROM, не чіпаючи код та інші дані.

У деяких STM32 мікроконтролерах серії STM32L (з ультранизким енергоспоживанням) є вбудована Data EEPROM, яку можна використовувати як звичайну EEPROM. Наприклад, у серії STM32L0 і STM32L4 вбудована Data EEPROM може становити від 2 КБ до 8 КБ.

**Діапазон SRAM** у STM32 мікроконтролерах залежить від серії та моделі, що надає широкий вибір контролерів як для простих програм, так і для реалізації складних високопродуктивних алгоритмів обробки з великою кількістю змінних у кодї систем.

**Програмне забезпечення розробки** та навіть операційні системи для них є також важливим для підтримки роботи з цими мікроконтролерами. Для STM32 існує група засобів розроблення, яка включає в себе середовища для розроблення, генератори коду, конфігуратори, компілятори, та засоби відлагодження. Слід зазначити, що серія підтримує не тільки засоби від власного виробника, такі як STM32CubeIDE, STM32CubeMX чи ST-LINK, а й з інструментами інших виробників і навіть з відкритим ПЗ. Наприклад, середовища Keil MDK і Arduino IDE та відкриті рішення відладжувачів J-Link і OpenOCD також підтримують STM32. Також для них доступні операційні системи з відкритим кодом.

Результати порівняння серій і діапазонів обсягу пам'яті програми та змінних наведено у таблиці 2.

Таблиця 2  
Порівняння серій мікроконтролерів STM32.

№	Серія	Flash, Кб	SRAM, Кб
1	STM32F0	16 – 256	4 – 32
2	STM32F1	16 – 1024	4 – 96
3	STM32F2	128 – 1024	64 – 128
4	STM32F3	16 – 512	16 – 80
5	STM32F4	64 – 2048	64 – 384
6	STM32F7	64 – 2048	256 – 512
7	STM32G0	16 – 512	8 – 128
8	STM32G4	32 – 512	4 – 32
9	STM32H7	128 – 2048	128 – 1433
10	STM32L0	8 – 192	2 – 20
11	STM32L1	32 – 512	4 – 80
12	STM32L4	64 – 1024	40 – 320
13	STM32L5	256 – 512	32 – 256
14	STM32WL	128 – 256	32 – 64
15	STM32WB	256 – 1024	1 – 256

Таким чином, діапазон вбудованої флеш-пам'яті в розглянутих серіях мікроконтролерів STM32 становить від 8 КБ до 2 МБ, а в деяких серіях із зовнішньою флеш-пам'яттю значно більше.

Отже, діапазон SRAM у STM32 мікроконтролерах становить від 2 КБ до 1.4 МБ, що дає змогу обирати пристрої для найрізноманітніших завдань, від простих вбудованих систем із мінімальним споживанням до складних застосунків із високими вимогами до оперативної пам'яті.

**Підтримка USB** в розглянутих серіях STM32 реалізована не у всіх моделях. Підтримку USB з них мають: STM32F0 (3 моделі), STM32F1 (6 моделей), STM32F2 (4 моделі), STM32F3 (5 моделей), STM32F4 (15 моделей), STM32F7 (10 моделей), STM32G0 (5 моделей), STM32G4 (7 моделей), STM32L0 (3 моделі), STM32L1 (3 моделі), STM32L4 (7 моделей), STM32L5 (2 моделі), STM32WL (4 моделі), STM32WB (5 моделей).

#### 5. Аналіз мікроконтролерів ESP32

ESP32 мікроконтролери від Espressif Systems зазвичай мають вбудовану флеш-пам'ять, але вони також підтримують і зовнішню для забезпечення розширених можливостей. Розмір флеш-пам'яті в мікроконтролерах ESP32 має діапазон від 256 КБ до 4 МБ (у деяких випадках за підтримки зовнішньої SPI-флеш-пам'яті може досягати 32 МБ залежно від конкретного пристрою).

