

УДК 629.7:004.001:004.45

doi: 10.32620/aktt.2024.3.12

О. В. ЛЮБИМОВ, І. Б. ТУРКІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський Авіаційний Інститут», Харків, Україна

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ СТАНДАРТИЗОВАНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ БОРТОВИХ МЕРЕЖ НАНОСУПУТНИКІВ CUBESAT

Технологія побудови наносупутників класу CubeSat створила справжній прорив в опануванні ближнього космосу для завдань досліджень та навчання. Наявність комерційних рішень для швидкої інтеграції апаратного та програмного забезпечення розроблюваного CubeSat та вивід такого наносупутника на орбіту Землі як паразитного навантаження, зробила цю технологію доступною та привабливою для університетів по всьому світу. Незважаючи на таку популярність, статистика відмов наносупутників після виведення на орбіту вимагає системного підходу при їх проектуванні та побудові, а також під час обирання готових Commercial Off The Shelf (COTS) компонентів. **Об'єкт дослідження** – системна ефективність стандартизованих мережевих інтерфейсів при їх використанні в бортовій мережі наносупутників CubeSat. **Предметом** вивчення в даній статті є метод комплексного оцінювання ефективності стандартизованих мережевих інтерфейсів при обміні даними в бортовій мережі наносупутників CubeSat з урахуванням типових сценаріїв обміну даними та командами. **Метою дослідження** є обґрунтування методу експертного оцінювання технічної ефективності стандартизованих мережевих інтерфейсів при обміні даними в бортовій мережі наносупутників CubeSat з урахуванням наступних факторів: енергоефективність, здатність до мультимастерінгу, стійкість до електромагнітних завад, надлишковість, покриття у відповідності до мережевої моделі OSI, швидкість передавання даних, складність реалізації мережевої технології програмним забезпеченням. **Завдання:** Проаналізувати сучасні методи організації бортових мереж авіоніки наносупутників класу CubeSat, сформулювати експертну модель порівняння, порівняти обрані інформаційні бортові мережі відповідно до моделі та переліку обраних мереж та їх протоколів. **Результати:** створена експертна модель, яка складається з 7 факторного порівняння, обрані сучасні та найбільш поширені в індустрії бортові мережі та кожна з мереж була порівняна за запропонованою моделлю. **Висновки:** Дві найбільш поширені та ефективні моделі – $\mathbb{P}^2\text{C}$ та CAN були обрані як рекомендовані для застосування у авіоніці наносупутника ХАІ-ІКА та бортового обчислювача «Борівітер»/«Falco» який розробляють автори. Хоча різниця в енергоспоживанні цих двох типів мереж суттєва, кожна з них має певні переваги як у завадостійкості, так і за критерієм мультимастерінгу і застосування.

Ключові слова: енергоефективність; бортова мережа; CAN; $\mathbb{P}^2\text{C}$; $d\mathbb{P}^2\text{C}$; SPI; TIA-485; експертна модель; Борівітер; Falco; бортовий обчислювач; авіоніка; наносупутник; ХАІ-ІКА; OSI; надлишковість; CubeSat.

Вступ

Концепція наносупутників типу CubeSat була започаткована у 1999 році Каліфорнійським Політехнічним Університетом (CalPoly) [1]. Назва концепції походить від Cubed Units Satellite, що пояснює ідею складання таких наносупутників з «кубів» стандартного розміру. Ідея базується на зафіксованому форм-факторі (типорозміру) таких «кубів» від 1U ($10 \times 10 \times 10$ см³, вага не перевищує 1,33 кг) до 12U. Первинна ідея полягала у використанні таких наносупутників на низьких навколосезних орбітах (ННО) для наукових досліджень та навчання [2], але сьогодні ця технологія широко використовується як комерційними, так і військовими операторами супутників, і в результаті створила справжній прорив у опануванні як орбіти Землі, так і орбіт Місяця та Марсу [3].

Згодом концепція CubeSat поширилась на так звані «сузір'я» (constellations) наносупутників які виконують свою функцію як логічне об'єднання декількох однотипних супутників. Це дозволило суттєво розширити часове «вікно» комунікації з такою множиною супутників, підвищити відмовостійкість, а також збільшити готовність сузір'я виконувати завдання місії та корисного навантаження (КН).

