

УДК 629.783:004.382.7:001.891.57(0.034.2)

doi: 10.32620/aktt.2025.3.11

І. Б. ТУРКІН, О. В. ЛЮБІМОВ, Л. О. ВОЛОБУЄВА, В. С. ВАЛКОВИЙ

*Національний аерокосмічний університет**«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БОРТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ НАНОСУПУТНИКІВ CUBESAT: СИСТЕМАТИЗОВАНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Завдяки своїм перевагам, таким як модульна архітектура, відносно низькі витрати на запуск, короткі терміни розробки та невисокі вимоги до кваліфікації проєктної команди, наносупутники CubeSat здобули популярність та успішно виконують багато завдань в освітніх та наукових місіях. Кількість доступних наукових публікацій, що охоплюють весь спектр наукових та виробничих аспектів сучасних наносупутникових платформ CubeSat, становить кілька сотень робіт щороку, але їх фрагментарність та сфокусованість на окремих вузьких темах або конкретних підсистемах наносупутників ускладнюють системне розуміння проблем та підходів до їх вирішення. Мета цієї статті — надати структурований та систематизований огляд літератури з вказаної тематики за останні десять років та визначити перспективні тенденції досліджень на найближчі роки. У статті аналізуються існуючі наукові публікації, де розглянуто процеси життєвого циклу апаратно-програмного забезпечення бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat. Для вирішення цього складного завдання в дослідженні застосовано підхід, що включає автоматичну кластеризацію вибраних публікацій за допомогою аналізу ключових слів, експертну класифікацію наукових публікацій шляхом аналізу анотацій та подальше узгодження автоматичних та експертних оцінок. Результати систематизованого огляду та аналізу літератури показали, що більшість публікацій певною мірою стосувалися програмної інженерії, тоді як питанням освіти та навчання майже не приділяється уваги. Було виявлено, що експертна класифікація частково зменшує вплив помилок автоматичної кластеризації, а можливість віднесення публікації до кількох класів, ранжованих за ступенем важливості, дозволяє аналізувати міждисциплінарний характер публікації. Тим не менш, експертна класифікація породжує додаткові труднощі, пов'язані з узгодженням суб'єктивних оцінок різних експертів. Таким чином, в роботі визначено популярні напрямки досліджень у цій галузі, сучасні підходи та апаратно-програмні рішення, а також перспективні тенденції досліджень. Зокрема, було виявлено, що ключовими кластерами, на яких слід зосередитися, є системна інженерія та стандарти, апаратне та програмне забезпечення, комп'ютерна архітектура та надійність, використання штучного інтелекту та машинного навчання.

Ключові слова: наносупутники; CubeSat; бортовий комп'ютер; систематизований огляд літератури; програмне забезпечення; апаратне забезпечення.

Вступ

Наносупутники CubeSat з моменту своєї появи в 1999 докорінно змінили саму концепцію малих супутників. Те, що починалося як простий освітній інструмент (10-сантиметровий куб вагою близько 1,33 кг – типорозмір формату 1U), з часом набуло зовсім інших розмірів та вирішуваних завдань, здійснюючи все більш складні місії.

До появи CubeSat розробка супутників була монополією урядових установ та аерокосмічних гігантів. Процес був дорогим і технічно складним, вимагав п'ять-сім років і величезного фінансування. Наносупутники CubeSat змінили це, запровадивши модульний, стандартизований підхід, який скоротив час і витрати на розробку. Використання готових компонентів і заохочення співпраці між

університетами та промисловістю відкрило широкий спільноті доступ до космосу.

Ці крихітні супутники зараз виконують критично важливі завдання в наукових, освітніх і комерційних цілях. CubeSat довели свою спроможність вирішувати завдання спостереження за Землею, випробування нових технологій, телекомунікацій і навіть освоєння далекого космосу. Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору США (NASA), Агентство аерокосмічних досліджень Японії (JAXA), Європейське космічне агентство (ESA) та незліченна кількість приватних компаній розробляють та використовують CubeSat для космічних досліджень, розширення супутникових мереж, моніторингу змін клімату, підтримки реагування на стихійні лиха та подорожей на Марс та Місяць. За чверть століття



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

наносупутники CubeSat перетворилися з навчальних проєктів на необхідні інструменти для комерційних і наукових місій, демонструючи, як швидко можуть розвиватися космічні технології. На даний момент запущено майже 2730 наносупутників CubeSat (рис. 1), та прогнозується ще приблизно 1900 наносупутників CubeSat у 2025-2029 роках [1]. Досягається це зростання кількості запусків через їх здешевлення завдяки використанню таких комерційних ракет-носіїв, як Falcon від SpaceX, коли наносупутники CubeSat є попутним навантаженням для основного вантажу.

Багато команд по всьому світу намагаються створити свою власну авіоніку для наносупутників, мотивуючись науковими інтересами, необхідністю навчання студентів і аспірантів в умовах обмежень на час та бюджет розробки. Перший український CubeSat PolyITAN-1 (створений у Національному технічному університеті України «КПІ Ігоря Сікорського») був запущений у 2014 ракетою-носієм «Дніпро» разом з 33 супутниками з інших 17 країн [2], він має формат 1U і безперервно працює на орбіті вже більше 10 років, його статус на час написання статті – operational [1]. На основі отриманої завдяки PolyITAN-1 інформації був розроблений та успішно запущений у 2017 році CubeSat формату 2U PolyITAN-2-SAU (reentering, 2019). Продовжуються розробки інших українських CubeSat, серед яких наступні наносупутники серії PolyITAN [2] та ХАІ-ІКА.

CubeSat формату 3U ХАІ-ІКА розробляється в Національному аерокосмічному університеті «ХАІ» [3] з метою експериментального відпрацювання нових розробок у відкритому космічному просторі та

підтримки науково-технічної творчості студентів й аспірантів університету. Бортовий обчислювач (БО) і його програмне забезпечення є основними інструментами керування польотною місією та бортовою авіонікою, і, як наслідок, значною мірою визначають складність, вартість та терміни всього проєкту з розробки CubeSat. Це обумовлює необхідність обґрунтованого вибору сучасних апаратно-програмних рішень для реалізації БО наносупутника ХАІ-ІКА, що є також одним з підзавдань при підготовці ТЗ на розробку БО «Борівітер»/«Falco» [4]. Додатковою мотивацією систематизованого огляду є дисертаційна робота автора статті Любімова О.В. на тему «Методи та програмні засоби забезпечення енергетичної ефективності бортових обчислювачів БПЛА та наносупутників».

Кількість наукових публікацій, присвячених тільки апаратно-програмному забезпеченню бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat стабільно зростала щороку за останні 10 років (рис. 2). Для обґрунтування необхідності власного систематизованого огляду розглянемо тільки ті публікації, які оголошують метою надання огляду літератури в тематиці апаратно-програмного забезпечення бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat, використовуючи в назві, або анотації слова та словосполучення: “Literature review”, “Survey”, “State-of-the-art review”, “Meta-analysis”, “Systematic review”.

В публікаціях [5, 6] розглядаються сучасні апаратні рішення (FPGA, GPU, SoC) та пов'язані з ними обчислювальні програмні архітектури, операційні системи та фреймворки (ROS, FreeRTOS,

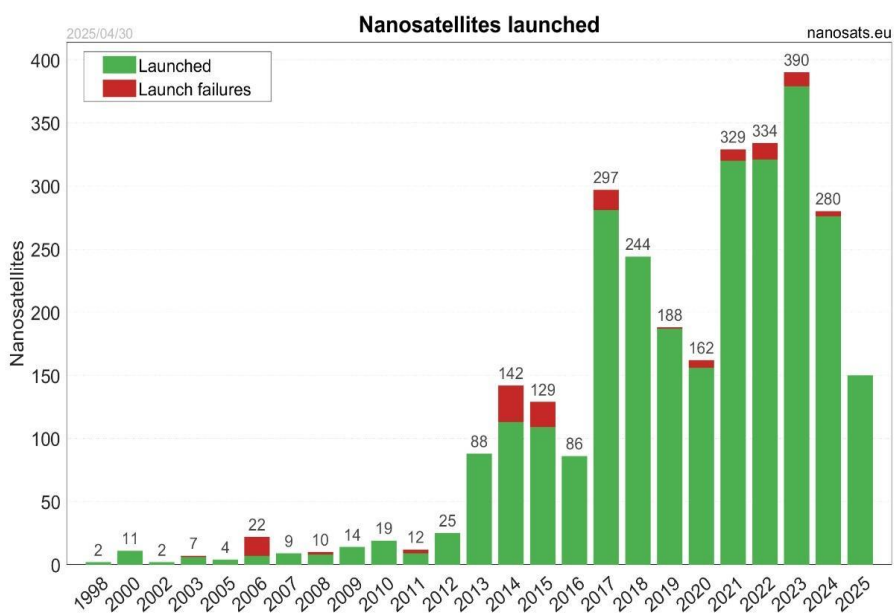


Рис. 1. Статистика запуску наносупутників CubeSat станом на 30/04/2025 (Ерік Кулу, www.nanosats.eu)

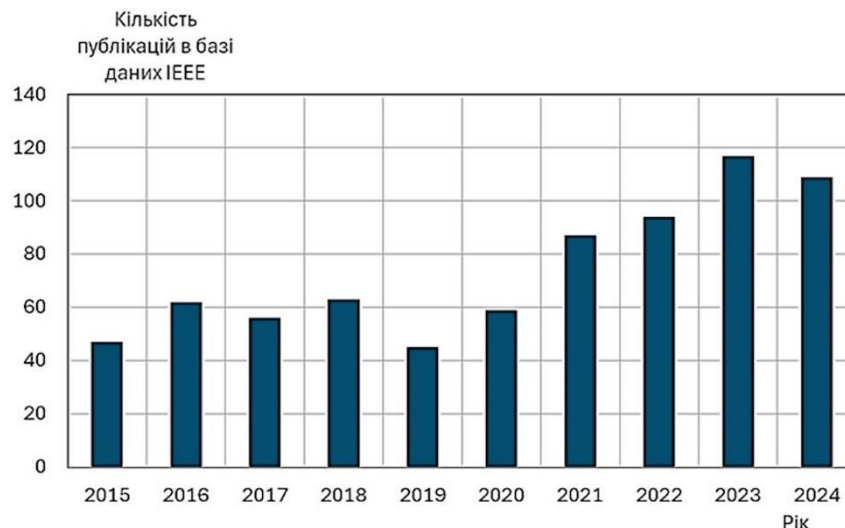


Рис. 2. Кількість публікацій IEEE Xplore, присвячених апаратно-програмному забезпеченню бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat

cFS, F Prime), що дозволяє оцінити технологічні тренди та варіанти реалізації. Робота [6] робить акцент на впровадженні недорогих комерційних компонентів у CubeSat-проекти та надає уявлення про практичні компроміси між ризиками і перевагами. Стаття [7] системно розглядає наносупутники як платформу, що забезпечує контекст для розуміння особливостей архітектурних та програмних рішень. Окремі статті поглиблено аналізують роль машинного навчання у супутникових місіях [8], сучасні методи шифрування в умовах обмежених ресурсів CubeSat [9], а також методи моделювання і балансування супутникових тренажерів [10], що демонструє інтенсивний розвиток прикладних технологій. Стаття [11] пропонує огляд тенденцій, потенціалу й обмежень CubeSat як наукової платформи, з особливою увагою до телекомунікаційних підсистем – важливої складової апаратно-програмної архітектури. Стаття [12] пропонує міждисциплінарний погляд на проблематику інформаційної інтеграції в космічних місіях, що охоплює як апаратні, так і програмні виклики, включно з концепціями MBSE і цифрових двійників.

Проаналізовані огляди літератури, тим не менш, мають достатньо недоліків. Головним з них є те, що тільки публікації [6, 12] – єдині, що претендують на структурований або частково систематизований літературний огляд. Решта - це технічні дослідження або вузькотематичні огляди без формалізації методології огляду.

Не менш важливим є фрагментарність розгляду: жодна з робіт не пропонує комплексного огляду всіх критичних аспектів архітектури, ПЗ, енергоспоживання та безпеки бортового обчислювача CubeSat як цілісної системи. Хоча

архітектурні компоненти розглядаються в [5 - 7], але ці публікації не містять порівняльного аналізу щодо вибору FPGA, GPU та центрального процесора. Тема відмовостійкості, тестування та сертифікації програмного забезпечення згадується лише побічно в [6], і не підкріплена прикладами з реальних місій. Статті визнають обмеження енергоспоживання [5], [6], однак не фокусуються на огляді конкретних методів його оптимізації в обчислювальних блоках. Відсутній аналіз переваг і недоліків застосування різних операційних систем, хоча операційні системи FreeRTOS і Linux RT згадуються в [5, 6], але немає аналізу переваг і недоліків їх застосування у різних умовах місій. Model-Based Systems Engineering (MBSE) і концепція цифрових двійників є предметом обговорення в [12], але ці теми не отримують розвитку в контексті реального проектування CubeSat.