**Відсутність вбудованої EEPROM**, як і для STM32, вимагає у випадку мікроконтролерів ESP32 використання області у флеш-пам'яті програми для емуляції енергонезалежної роботи пам'яті.

ESP32 має гарну підтримку середовищем Arduino, тому можна для емуляції EEPROM використовувати бібліотеку EEPROM з цього середовища. Це дає змогу зберігати та зчитувати дані так само, як при використанні традиційної EEPROM. Обсяг емуляції залежить від загального обсягу флеш-пам'яті мікроконтролера. Зазвичай це може бути кілька кілобайт (наприклад, 4 КБ або 8 КБ), але можна виділити і більше, залежно від конкретного проекту та обсягу флеш-пам'яті, що не використовується програмою та завантажувачем.

**Діапазон SRAM** в ESP32 мікроконтролерах варіюється залежно від моделі. Компанія виробник надає достатньо великий обсяг пам'яті для різних застосунків, особливо для тих, що пов'язані з IoT, бездротовим зв'язком і вбудованими системами.

Результати порівняння обсягу пам'яті програми та SRAM для серій ESP32 наведено у таблиці 3.

Таблиця 3  
Порівняння серій мікроконтролерів ESP32.

№	Серія	Flash, Кб	SRAM, Кб
1	ESP32	2048 – 8192	320 – 520
2	ESP32-S2:	2048 – 16384	200 – 320
3	ESP32-S3:	2048 – 16384	384 – 512
4	ESP32-C3:	4096 – 16384	320 – 400
5	ESP32-C6:	4096 – 16384	400 – 512
6	ESP32-H2:	2048 – 4096	192 – 320

Таким чином, значення діапазону вбудованої флеш-пам'яті в мікроконтролерах ESP32 становить від 2 МБ до 16 МБ, але з використанням зовнішньої пам'яті можна значно його збільшити.

Діапазон пам'яті SRAM в мікроконтролерах ESP32 становить від 192 КБ до 520 КБ, залежно від моделі. Це дозволяє використовувати ці мікроконтролери в широкому спектрі застосунків, зокрема в завданнях із високим навантаженням і вимогами до пам'яті, наприклад, щоб реалізувати обмін за бездротовими стандартами з'єднання з Інтернет.

У наборі мікроконтролерів із 6 моделей ESP32, підтримка USB реалізована лише в двох моделях. Підтримку USB мають ESP32-S2 та ESP32-S3.

**Інструментальні засоби розроблення** для цих мікроконтролерів підтримуються розробниками ПЗ. В нього входять середовища розроблення, фреймворки, хмарні платформи, компілятори, відлажувачі та генератори коду. Серед власних продуктів виділяють середовище ESP-IDF та програматор ESP-Prog. Також підтримка рішень ESP32 є у продуктах від інших виробників, таких як середовище Arduino IDE (що дуже важливо для можливості швидкого проектування та навчання програмуванню), Eclipse, генератор коду Arduino Core for ESP32, хмарних платформ AWS IoT SDK для ESP32 та Google Cloud IoT Core SDK.

## 6. Порівняння апаратних ресурсів мікроконтролерів трьох виробників

Виходячи з результатів проведеного аналізу розглянутих мікроконтролерів та програмного забезпечення до них, можна зробити висновок, що процес прийняття рішення щодо використання конкретної моделі мікроконтролера може враховувати параметри апаратних ресурсів. Вони порівнюються за набором категорій, і за результатом такого порівняння можна зробити набір рекомендацій для розробника. Якщо розробник працював з конкретним мікроконтролером, то йому легше продовжувати створювати проекти на його основі, тому що він знає його набір регістрів, середовище розробки, тощо. Набір проаналізованих параметрів наведено у таблиці 4.

Таблиця 4  
Порівняння фізичних характеристик і ресурсів мікроконтролерів трьох виробників.

