

В. О. КУЛАНОВ, А. Є. ПЕРЕПЕЛИЦИН*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна***АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЛІС В СКЛАДІ ІОТ**

Предметом вивчення в роботі є сучасні технології програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) класу FPGA (Field Programmable Gate Array) та особливості їх застосування в домені Інтернету речей (Internet of Things, IoT) на різних рівнях архітектурної реалізації, а також елементи вибору відповідних рішень на основі FPGA як сервіс під час реалізації задач IoT, що потребують інтенсивних обчислень. **Метою** роботи є аналіз можливостей застосування технології ПЛІС в складі сучасної архітектури IoT та вдосконалення процесу вибору відповідних рішень на основі FPGA з урахуванням типів задач. **Завдання:** провести аналіз сучасного стану речей щодо використання технології ПЛІС в проєктах IoT; проаналізувати виклики та обмеження щодо застосування технології ПЛІС на різних рівнях побудови IoT-інфраструктури; запропонувати способи інтеграції технології ПЛІС до складу інфраструктури Інтернету речей для виконання високошвидкісних обчислень; провести аналіз переваг та недоліків щодо запропонованих підходів інтеграції; надати рекомендації та визначити подальший напрям дослідження використання технології ПЛІС у складі IoT інфраструктури з урахуванням задач класу AI/ML; навести приклад практичного використання технології ПЛІС для побудови продуктивної системи IoT. Відповідно до поставлених завдань, були отримані наступні **результати**. Виконано аналіз сучасного стану використання технології ПЛІС в проєктах IoT, який виявив значний потенціал цих технологій для реалізації високошвидкісних обчислень у системах Інтернету речей. Запропоновано класифікацію шляхів застосування ПЛІС в задачах обробки даних в реальному часі та реалізації нейронних мереж. Визначено перелік обмежень можливості застосування технології ПЛІС на різних рівнях побудови IoT-інфраструктури, який включає високі витрати на обладнання, потребу в специфічних навичках для проєктування, обмеження в споживанні енергії та складності їх інтеграції з існуючими системами. Наведено практичний приклад реалізації системи IoT з реалізацією обчислень високої інтенсивності. **Висновки:** Головний внесок і наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що проведений аналіз дозволяє прийняти рішення щодо можливості застосування програмованої логіки при побудові проєктів IoT та систем домашньої автоматизації. На основі запропонованої класифікації типів задач існує можливість прийняття рішення про застосування технології FPGA в якості окремої елементної бази або з використанням повноцінного екземпляра FPGA як сервіс у складі хмарного середовища.

Ключові слова: Інтернет речей; IoT; хмарні сервіси; апаратні прискорювачі; штучний інтелект; ШІ; ПЛІС; FPGA; FPGA як сервіс; середовище розроблення; крайові обчислення; крайові пристрої.

Вступ

Сьогодні Інтернет речей є однією з найактуальніших тем у світі сучасних технологій. Концепція IoT не нова, але в останні роки вона здобула значну увагу завдяки популярності мережі Інтернет та появі розумних пристроїв, таких як побутова техніка з елементами прийняття рішень, мобільні пристрої, автономні транспортні засоби, автономні системи пілотування та аерокосмічна техніка [1].

Інтернет речей – це мережа взаємопов'язаних пристроїв, які можуть "спілкуватися" (взаємодіяти) між собою та обмінюватися даними [2]. Ці пристрої можуть бути різного типу – від простого датчика з базовим інтерфейсом (аналоговим та/або цифровим)

до складних обчислювальних машин, в залежності від застосування та рівня архітектури IoT [3]. Тип і обсяг даних, які генеруються цими пристроями, значно змінилися протягом останніх десятиліть. Зростання обсягу та складності даних вимагає більшої обчислювальної потужності для побудови процесу ефективного оброблення [4]. Саме тут на допомогу приходять штучний інтелект (ШІ, AI) та машинне навчання (Machine Learning, ML). AI та ML – це технології, які можуть допомогти як у обробці та аналізі даних, що генеруються IoT-пристроями, так і стати частиною самої інфраструктури IoT у вигляді спеціалізованого сервісу [5].

Обробка та аналіз даних безпосередньо на крайових пристроях все ще стримується значними тех-



нічними перешкодами, які необхідно подолати. До таких викликів відносяться: обмежені обчислювальні ресурси [6], обмеження щодо споживання енергії, вимоги до обробки подій у реальному часі тощо.

Технології ПЛІС пропонують перспективні рішення для подолання цих викликів. Їх здатність бути реконфігурованими для специфічних завдань, в поєднанні з високою обчислювальною здатністю, надає можливість прискорити процеси оброблення на крайових пристроях [7]. Прискорення процесу обробки зображень [8], а також виконання інших завдань пов'язаних з реалізацією елементів ШІ [9] є надзвичайно затребуваним у складі систем IoT.

Інтеграція технології програмованої логіки в інфраструктуру IoT може забезпечити прийняття рішень у реальному часі, зменшити затримки на прийняття рішень та підвищити рівень конфіденційності, мінімізуючи передачу даних до централізованих хмарних платформ або забезпечуючи можливість надання спеціалізованого обчислювального ресурсу безпосередньо у системі [10].

Процес інтеграції не є тривіальним завданням та вимагає глибокого розуміння того, як організована IoT інфраструктура, які є особливості її функціонування на різних рівнях архітектури, а також які виклики та обмеження існують у технології програмованої логіки, та розуміння шляхів їх вирішення.

Таким чином, пошук шляхів інтеграції технології програмованих інтегральних схем до складу інфраструктури Інтернету речей та труднощі, що можуть виникнути при цьому, є важливою задачею.

Метою даної роботи є аналіз можливостей та особливостей застосування технології ПЛІС в складі сучасної архітектури Інтернету речей та вдосконалення процесу вибору відповідних технічних рішень на основі FPGA з урахуванням типів задач.