1. Постановка задачі

Мотивація. Оглянуті публікації є актуальними і змістовними, оскільки відображають широкий спектр технологічних аспектів, які сьогодні формують обличчя сучасних наносупутникових платформ. Проте їхня фрагментарність, спрямованість на окремі вузькі теми або компоненти системи створюють об'єктивну потребу в інтегрованому, систематизованому огляді апаратно-програмного забезпечення бортових комп'ютерів CubeSat. Такий огляд має враховувати комплексність проблематики, забезпечити міждисциплінарну синергію технічних рішень і дати змогу виявити реальні виклики для наступного покоління супутникових місій.

Ключова мета цієї статті полягає в тому, щоб

надати структурований та систематизований огляд наукових публікацій, присвячених критично важливій частині наносупутникової авіоники – бортовому комп'ютеру та його програмному забезпеченню.

Це складне та комплексне завдання ми вирішуємо через автоматичну кластеризацію відібраних публікацій через аналіз ключових слів, експертну класифікацію наукових публікацій через аналіз анотацій та наступне узгодження автоматичних та експертних оцінок за наступними критеріями.

1. Характер публікації: теоретична, емпірична (експериментальна), огляд літератури.

2. Класи об'єктів дослідження в публікації визначено наступні:

- інженерія бортового програмного забезпечення;
- проектування місій та управління;
- апаратні компоненти та системи платформи наносупутника;
- корисне навантаження;
- навчання, освітні програми, дисципліни;
- архітектура бортового обчислювача.

Кількість класів об'єктів дослідження було навмисно обмежено відповідно до правило "7 плюс-мінус 2", яке сформулював американський психолог Джордж А. Міллер у 1956 році, як обмеження короткочасної (робочої) пам'яті людини. Але подальші попередні спроби залучення експертів до класифікації аналізованих публікацій показали суттєво нерівномірний розподіл на класи. Щоб компенсувати цю нерівномірність, було прийнято два рішення щодо організації експертного опитування.

1. Занадто великі в попередньому опитуванні за розміром публікацій класи були розбиті на підкласи, а саме:

- підкласи класу «Інженерія бортового програмного забезпечення»: «Алгоритми обробки даних», «Методології розробки програмного забезпечення», «Забезпечення якості»;
- підкласи класу «Проектування місій та управління»: «Дизайн місій», «Аналіз продуктивності», «Управління ризиками»;
- підкласи класу «Апаратні компоненти та системи платформи наносупутника»: «Комунікація та захист даних»; «Платформи та інтеграція»; «Енергосистеми», «Термоконтроль та механічні системи».

2. Реалізовано схему опитування, коли кожному експерту надано можливість віднести публікацію за критерієм об'єкту дослідження публікації до трьох класів: перший - головний клас, другий - середній за важливістю клас, третій - найменш важливий, але

також суттєвий клас. Вибір головного класу є обов'язковим, другого та третього можливий тільки, якщо експерт вважає, що цей напрям присутній в публікації.

Таким чином, реалізовано можливість класифікувати міждисциплінарні публікації, але кількість класів кваліфікації з урахуванням підкласів збільшено до тринадцяти.

2. Методологія дослідження

Дослідження в даній статті проводилося шляхом систематизованого огляду літератури з метою пошуку системного розуміння про напрями таких досліджень в минулому (за останні десять років) та пошуку перспективних напрямів подібних досліджень в найближчому майбутньому (рис. 3).

Алгоритм систематизованого огляду літератури (рис. 3), розбитий на наступні етапи (фази).

Етап 1. Наукові інтереси авторів визначили формулювання теми та питання досліджень.

Етап 2. Для формування переліку наукових публікацій для подальшого експертного та автоматичного аналізу використано методологію PRISMA (Preferred Items for Systematic Reviews and Meta-Analysiss) [13], яка була розроблена та впроваджена Джоаном Маккензі та Метью Пейджем як структурований підхід та методологію для аналізу наукових публікацій.

Етап 3. Автоматичну кластеризацію публікацій через аналіз ключових слів здійснено з використанням open-source програми аналізу та візуалізації графів Gephi [14] та інструменту VOSviewer, який ідентифікував кластери щільно пов'язаних публікацій через розрахунок щільності зв'язків між публікаціями, як кількість спільних ключових слів з урахуванням їх синонімічності в контексті даного дослідження.

Етап 4. Експертна класифікація публікацій через аналіз змісту анотацій виконана в два кроки: попередньо експерти визначили опорні класи публікацій, а потім після узгодження переліку опорних класів публікацій віднесли кожен публікацію до певної множини класів. Експертам було запропоновано обов'язково визначити перший, головний клас, до якого відноситься публікація, а також опціонально експертам пропонувалося віднести публікацію ще до двох додаткових класів, якщо на їх думку в публікації також змістовно розглядаються питання, характерні для інших класів. Експертів було проінструктовано, що вони повинні надавати впорядковані оцінки: обов'язковий клас є головним, перший додатковий клас є менш важливим за головний, а другий додатковий менш важливим за перший.

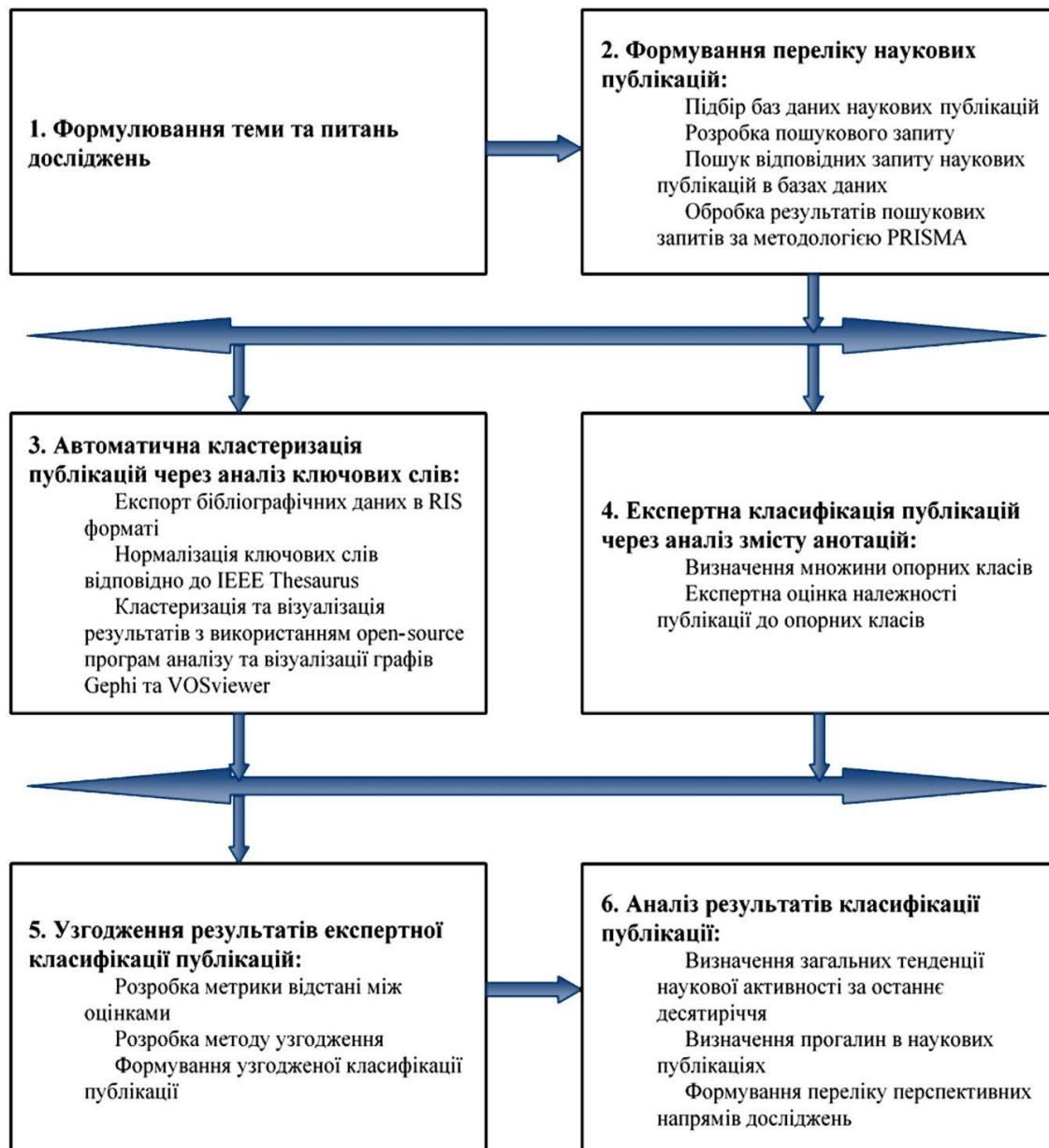


Рис. 3. Алгоритм систематизованого огляду літератури

Етап 5. Метод узгодження результатів експертної класифікації публікацій є авторським, він докладно викладений в наступному розділі.

Етап 6. Результатам систематизованого огляду літератури також присвячено окремий розділ.

3. Метод узгодження результатів експертної класифікації публікацій

В формулюванні методу узгодження результатів експертної класифікації публікацій першим кроком є визначення метрики відстані між двома оцінками.

Вихідні дані – два вектори класів, визначених або експертами. У векторі оцінки належності публікації до певного класу позиції векторів можуть

містити елементи з множини заздалегідь визначеного переліку класів або порожнє значення ($\emptyset$). У цьому контексті $\emptyset$ означає відсутність оцінки з боку експерта на відповідній позиції, а не окремий клас.

При побудові метрики відстані ми дотримуємось аксіоматичних визначень метрики:

- відстань між будь-якими двома елементами не може бути від'ємною;
- відстань дорівнює нулю тільки тоді, коли елементи однакові;
- відстань від першого вектору до другого дорівнює відстані від другого вектору до першого;
- нерівність трикутника - пряма відстань між двома векторами не більша за обхід через третій вектор.

Також як аксіому приймаємо, що метрика

дорівнює одиниці, якщо вектори повністю різні, адже вони застосовані до корпусу попередньо відібраних наукових публікацій з єдиної тематики. Якщо зафіксовано повне не співпадіння результатів класифікації від різних експертів, то досягти спільного розуміння можна тільки через повторне експертне оцінювання.

Математично відстань між двома векторами визначається наступним чином.

Вхідні дані – два вектори, які необхідно порівняти:

$$\begin{aligned} A &= \langle a_1, a_2, a_3 \rangle, \\ B &= \langle b_1, b_2, b_3 \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

де індекс одиниця – це головний, обов'язковий клас, до якого віднесено публікацію, а індекси 2 та 3, це необов'язкові класи, до яких експерти також віднесли публікацію, якщо вважали, що публікація стосується декількох класів.

Відстань $d(A, B)$ – це мінімальна сумарна вартість редагування векторів таким чином, щоби досягти їх повного співпадіння. При редагуванні дозволено застосовувати заздалегідь визначений набір операцій (табл. 1), для кожної операції призначена її вартість в залежності від позиції редагованого елемента. Запропоноване рішення узагальнює обчислення відстані між результатами експертних оцінок, подібно до відстані Левенштейна.

Таблиця 1
Вартість операцій редагування

Назва операції	Зміст операції	Вартість операції
Replace	Замінити клас	$\text{Replace}_1 = 0.6,$ $\text{Replace}_2 = 0.25,$ $\text{Replace}_3 = 0.15$
Rotate	Перестановка місць в векторі	$\text{Rotate}_{1,2} = 0.2,$ $\text{Rotate}_{1,3} = 0.25,$ $\text{Rotate}_{2,3} = 0.1$
Add	Додавання класу в вектор може бути застосоване тільки в випадку порожнього значення ($\emptyset$)	$\text{Add}_2 = 0.25$ $\text{Add}_3 = 0.15$

Оскільки складові вектору з самого початку є впорядкованими відповідно до їх важливості, то алгоритм розрахунку відстані можна охарактеризувати рекурентним співвідношенням:

$$D_i = \min \begin{pmatrix} D_{i-1} + \text{Replace}_i, \\ D_{i-1} + \text{Rotate}_{i,k} \mid k > i, \\ D_{i-1} + \text{Add}_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де стан D_i – це мінімальна вартість редагування вектору до i -тої позиції включно, а $D_0 = 0$. Якщо вектори A та B містять різну кількість порожніх значень ($\emptyset$), то алгоритм необхідно застосувати до вектору, у якого порожніх значень більше.

Далі визначимо алгоритм знаходження середнього вектора як основу метода автоматичного пошуку компромісу між двома різними експертними оцінками.