№	Критерій порівняння	Групи мікроконтролерів		
		AVR	STM32	ESP32
1	Flash, Кб	0,5 – 384	8 – 2048	2048 – 16384
2	EEPROM, Кб	0 – 4	0 (є до 8)	0
3	SRAM, Кб	0 – 32	2 – 1433	192 – 520
4	Підтримка USB	деякі моделі	третина моделей	деякі моделі
5	Найбільша частота, МГц	1,6 – 32	32 – 480	128 – 240
6	Розрядність	8 (є 16)	32	32

**Використання мікроконтролерів AVR** може бути доцільним для рішень з особливими вимогами до енергоефективності та простоти розроблення. Оскільки є наявність вбудованої EEPROM, яка не потребує додаткового живлення, є вбудованою в сам мікроконтролер, що полегшує його взаємодію з нею, тим самим прискорює виконання операцій.

Іншою перевагою AVR можна вважати простоту та легкість програмування за наявності інструментів швидкого проектування. Завдяки мінімальним вимогам до периферії, пристрої не потребують додаткових інструментів, чим значно спрощують процес розробки проекту та програмування.

Таким чином, простота, швидкодія та енергоефективність цих пристроїв спонукає до мініатюризації самих рішень, які розробляються на їх основі. Притаманна серії компактність добре підходить для вбудованих бортових рішень, аматорських проектів, прототипування та масового виробництва пристроїв, де не потрібна висока обчислювальна потужність або складна периферія, як у STM32 і ESP32. Це може бути не лише домашня автоматизація, а й такі мобільні рішення, як метео-зонди, наземні, підводні, повітряні системи, бортові самописці, реєстратори.

**Мікроконтролери STM32** надають достатній інструментарій для потужних рішень, які потребують високого рівня швидкодії, програмної гнучкості та обчислювальних можливостей. Завдяки високому діапазону частот тактування і розрядності у 32 біта, забезпечується достатній рівень паралелізму і швидкості виконання операцій. Також, завдяки об'ємній SRAM надається підтримка складних та точних обчислювальних операцій, що значно розширює спектр завдань для пристрою. Завдяки різноманіттю інтерфейсів взаємодії забезпечується широка сумісність та інтеграція із зовнішніми пристроями.

STM32 перевершує можливості AVR і надає більше опцій порівняно з ESP32, особливо там, де важлива висока обчислювальна потужність, низьке енергоспоживання або аналогові вимірювання. Це можуть бути такі рішення, як аналізуюче обладнання двигунів, обладнання самоходних космічних апаратів та деяких супутників.

**Мікроконтролери ESP32** забезпечують можливість розроблення рішень високої потужності. Вони вирізняються значним розміром флеш пам'яті програми, що дозволяє кількісно збільшувати її розмір для пристроїв. ESP32 вирізняються своїми мережевими можливостями. Завдяки підтримці бездротових способів комунікації Wi-Fi та Bluetooth, і підтримці мережових протоколів на прикладі TCP/IP, вони є кращим вибором для систем IoT.

Окрім звичної мережової взаємодії доступні ще й хмарні обчислення. Оскільки серед підтримуваних протоколів є MQTT та HTTP, з'являється можливість проводити інтеграції з хмарними сервісами на прикладі AWS IoT, Google Cloud, Blynk та іншими для віддаленого моніторингу та керування [1, 9].

Для розроблення проектів на основі ESP32, включаючи ESP8622, є можливість використання як програмного забезпечення власного виробництва, так і сторонніх виробників, наприклад Arduino IDE. Це значно розширює обсяг бібліотек і прикладів.

Отже, ESP32 має низку переваг, особливо в застосунках, пов'язаних із бездротовим зв'язком, IoT і обробкою даних у реальному часі. Вбудована підтримка Wi-Fi і Bluetooth, висока продуктивність і постійне доповнення бібліотек роблять його чудовим варіантом порівняно з AVR для мережових і сучасних застосунків і вигіднішим рішенням, ніж STM32, коли важлива інтеграція бездротових інтерфейсів за умови обмеженого бюджету.