Для досягнення поставленої мети, в рамках даної публікації вирішуються наступні **задачі**:

1) проводиться аналіз сучасного стану речей щодо використання технології ПЛІС в проектах IoT;

2) аналізуються виклики та обмеження щодо застосування технології ПЛІС на різних рівнях побудови IoT-інфраструктури;

3) пропонуються способи інтеграції технології ПЛІС до складу інфраструктури Інтернету речей для виконання високошвидкісних обчислень;

4) проводиться аналіз переваг та недоліків щодо запропонованих підходів інтеграції;

5) надаються рекомендації та визначається подальший напрям дослідження використання технології ПЛІС у складі IoT інфраструктури з урахуванням задач класу AI/ML;

6) пропонується приклад практичного використання технології ПЛІС для побудови високопродуктивної системи IoT.

2. Огляд застосування програмованої логіки в IoT домені

Використання програмованої логіки в складі інфраструктури Інтернету речей не є новою концепцією. Існує безліч досліджень і робіт, які вивчали інтеграцію технології FPGA в IoT, а також виклики та можливості, які з цим пов'язані [11].

Аналіз передових публікацій у сфері інтеграції програмованої логіки класу FPGA із системами на основі мікроконтролерів демонструє зосереджується на оптимізації реалізацій на ключові фактори продуктивності, такі як час відгуку, робочу частоту та ефективність ресурсів. Наприклад, описана реалізація простого криптографічного алгоритму для забезпечення безпеки IoT-проекту з використанням FPGA та можливістю часткової ре конфігурації [12]. З використанням плати Basys 3 Artix-7 FPGA та інтегрованого середовища Vivado, проєкт демонструє переваги використання програмованої логіки класу FPGA в IoT домені, зокрема здатність динамічно переключати алгоритми залежно від умов трафіку та безпекової складової. Поєднання безпеки та елементів AI/ML дозволяє отримати певні переваги крайових обчисленнях для інфраструктури IoT.

Такі дослідження підкреслюють потенціал і переваги застосування технології FPGA для забезпечення масштабованої та ефективної криптографічної структури для IoT-застосунків, пропонуючи новий напрямок досліджень на перетині безпеки IoT та апаратної оптимізації. Таким чином, крайові обчислення для Інтернету речей є актуальною темою.

Можливість оптимізації продуктивності пристроїв Інтернету речей шляхом використання FPGA замість традиційних графічних процесорів також є напрямком застосування цієї технології [13]. Це підкреслює важливість вибору відповідної платформи, будь то процесори загального призначення, графічні прискорювачі чи програмована логіка класу FPGA, в залежності від вимог і потреб застосування, з акцентом на підвищену продуктивність, що пропонується платформою FPGA у певних реалізаціях IoT. Процеси проєктування та виклики, пов'язані з цими платформами, підкреслюють роль апаратних прискорювачів у досягненні високої продуктивності та ефективності в IoT-застосунках.

Ще одна область застосування – це інноваційний підхід до сучасного сільського господарства шляхом інтеграції технологій Інтернету речей та відновлювальної енергії для гідропонного землеробства [14]. Такі системи використовуються для моніторингу та контролю критичних параметрів, таких як вологість, рівень води, рН-фактор, температура та рівень живильних речовин у гідропонній установці.

Платформа Raspberry Pi може виступати в ролі комунікаційного моста між FPGA та обчислювальною хмарою, що дозволяє здійснювати візуалізацію даних у реальному часі та контролювати показники. Наведені значення [14] підтверджують ефективність такої системи.

Інші популярні області, де програмована логіка класу FPGA широко використовуються в рамках IoT, включають комп'ютерний зір, розпізнавання мови та обробку сигналів. Це демонструє реалізація IoT-системи слухового апарату з використанням технологій програмованої логіки [15]. Вона визначає основні блоки обробки, які мають бути реалізовані на вбудованому програмованому логічному пристрої, зосереджуючись на інтеграції кількох вхідних джерел у спеціалізований блок. Зокрема, інтеграційний блок комбінє дані аудіо та відео з різними частотами дискретизації, кожен з яких кодується з різною кількістю біт. Така система досягає передачі даних у реальному часі, призначаючи спрощену кількість біт для кожного компонента в суміщеному сигналі.

На основі проведеного огляду можна стверджувати, що вже існують вдалі рішення інтеграції технологій ПЛІС в IoT домені, з акцентом на потенціал покращення продуктивності, безпеки та ефективності. Різні дослідження та варіанти використання демонструють можливості програмованої логіки в оптимізації криптографічних алгоритмів, поліпшенні механізмів обміну ключами та наданні більш високої продуктивності в порівнянні з традиційними обчислювачами загального використання [16].

Ці результати підкреслюють значну роль у застосуванні елементної бази ПЛІС для вдосконалення IoT-рішень в різних прикладних доменах.

3. Аналіз можливостей інтеграції технологій ПЛІС на різних рівнях архітектури IoT

Існує багато досліджень, які вивчали та пропонували різні типи багаторівневої архітектури Інтернету речей з кількома компонентами, в залежності від потреб застосування та вимог бізнесу [3, 17]. Головна ідея полягає в забезпеченні розділення обов'язків і відповідальності для кожного рівня. Це дозволяє досягти кращої масштабованості, гнучкості системи та спростити процес її підтримки.

Визначемо наступні основні рівні:

- рівень датчиків та виконавчих пристроїв;
- рівень мережі;
- рівень даних;
- прикладний рівень.

Розглянемо особливості інтеграції технологій програмованої логіки для кожного з рівнів.