Постановка задачі: для відомих значень двох векторів A та B необхідно знайти такий вектор S^* , що максимальна відстань від нього до обох вхідних векторів є мінімальною:

$$S^* = \arg \min (\max (D(S, A), D(S, B))). \quad (3)$$

Ця процедура може бути застосована за умови дотримання обмеження $D(A, B) < 1$, тобто вектори A та B мають хоча б один спільний клас.

З цього обмеження витікає, що задача може бути вирішена через комбінаторний перебір альтернативних варіантів розстановки, кількість яких не буде перевищувати числа $N = 5 \cdot 4 \cdot 3 = 60$, оскільки максимальна кількість класів, які можуть бути використані в трьох позиціях вектора S дорівнює п'яти.

Запропоноване рішення не позбавлене недоліків, воно лише частково автоматизує пошук середнього значення та може вимагати подальшого експертного узгодження, оскільки залишається багатоваріантність можливих кандидатів на представлення класів в складі середнього вектора. Як приклад, розглянемо наступну ситуацію:

$$\begin{aligned} A &= \langle \text{Class}_1, \text{Class}_2, \text{Class}_3 \rangle, \\ B &= \langle \text{Class}_2, \text{Class}_1, \text{Class}_4 \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

В цьому випадку відстань між двома оцінками – це сума вартостей операцій $\text{Rotate}_{1,2}$ та Replace_3 , що дорівнює 0.35. Можливі два альтернативні варіанти середнього вектора S^* , відстань від яких до вхідних векторів не буде перевищувати 0.2:

$$\begin{aligned} S_1^* &= \langle \text{Class}_1, \text{Class}_2, \text{Class}_4 \rangle, \\ S_2^* &= \langle \text{Class}_2, \text{Class}_1, \text{Class}_3 \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо ми бажаємо уникнути проведення повторної експертизи, а обидва експерти мають однаковий рівень довіри до їх компетентності, то кращим рішенням буде обрати середній вектор випадковим чином.

4. Результати досліджень

ЕТАП 1. Формулювання теми та питань досліджень

Тема досліджень: Апаратно-програмні рішення для бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat: сучасні архітектури, принципи розробки та виклики.

Питання досліджень розділено на дві частини.

1. Загальні дослідницькі питання (ДП) орієнтовані на отримання бібліометричної інформації про напрями та інтенсивність досліджень в області апаратно-програмного забезпечення бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat та включають наступне.

ДП1. Як змінювалась щорічна кількість наукових публікацій за різними напрямками досліджень?

ДП2. Які кластери наукових публікацій можна визначити шляхом автоматичної кластеризації з застосуванням інструменту програм аналізу та візуалізації графів Gephi [14] та VOSviewer [15], що широко використовується в академічній спільноті для бібліометричного аналізу та візуалізації?

ДП3. Як автоматично визначені з застосуванням інструменту Gephi та VOSviewer кластери наукових публікацій корелюють з класами публікацій, отриманими в результаті експертного аналізу?

2. Спеціальні дослідницькі питання орієнтовані на отримання змістовної деталізованої інформації про напрями досліджень в області апаратно-програмного забезпечення бортових комп'ютерів наносупутників CubeSat та включають наступне.

ДП4. Наскільки широко використовується комерційна, не радіаційно-стійка електроніка в сучасних місіях CubeSat, і які типові приклади її застосування?

ДП5. Які архітектурні підходи використовуються в бортових комп'ютерах CubeSat (FPGA, GPU, RISC-V), і чим зумовлений вибір тієї чи іншої архітектури?

ДП6. Які особливості апаратно-програмних рішень у місіях з підвищеними вимогами до надійності?

ДП7. Які методи забезпечення якості програмного забезпечення та оптимізації енергоспоживання апаратної платформи використовуються у CubeSat?

ДП8. Які операційні системи та відкриті фреймворки використовуються у CubeSat, і чим зумовлена популярність їх застосування?

ДП9. Як впливають сучасні гнучкі технології розробки програмного забезпечення та системна інженерія на основі моделей (MBSE - Model-based systems engineering) на ефективність проєктів CubeSat?

ДП10. Які технології проєктування, тестування та забезпечення якості (MBSE, HIL/MIL/SIL) використовуються на різних етапах створення CubeSat?

ДП11. Які загрози і підходи до кібербезпеки розглядаються у сучасних проєктах CubeSat, зокрема в контексті комерційних місій?

ЕТАП 2. Формування переліку наукових публікацій для подальшого експертного та автоматичного аналізу з використанням методології PRISMA

Методологія PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis) Методологія PRISMA розрізняє повнодоступні статті та статті, які містять лише ключові слова та анотації. У цьому огляді повний текст більшості статей є недоступним, тому в чек-листі вказано єдиний список статей, незалежно від їх відкритості.

Пошуковий запит повинен знайти всі статті, в анотації яких містяться одночасно три складові.

1. Щонайменше один з можливих варіантів написання слова «наносупутник»: satellite, nanosatellite*, cubesat.

2. Щонайменше один з можливих варіантів написання слова «бортний комп'ютер»: Computer, OBC (On-Board Computer), C&DH (Command and Data Handling), CDHM (Command and Data Handling Module).

3. Щонайменше один з можливих варіантів написання слів, що визначають етапи розробки,

4. вимоги до програмного забезпечення та апаратної складової: Software, Architecture, Design, Implementation, Development, Real-Time, Radiation-Hardened, Firmware, Embedded, Fault-Tolerant.

При формуванні списку синонімічних в контексті даного дослідження слів зроблено попередній експертний аналіз публікацій та використано IEEE Thesaurus [16] і настанови курсу CubeSat 101 від NASA [17].

Для пошуку публікацій обрано дві бази даних: IEEE Xplore [18] та Elsevier Scopus / Science Direct [19]. Діапазон пошуку обмежено останніми 10 роками, тобто це 2015-2024 роки.

Таким чином, пошуковий запит є таким:

(satellite* OR nanosatellite* OR cubesat*) AND
(OBC OR "On-Board Unit" OR "C&DH" OR
"Command and Data Handling" OR Computer)
AND

(Hardware OR Software OR Architecture OR Design
OR Implementation OR Development OR "Real-Time"
OR "Radiation-Hardened" OR Firmware OR
Embedded OR "Fault-Tolerant")

Для експертного відбору та фільтрації зайвих статей, що не відповідають темі досліджень, були

використані такі тригери фільтрації (стоп-слова другого рівня): ADCS (Attitude Determination and Control System), EPS (Electric Power System), PPT (Power Point Tracking), 5G, 6G, SDR (Software Defined Radio), radio, propulsion, radar, battery, thruster, robot, navigation, IoT (Internet of Things), thermal.

Тригери фільтрації – це слова, присутність яких в тексті є ознакою невідповідності публікації пошуковій темі.

В результаті ідентифікації наукових публікацій для систематизованого літературного огляду з використанням технології PRISMA для подальшого аналізу відібрано 203 статті з IEEE Xplore та Science Direct (рис. 4).

Ідентифікатори цифрових об'єктів (DOI) проаналізованих статей представлено в табл. 2, 3. Надалі посилання на публікації, що аналізуються, буде здійснюватися в форматі «П&номер публікації», наприклад, П1, П2,..., П203.

ЕТАП 3. Автоматична кластеризація публікацій через аналіз ключових слів

Перед кластеризацією виконано нормалізацію ключових слів шляхом уніфікації споріднених термінів через мапінг синонімів з метою скорочення словника та покращення якості тематичного аналізу. VOSviewer дозволяє задати нормалізацію термінів (тезаурус) в спеціальному файлі-в текстовому форматі, де вказано, які терміни в контексті дослідження повинні вважатись синонімами. Тезаурус було використано для зменшення кількості вершин графу ключових слів та спрощення подальшого аналізу. Так, наприклад, ключове слово «Power Systems» є узагальненням для словосполучень «Solar panels», «Photovoltaic cells», «Photovoltaic systems», «Batteries», «Power supplies», «Voltage control», «Maximum power point trackers».

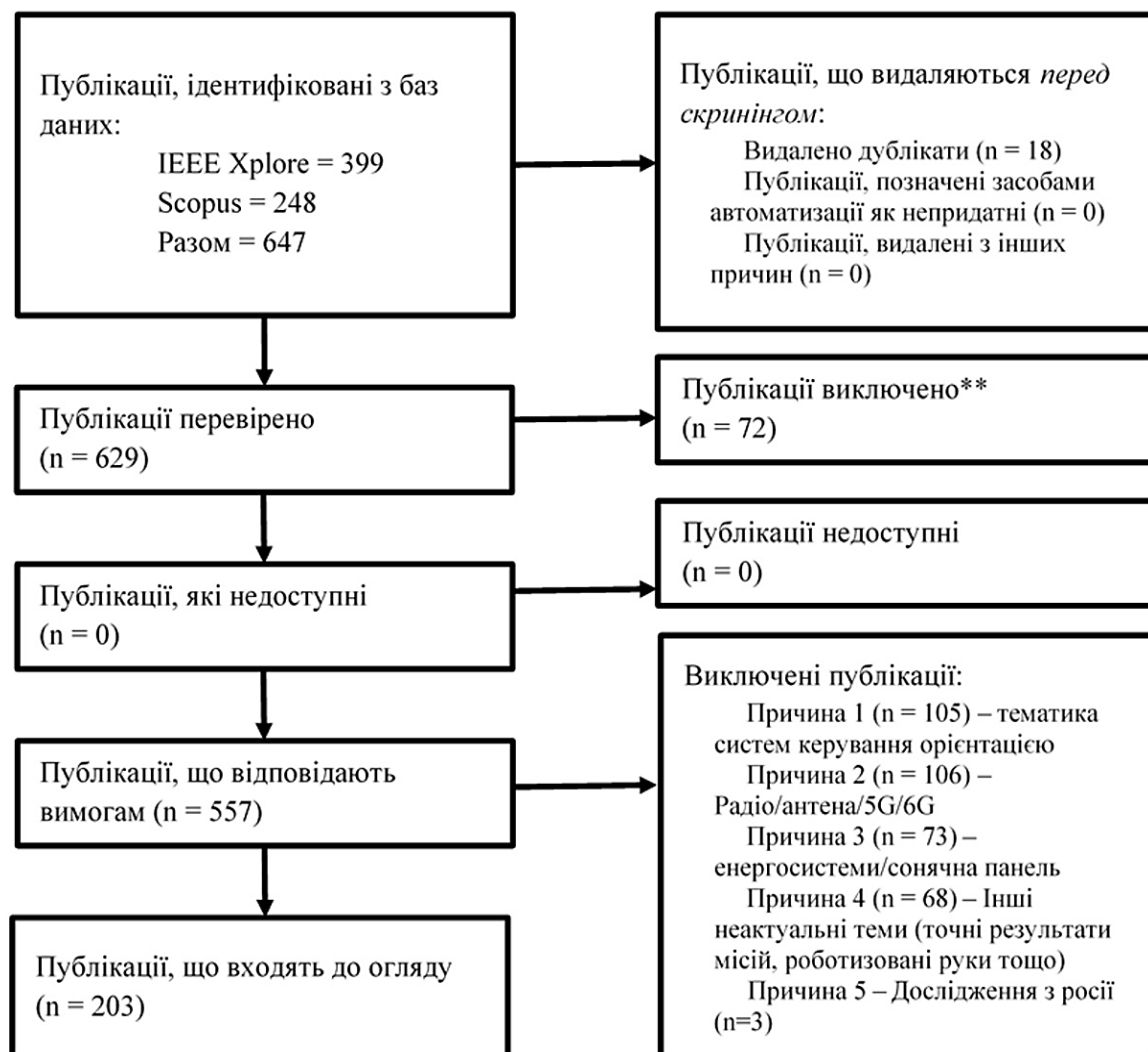


Рис. 4. Ідентифікація наукових публікацій для систематизованого літературного огляду з використанням технології PRISMA

Таблиця 2

Ідентифікатори цифрових об'єктів проаналізованих публікацій (№ - позначення публікації в тексті)

№	DOI
П1	10.1109/AERO47225.2020.9172340
П2	10.1109/MAES.2021.3115897.
П3	10.1016/j.ifacol.2016.11.128.
П4	10.1109/TSE.2021.3107680.
П5	10.1109/SH52469.2022.9708802
П6	10.1016/j.ifacol.2017.08.1914.
П7	10.1109/AERO55745.2023.10116011
П8	10.1016/j.jsse.2023.08.006.
П9	10.1016/j.actaastro.2020.05.007.
П10	10.2514/6.2011-6340
П11	10.1109/AERO.2019.8741972
П12	10.1016/j.actaastro.2019.10.034.
П13	10.1109/NAECON.2018.8556744
П14	10.1109/ACDT.2017.7886153
П15	10.1109/IconSpace.2015.7283826
П16	10.1109/AERO.2015.7119240
П17	10.1109/AERO53065.2022.9843521
П18	10.1109/AERO.2017.7943885
П19	10.1109/LES.2023.3260066.
П20	10.1109/AERO58975.2024.10521404
П21	10.1016/j.actaastro.2022.04.028.
П22	10.1109/AERO58975.2024.10521296
П23	10.1109/IGARSS52108.2023.10283393
П24	10.1109/AERO.2016.7500512
П25	10.1109/ICSPC50992.2020.9305775
П26	10.1109/GAST60528.2024.10520782
П27	10.1109/AERO53065.2022.9843442
П28	10.1016/j.actaastro.2024.04.034.
П29	10.1109/AERO.2018.8396692
П30	10.1109/AERO.2015.7119213
П31	10.1109/AERO.2016.7500686
П32	10.1109/AERO55745.2023.10115565
П33	10.1016/j.actaastro.2024.06.050.
П34	10.1109/AERO55745.2023.10115881
П35	10.1109/MICC59384.2023.10419435
П36	10.1016/j.actaastro.2024.02.006.
П37	10.1016/j.actaastro.2021.05.037.
П38	10.1016/j.actaastro.2020.11.044.
П39	10.1109/AERO50100.2021.9438417
П40	10.1016/j.paerosci.2024.100997.
П41	10.1109/GRS.2021.3100850.
П42	10.1109/MAES.2021.3115897
П43	10.1109/JMASS.2022.3209897.
П44	10.1109/IGARSS.2016.7730454
П45	10.1016/j.rineng.2024.103324.
П46	10.1016/j.actaastro.2022.04.014.
П47	10.23919/URSIGASS.2017.8105278
П48	10.1016/j.compind.2023.103913.
П49	10.1016/j.actaastro.2018.05.003.
П50	10.1016/j.asr.2022.10.025.
П51	10.1109/ACCESS.2019.2927931.