**Опис елементів прийняття рішення** з вибору мікроконтролера враховує розглянуті вимоги до ресурсів, включаючи кількість вбудованої флеш пам'яті, відсутність чи навпаки необхідність використання EEPROM, кількість виводів, SRAM, та інші.

На основі опису таких параметрів існує можливість визначити, яким чином кінцевий користувач,

залежно від масштабу його системи, може прийняти рішення про вибір мікроконтролера. Наприклад, це просто невеликий розробник, який виконує разову побутову автоматизацію чогось, або це група розробників, яка робить прототип для подальшого використання, або це велика компанія, яка займається вбудованими рішеннями, і для розвитку їх проекту потрібен компонент, який може бути реалізований під конкретне завдання на основі мікроконтролера.

Такі деталі довшначають умови вибору для прийняття рішення, адже якщо це буде повноцінний мікроконтролер, який буде повністю контролювати систему, то для нього будуть інші вимоги. Невеликий мікроконтролер можна використовувати замість якогось контролера конкретного пристрою, якщо запрограмувати його під це завдання. Це може бути дешевше, ніж встановлювати мікросхему для управління виконавчим пристроєм чи датчиком.

**Приклади прийняття рішення** можуть бути засновані на варіантах та критеріях, коли кількість апаратних ресурсів враховується нарівні з вартістю. Тобто, що є в наявності та на основі чого можна побудувати систему.

Наприклад, якщо критерієм є використання великої кількості бібліотек, необхідно ці бібліотеки підключати так, щоб можна було їх безпосередньо помістити в пам'ять, а для цього потрібно багато пам'яті. Можна обрати один із пристроїв ESP32.

Або, наприклад, існує необхідність використовувати вбудовані перетворювачі, або інтерфейси UART, I2C, SPI, або паралельні компаратори, або зовнішні лічильники. Все це вимагає наявності або вбудованих апаратних рішень, або бібліотек для їх програмної реалізації. Можна обрати STM32.

Якщо необхідно використовувати рішення, що працюють з цілим типом int (4 байтним без розбиття на байти), то необхідно віддати перевагу 32-бітним архітектурам. Наприклад, STM32 та ESP32.

Якщо потрібно забезпечити сумісність з вже існуючими бібліотеками, які написані мовою асемблер, наприклад, для AVR, то потрібно вибрати AVR.

Якщо існує можливість використання конкретних середовищ розробки, потрібно вибрати мікроконтролери на основі цих середовищ розробки.

Якщо існує необхідність використання вбудованих рішень з бездротовим зв'язком і побудови маленьких вбудованих найпростіших WEB серверів для інтерфейсу користувача, то доцільно використовувати ESP32, тому що для них існує багато бібліотек, які вже це дозволяють зробити одразу.

Таким чином, на основі цього можна приймати рішення про доцільність застосування конкретного мікроконтролера, та наявність або відсутність вимог програмної або апаратної реалізації, включаючи апаратні ресурси, для реалізації конкретної системи.

## Дискусія

Головною ідеєю даної публікації є спрощення процесу вибору мікроконтролерів для користувача, знайомого з цими технологіями. Вони доступні в досить дешевому виконанні з програмуванням, в тому числі, з використанням засобів Arduino.

У публікації також надано підхід до процесу вибору елементної бази. Для користувача, знайомого з розглянутими технологіями, надані орієнтири відносно апаратного та програмного оснащення найпоширеніших мікроконтролерів.

Для початківців спрощення процесу вибору також буде корисним, оскільки мікроконтролери через свою низьку вартість та доступність стали частіше використовуватися при навчанні програмуванню.

Маючи уявлення про тип проєктованої системи, завдяки орієнтирам з'являється можливість швидко звузити коло пошуку необхідних складових компонентів.

У більшості мікроконтролерів STM32 та ESP32 пам'ять типу EEPROM реалізується через емуляцію у флеш-пам'яті, і обсяг доступної пам'яті залежить від конфігурації і може варіюватися залежно від налаштувань користувача, а в деяких низькоенергетичних моделях доступна вбудована EEPROM з фіксованим обсягом.