Рівень датчиків та виконавчих пристроїв відповідає за збирання даних з навколишнього середовища (фізичних об'єктів) за допомогою різних датчиків та надсилання заданих команд виконавчим пристроям для здійснення конкретних дій. Оскільки цей рівень безпосередньо взаємодіє з фізичним середовищем, він є критично важливим для загальної продуктивності, точності і стійкості екосистеми IoT. На цьому рівні ПЛІС може бути залучено до процесу впровадження спеціальних алгоритмів/логіки у випадку, якщо потрібно контролювати виконавчий механізм в специфічний спосіб, який не підтримується стандартними контролерами та периферійними інтерфейсами (наприклад, I2C, SPI, UART тощо). Інший варіант – це перетворення даних разом із різними видами попередньої обробки, такими як обробка даних з датчиків (фільтрація шумів, спотворень та перешкод), стиснення даних (зменшення обсягу даних, які потрібно передати через мережу) та обробка зображень і відео (виявлення об'єктів у реальному часі). На завершення, реалізація різних протоколів передачі даних/зв'язку (BLE, Ethernet, LTE, NFC, PLC, RFID, 3G/4G/5G, Zigbee тощо) на фізичному рівні з'єднання, включаючи кастомні.

Рівень мережі займається встановленням комунікації між кількома пристроями в інфраструктурі IoT, об'єднуючи їх у єдину екосистему. Цей рівень є критично важливим для забезпечення швидкої передачі даних з відповідним рівнем безпеки та надійності. Технологія ПЛІС може використовуватися як для прискорення завдань, пов'язаних із мережею, таких як шифрування, дешифрування, маршрутизація, так і для реалізації нестандартних та стандартних комунікаційних протоколів на рівнях зв'язку (LPWAN, IEEE 802.15.4), мережі (6LoWPAN, IP) та транспорту (TCP, UDP) моделі OSI.

Рівень даних – це рівень, де необроблені (або початкові) дані, зібрані з датчиків, перетворюються на змістовну інформацію. В залежності від задач і бізнес-потреб обчислення на цьому рівні виконуються або програмним, або апаратним шляхом. Технології ПЛІС можуть значно сприяти цьому процесу, прискорюючи обчислення, які виконуються на апаратному рівні. Наприклад, FPGA можуть використовуватися для реалізації спеціальних апаратних прискорювачів для AI/ML домену, попередньої обробки даних, фільтрації даних, їх агрегації тощо.

Прикладний рівень знаходиться на вершині архітектури Інтернету речей. Це якраз той рівень, на якому оброблені дані використовуються для прийняття рішень, надання аналітики та ініціювання дій. Він забезпечує доступ і управління системами IoT через мобільні та веб-додатки. На відміну від інших рівнів, де можна напряму застосувати ПЛІС, на цьому рівні розглядається взаємодія з користувачем.

Отже, інтеграція програмованої логіки в інфраструктуру Інтернету речей відкриває нові можливості для покращення продуктивності, безпеки та гнучкості систем. Використання програмованих логічних схем на різних рівнях архітектури, від збору даних до обробки та управління, забезпечує швидке реагування на вимоги бізнесу та дозволяє реалізувати унікальні рішення, які не можуть бути досягнуті стандартними технологіями. Це підкреслює важливість подальших досліджень у цій галузі для оптимізації IoT-додатків.

4. Запропонована класифікація варіантів застосування технології FPGA для IoT

FPGA як сервіс (FPGA-as-a-Service, FaaS) – це нова парадигма, яка забезпечує гнучкий та масштабований доступ до ресурсів програмованої схеми класу FPGA через хмарні платформи, що дозволяє прискорене обчислення для завдань, що потребують багато обчислювальних ресурсів [18, 19]. Завдяки наявності додаткового рівня абстракції в управлінні апаратним забезпеченням та наданню можливостей високопродуктивної обробки з низькою затримкою, FPGA як сервіс дозволяє розробникам інтегрувати в свої проекти можливість апаратного прискорення без потреби в глибоких знаннях про FPGA [20].

Проведений аналіз можливостей технології ПЛІС, включаючи створення сервісів в контексті парадигми FPGA як сервіс, а також потреб систем IoT, дозволяє визначити чотири варіанти застосування FPGA для побудови таких систем (табл. 1). Цей аналіз включає врахування особливих переваг використання FPGA як сервіс в контексті IoT-застосунків, де обчислювальні вимоги та обмеження є критично важливими.

Таблиця 1
Запропонована класифікація варіантів застосування FPGA для задач IoT

Варіант застосування FPGA для IoT	Окремий FPGA	FPGA як сервіс
Розширення функцій мікроконтролера з прямою апаратною реалізацією	так	ні
Реалізація спеціалізованих задач із високою інтенсивністю обчислень	так	так
Реалізація нейронних мереж для апаратної реалізації обчислень у рамках AI/ML	так	так
Використання елементів AI на етапі проєктування самої архітектури системи та/або її вихідного коду	ні	так

Використання програмованих інтегральних схем класу FPGA з прямим підключенням до виводів мікроконтролера для розширення його функцій дозволяє збільшити набір вихідних портів та підвищити функціональні можливості за рахунок підключення додаткової периферії. Таке поєднання дозволяє застосовувати програмні можливості мікроконтролера, зокрема з підтримкою інтерфейсів мережевої взаємодії та протоколів, спільно з організацією паралельних обчислень.

У цьому випадку взаємодія з мережею виконується мікроконтролером, на відміну від FPGA як сервіс, де завдання мережевої взаємодії реалізуються або прискорювальною платою з швидкісними мережевими інтерфейсами, або хост-комп'ютером, до якого такі плати підключені. Застосування мікроконтролера дозволяє побудувати енергоефективне IoT-рішення з істотним розширенням можливостей розширених портів введення/виведення, наприклад, для прямої адресації системи з динамічною індикацією великої розрядності.

Реалізація завдань з інтенсивними обчисленнями є важливою можливістю при використанні FPGA. Мікроконтролери в системах IoT не здатні виконувати інтенсивну обробку даних, що може перешкоджати одночасному ефективному виконанню завдань та обміну даними через мережу. Перенесення складних обчислень на окремий чіп FPGA або використання FPGA як сервіс дозволяє спростити програмну реалізацію мікроконтролера в рамках IoT. Якщо обробка даних допускає паралелізацію та не має залежності між наборами даних, відправлення такого завдання в FPGA та отримання результатів оброблення може бути представлене у вигляді виклику компактної функції в мікроконтролері.