№	DOI
П52	10.1109/ASET56582.2023.10180675
П53	10.1109/JMASS.2022.3206713.
П54	10.1016/j.actaastro.2018.02.020.
П55	10.1016/j.ifacol.2021.11.014.
П56	10.1016/j.actaastro.2020.02.034.
П57	10.1109/ACCESS.2021.3097537.
П58	10.1016/j.compeleceng.2023.108953.
П59	10.1109/IconSpace.2015.7283819
П60	10.1109/AERO53065.2022.9843603
П61	10.1016/j.asr.2017.10.015.
П62	10.1109/AERO50100.2021.9438438
П63	10.1109/AERO.2015.7119266
П64	10.1109/AERO.2017.7943865
П65	10.1109/AERO.2016.7500849
П66	10.1016/j.asr.2020.12.032
П67	10.1016/j.actaastro.2016.05.004.
П68	10.1109/ATSIP.2017.8075514
П69	10.1016/j.asr.2015.02.032.
П70	10.1016/j.asr.2024.05.035.
П71	10.1016/j.asr.2020.12.032.
П72	10.1109/JMASS.2020.3009835.
П73	10.1016/j.micpro.2024.105132.
П74	10.1109/IconSpace.2015.7283822
П75	10.1109/ACCESS.2019.2892308.
П76	10.1109/AERO55745.2023.10115594
П77	10.1016/j.jfranklin.2020.11.024.
П78	10.1016/j.actaastro.2023.06.001.
П79	10.1016/j.jsse.2023.08.006
П80	10.1016/j.asr.2018.03.040.
П81	10.1016/j.actaastro.2015.08.002.
П82	10.1109/APSEC.2018.00066
П83	10.1109/LADC53747.2021.9672594
П84	10.1016/j.actaastro.2024.04.034
П85	10.1109/AERO.2016.7500564
П86	10.1016/j.ifacol.2016.11.128
П87	10.1109/SYSCON.2018.8369575
П88	10.1109/MAES.2017.180230.
П89	10.1109/SysCon47679.2020.9275894
П90	10.32604/cmcs.2022.018840.
П91	10.1109/EMCEurope57790.2023.10274171
П92	10.1109/SYSCON.2015.7116753
П93	10.1016/j.net.2018.07.010
П94	10.1109/AERO.2017.7943647
П95	10.1109/AERO.2016.7500897
П96	10.23919/WAC.2018.8430399
П97	10.1109/ICAT.2017.8171623
П98	10.1109/SMC-IT56444.2023.00011
П99	10.1016/j.cosrev.2020.100349
П100	10.1109/AERO.2019.8741892
П101	10.1109/ISSE49799.2020.9272209
П102	10.1109/EMR.2024.3503545.

№	DOI
П103	10.1109/ITNG.2015.22
П104	10.1109/AERO55745.2023.10115651
П105	10.1109/AERO55745.2023.10115576
П106	10.1109/AERO.2019.8741886
П107	10.1016/j.ast.2015.09.020.
П108	10.1109/ACCESS.2021.3104283.
П109	10.1109/JMASS.2023.3250581.
П110	10.1016/j.cja.2015.04.010.
П111	10.1109/AUTOTESTCON43700.2019.8961058
П112	10.1109/INFOCOMWKSHPS61880.2024.10620909
П113	10.1016/j.asr.2024.08.059.
П114	10.1109/TENCON.2016.7848725
П115	10.1109/MAES.2018.170052.
П116	10.1109/AERO50100.2021.9438148
П117	10.1109/ICRA48891.2023.10160806
П118	10.1109/LATW.2018.8347242
П119	10.1016/j.asr.2023.09.065.
П120	10.1016/j.actaastro.2018.01.017.
П121	10.1109/ACCESS.2022.3215154.
П122	10.1016/j.ifacol.2020.12.1822.
П123	10.1109/AERO58975.2024.10521328
П124	10.1109/SMACD61181.2024.10745423
П125	10.1109/RTAS.2018.00031
П126	10.1109/JPROC.2018.2802438.
П127	10.1016/j.ifacol.2021.11.015.
П128	10.23919/EDHPC59100.2023.10396629
П129	10.1109/ISSE63315.2024.10741129
П130	10.1109/SYSOSE.2015.7151937
П131	10.1109/SysCon61195.2024.10553549
П132	10.1109/ACCESS.2022.3196927.
П133	10.1109/AERO50100.2021.9438156
П134	10.1109/TGRS.2019.2954807.
П135	10.1016/j.ifacol.2024.08.480.
П136	10.1109/CCECE47787.2020.9255722
П137	10.1016/j.ifacol.2024.08.494.
П138	10.1109/FIE.2018.8658780
П139	10.1016/j.actaastro.2018.04.047.
П140	10.1109/JMASS.2023.3342208.
П141	10.1109/AERO.2019.8742140
П142	10.1109/AERO.2019.8742184
П143	10.23919/EDHPC59100.2023.10396209
П144	10.1109/ACCESS.2024.3428388.
П145	10.1109/AERO.2016.7500695
П146	10.1109/DFT.2019.8875417
П147	10.1109/AERO53065.2022.9843532
П148	10.1109/ICECS58634.2023.10382727
П149	10.1109/ACCESS.2023.3262410.
П150	10.1016/j.asr.2024.03.053
П151	10.1016/j.actaastro.2018.04.006.
П152	10.1016/j.net.2018.07.010.

№	DOI
П153	10.1016/j.microrel.2019.02.009.
П154	10.1016/j.mejo.2019.04.007.
П155	10.1016/j.cosrev.2020.100349.
П156	10.1109/RAM.2018.8463043
П157	10.1109/RADECS53308.2021.9954468
П158	10.1109/TC.2022.3174587.
П159	10.1109/AHS.2015.7231151
П160	10.1109/ACCESS.2019.2927931
П161	10.1016/j.actaastro.2019.04.047.
П162	10.1109/TSSA.2015.7440442
П163	10.1109/LES.2022.3191638.
П164	10.1016/j.asr.2023.01.026.
П165	10.1016/j.cose.2024.104033.
П166	10.1016/j.heliyon.2019.e01998.
П167	10.1109/ICUIS64676.2024.10867245
П168	10.1016/j.ifacol.2015.08.138.
П169	10.1016/B978-0-323-90916-7.00011-1
П170	10.1016/j.actaastro.2015.12.027.
П171	10.1016/j.actaastro.2016.01.006.
П172	10.1109/ACCESS.2024.3374227.
П173	10.1016/j.spacepol.2023.101600.
П174	10.1109/SMC-IT51442.2021.00018
П175	10.1016/j.actaastro.2018.11.011.
П176	10.1109/AERO47225.2020.9172280
П177	10.1016/j.ress.2021.107796.
П178	10.1016/j.jsse.2023.11.008.
П179	10.1109/ATS.2018.00034
П180	10.1109/ACCESS.2020.3044044.
П181	10.1016/j.actaastro.2018.04.040.
П182	10.1016/j.ifacol.2021.11.012.
П183	10.1016/j.asej.2019.08.006.
П184	10.1109/AERO47225.2020.9172474
П185	10.1109/MeditCom58224.2023.10266631
П186	10.1109/AERO47225.2020.9172516
П187	10.1109/ICSOS53063.2022.9749725
П188	10.1145/3613424.3614271
П189	10.1016/j.asr.2023.02.025.
П190	10.1109/SAUPEC60914.2024.10445091
П191	10.1109/CCAAW.2019.8904897
П192	10.1109/CCAAW.2019.8904895
П193	10.1016/j.paerosci.2023.100960.
П194	10.1109/AERO53065.2022.9843402
П195	10.1109/CCAAW50069.2021.9527302
П196	10.1109/AERO55745.2023.10115906
П197	10.1109/IGARSS52108.2023.10282715
П198	10.1109/AERO58975.2024.10521244
П199	10.1109/MedComNet58619.2023.10168858
П200	10.1109/CVPRW63382.2024.00672
П201	10.1016/j.asr.2024.03.053.
П202	10.1109/SBR/WRE63066.2024.10837879
П203	10.23919/IFIPNetworking57963.2023.10186407

Таблиця 3

Зміст публікацій та дослідницькі питання, які в них розглядаються

Назва підкатегорії та зміст публікацій	Актуальні публікації	Спеціальні дослідницькі питання
Кластер «Наносупутники та місії»		
Робототехніка та автономні операції: приклади використання концепції CubeSat в проєктах проєктам у сфері космічних роботів П1,П2, маніпуляторів і навіть стратосферних аеростатів	П1, П2	ДП6
Тестування вбудованих систем та програмного забезпечення: програмні інструменти та стратегії розробки та тестування	П3- П5	ДП9, ДП10
Комунікація та мережі: демонстрація заміни в космічній техніці застарілих шинних протоколів на протокол кабельних комп'ютерних мереж Ethernet	П6	ДП6
Обладнання, авіоніка та COTS: апаратні реалізації, використані компоненти COTS, архітектури авіоніки	П7-П15	ДП4, ДП5, ДП6
Платформа супутника та дизайн: різні інструменти розробки CubeSat або наносупутників, проблеми дизайну та інновації платформи. Може стати швидким матеріалом для ознайомлення з останніми досягненнями та досвідом розробки CubeSat	П16- П30	ДП4, ДП5, ДП6
Розробка місії, аналіз та концептуальні дослідження: планування місій, аналіз продуктивності, дослідження концепцій, моделювання та пов'язані теми	П31- П47	ДП4, ДП5
Безпека та управління даними: супутникові довідкові бази даних та інформаційна безпека	П48, П49	ДП12
Інтеграція навігаційних датчиків та цифрова фільтрація	П50	ДП6
Кластер «Апаратні та програмні засоби»		
Програмні фреймворки та архітектура: модульні рішення та підходи до відстеження архітектури, командно-орієнтовані та багаторівневі дизайни для ефективного розроблення бортового програмного забезпечення, забезпечення можливості повторного використання, збільшення надійності та скорочення часу розробки.	П51- П57	ДП6, ДП7, ДП8, ДП10
Програмні процеси, інструменти, перевірка та планування: процесі розробки (ітеративні, гнучкі та засновані на моделях), допоміжні інструменти, методах перевірки властивостей програмного забезпечення, а також методи планування та управління завданнями в супутникових місіях	П58-П63	ДП6, ДП7, ДП9, ДП10
Відмовостійкість і радіаційна стійкість: архітектури, випробування та методи для забезпечення надійної роботи в радіаційно небезпечному космічному середовищі.	П64-П71	ДП4, ДП5, ДП6
Бортові обчислення, їх продуктивність та енергоефективність: теоретичні та практичні аспекти обчислювальної продуктивності, енергоефективності та обробки бортових даних за допомогою нових процесорів, моніторів продуктивності або конструкцій на основі FPGA.	П72-П77	ДП5, ДП6, ДП10
Системна інтеграція, стандарти електромагнітної сумісності та інтерфейсу: використання пристроїв COTS, стратегії електромагнітної сумісності, а також використання стандартизованих інтерфейсів та розробка архітектур бортових комунікацій.	П78-П81	ДП4, ДП5
Кластер «Системна інженерія та стандарти»		
Системна інженерія на основі моделей (MBSE - Model-Based Systems Engineering) та графічна мова моделювання загального призначення для застосувань в системній інженерії (SysML): використання MBSE та SysML мав значний науковий інтерес у 2016-2020 роках, який зазнав суттєвого спаду в наступні роки.	П82-П93	ДП4, ДП5, ДП6, ДП9, ДП10
Інженерія вимог та вимоги до кіберфізичних систем (Requirements Engineering & Cyber- Physical Requirements): виявлення, специфікація та моделювання системних вимог, включаючи нефункціональні аспекти та сценарії використання.	П94-П98	ДП5, ДП6, ДП10, ДП11
Agile, Scrum та паралельна або гібридна розробка: сучасні гнучкі методології та підходи, спрямовані на скорочення часу та витрат на розробку.	П99-П103	ДП9, ДП10
Тестування, верифікація, виявлення та усунення несправностей з відновленням роботи (FDIR- Fault detection and isolation): методи та платформи.	П104- П111	ДП9, ДП10
Інструменти моделювання, імітації, оптимізації та проєктування: моделі, методи та інструменти, які допомагають розрахувати та підвищити продуктивність системи.	П112- П121	ДП7, ДП9, ДП10