## Висновки

Головний внесок і наукова новизна отриманих результатів полягає у спрощенні процесу прийняття рішення щодо вибору необхідної елементної бази для побудови компонентів систем домашньої автоматизації та Інтернету речей.

У роботі було проаналізовано існуючі виробників мікроконтролерів та набір серій трьох із них. Можливість програмування мікроконтролерів без використання програматорів надає можливість побудови відтворюваних систем домашньої автоматизації безпосередньо кінцевими споживачами завдяки використанню інструментів швидкого проєктування, які широко підтримують якраз три розглянуті групи мікроконтролерів.

Проведений аналіз дозволяє спростити вибір мікроконтролерів, ґрунтуючись на урахуванні наявних апаратних ресурсів, кількості виводів і наявності апаратних інтерфейсів. Таким чином знижуються необхідні трудовитрати на початкових етапах проєктування таких систем, а також під час перенесення на нову елементну базу та середовища проєктування вже існуючого проєкту.

У рамках подальших досліджень може бути виконано детальне зіставлення всіх мікроконтроле-

рів кожної із серій та доповнення процесу прийняття рішень категоріями вартості та наявності конкретної моделі для придбання під час вибору основи для проєкту, а також розглянута можливість побудови автоматизованої системи для цього.

**Внесок авторів:** формулювання завдань дослідження – **А. Є. Перепелицин**; аналіз інформаційних джерел – **О. О. Вдовіченко, А. Є. Перепелицин**; аналіз поширених моделей мікроконтролерів та написання розділів із аналізом – **О. О. Вдовіченко**; написання рекомендацій для застосування мікроконтролерів – **О. О. Вдовіченко, А. Є. Перепелицин**; аналіз отриманих результатів та формулювання висновків – **О. О. Вдовіченко, А. Є. Перепелицин**.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

## Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

## Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

1. *Perepelitsyn, A. Service for communication of devices with internet access: analysis of technologies and method of creation [Text] / A. Perepelitsyn, O. Vdovichenko, & V. Mikhalevskyi // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. – No. 4. – P. 197–208. DOI: 10.32620/reks.2023.4.14.*
2. *Любимов, О. В. Багатокритеріальне оцінювання стандартизованих інтерфейсів бортових мереж наносупутників CubeSat [Текст] / О. В. Любимов, & І. Б. Туркін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2024. – № 3. – С. 138–153. DOI: 10.32620/akt.2024.3.12.*
3. *Вялов, С. Р. Порівняльний аналіз систем програмування мікроконтролерів серії STM32 у виробках авіаційного застосування [Текст] / С. Р. Вялов, & А. В. Дунай // Авіаційно-космічна*

техніка і технологія. – 2023. – № 4sup2. – С. 65–69. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.08.

4. Лінков, О. Ю. Використання технологій IIoT в системах моніторингу та керування двигуном [Текст] / О. Ю. Лінков, & О. С. Шевченко // Двигуни внутрішнього згорання. – 2024. – № 2. – С. 42–46. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.06.

5. Berlier, J. A. A constraint satisfaction algorithm for microcontroller selection and pin assignment [Text] / J. A. Berlier, & J. M. McCollum // Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010, SoutheastCon 2010. – 2010. – P. 348–351. DOI: 10.1109/SECON.2010.5453854.

6. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P [Online]. – Microchip Technology Inc., 2020. – 653 p. – Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>. – 23.07.2024.

7. Вдовіченко, О. О. Аналіз технологій реконфігурації систем інтернету речей на рівні програмних модулів та завантажувачів [Текст] / О. О. Вдовіченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2024. – № 3. – С. 99–108. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.09.

8. Vdovichenko, O. Analysis of Technologies for Reconfiguration of IoT Systems at Level of Software Modules and Bootloaders [Text] / O. Vdovichenko, & A. Perepelitsyn // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering, ICTM 2023, Springer, Cham. – 2023. – Vol. 996. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9\_36.