Апаратура для реалізації нейронних мереж на FPGA або в підключеному FPGA як сервіс дозволяє IoT-системі виконувати складні завдання попередньої обробки даних, включаючи аналіз зображень та підготовку вихідних даних. Виконання такої обробки не завжди можливе за рахунок ресурсів мікроконтролера в складі IoT-системи. Завдяки оптимізації нейронної мережі відповідно до запропонованих етапів для FPGA можна значно підвищити продуктивність та зменшити навантаження на канал взаємодії з мережею завдяки попередній обробці, тому сумісне використання цих технологій є доцільним для вбудованих систем, систем домашньої автоматизації та систем безпеки. FPGA як сервіс може бути інтегрований у систему з використанням, зокрема, локального підключення як одного з пристроїв для виконання базових обчислень.

Використання елементів штучного інтелекту може також бути застосоване при розробці систем IoT для автоматизації частини дій у життєвому циклі.

лі цих систем, таких як написання вихідного коду для мікроконтролера, тестування системи, аналіз безпеки та обробка даних у рамках диференційного аналізу. Проектування та трасування плати IoT-системи також можуть бути виконані з використанням таких інструментів.

Сервіси з елементами III в рамках FPGA як сервіс у цьому випадку не є частиною системи, а розглядаються виключно як інструменти для групи розробників цієї системи IoT.

Аналіз можливостей програмованої логіки, зокрема в контексті парадигми FPGA як сервіс для систем IoT, підкреслює ключові відмінності між автономними пристроями FPGA та рішеннями на основі FPGA як сервіс. Автономні пристрої FPGA розширюють функціональність мікроконтролера, збільшуючи кількість портів введення/виведення та забезпечуючи ефективне використання енергії, тоді як FPGA як сервіс зменшує навантаження на інтенсивні обчислювальні завдання, що дозволяє досягти більшої масштабованості та ефективності обробки. Нейронні мережі, критично важливі для задач, таких як аналіз зображень, мають свої переваги від апаратної реалізації, що підвищує продуктивність систем IoT в цілому.

Крім того, підтримка штучного інтелекту в рамках FPGA як сервіс полегшує розробку систем IoT, автоматизуючи процеси проектування, тестування та забезпечення безпеки, що спрощує інженерні зусилля.

5. Технологія ПЛІС в IoT: проблеми та виклики

Споживання енергії. Це може бути суттєвою проблемою для IoT-пристроїв, які працюють від автономного живлення або відновлювальних джерел енергії (особливо для рівня пристроїв/датчиків). На сьогодні існують окремі дослідження щодо вирішення цих обмежень та запропоновані спеціальні техніки для оптимізації споживання енергії мікросхемами FPGA [21, 22].

Трудовитрати проектування та розроблення. Додавання додаткових технологій до стеку IoT вимагає специфічних знань і навичок. Крива навчання для мов опису апаратури (HDL), таких як VHDL або Verilog, є досить кругою, а процес розроблення ефективних проектів на ПЛІС може займати багато часу, що не завжди відповідає вимогам ринку. Етап налагодження та тестування проектів FPGA може бути більш складним і тривалим у порівнянні з програмними рішеннями, що може призвести до подовжених циклів розроблення та збільшення витрат. Крім того, гетерогенні архітектури зазвичай важче підтримувати у порівнянні з однорідними.

Витрати. Технології програмованої логіки є відносно дорогими в порівнянні з іншими апаратними пристроями, такими як мікроконтролери та ASIC. Це може створити суттєвий бар'єр для розробників IoT з обмеженим бюджетом. Вартість продуктів на базі ПЛІС визначається складним взаємозв'язком факторів, включаючи вартість самих пристроїв, витрати на проектування та розроблення, виробничі витрати та витрати на інженерне проектування.

Інтеграція з існуючою інфраструктурою IoT. Інтеграція програмованої логіки в уже існуючі IoT-системи може бути складною через проблеми сумісності з іншими апаратними та програмними компонентами. Забезпечення комунікації та обміну даними між мікросхемою ПЛІС та іншими пристроями є критично важливим.

Фактори навколишнього середовища. Програмована логіка, яка використовується як IoT-пристрої, може працювати в умовах впливу з боку зовнішнього середовища. Це потребує додаткових зусиль для захисту їх від зовнішніх чинників.

Вимоги галузевих стандартів та законодавча база. Відповідність регуляторним вимогам для пристроїв IoT, таким як стандарти безпеки та електромагнітної сумісності, може бути більш складним при інтеграції мікросхем з програмованою структурою в одному пристрої.

Прив'язка до постачальника. Ринок мікросхем програмованої логіки займає незначну частину світу мікроелектроніки вбудованих систем. У ньому представлені кілька відомих виробників, таких як AMD (включаючи Xilinx), Intel (включаючи Altera), Microsemi, Lattice Semiconductor та кілька невеликих компаній.

Кількість інструментів і платформ обмежена, і це, іноді, може призводити до залежності від конкретного постачальника. Тому правильний вибір на етапі планування може забезпечити менш схильний до помилок процес інтеграції IoT.

6. Практичний приклад застосування системи IoT з використанням FPGA

В якості наочного прикладу спільного використання технології FPGA та мікроконтролерів, для побудови систем з доступом через мережу Інтернет, можна навести досвід створення спеціалізованого обчислювача. Сутність проекту полягає в пошуку поліномів зворотних зв'язків для реєстрів зсуву з нелінійним зворотним зв'язком із різною довжиною та порядком нелінійності, який становить 2 і більше. Відсутність повноцінно описаного математичного апарату для перевірки бінарних послідовностей генераторів на основі таких поліномів, обумовлює необхідність застосування повного перебору станів

для пошуку поліномів, що дозволяють формувати максимальні за довжиною псевдовипадкові послідовності [23]. Реалізація такої перевірки з використанням технології ПЛІС дає можливість створити компактну спеціалізовану логіку для відповідного завдання. Продуктивність реалізації у десятки разів перевищує можливості процесорів персональних комп'ютерів, але процес введення задач, отримання результатів та їх надсилання користувачу може бути невиправданим для реалізації в FPGA. У таких випадках оптимальним рішенням є використання мікроконтролера.