Назва підкатегорії та зміст публікацій	Актуальні публікації	Спеціальні дослідницькі питання
Обладнання, авіоніка, бортові комп'ютери та інтеграція	П122- П131	ДП4, ДП5, ДП6
Управління ризиками, готовність та безпека: оцінка готовності збірки, плани управління ризиками та підходи до зменшення проблем безпеки та відповідності.	П132, П133, П134	ДП5, ДП6, ДП10, ДП11
Підходи до освітнього та проектного менеджменту: досвід розробки CubeSat в освіті, управлінні проектами та інжинірингу супутникових проектів.	П135-П139	ДП4, ДП5, ДП6,
Кластер «Системна інженерія та стандарти»		
Системна інженерія на основі моделей (MBSE - Model-Based Systems Engineering) та графічна мова моделювання загального призначення для застосувань в системній інженерії (SysML): використання MBSE та SysML мав значний науковий інтерес у 2016-2020 роках, який зазнав суттєвого спаду в наступні роки.	П82- П93	ДП4, ДП5, ДП6, ДП9, ДП10
Інженерія вимог та вимоги до кіберфізичних систем (Requirements Engineering & Cyber- Physical Requirements): виявлення, специфікація та моделювання системних вимог, включаючи нефункціональні аспекти та сценарії використання.	П94- П98	ДП5, ДП6, ДП9, ДП10
Agile, Scrum та паралельна або гібридна розробка: сучасні гнучкі методології та підходи, спрямовані на скорочення часу та витрат на розробку.	П99- П103	ДП9, ДП10
Тестування, верифікація, виявлення та усунення несправностей з відновленням роботи (FDIR- Fault detection and isolation): методи та платформи.	П104- П111	ДП6, ДП9, ДП10
Інструменти моделювання, імітації, оптимізації та проектування: моделі, методи та інструменти, які допомагають розрахувати та підвищити продуктивність системи.	П112- П121	ДП7, ДП8, ДП9
Обладнання, авіоніка, бортові комп'ютери та інтеграція	П122-П131	ДП4, ДП5, ДП6,
Управління ризиками, готовність та безпека: оцінка готовності збірки, плани управління ризиками та підходи до зменшення проблем безпеки та відповідності.	П132- П134	ДП5, ДП6, ДП10, ДП11
Підходи до освітнього та проектного менеджменту: досвід розробки CubeSat в освіті, управлінні проектами та інжинірингу супутникових проектів.	П135- П139	ДП4, ДП5, ДП6,
Кластер «Архітектура та надійність бортових комп'ютерів»		
Бортові комп'ютери (ОБС) та їх архітектури: конкретні способи реалізації обчислювальних архітектур для ОБС та інших електронних підсистем наносупутників. Спільні риси в дизайні ОБС для сумісних місій (П140, П143, П144), удосконалення діагностики ОБС та аналіз проблем місій (П73, П141), спроба визначити найбільш застосовні інтерфейси пам'яті (П145) та багатоядерних рішень (П142). Стаття П144 надає аналіз останніх архітектур ОБС.	П140- П145	ДП5, ДП6
Відмовостійкість і надійність в космічних системах: стійкість до несправностей і помилок, підходи подвійної обробки, що поєднують FPGA і класичні обчислювальні ядра (П146) для виявлення проблем в контексті обчислень, реалізація архітектури lock-step, коли два, або більше процесори виконують одні й ті самі інструкції одночасно (П150), розподілена або багатомісркова архітектура (П151). Пропонується об'єднаний чисельний та імітаційний підхід до визначення покриття діагностикою (П147). Проаналізовано питання підвищення надійності при взаємодії пам'яті з процесором (П148) і при вирішенні найбільш типового блокування периферійних шин авіоніки I ² C (П149).	П146- П151	ДП4, ДП5, ДП6, ДП10
Дослідження впливу радіації на надійність: радіація в космосі – це завжди проблема для мікроелектроніки. Переважна більшість CubeSat працюють на LEO (low Earth orbit), що дещо послаблює цю проблему, але при використанні електроніки COTS в CubeSat супутники є вразливими до радіаційного впливу, особливо в поясі Ван Аллена. Для вирішення цієї проблеми існують актуальні підходи до стрес-тестування (П152, П154, П156), моделювання та ін'єкції несправностей (П153, П155) і в цілому розглядається посилення електроніки COTS в напрямку підвищення надійності (П78, П110, П157).	П152-П157	ДП4, ДП5, ДП6
Архітектури та обчислення на основі FPGA: використання технологій FPGA (польові програмовані вентильні масиви) та CPLD (Complex programmable logic device - програмовані логічні інтегральні схеми) – це напрям, який виділяється в галузі. Він дозволяє гнучко конфігурувати (П164, П161), забезпечує паралельні та детерміновані обчислення, а також забезпечує великий апаратний рівень інтеграції з пам'яттю, шинами та інтерфейсами,	П158- П164	ДП5, ДП6

Назва підкатегорії та зміст публікацій	Актуальні публікації	Спеціальні дослідницькі питання
включаючи використання деяких обчислювальних ядер з відкритим вихідним кодом, як RISC-V (П158). Ідея створення сумісного OBC на основі FPGA (П163) і підвищення його високої надійності для місії NASA висвітлена в статті (П159). Можливе спільне використання FPGA з графічним процесором (П160). Проблеми, висновки та потреби в ресурсах для кібербезпеки розглядаються в (П162).		
Кібербезпека та надійність програмного забезпечення: одним з типових методів аналізу кібератак є виявлення аномалій в комунікації з наземною станцією (П165) і подальша передача завдання прийняття рішень саме на наземну станцію (П167, П172, П173). Віртуалізація (П166) та ізоляція завдань (П168) також розглядаються, оскільки забезпечують безпеку обчислювального контексту, що виконується на центральному процесорі OBC. В роботах П169, П179 розглянута концепція підходу FDIR до архітектури авіоніки наносупутників та її вплив на місію (П170, П171).	П165- П173	ДП11
Надійність і підходи до тестування: Для систем CubeSat термін надійність - це здатність системи надавати гарантований рівень обслугованості (Service Level Agreement) протягом усього терміну своєї місії, незважаючи на суворе космічне середовище, відмови та обмежені можливості втручання. Ключовою сутністю цієї групи наукових робіт є ретельне та повторюване тестування HiL (Hardware in the Loop) – публікації П174, П175 з використанням моделі та методів ін'єкції зломів та ударів (П176, П177). Використання формального функціонального підходу до забезпечення безпеки розглянуто в П178.	П174-П179	ДП5, ДП6, ДП11
Управління живленням та енергоефективність: енергія є найдефіцитнішим ресурсом на навколосезній орбіті. Пошук балансу між надійністю системи та енергоефективністю є в П180, метод планування обчислень пропонується в П181 та обговорюється в публікації П182.	П180-П182	ДП7
Кластер «Моніторинг і телеметрія»		
Моніторинг і телеметрія: Система телеметрії, аналізу архівування телеметричної інформації на наземній станції забезпечує надійність CubeSat. Стаття П183 надає огляд можливостей ML для такого аналізу. В роботах П184, П185 розглянуто балансування споживання енергії та обсягу телеметричних даних П184,П185, оскільки телеметрія та система зв'язку є найбільш енергетично вимогливими. Довіра та репутація міжсупутникової телеметрії та супутниково-наземного зв'язку є предметом вивчення в П186. Обговорюються складнощі лазерного високошвидкісного зв'язку і представлено технічну пропозицію щодо його реалізації в П187. Концепція розробки дата-центрів LEO, що забезпечує зберігання конфіденційності даних, запропонована і розглянута в П188.	П183-П188	ДП5, ДП6, ДП7
Кластер «Штучний інтелект та машинне навчання (AI/ML)»		
Моніторинг і телеметрія: Система телеметрії, аналізу архівування телеметричної інформації на наземній станції забезпечує надійність Cubesat. Стаття П183 надає огляд можливостей ML для такого аналізу. В роботах П184, П185 розглянуто балансування споживання енергії та обсягу телеметричних даних П184,П185, оскільки телеметрія та система зв'язку є найбільш енергетично вимогливими. Довіра та репутація міжсупутникової телеметрії та супутниково-наземного зв'язку є предметом вивчення в П186. Обговорюються складнощі лазерного високошвидкісного зв'язку і представлено технічну пропозицію щодо його реалізації в П187. Концепція розробки дата-центрів LEO, що забезпечує зберігання конфіденційності даних, запропонована і розглянута в П188.	П183, П184-П188	ДП5, ДП6, ДП7

В мережевій діаграмі ключових слів (рис. 5) використана наступна нотація:

– вузли графа – ключові слова, розмір вузла є пропорційним кількості вживання цього ключового слова в відібраних для аналізу публікаціях;

– ребра відображають спільне використання пари ключових слів в одній публікації, товщина ребра при цьому – це частотність спільного використання;

– кольори використано для розмітки автоматично виділених кластерів.

Таким чином, програма VOSviewer автоматично виділила наступні шість кластерів публікацій, які визначено через застосування спільних ключових слів (табл. 4).