З того часу відбулось більш ніж 2700 спроб виводу на орбіту супутників такого класу [4], але розглядаючи статистику успішності пусків, можна побачити що всього 11 % пусків були повністю вдалим, 36,8 % наносупутників було втрачено, а решта виконала свою місію лише частково (рис. 1). Найчастішими причинами відмов супутників на ННО, а також неповного функціонування та/або втрати наносупутника, є помилки при розробці та експлуатації

наносупутника у використанні бортової енергії, відмови типу «зависання шини» (bus lock-ups) бортових інформаційних мереж [5], низька якість та ступень відпрацювання бортового ПЗ та радіаційна стійкість комерційних електронних компонентів.

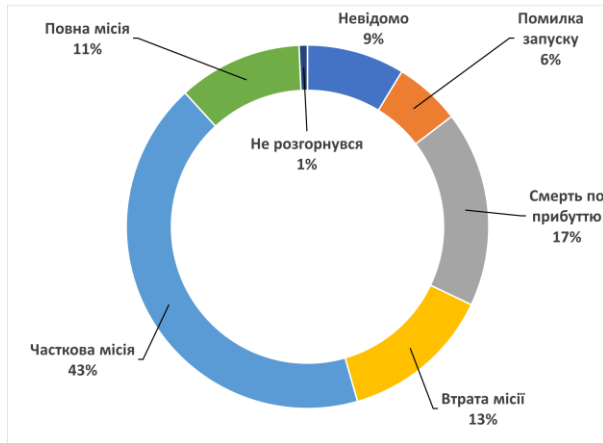


Рис. 1. Статистика запусків супутників CubeSat на кінець 2023 [4]

Існує багато методів та інструментів підвищення надійності побудови як апаратури так і програмного забезпечення. Найбільш поширеними є методи використання радіаційно-стійкої електроніки для забезпечення надійності обробки даних [6], використання принципів функціональної безпеки при проектуванні: надлишковість, резервування тощо. Ця стаття фокусується на проблемах пов'язаних з застосуванням певних мережевих технологій.

Типовий наносупутник класу CubeSat, побудований за специфікацією CalPoly - CubeSat Specification, зазвичай включає до себе наступні складові (рис. 2):

- OBC(OBDH) (On-board Computer)/БО (Бортовий Обчислювач),
- ADC(S) (Attitude Determination and Control System) / СОК (Система Орієнтації та Керування),
- EPS (PWR) (Electric Power System) / СЕ (Система Енергозабезпечення),
- COM(M) (Communication System) / СКЗ (Система Комунікації та Зв'язку);
- Payload (PAY)/КН (Корисне Навантаження).

Усі надані вище типові підсистеми мають бути поєднані в єдину бортову мережу або декілька мереж у випадку їх резервування для обміну інформацією між підсистемами та централізованого керування усіма складовими наносупутника як в автоматичному режимі за алгоритмами БО, так і через виконання команд керування з наземної станції.

Бортова інформаційно-керуюча мережа є дуже вагомою складовою наносупутника, а її відмова та/або енергетична неефективність мають критичну важливість для живучості всього наносупутника.

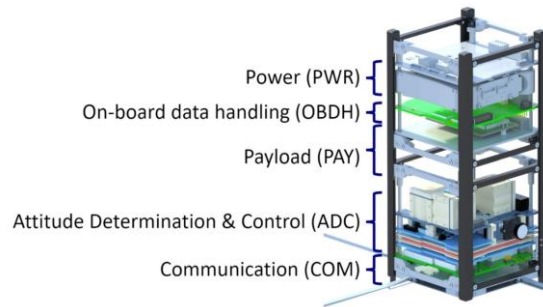


Рис. 2. Німецький CubeSat «TRACE» [8]

Одним з важливих чинників успіху технології CubeSat є використання готових комерційних компонентів (COTS, Commercial Off The Shelf) [7], що у свою чергу також вимагає вибору стандартної мережевої технології та її реалізації, або адаптації такої технології до вимог місії у конкретному наносупутнику, що будується.

Поєднавши разом статистичні данні щодо відмов наносупутників, їх популярності та бажання багатьох як професійних так і академічних та дослідницьких команд використовувати COTS компоненти – обґрунтований вибір та ефективне [9] використання бортових мережевих технологій є актуальною проблемою. У реаліях стислих бюджетів дослідницьких та студентських команд, достатньо часто основним чинником обрання певної авіоніки є кошторис. У такому випадку багато проєктів наносупутників вимушені використовувати найпростіші та найдоступніші мережеві технології, що у свій час збільшує ймовірність повної або часткової відмови наносупутника.