Процес взаємодії з пристроєм можна реалізувати у зручному для користувача форматі з використанням клієнтських програм на смартфонах або персональних комп'ютерах. Канал зв'язку з пристроєм, в тому числі через Wi-Fi, може бути організований як локально, так і з підключенням через Інтернет. У такому випадку можливе використання не лише локальних сервісів, а й сервісів взаємодії з пристроями, доступними в Інтернеті, а також поштових сервісів і месенджерів.

Створена система для пошуку нелінійних поліномів реалізована на основі чотирьох окремих FPGA

плат на базі Cyclone IV EP4CE10 [24]. Для реалізації процесу введення значень діапазонів поліномів для перевірки довжини формованої послідовності та отримання назад знайдених підходящих поліномів використовується програмна реалізація протоколу UART.

Процес взаємодії з користувачем реалізовано за допомогою компактною реалізації бота популярного месенджера на платі NodeMCU v3 на основі Wi-Fi мікроконтролера ESP8266. Для цієї плати існує багато бібліотек з відкритим вихідним кодом, що підтримують більшість популярних Інтернет-сервісів. Також може бути використаний обліковий запис поштових сервісів для запису даних безпосередньо в результуючі таблиці.

В поточній реалізації плата координатора виконує взаємодію з FPGA використовуючи підключення за інтерфейсом UART і не здійснює управління живленням макетних плат EP4CE10 (рис 1).

Додавання реле або транзистора для підключення живлення плат з FPGA дозволить дистанційно керувати живленням таких схем для підвищення енергоефективності за рахунок їх відключення у періоди відсутності задач.

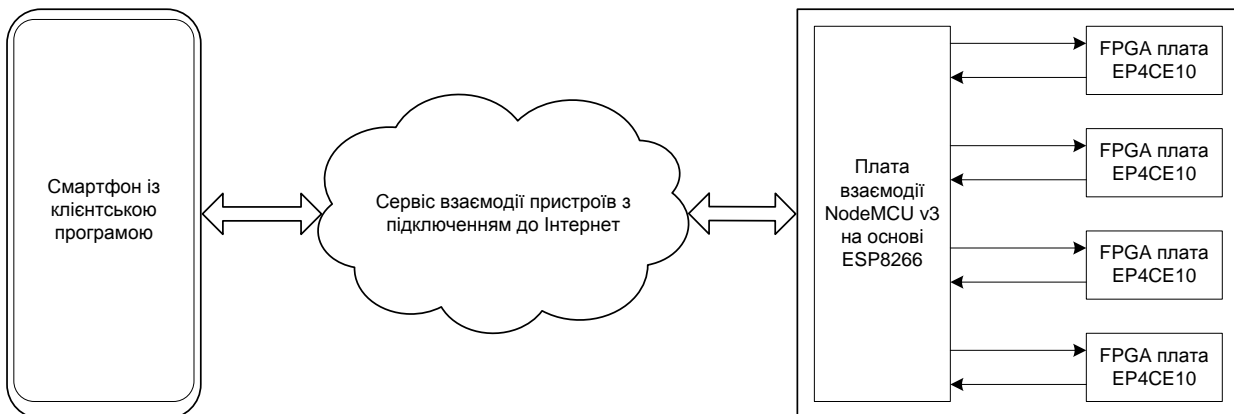


Рис. 2. Графічне представлення побудови взаємодії спеціалізованих обчислювачів на базі FPGA та клієнтським застосунком в контексті парадигми IoT

Дискусія

Інтеграція елементної бази програмованої логіки в інфраструктуру Інтернету речей пропонує значні переваги для вирішення задач, які потребують значних обчислювальних ресурсів. Сучасні рішення на основі технології FPGA демонструють виняткову продуктивність завдяки можливості реконфігурації, що дозволяє виконувати індивідуальну оптимізацію обчислювальних ресурсів з урахуванням специфіки навантажень у сфері штучного інтелекту та машинного навчання.

Незважаючи на свої переваги, існує низка викликів, які треба враховувати в процесі інтеграції

програмованої логіки. Основними проблемами є споживання енергії, що може бути критичним для автономних пристроїв IoT, а також висока вартість елементної бази ПЛІС у порівнянні з іншими рішеннями, такими як мікроконтролери та ASIC.

Крім того, проектування та розроблення проєктів на базі ПЛІС вимагають спеціалізованих знань і можуть бути трудомісткими, що потенційно може впливати на час створення продукту та зростання витрат. Інтеграція з існуючою інфраструктурою IoT також може бути складною через проблеми з сумісністю, а наявність впливу зовнішнього середовища може вимагати додаткових заходів захисту для таких пристроїв.

Висновки

У цій роботі було виконано аналітичний огляд можливість інтеграції програмованої логіки в інфраструктуру Інтернету речей для завдань, що потребують великої кількості обчислювальних ресурсів – реалізація штучного інтелекту та впровадження елементів машинного навчання.

Досліджено існуючі підходи та методи інтеграції програмованої логіки, включаючи виклики, пов'язані з обмеженнями щодо енергоспоживання та вимогами до обробки даних в режимі реального часу. Проведено огляд сучасного стану застосування технології FPGA в IoT, з акцентом на переваги підтримки процесу реконфігурації FPGA та високої продуктивності для задач, що потребують інтенсивних математичних обчислень.

Також було вивчено обмеження та розглянути перешкоди на шляху інтеграції програмованої логіки на різних рівнях інфраструктури IoT. Запропоновані рекомендації спрямовані на оптимізацію розгортання FPGA для інтенсивних обчислювальних задач, що дозволяє здійснювати прийняття рішень у реальному часі, знижувати затримки та покращувати конфіденційність даних, мінімізуючи потребу у централізованій передачі даних в хмару.

Крім того, оцінено переваги та недоліки застосування технології ПЛІС, а також надано рекомендації для подальших досліджень у сфері інтеграції FPGA для застосувань AI/ML у складі IoT.