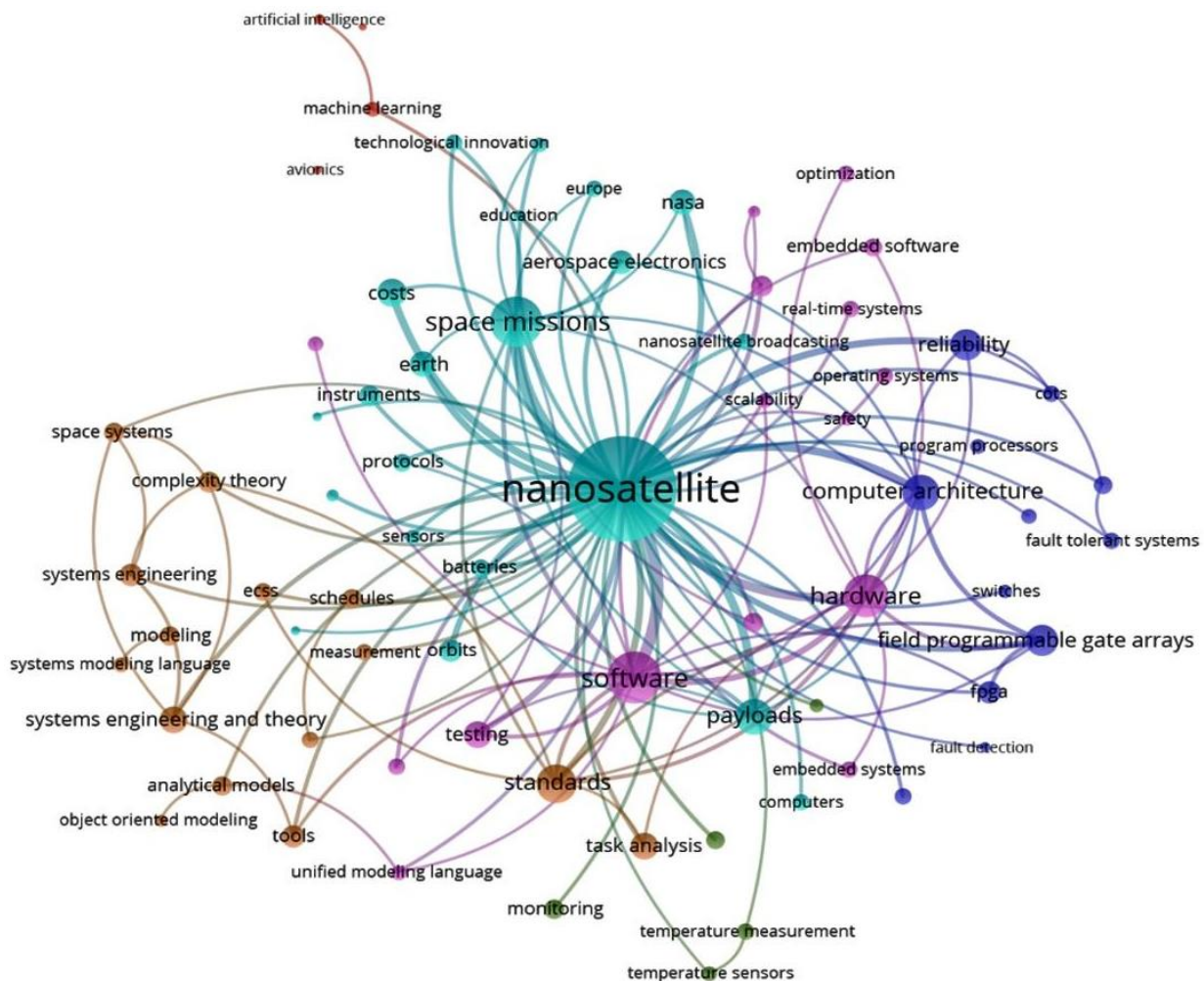


Рис. 5. Кластеризація ключових слів з використанням програми VOSviewer

1. Наносупутники, корисне навантаження та місії (21 елемент) – бірюзовий колір. Дослідження в основному спрямовані на аналіз підходів до побудови наносупутників, процесів та підходів до їх розвитку. Вони також розглядають специфіку конкретних місій і відповідне корисне навантаження. Дослідження в цьому кластері дають гарний огляд загального процесу розробки та підготовки наносупутників та їх компонентів до запуску – від збору вимог до тестування, оптимізації та взаємодії з програмами запуску наносупутників провідних агентств, таких як ESA (Європейське космічне агентство) та NASA (Національне управління з авіонавтики та дослідження космічного простору). Дослідження дозволяють читачеві ознайомитися з тенденціями, завданнями та проблемами наносупутників та ознайомитися з їхньою структурою. Додатковою складовою публікацій цього кластера є аналіз виконаних місій та засвоєного досвіду, що дає змогу знизити ризики наступних космічних програм.

2. Software & Hardware (16 елементів) – рожевий колір. Кластер 2 складається з наукових робіт, присвячених апаратному та програмному забезпеченню авіоніки CubeSat, головним чином бортових комп'ютерів. Змістовно публікації можна розділити на дві частини: програмне та апаратне забезпечення.

3. Системна інженерія та стандарти (15 елементів) – помаранчевий колір. Кластер «Системна інженерія та стандарти» присвячено інтегрованому підходу до проектування, розробки та управління життєвим циклом супутників CubeSat, з фокусом на системну інженерію, інструменти моделювання, управління вимогами та проектними процесами. Дослідження охоплюють теми MBSE та SysML, Agile-методологій, виявлення та усунення несправностей (FDIR), інтеграції апаратного забезпечення, керування ризиками, а також освітні та менеджерські аспекти розробки космічних місій, що в сукупності демонструє перехід від ізольованої інженерії компонентів до більш цілісного, модельно-орієнтованого та гнучкого інженерного процесу.

Таблиця 4

Результат кластеризації публікацій через аналіз ключових слів

№	Назва кластера	Кількість публікацій	Ключові слова, що віднесено до кластеру
1	Наносупутники та місії (Nanosatellites & Missions)	50	aerospace electronics, atmospheric modeling, batteries, computational modeling, computers, costs, earth, education, Europe, extraterrestrial measurements, instruments, moon, nanosatellite, NASA, orbits, payloads, protocols, sensors, space missions, and technological innovation
2	Апаратні та програмні засоби (Hardware and Software)	31	cyber-physical systems, embedded software, embedded systems, ESA, flight software, hardware, operating systems, optimization, real-time systems, requirements engineering, safety, scalability, software, software architecture, testing, and unified modeling language
3	Системна інженерія та стандарти (System Engineering & Standards)	58	analytical models, complexity theory, ECSS, MBSE, measurement, modeling, object-oriented modeling, project management, schedules, space systems, standards, system engineering (and theory), system modeling language, task analysis, tools
4	Архітектура та надійність комп'ютера (Computer Architecture & Reliability)	44	computer architecture, cots, fault detection, fault tolerance, fault-tolerant systems, field programmable gate arrays (FPGA), microcontrollers, program processors, random access memory (RAM), reliability, switches
5	Моніторинг і телеметрія (Monitoring & Telemetry)	6	monitoring, telemetry, temperature measurements, temperature sensors, visualization
6	Штучний інтелект та машинне навчання (AI/ML)	15	artificial intelligence, avionics, earth observation, machine learning

4. Архітектура та надійність комп'ютера (12 елементів) – синій колір. Публікації присвячено комплексним підходам до забезпечення надійності, стійкості та ефективності обчислювальних систем наносупутників (CubeSat), зосередженому навколо архітектури бортових комп'ютерів, відмовостійкості, стійкості до радіації, використання FPGA, кібербезпеки, тестування та енергоефективності. Дослідження охоплюють як апаратну (бортовий комп'ютер, пам'ять, інтерфейси), так і програмну (віртуалізація, FDIR, безпека) складові, з акцентом на адаптацію комерційних компонентів (COTS) до умов космосу, а також застосування сучасних методів тестування й моделювання для забезпечення довговічності та стабільної роботи наносупутникових місій

5. Моніторинг та телеметрія (5 елементів) – зелений колір.

6. AI/ML (4 елементи) – червоний колір. Більшість статей про використання штучного інтелекту та машинного навчання стосуються завдань обробки зображень та дистанційного зондування, інтелектуальної обробки та відновлення даних телеметрії, а також останніх розробок для подолання розриву між дешевими рішеннями COTS та радіаційно-стійкими платформами, які не доступні як комерційні продукти.

Діаграма залежності ключових слів від дати публікації (рис. 6) надає можливість оцінити зміни напрямів дослідження в аналізованому часовому інтервалі.

На діаграмі видно, що дослідження в таких

областях, як моделювання систем, управління вимогами, FPGA (Field-Programmable Gate Array - програмована користувачем вентильна матриця) і використання аналітичних моделей для розробки наносупутників були дуже активні в 2015-2018 роках і, ймовірно, матимуть стабільну зрілість сьогодні. У 2020-2022 роках найбільш значущими трендами в дослідженнях стали програмне та апаратне забезпечення, надійність, використання системної інженерії та моделювання для побудови наносупутників, стандартизація підходів до їх розробки.

У 2022-2023 роках основні дослідження були зосереджені на оптимізації цін на наносупутники, використанні машинного навчання та штучного інтелекту, а також оптимізації та дослідженні вбудованого програмного забезпечення. А тренди 2023-2024 років були зосереджені на загальних питаннях побудови космічних систем. Також варто додати, що протягом 2022-2024 років кількість публікацій (і, відповідно, досліджень) у Європі значно зросла, що свідчить про залученість Європейського космічного агентства (ESA) та його зростаюча роль у галузі наносупутників CubeSat.

На рис. 7 представлено результат автоматичної кластеризації публікацій через аналіз спільних ключових слів, де кожен вузол графа – окрема публікація, ребра – залежності між публікаціями, вага кожного ребра - це кількість спільних ключових слів в двох публікаціях. Кластеризація публікацій виконана за допомогою open-source програми аналізу та візуалізації графів Gephi. Велика кількість

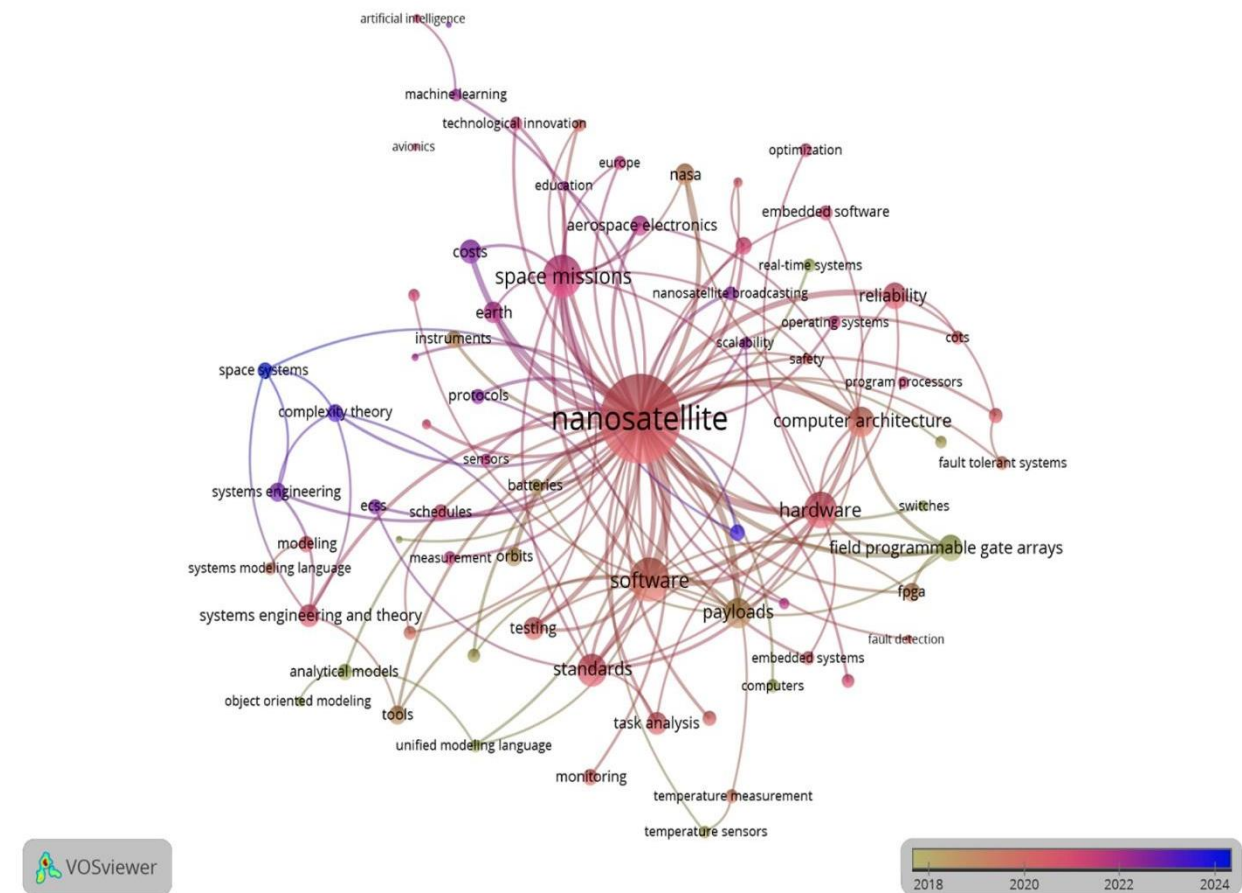


Рис. 6. Хронологічний аспект вживання ключових слів (VOSviewer)

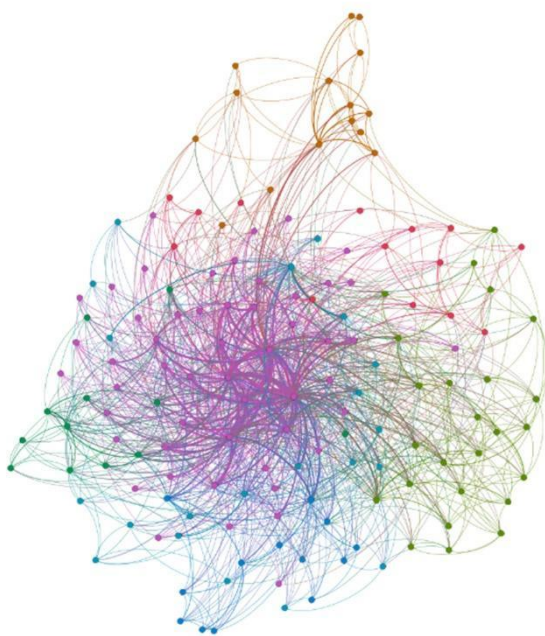


Рис. 7. Розбиття публікацій на щільно пов'язані кластери з використанням програми Gephi

публікацій (203 вузли та 1780 ребер графа) вважає доповнити цей рисунок назвами публікацій.

Для аналізу якості розбиття графа на підграфи Gephi використовує метрику модулярності [20], яка оцінює, наскільки добре вузли в межах одного кластера пов'язані між собою та слабо пов'язані з вузлами інших кластерів. Модулярність вимірює щільність зв'язків всередині кластерів у порівнянні з випадковим графом, який має таку саму кількість вершин та ребер, як досліджуваний граф, але ребра в ньому розподілені випадково. Отримане значення модулярності 0.213 не є достатнім для твердження, що результати автоматичної кластеризації добре відображають поділ графа на стійкі спільноти, оскільки нульове значення модулярності – це випадковий граф, а порогове значення 0.3 вважається достатнім для твердження, що в графі щільно пов'язані спільноти існують.