9. Perepelitsyn, A. Technologies and Services of Communication for Embedded Systems over Internet [Text] / A. Perepelitsyn, & O. Vdovichenko // Proceedings of 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2023. – 2023. – 6 p. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416486.

10. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices [Text] / D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, & O. Težak // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – Article No. 6739. DOI: 10.3390/s23156739.

11. Quick Guide to Microchip Development Tools [Online]. – Microchip Technology Inc., 2016. – 36 p. – Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50001894E.pdf>. – 19.07.2024.

12. Production Programming of Microchip AVR® and SAM Microcontrollers. AN2468 [Online]. – Microchip Technology Inc., 2018. – 24 p. – Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Production-Programming-of-Microchip-AVR-SAM-MCU-00002468D.pdf>. – 23.07.2024.

13. TM4C Microcontrollers Product Selection Guide [Online]. – Texas Instruments, 2021. – 12 p. – Available at: <https://www.ti.com/lit/sg/spmt285e/spmt285e.pdf?ts=1729420360166>. – 23.07.2024.

14. Atmel ATtiny25, ATtiny45, ATtiny85 Datasheet [Online]. – Atmel, 2013. – 234 p. – Available at: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85\\_datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85_datasheet.pdf). – 23.07.2024.

15. AT90USB82/162 Datasheet [Online]. – Atmel., 2010. – 307 p. – Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc7707.pdf>. – 23.07.2024.

## References

1. Perepelitsyn, A., Vdovichenko, O., & Mikhalevskiy, V. Service for communication of devices with internet access: analysis of technologies and method of creation. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2023, no. 4, pp. 197–208. DOI: 10.32620/reks.2023.4.14.

2. Liubimov, O., & Turkin, I. Bahatokryterial'ne otsynuyvannya standartyzovanykh interfeysiv bortovykh merezh nanosuputnykiv CubeSat [Multicriteria evaluation of industry-known interfaces of onboard network of CubeSat nanosatellites]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2024, no. 3, pp. 138–153. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.12. (In Ukrainian).

3. Vialov, S., & Dunai, A. Porivnyal'nyy analiz system prohramuvannya mikrokontroleriv seriyi STM32 u vyrobakh aviatsiynoho zastosuvannya [Comparative analysis of STM32 series microcontroller integrated development environment in aviation products]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 4sup2, pp. 65–69. DOI: 10.32620/aktt.2023.4sup2.08. (In Ukrainian).

4. Linkov, O. U., & Shevchenko, O. S. Vykorystannya tekhnolohiy IIoT v systemakh monitorynhu ta keruvannya dvyhunom [Use of IIoT technologies in engine monitoring and control systems]. *Dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya – Internal combustion engines*, 2024, no. 2, pp. 42–46. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.2.06. (In Ukrainian).

5. Berlier, J. A., & McCollum, J. M. A constraint satisfaction algorithm for microcontroller selection and pin assignment. *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010, SoutheastCon 2010*, 2010, pp. 348–351, DOI: 10.1109/SECON.2010.5453854.

6. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P. Microchip Technology Inc., 2015. 294 p. Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf>. (accessed 23.07.2024).

7. Vdovichenko, O. Analiz tekhnolohiy rekonfiguratsiyi system internetu rechet na rivni prohramnykh moduliv ta zavantazhuvachiv [Analysis of technologies for reconfiguration of Internet of Things systems at level of software modules and bootloaders]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2024, no. 3, pp. 99–108. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.09. (In Ukrainian).

8. Vdovichenko, O., & Perepelitsyn, A. Analysis of Technologies for Reconfiguration of IoT Systems at Level of Software Modules and Bootloaders. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2023 – ICTM 2023, Springer, Cham*, 2023, vol. 996. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9\_36.

9. Perepelitsyn, A., & Vdovichenko, O. Technologies and Services of Communication for



Embedded Systems over Internet. *Proceedings of 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2023*, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416486.