Також в роботі розглянуто застосування парадигми FPGA як сервіс для практичних завдань IoT. В даному напрямку одним із нових результатів є запропонована класифікація варіантів використання FPGA як сервіс для створення систем з доступом до Інтернету, включаючи побутову автоматизацію, що є складовою частиною концепції розумного будинку. Ця класифікація дозволяє оцінити доцільність використання такого сервісу для конкретного процесу розроблення системи з доступом до Інтернету. На основі запропонованої класифікації можливе прийняття рішення про застосування цієї технології для конкретного завдання.

Визначено перелік обмежень можливості застосування технології ПЛІС на різних рівнях побудови IoT-інфраструктури. Такий перелік включає високі витрати на обладнання, потребу в специфічних знаннях для проектування, обмеження в частині споживання енергії та складності інтеграції з існуючими системами.

Головний внесок і наукова новизна поточної роботи полягає в тому, що отримані результати дозволяють прийняти рішення щодо можливості застосування програмованої логіки при побудові проєктів IoT та систем домашньої автоматизації.

Напрямок подальших досліджень може акцентуватися на інтеграції ПЛІС з AI/ML для підвищення ефективності роботи систем IoT, що відкриває нові можливості для автоматизації процесів і покращення їх функціональності.

Внесок авторів: формулювання мети і завдань дослідження – **В. О. Куланов, А. Є. Перепелицин**; пошук та аналіз джерел інформації – **В. О. Куланов, А. Є. Перепелицин**; аналіз рішень в складі хмарних сервісів і застосування ПЛІС в IoT – **В. О. Куланов**; побудова то опис прототипу – **А. Є. Перепелицин**; класифікація напрямів застосування ПЛІС та FPGA як сервіс для завдань IoT – **А. Є. Перепелицин**; аналіз результатів дослідження – **В. О. Куланов, А. Є. Перепелицин**; формулювання висновків та результатів – **В. О. Куланов, 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 проведено без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

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

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *IoT for 5G/B5G Applications in Smart Homes, Smart Cities, Wearables and Connected Cars [Text] / H. Uddin, & et al. // Proceedings of 2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD 2019. – 2019. – 5 p. DOI: 10.1109/CAMAD.2019.8858455.*
2. *Perepelitsyn, A. Service for communication of devices with internet access: analysis of technologies and method of creation [Text] / A. Perepelitsyn, O. Vdovichenko, & V. Mikhalevskiy // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. – No. 4. – P. 197–208. DOI: 10.32620/reks.2023.4.14.*
3. *The key layers of IoT architecture [Text] / A. -E. Bouaouad, A. Cherradi, S. Assoul, & N. Souissi // Proceedings of 2020 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications, CloudTech 2020. – 2020. – 4 p. DOI: 10.1109/CloudTech49835.2020.9365919.*

4. Куланов, В. О. Метод створення і впровадження FPGA проєктів стійких до змін вимог і середовищ розроблення для хмарних інфраструктур [Текст] / В. О. Куланов, & А. Є. Перепелицин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 5. – С. 87–97. DOI: 10.32620/akt.2023.5.07.
5. Analysis of Ways of Digital Rights Management for FPGA-as-a-Service for AI-Based Solutions [Text] / A. Perepelitsyn, & V. Kulanov // *Proceedings of 2023 IEEE 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2023*. – 2023. – 5 p. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416526.
6. 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/akt.2024.3.09.
7. Kolesnyk, I. Providing of FPGA Resources as a Service: Technologies, Deployment and Case-Study [Text] / I. Kolesnyk, A. Perepelitsyn, & V. Kulanov // *Proc. PhD Symposium at ICTERI 2017, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017*. – CEUR-WS, 2017. – Vol. 1851. – P. 63-68.
8. Li, J. -Y. An Edge AI Accelerator Design Based on HDC Model for Real-time EEG-based Emotion Recognition System with RISC-V FPGA Platform [Text] / J. -Y. Li, & W. -C. Fang // *Proceedings of 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IS-CAS 2024*. – 2024. – 5 p. DOI: 10.1109/IS-CAS58744.2024.10558319.
9. Chen, W.-T. Area-Adaptive Air Quality Monitoring Based on FPGA with Edge AI and Hyperspectral Imaging [Text] / W.-T. Chen, & C.-H. Huang // *Proceedings of 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2023*. – 2023. – 8 p. DOI: 10.1109/IECON51785.2023.10312273.
10. A two-stage-pipeline CPU of SH-2 architecture implemented on FPGA and SoC for IoT, edge AI and robotic applications [Text] / K. Hagiwara, & et al. // *Proceedings of 2018 IEEE Symposium in Low-Power and High-Speed Chips, COOL CHIPS 2018*. – 2018. – 3 p. DOI: 10.1109/CoolChips.2018.8373084.
11. MAFIA: Machine Learning Acceleration on FPGAs for IoT Applications [Text] / N. P. Ghanathe, V. Seshadri, R. Sharma, S. Wilton, & A. Kumar // *Proceedings of 2021 IEEE 31st International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, FPL 2021*. – 2021. – P. 347-354. DOI: 10.1109/FPL53798.2021.00067.
12. Birleanu, F. G. Lightweight cryptography for Internet of Things using FPGA-based Design with Partial Reconfiguration [Text] / F. G. Birleanu, & N. Bizon // *Proceedings of 2020 IEEE 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2020*. – 2020. – 7 p. DOI: 10.1109/ECAI50035.2020.9223213.
13. Nair, R. Optimizing the Performance of IoT Using FPGA as Compared to GPU [Text] / R. Nair, P. Sharma, & T. Sharma // *International Journal of Grid and High Performance Computing*. – 2022. – No. 14. – 15 p. DOI: 10.4018/IJGHPC.301580.
14. Solar PV fed brushless drive with optical encoder for agriculture applications using IoT and FPGA [Text] / A. S. Alqahtani, A. Mubarakali, P. Parthasarathy, & et al. // *Opt Quant Electron*. – 2022. – Vol. 54. – Article no. 715. DOI: 10.1007/s11082-022-04065-0.
15. Towards an FPGA Implementation of IoT-Based Multi-Modal Hearing AID System [Text] / G. Enemali, A. Bishnu, T. Ratnarajah, & T. Arslan // *Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops ICASSPW 2023*. – 2023. – 4 p. DOI: 10.1109/ICASSPW59220.2023.10192936.
16. FPGA Implementation of Arbiter PUFs for ideal Cryptographic Key Generation [Text] / K. Anitha, K. Kumar Gopathoti, J. Rajeswari, S. Majji, T. Radhika Patnala, & D. Sri Sai Satyanarayana // *Proceedings of 2021 IEEE 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2021*. – 2021. – P. 754-757. DOI: 10.1109/ICECA52323.2021.9676119.
17. Kutseva, M. Adaptation of Seven-Layered IoT Architecture for Energy Efficiency Management in Smart House [Text] / M. Kutseva // *Proceedings of 2022 IEEE 10th International Scientific Conference on Computer Science, COMSCI 2022*. – 2022. – 5 p. DOI: 10.1109/COMSCI55378.2022.9912604.
18. Kulanov, V. Method of development and deployment of reconfigurable FPGA-based projects in cloud infrastructure [Text] / V. Kulanov, A. Perepelitsyn, & I. Zarizenko // *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*. – 2018. – P. 103-106. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409108.
19. FPGAAaaS: A Survey of Infrastructures and Systems [Text] / L. M. Al Qassem, T. Stouraitis, E. Damiani, & I. M. Elfadel // *IEEE Transactions on Services Computing*. – 2022. – Vol. 15, no. 2. – P. 1143-1156. DOI: 10.1109/TSC.2020.2976012.
20. Alveo UL3524 Ultra Low Latency Trading Data Sheet, AMD, DS1009 (v1.1) [Electronic resource]. – Available at: <https://docs.xilinx.com/r/en-US/ds1009-ul3524>. – 08.08.2024.
21. Ibro, M. FPGA Power Consumption Optimization Methods Analysis [Text] / M. Ibro, & G. Marinova // *Proceedings of 2023 International Conference on Electromechanical and Energy Systems SIELMEN 2023*, – 2023. – 4 p. DOI: 10.1109/SIELMEN59038.2023.10290793.
22. Pandey, N. Reduction in power consumption of packet counter on VIRTEX-6 FPGA by frequency scaling [Text] / N. Pandey, B. Pandey, & D. M. A. Hussain // *Proceedings of 2017 Saudi Arabia Smart Grid, SASG 2017*. – 2017. – 4 p. DOI: 10.1109/SASG.2017.8356479.
23. Poluyanenko, N. Development of the search method for Non-Linear Shift Registers using hardware, implemented on Field Programmable Gate Arrays [Text] / N. Poluyanenko // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2017. – P. 53-60. DOI: 10.21303/2461-4262.2017.00271.