1. Огляд сучасного стану бортових мереж наносупутників CubeSat

Більшість сучасних студентських та простих комерційних наносупутників будуються на так званих внутрішньо-схемних мережах або протоколах, на кшталт I²C (Inter-Integrated Communication) [10], SPI (Serial Peripheral Interface) [11] та UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) [12] (рис. 3, а).

У випадках складних місій та вибагливого з точки зору об'єму даних КН, або у випадку бажання розробників виконати дублювання мереж – навіть достатньо прості супутнику можуть отримати складну бортову мережу. На рис. 3, б, продемонстрована бортова мережа наносупутника Aalto-1 який був розроблений фінськими студентами як перший національний наносупутник класу CubeSat. Aalto-1 був виведений на орбіту у 2017 році. Але проблеми з складною архітектурою авіоніки та постійним зростанням вимог до об'єму бортових даних призвели до пуску на 4 роки пізніше. За первинним планом вивід супутника на орбіту мав відбутися у 2013 році.

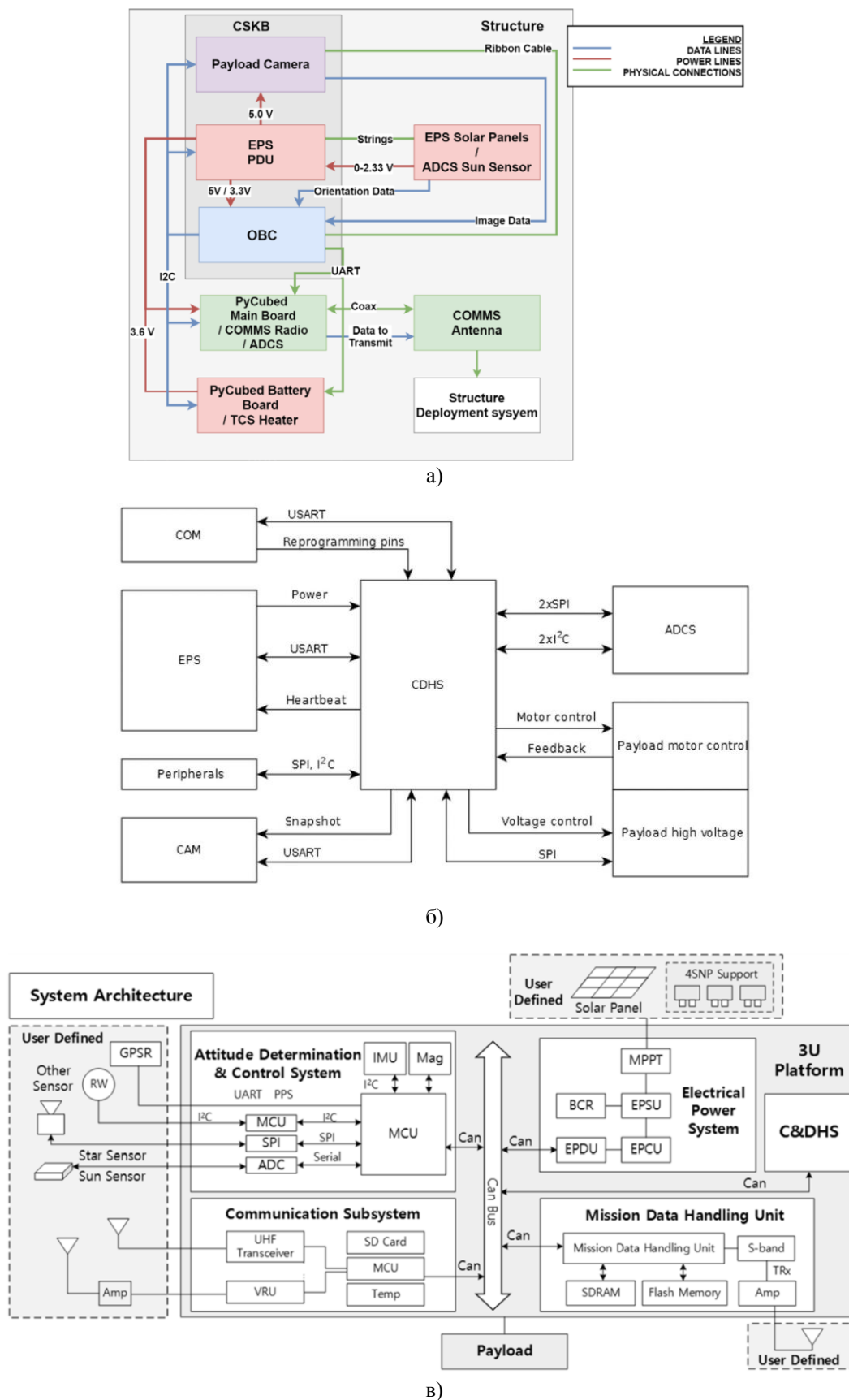


Рис. 3. Приклади реалізації бортових інформаційно-керуючих мереж наносупутників CubeSat
 а) – спрощена авіоніка «Ке Ао» [13], б) – авіоніка середньої складності ESTCube-1 [14],
 в) – складна авіоніка KAUSAT-5 - 3U [15]