ЕТАПИ 4-5.

До експертної класифікації було залучено 2 експерти: представник ІТ-промисловості та викладач університету. На визначений перелік опорних класів безумовно вплинули особисті інтереси експертів. В якості опорних класів експертами після ознайомлення з результатами автоматичної кластеризації було визначено наступні класи.

1. Апаратні компоненти та системи-Енергосистеми.

2. Апаратні компоненти та системи-Комунікація та захист.
3. Апаратні компоненти та системи-Платформи та інтеграція.
4. Апаратні компоненти та системи-Термоконтроль та механічні системи.
5. Архітектура бортового обчислювача.
6. Інженерія бортового програмного забезпечення- Алгоритми обробки даних.
7. Інженерія бортового програмного забезпечення- Методології розробки ПЗ.
8. Інженерія бортового програмного забезпечення- Забезпечення якості.
9. Корисне навантаження.
10. Навчання, освітні програми, дисципліни.
- 11.Проектування місій та управління- Аналіз продуктивності.
- 12.Проектування місій та управління- Дизайн місій.
- 13.Проектування місій та управління- Управління ризиками.

Незважаючи на попереднє узгодження опорних класів, результати експертної класифікації продемонстрували, що суб'єктивізм в визначенні опорних класів був суттєвим фактором, оскільки в результаті класифікації до деяких класів віднесено в 10-20 разів менше публікацій, ніж до найбільш вживаного. Повторювати експертне оцінювання – достатньо трудомістке завдання, тому для подальшого аналізу залишено тільки наступні класи (рис. 8), впорядковані в спадаючому порядку публікаційного інтересу.

1. Інженерія бортового програмного забезпечення.

2. Апаратні компоненти та системи.
3. Проектування місій та управління.
4. Архітектура бортового обчислювача.
5. Навчання, освітні програми, дисципліни.
6. Корисне навантаження.

Рис. 8 свідчить, що більше половини публікацій концентрувались на питаннях, пов'язаних з розробкою бортового програмного забезпечення з урахуванням підкласів:

- алгоритми обробки даних;
- методології розробки ПЗ;
- забезпечення якості.

Відповідно, публікації, які в автоматичній кластеризації висвітлювали питання «Моніторинг і телеметрія (Monitoring & Telemetry)», «Штучний інтелект та машинне навчання (AI/ML)» при експертній класифікації потрапили в підклас «Інженерія бортового програмного забезпечення: алгоритми обробки даних».

З використанням розробленого методу узгодження результатів експертної класифікації публікацій побудовано гістограму відстаней між двома експертними оцінками (рис. 9) та визначено узгоджену спільну думку, при цьому тільки 18 з 203-х оцінок вимагали повторного перегляду.

Тим не менш, констатуємо достатньо велику розбіжність оцінок двох експертів.

5. Обговорення

Відповіді на питання досліджень структуровано у тій же послідовності, якою було сформульовано питання досліджень.

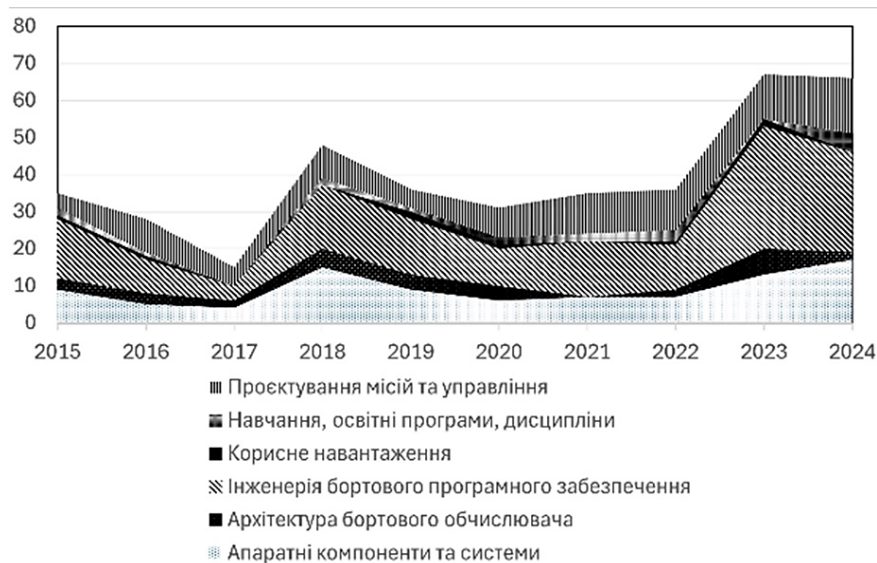


Рис. 8. Щорічна кількість публікацій, впорядкована за класами

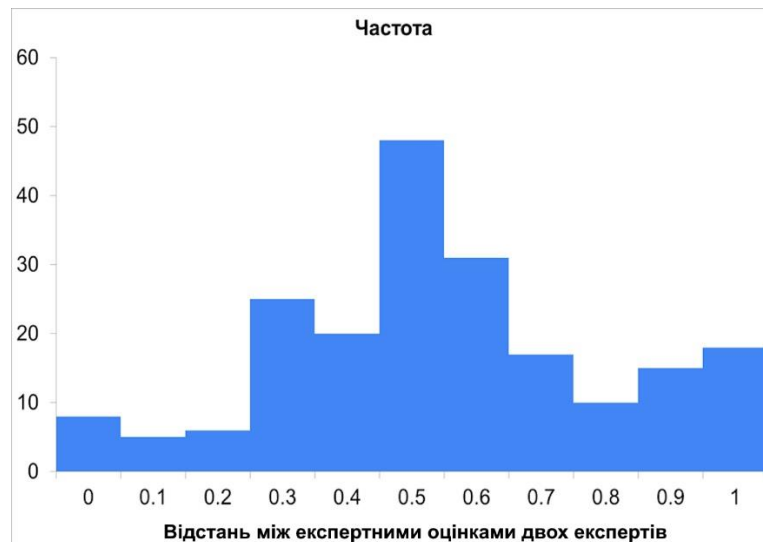


Рис. 9. Гістограма відстаней між експертними оцінками двох експертів

В1. Кількість щорічних публікацій зростала лінійно. На наш погляд, це є ознакою добре сформованої, зрілої технології, інтерес до якої тільки збільшується протягом останнього десятиріччя. Більшість публікацій певною мірою відносились до інженерії програмного забезпечення. Недостатньо уваги приділяється питанням освіти та навчання.

В2. Перелік автоматично визначених кластерів наведено в таблиці 4. Саме він є в цій роботі основою для подальшого змістовного аналізу публікацій (див. табл. 3). Тим не менш, вважаємо, що інструменти автоматичної кластеризації є тільки першим кроком для побудови обґрунтованого та структурованого аналізу публікацій. Обчислене невелике значення метрики модулярності розбиття графа публікацій на підграфи є підтвердження цієї тези. Недоліками також є те, що кожна публікація може бути віднесена тільки до одного головного кластера і достатньо велика кількість публікацій помилково віднесена до зовсім інших кластерів.

В3. Використання експертного оцінювання частково вирішує проблеми автоматичної кластеризації, але в свою чергу також породжує достатньо багато питань. Несподіванкою стало те, що оцінки від різних експертів настільки суттєво можуть різнитись. Запропонований метод автоматичного узгодження результатів експертної класифікації в основному вирішує цю проблему, але також потребує додаткової роботи, якщо експертні оцінки повністю різні. Можливість віднесення однієї публікації до декількох класів, впорядкованих за важливістю, дозволяє звернути увагу на міждисциплінарність публікації, але потребує узгодження суб'єктивних оцінок різних експертів.

В4. Використання комерційної, не радіаційно стійкої електроніки в бортових комп'ютерах CubeSat,

поширюється ще більше, ніж раніше, включаючи місії великих міжнародних космічних гравців, таких як NASA. Типовою практикою є використання звичайних комерційних процесорів, таких як STM32 від ST Microelectronics, ATSAMx від Atmel/Microchip або MSP430 від Texas Instruments.

В5. Використання подвійних архітектур, що складаються з FPGA і центрального процесора, є стабільно зростаючою тенденцією. У той же час ми спостерігаємо зростання використання подвійних рішень, об'єднаних в одному чіпі, таких як MPSoC, Xilinx Zynq і Microchip PolarFire. Ключовою мотивацією для використання архітектур на основі FPGA є їх гнучкість, надійність і продуктивність. Використання графічних процесорів для більш складних обчислювальних завдань набирає популярності, особливо для великих супутників або супутників, де OBC, ADCS і корисне навантаження поєднуються для економії маси та об'єму. Спочатку використання графічних процесорів було популярним вибором для завдань AI/ML при обробці зображень на модулі корисного навантаження, але коли воно було прийнято там, воно поширилося і на рішення OBC. Відкрита архітектура RISC-V стає все більш популярною, але сьогодні вона в основному знаходиться на рівні ядер IPU, завантажених в FPGA (Microchip PolarFire або просто Xilinx FPGA загального призначення). Це пов'язано з відсутністю належним чином комерціалізованих фізичних процесорів. Ця тенденція потребує подальшої уваги та досліджень, оскільки RISC-V є потужним та енергоефективним рішенням, значення якого продовжуватиме зростати.

В6. Виникає окрема гілка «високонадійних» місій, що вимагає використання радіаційно-стійких процесорів, ПЛІС і взагалі електроніки. Такі рішення

завичай призначені для подорожей на більш високі орбіти, ніж орбіти LEO. Існує «середній» клас надійних місійних комп'ютерів, які дотримуються ключових принципів і знань зі світу функціональної безпеки. Багато досліджень проводиться в області використання багатоядерних систем або багатоканальних резервованих комп'ютерів.

В7. Енергоспоживання, ефективність та методи оптимізації залишаються темою для досліджень. Різні методи та прийоми використовуються для оптимізації як апаратного забезпечення, та, в основному, бортового програмного забезпечення, яке є ключем до обчислювальної та енергетичної ефективності.

В8. Використання операційних систем реального часу (FreeRTOS, RTEMS, uCOS (Micrium)) є де-факто галузевим стандартом. Операційні системи дозволяють безпечно реалізовувати більш складні програмні системи і комплекси. Також помітна тенденція збільшення частки наносупутників, що виконують місії під операційною системою Linux (з розширенням у реальному часі або без нього). Це пов'язано з великою кількістю доступного для використання програмного забезпечення, зростаючою потужністю апаратного забезпечення та зростаючим ступенем інтеграції. Незважаючи на доступність відомих програмних рішень фреймворків з відкритим вихідним кодом, таких як рішення від NASA cFS і FPrime і ROS/ROS2, їх використання та розгляд в публікаціях дуже обмежені, що, швидше за все, пов'язано з короткими часовими рамками розробки програмного забезпечення в академічних установах.

В9. Використання програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом є галузевим стандартом. У досить великій кількості статей аналізується використання сучасних підходів до розробки програмного забезпечення, таких як Scrum/Agile, та рух до модульності та повторного використання програмного забезпечення. Модульність і повторне використання опиняються в центрі уваги майбутньої розробки програмного забезпечення для польотів і є ключовими методами зниження складності та частоти невдач місій. Багато проектів і місій все ще базуються на власних програмних рішеннях, де програмне забезпечення/прошивка розробляється на низькорівневих мовах програмування, таких як C і C++. У той же час все більше і більше реалізацій використовують мови програмування вищого рівня, такі як Python і Rust.

В10. Віртуалізація і контейнеризація активно розглядаються і досліджуються. У найближчому майбутньому потужні ОВС, швидше за все, замінять концепцію запуску повного монолітного бінарного програмного образу. Віртуалізація та

контейнеризація безпечніші, зрозуміліші для сучасних програмістів та DevOps-інженерів, і загалом надійніші з точки зору стабільності та кібербезпеки. Попередня тенденція використання підходу MBSE та SysML для проектування та розробки бортового програмного забезпечення здається менш актуальною сьогодні темою для досліджень. Це може бути пов'язано із загальною зрілістю технології CubeSat і кращою уніфікацією різних функцій авіоніки CubeSat. Іншими словами, розподіл на те, що робить кожен блок авіоніки CubeSat, став чіткішим і добре задокументованим. Наприкінці 2023 року і надалі інтерес до використання підходу MBSE почав знову зростати. Стійкою тенденцією є використання тестування HIL/MIL/SIL, що призвело до створення відносно складних модульних тестових платформ, призначених для допомоги розробникам CubeSat виконувати процес V&V під час розробки.

В11. Кібербезпека, стійкість та захист даних також є зростаючими тенденціями досліджень. У сучасному світі комерційних рішень під назвою Satellite-as-a-Service, існує величезна потреба у збереженні та обмеженні доступу до супутникових даних. Захист даних дозволяє розробникам CubeSat забезпечити загальний успіх місії.