24. Cyclone IV EP4CE10 FPGA, Intel [Electronic resource]. – Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/210464/cyclone-iv-ep4ce10-fpga/specifications.html>. – 08.08.2024.

References

1. Uddin, H., & et al. IoT for 5G/B5G Applications in Smart Homes, Smart Cities, Wearables and Connected Cars. *Proceedings of 2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, CAMAD 2019*, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/CAMAD.2019.8858455.
2. 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.
3. Bouaouad, A.-E., Cherradi, A., Assoul, S., & Souissi, N. The key layers of IoT architecture. *Proceedings of 2020 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing and Artificial Intelligence: Technologies and Applications, CloudTech 2020*, 2020, pp. 1-4. DOI: 10.1109/CloudTech49835.2020.9365919.
4. Kulanov, V., & Perepelitsyn, A. Metod stvorenniya i vprovadzheniya FPGA proyektiv stiykykh do zmin vymoh i seredovyshch rozroblennya dlya khmarnykh infrastruktur [Method of creation and deployment of FPGA projects resistant to change of requirements and development environments for cloud infrastructures]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2023, no. 5, pp. 87–97. DOI: 10.32620/akt.2023.5.07. (In Ukrainian).
5. Perepelitsyn, A., & Kulanov, V. Analysis of Ways of Digital Rights Management for FPGA-as-a-Service for AI-Based Solutions. *Proceedings 2023 IEEE 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2023*, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416526.
6. 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/akt.2024.3.09. (In Ukrainian).
7. Kolesnyk, I., Perepelitsyn, A., & Kulanov, V. Providing of FPGA Resources as a Service: Technologies, Deployment and Case-Study. *Proc. PhD Symposium at ICTERI 2017*, Kyiv, Ukraine, May 15-18, 2017, CEUR-WS, vol. 1851, pp. 63-68.
8. Li, J.-Y., & Fang, W.-C. An Edge AI Accelerator Design Based on HDC Model for Real-time EEG-based Emotion Recognition System with RISC-V FPGA Platform. *Proceedings of 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2024*, 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISCAS58744.2024.10558319.
9. Chen, W.-T., & Huang, C.-H. Area-Adaptive Air Quality Monitoring Based on FPGA with Edge AI and Hyperspectral Imaging. *Proceedings of 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2023*, 2023, pp. 1-8. DOI: 10.1109/IECON51785.2023.10312273.
10. Hagiwara, K., & et al. A two-stage-pipeline CPU of SH-2 architecture implemented on FPGA and SoC for IoT, edge AI and robotic applications. *Proceedings of 2018 IEEE Symposium in Low-Power and High-Speed Chips, COOL CHIPS 2018*, 2018, pp. 1-3. DOI: 10.1109/CoolChips.2018.8373084.
11. Ghanathe, N. P., Seshadri, V., Sharma, R., Wilton S., & Kumar, A. MAFIA: Machine Learning Acceleration on FPGAs for IoT Applications. *Proceedings of 2021 IEEE 31st International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, FPL 2021*, 2021, pp. 347-354. DOI: 10.1109/FPL53798.2021.00067.
12. Birleanu, F. G., & Bizon, N. Lightweight cryptography for Internet of Things using FPGA-based Design with Partial Reconfiguration. *Proceedings of 2020 IEEE 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2020*, 2020, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ECAI50035.2020.9223213.
13. Nair, R., Sharma, P., & Sharma, T. Optimizing the Performance of IoT Using FPGA as Compared to GPU. *International Journal of Grid and High Performance Computing*, 2022, no. 14, pp. 1-15. DOI: 10.4018/IJGHC.301580.
14. Alqahtani, A. S., Mubarakali, A., Parthasarathy, P., & et al. Solar PV fed brushless drive with optical encoder for agriculture applications using IoT and FPGA. *Opt Quant Electron*, 2022, vol. 54, article no. 715. DOI: 10.1007/s11082-022-04065-0.
15. Enemali, G., Bishnu, A., Ratnarajah, T., & Arslan, T. Towards an FPGA Implementation of IOT-Based Multi-Modal Hearing AID System. *Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Workshops, ICASSP 2023*, 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICASSP59220.2023.10192936.
16. Anitha, K., Kumar Gopathoti, K., Rajeswari, J., Majji, S., Radhika Patnala T., & Sri Sai Satyanarayana, D. FPGA Implementation of Arbiter PUFs for ideal Cryptographic Key Generation. *Proceedings of 2021 IEEE 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2021*, 2021, pp. 754-757. DOI: 10.1109/ICECA52323.2021.9676119.
17. Kutseva, M. Adaptation of Seven-Layered IoT Architecture for Energy Efficiency Management in Smart House. *Proceedings of 2022 IEEE 10th International Scientific Conference on Computer Science COMSCI 2022*, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/COMSCI55378.2022.9912604.
18. Kulanov, V., Perepelitsyn, A., & Zarizenko, I. Method of development and deployment of reconfigurable FPGA-based projects in cloud infrastructure. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, 2018, pp. 103-106. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409108.