10. Hercog, D., Lerher, T., Truntiĉ, M., & Teĉak, O. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*, 2023, vol. 23, article no. 6739. DOI: 10.3390/s23156739.

11. *Quick Guide to Microchip Development Tools*. Microchip Technology Inc., 2016. 36 p. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50001894E.pdf>. (accessed 19.07.2024).

12. *Production Programming of Microchip AVR® and SAM Microcontrollers*. Microchip Technology Inc. AN2468, 2018. 24 p. Available at: [\[Programming-of-Microchip-AVR-SAM-MCU-00002468D.pdf\]\(#\). \(accessed 23.07.2024\).](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Production-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

13. *TM4C Microcontrollers Product Selection Guide*. Texas Instruments. 2021. 12 p. Available at: <https://www.ti.com/lit/sg/spmt285e/spmt285e.pdf?ts=1729420360166>. (accessed 23.07.2024).

14. *Atmel ATtiny25, ATtiny45, ATtiny85 Datasheet*. Atmel. 2013. 234 p. Available at: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85\\_datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85_datasheet.pdf). (accessed 23.07.2024).

15. *AT90USB82/162 Datasheet*. Atmel. 2010. 307 p. Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc7707.pdf>. (accessed 23.07.2024).

Надійшла до редакції 10.09.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

## ANALYSIS OF PRODUCT RANGE OF MICROCONTROLLERS FOR CREATION OF ELEMENTS OF HOME AUTOMATION

*Oleksandr Vdovichenko, Artem Perepelitsyn*

**The subject** of study and research in this article is the list of modern microcontrollers and technologies of the programming for creation elements of home automation, embedded systems, and components of Internet of Things. The **goal** is to analyze the product range and nomenclature of modern microcontrollers for creation of components of IoT systems and home automation considering an available resources and hardware implementation of interfaces. The **tasks**: to analyze a significant parameters of microcontroller for practical use; to analyze the product range and a modern manufacturers list of the most widely used microcontrollers; to analyze the main features of AVR microcontrollers; to perform an analysis of the advantages of STM32 microcontrollers; to analyze the capabilities of ESP32 microcontrollers; to perform the comparison of hardware resources of these three groups of microcontrollers. According to the tasks, the following **results** were obtained. Fourteen leading manufacturers of microcontrollers are analyzed with taking into account the bit length and a set of series and families of devices. The main characteristics and requirements for the practical application of microcontrollers for both the creation of embedded systems and for training and prototyping are highlighted. The reasons of the great popularity of the use of AVR microcontrollers by the community for training and learning of programming are identified. The capabilities of hardware resources and the advantages of using for embedded systems of the set of models of STM32 microcontrollers series are analyzed. The reasonability of the use of ESP32 microcontrollers for building of components of IoT systems and devices with Internet access is concluded. The comparison of the hardware resources of microcontrollers of three manufacturers is performed with taking into account the available size of program memory, the number of interfaces and pins. **Conclusions.** The main contribution and scientific novelty of the obtained results is that the performed analysis allows to simplify the process of a decision making about the selection of the required product range of modern microcontrollers for the creation of the components of the systems of home automation and Internet of Things with taking into account the available hardware resources, the number of pins, and the presence of hardware interfaces. This reduces the required efforts and costs at the initial stages of prototyping such systems, as well as during the porting to new microcontrollers and integrated environments of an already existing project.

**Keywords:** microcontroller; AVR; STM32; ESP32; ARM; Arduino; hardware resources; components of smart home; home automation; devices with Internet access; Internet of Things; IoT.

**Вдовіченко Олександр Олександрович** – асп., асист. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Перепелицин Артем Євгенович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Oleksandr Vdovichenko** – PhD Student, Assistant of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.vdovichenko@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0001-8695-1752, Scopus Author ID: 58090577500.

**Artem Perepelitsyn** – PhD, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.perepelitsyn@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0002-5463-7889, Scopus Author ID: 56332607800.