Висновки

Наносупутники класу CubeSat залишаються актуальною темою в сучасних космічних дослідженнях, завдяки модульній архітектурі, низькій вартості запуску та нарощування, а також накопиченим ноу-хау та результатам досліджень. Використання наносупутників як у комерційних, так і в академічних організаціях демонструє успішність технології.

Оскільки основною метою статті є проведення систематизованого огляду літератури з проектування, розробки та тестування бортових комп'ютерів (ОВС) наносупутників, ключовими напрямками наукових досліджень, на які слід звернути увагу, є системна інженерія та стандарти, апаратне та програмне забезпечення, комп'ютерна архітектура та надійність, використання штучного інтелекту та машинного навчання.

Внесок авторів

Формулювання проблеми, виведення формул – **І. Б. Туркін**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **І. Б. Туркін, В. С. Валковий, Л. О. Волобуєва**; проведення дослідження та візуалізація результатів – **І. Б. Туркін, О. В. Любімов, В. С. Валковий, Л. О. Волобуєва**; оцінка результатів – **І. Б. Туркін, О. В. Любімов**.

Конфлікт інтересів

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

Фінансування

Дослідження проведено в рамках проекту 2023.04/0143 «Експериментальне відпрацювання бортового обчислювача безпілотного літального апарата подвійного призначення» за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні представленої роботи використовували технології штучного інтелекту тільки для вирішення технічних питань, як то визначення УДК, або формування переліку літератури відповідно до вимог оформлення.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією цього рукопису.

Література

1. Kulu, E. World's largest database of nanosatellites, over 4400 nanosats and CubeSats [Electronic resource] / E. Kulu // Nanosats Database. – Access mode: <https://www.nanosats.eu/#figures> (accessed 01.03.2025).
2. КППиный наносупутник PolyITAN-1 став рекордсменом за строком перебування на навколоземній орбіті [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kpi.ua/polyitan-1-record> (дата звернення: 02.03.2025). – Назва з екрана.
3. Любімов, О. В. Багатокритеріальне оцінювання стандартизованих інтерфейсів бортових мереж наносупутників CubeSat [Текст] / О.В. Любімов, & І. Б. Туркін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2024. – Вип. 3(195). – С. 138–153 DOI: 10.32620/akt.2024.3.12.
4. UAV Mission Computer Operation Mode Optimization Focusing on Computational Energy Efficiency and System Responsiveness [Text] / O. Liubimov, I. Turkin, V. Cheranovskiy, & L. Volobuieva // Computation. – 2024. – Vol. 12. – Article No. 235. DOI: 10.3390/computation12120235.
5. Comparison of Common Instrument Stack Architectures for Small UAS and CubeSats [Text] / S. Siewert, K. Rocha, T. Butcher, & T. Pederson // 2021

IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky, MT, USA. – 2021. – P. 1–17. – DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438438.

6. On-Board Computer for CubeSats: State-of-the-Art and Future Trends [Text] / A. Cratere, L. Gagliardi, G. A. Sanca, F. Golmar, & F. Dell'Olio // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 99537–99569. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3428388.

7. Exploring the Frontiers: An In-Depth Study on Nanosatellites as the Pinnacle of Embedded Systems in Space Technology [Text] / S. Essoumati, A. O. Said, F. Gharnati, & M. Raoufi // 2024 International Conference on Global Aeronautical Engineering and Satellite Technology. GAST-2024. – Marrakesh, Morocco. – 2024. – P. 1–5. DOI: 10.1109/GAST60528.2024.10520782

8. A critical review on the state-of-the-art and future prospects of Machine Learning for Earth Observation Operations [Text] / P. Miralles, K. Thangavel, A. Scannapieco, N. Jagadam, P. Baranwal, B. Faldu, R. Abhang, S. Bhatia, S. Bonnart, I. Bhatnagar, B. Batul, P. Prasad, H. Ortega-González, H. Joseph, H. More, S. Morchedi, A. K. Panda, M. Z. Di Fraia, D. Wischert, & D. Stepanova // Advances in Space Research. – 2023. – Vol. 71, iss. 12. – P. 4959–4986. DOI: 10.1016/j.asr.2023.02.025.

9. Review of Data Security Methods using Low-Earth Orbiters for High-Speed Encryption [Text] / M. Bakyt, L. L. Spada, K. Moldamurat, Z. Kadirbek, & F. Yermekov // 2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS). – 2024. – P. 1366–1375. DOI: 10.1109/ICUIS64676.2024.10867245.

10. Cardoso da Silva, R. A review of balancing methods for satellite simulators [Text] / R. Cardoso da Silva, R. Borges, S. Battistini, C. Cappelletti // Acta Astronautica. – 2021. – Vol. 187. – P. 537–545. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.05.037.

11. De, R. Enabling Science With CubeSats—Trends and Prospects [Text] / R. De, M. P. Abegaonkar, A. Basu // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. – 2022. – Vol. 3, no. 4. – P. 221–231. DOI: 10.1109/JMASS.2022.3209897.

12. The State of the Art of Information Integration in Space Applications [Text] / Z. Bi, K. L. Yung, A. W. H. Ip, Y. M. Tang, C. W. J. Zhang, & L. D. Xu // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 110110–110135. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215154.

13. PRISMA 2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020> (дата звернення: 01.03.2025) – Назва з екрана.

14. The Open Graph Viz Platform [Electronic resource]. – Access mode: <https://gephi.org/> (accessed 17.03.2025).

15. VOSviewer – Visualizing Scientific Landscapes [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.vosviewer.com> (accessed 01.03.2025).

16. IEEE Thesaurus Access Portal [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ieee.org/>

publications/services/thesaurus-access-page.html (accessed 24.02.2025).

17. CubeSat101. *Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers* [Electronic resource]. – Access mode: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf (accessed 24.04.2025).

18. IEEE Xplore [Electronic resource]. – Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org> (accessed 01.03.2025).

19. ScienceDirect. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com> (accessed 01.03.2025).

20. Fast unfolding of communities in large networks [Text] / V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, & E. Lefebvre // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. – 2008. – No. 10. – Article no. P10008. DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.

References

1. Kulu, E. *Nanosats Database: World's largest database of nanosatellites, over 4100 nanosats and CubeSats*. Available at: <https://www.nanosats.eu/#figures> (accessed 1.03.2025).

2. KPIshnyy nanosuputnyk PolyITAN-1 stav rekordsmenom za strokom perebuvannya na navkolozemniy orbiti [KPI nanosatellite PolyITAN-1 became the record holder for the longest stay in Earth orbit]. Available at: <https://kpi.ua/polyitan-1-record> (accessed: 02.03.2025). (In Ukrainian).

3. Liubimov, O. & Turkin I. Bahatokryterial'ne otsinyuvannya 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(195), pp. 138-153. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.12. (In Ukrainian).

4. Liubimov O, Turkin, I, Cheranovskiy, V. & Volobueva, L. UAV Mission Computer Operation Mode Optimization Focusing on Computational Energy Efficiency and System Responsiveness. *Computation*. 2024, vol. 12, article no. 235. DOI: 10.3390/computation12120235.

5. Siewert, S., Rocha, K., Butcher, T. & Pederson, T. Comparison of Common Instrument Stack Architectures for Small UAS and CubeSats. *Proceedings of the 2021 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, USA, 2021, pp. 1–17. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438438.

6. Cratere, A., Gagliardi, L., Sanca, G. A., Golmar, F. & Dell'Olio, F. On-Board Computer for CubeSats: State-of-the-Art and Future Trends. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 99537–99569. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3428388.

7. Essasoumati, S., Said, A., Gharnati, F. & Raoufi, M. Exploring the Frontiers: An In-Depth Study on Nanosatellites as the Pinnacle of Embedded Systems in Space Technology. *Proceedings of the 2024*

International Conference on Global Aeronautical Engineering and Satellite Technology (GAST) Marrakesh, Morocco. 2024, pp. 1–5. DOI: 10.1109/GAST60528.2024.10520782.

8. Miralles, P., Thangavel, K., Scannapieco, A., Jagadam, N., Baranwal, P., Faldu, B., Abhang, R., Bhatia, S., Bonnart, S., Bhatnagar, I., Batul, B., Prasad, P., Ortega-González, H., Joseph, H., More, H., Morchedi, S., Panda, A. K., Di Fraia, M. Z., Wischert, D. & Stepanova, D. A critical review on the state-of-the-art and future prospects of Machine Learning for Earth Observation Operations. *Advances in Space Research*, 2023, vol. 71, no. 12, pp. 4959–4986. DOI: 10.1016/j.asr.2023.02.025.

9. Bakyt, M., L. Spada, L., Moldamurat, K., Kadirbek, Z. & Yermekov, F. Review of Data Security Methods using Low-Earth Orbiters for High-Speed Encryption. *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)*. 2024, pp. 1366–1375. DOI: 10.1109/ICUIS64676.2024.10867245.

10. Cardoso da Silva, R., Borges, R., Battistini, S. & Cappelletti, C. A review of balancing methods for satellite simulators. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 187, pp. 537–545. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.05.037.

11. De, R., Abegaonkar, M. P. & Basu, A. Enabling Science With CubeSats—Trends and Prospects. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 221–231. DOI: 10.1109/JMASS.2022.3209897.

12. Bi, Z., Yung, K. L., Ip, A. W. H., Tang, Y. M., Zhang, C. W. J. & Xu, L. D. The State of the Art of Information Integration in Space Applications. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 110110–110135. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215154.

13. PRISMA 2020 Statement. Available at: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020> (accessed 1.03.2025).

14. The Open Graph Viz Platform. Available at: <https://gephi.org/> (accessed: 17.03.2025).

15. VOSviewer - Visualizing Scientific Landscapes. Available at: <https://www.vosviewer.com> (accessed 1.03.2025).

16. IEEE Thesaurus. Available at: <https://www.ieee.org/publications/services/thesaurus-access-page.html> (accessed 24.02.2025).

17. CubeSat101: *Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers*. Available at: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf (accessed 24.04.2025).

18. IEEE Xplore. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org> (accessed 1.03.2025).

19. ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com> (accessed 1.03.2025).

20. Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R. & Lefebvre, E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, no. 10, article no. P10008. DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.

Надійшла до редакції 15.03.2025, прийнята до опублікування 20.05.2025

HARDWARE AND SOFTWARE OF CUBESAT NANOSATELLITES' ON-BOARD COMPUTERS: A SYSTEMATIZED LITERATURE REVIEW

Ihor Turkin, Oleksandr Liubimov, Lina Volobuieva, Viacheslav Valkovyi

CubeSat nanosatellites have gained significant popularity due to their advantages, including modular architecture, short development cycles, relatively low launch costs, and qualification requirements for the project team, which enable them to successfully fulfill a wide range of tasks in educational and scientific missions. The number of available publications, covering the entire spectrum of scientific and production aspects of modern CubeSat nanosatellite platforms, is several hundred works per year, but their fragmentation and focus on individual narrow topics or specific subsystems of nanosatellites complicate a systematic understanding of the problems and approaches to solving them. This article aims to present a structured and systematic review of the literature on CubeSats over the past decade and to highlight emerging research trends for near future. The article analyzes existing scientific publications addressing the life cycle processes of CubeSat on-board computer hardware and software. To solve this complex problem, the authors employed an approach that involves automatic clustering of selected publications based on keyword analysis, expert classification using annotation analysis, and subsequent alignment of automatic and expert evaluations. The results of a systematic review and analysis of the literature reveal that the majority of publications are to some extent related to software engineering, while topics such education and training receive little attention. The study found that expert classification can partially reduce the impact of automatic clustering errors, and the ability to attribute a publication to several classes ranked by importance enables the analysis of the interdisciplinary nature of the publication. However, expert classification creates additional difficulties associated with the coordination of subjective expert opinions. The paper identifies key research areas in this field, contemporary approaches, hardware and software solutions, and outlines promising research trends. In particular, it was found that the key clusters to focus on are systems engineering and standards, hardware and software, computer architecture and reliability, and the use of artificial intelligence and machine learning.

Keywords: nanosatellites; CubeSat; on-board computer; systematic literature review; software; hardware.

Туркін Ігор Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Любимов Олександр Вікторович – асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Волобуєва Ліна Олексіївна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Валковий В'ячеслав Сергійович – асп. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Ihor Turkin – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.turkin@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3986-4186, Scopus Author ID: 57203145725.

Oleksandr Liubimov – Ph.D. Student of the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: oleksandr.liubimov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3636-6939, Scopus Author ID: 58099287400.

Lina Volobuieva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: l.volobuieva@khai.edu, ORCID: 0000-0002-3466-5743.

Viacheslav Valkovyi – Ph.D. Student of the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: v.s.valkovyi@khai.edu, ORCID: 0009-0008-7712-4112.