19. Al Qassem, L. M., Stouraitis, T., Damiani, E. & Elfadel, I. M. FPGAaaS: A Survey of Infrastructures and Systems. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 1143-1156. DOI: 10.1109/TSC.2020.2976012.

20. Alveo UL3524 Ultra Low Latency Trading Data Sheet, AMD, DS1009 (v1.1). Available at: <https://docs.xilinx.com/r/en-US/ds1009-ul3524>. (accessed August 08, 2024).

21. Ibro, M., & Marinova, G. FPGA Power Consumption Optimization Methods Analysis. *Proceedings of 2023 International Conference on Electromechanical and Energy Systems, SIEMEN 2023*, 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SIEMEN59038.2023.10290793.

22. Pandey, N., Pandey, B., & Hussain, D. M. A. Reduction in power consumption of packet counter on VIRTEX-6 FPGA by frequency scaling. *Proceedings of 2017 Saudi Arabia Smart Grid, SASG 2017*, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SASG.2017.8356479.

23. Poluyanenko, N. Development of the search method for Non-Linear Shift Registers using hardware, implemented on Field Programmable Gate Arrays. In: *EUREKA: Physics and Engineering*, 2017, pp. 53-60. DOI: 10.21303/2461-4262.2017.00271.

24. Cyclone IV EP4CE10 FPGA, Intel. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/210464/cyclone-iv-ep4ce10-fpga/specifications.html>. (accessed August 8, 2024).

Надійшла до редакції 10.09.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

ANALYSIS OF APPLICATION OF FPGA TECHNOLOGIES IN IOT

Vitaliy Kulanov, Artem Perepelitsyn

The subject of study in this article and work is the modern technologies of programmable logic devices (PLD) classified as FPGA, and the peculiarities of its application in Internet-of-Things domain at different architectural layers of the implementation, as well as the elements of decision making choosing of appropriate solutions based on FPGA in the context of implementation of IoT tasks with the requirements of intensive computations. The **goal** is to analyze the possibilities and peculiarities of the application of technology of programmable logic devices as part of the modern architecture of the Internet of Things with the improvement of decision making process during the choosing of appropriate technical solutions for the use of FPGA with taking into account the types of tasks. **Tasks:** to analyze the current state of demands regarding the use of FPGA technology in IoT projects; to analyze the challenges and limitations for the application of FPGA technology at different layers during the prototyping of IoT infrastructure; to propose ways of the use of FPGA technology in the IoT infrastructure with the use of high-speed computations; to analyze the advantages and disadvantages of the proposed approaches of integration of FPGA technology; to provide recommendations and determine the further direction of the research of the use of FPGA technology as a part of the IoT infrastructure considering of AI/ML tasks; to provide a practical example of the use of FPGA technology during the creation of a high-performance IoT system. According to the tasks, the following **results** were obtained. The analysis of the current state of the use of FPGA technology in IoT projects is performed, that showed the significant potential of these technologies for the implementation of high-speed computations in Internet of Things systems. A classification of the ways of applying FPGA in the tasks of real-time data processing and implementation of neural networks is proposed. The set of limitations of the possibility of FPGA technology applying at different layers of IoT infrastructure is defined. It includes high equipment costs, the need for specific design skills, limitations in energy consumption, and the complexity of the integration with existing systems. The practical example of the use of the IoT system with the implementation of high-intensive computations is provided. **Conclusions.** The main contribution and scientific novelty of the obtained results is that the conducted analysis allows to make a decision about the possibility of applying programmable logic in the construction of IoT projects and home automation systems. Based on the proposed classification of types of IoT tasks, there is a possibility of making a decision on the application of FPGA technology as a separate integrated circuit in the system or using a complete instance of FPGA as a Service in the cloud environment.

Keywords: Internet of Things; IoT; cloud services; hardware accelerator; Artificial Intelligence; AI; PLD; FPGA; FPGA as a Service; integrated environment; edge computing; edge devices.

Куланов Віталій Олександрович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. 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. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Vitaliy Kulanov – PhD, Associate Professor at the Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.kulanov@csn.khai.edu, ORCID: 0000-0002-9312-0735, Scopus Author ID: 54911941800.

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