За наявності у команди попереднього досвіду розробки апаратно-програмних засобів як наносупутників, так і загальнопромислових АСУ ТП, та/або периферійних засобів ПЕОМ, часто використовуються послідовні повно та напів-дуплексні мережі передавання даних, такі як EIA/RS-232, 422 та TIA/RS-485.

Промислові розробки наносупутників CubeSat використовують більш складні та коштовні для реалізації (як в грошовому еквіваленті, так і з точки зору обчислювальних та апаратних ресурсів) мережі та протоколи. До них відносяться такі стандартні мережі як CAN (Controller Area Network) (рис. 3, в) та його різновиди [16], SpaceWire (стандарт консорціуму CCSDS) [17] та військовий бортовий синхронний послідовний канал MIL-STD-1553, який зазвичай використовується в ракетно-космічній техніці військового призначення) [18].

У наведеному на рис. 3, в прикладі застосовано внутрішньо-схемні інтерфейси за їх прямим призначенням, тобто в межах однієї одиниці бортової авіоніки. В той самий час, поєднання різних підсистем авіоніки в єдину бортову інформаційно-керуючу мережу відбувається за допомогою більш для цього доцільних міжмодульних технологій та протоколів, в даному випадку – це мережева технологія CAN.

2. Постановка задачі

Мотивація цього дослідження обумовлена незадовільною надійністю наносупутників CubeSat внаслідок некоректного проектування та експлуатації бортових інформаційно-керуючих мереж, що підтверджується наявною статистикою повних або часткових втрат наносупутників [19]. Додатковою **мотивацією** є бажання запропонувати простий та наочний метод порівняння інтегральної ефективності бортових мереж та протоколів, тим самим надати проектантам та розробникам розуміння, як обрати мережевий інтерфейс, що відповідає цілям космічної місії.

Метою даної роботи є обґрунтування методу експертного оцінювання технічної ефективності стандартизованих мережевих інтерфейсів обміну даними в бортовій мережі наносупутників CubeSat для подальшого аналізу мереж та протоколів під час проектування та/або придбання складових авіоніки наносупутників.

Для досягнення мети дослідження були сформульовані наступні задачі: визначити основні критерії ефективності таких мереж, обґрунтувати вибір стандартизованих типів мереж для подальшого порівняння, виконати оцінку кожної з мереж, побудувати порівняльну таблицю та сформулювати рекомендації щодо їх використання у наносупутнику ХАІ-ІКА.

Виконання поставлених задач здійснено шляхом аналізу суттєвих властивостей типових бортових мереж, а саме – надлишковості протоколів передавання корисних даних, енергоспоживання типових апаратних реалізацій таких мереж у авіоніці CubeSat, аналіз фахових стандартів та специфікацій щодо таких мереж, а також опрацювання наукових та прикладних робіт.

3. Багатофакторна експертна модель для визначення інтегральної ефективності мереж та протоколів

Для порівняння мережевих технологій, що використовуються у наносупутниках класу CubeSat, були застосовані стандарти Європейського Космічного Агентства (ЄКА) (European Space Agency / ESA) та Європейської Кооперації з Космічної Стандартизації (ЄККК) / European Cooperation for Space Standardization (ECSS), а саме ECSS-E-ST-50C – Space Engineering, Communication. Стандарт ECSS-E-ST-50C [20]. Стандарт формує базис вимог до бортових мереж обміну даними та командами та декларує багатофакторне дерево вимог до їх реалізації. Після аналізу та класифікації вище зазначених вимог пропонується наступна експертна модель порівняння та оцінки бортових мережевих технологій а саме 7 факторів, що було використано:

1. Енергетична ефективність (E) – це питома енергія, витрачена на передачу або прийом одиниці корисної інформації, шляхом зміну фізичного стану лінії передавання інформації у відповідності до необхідного логічного рівня – «0» або «1». Таблиця 1 сформульована на основі відомої залежності енергетичних витрат на передачу даних від наступних складових:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{line}} + E_{\text{t_circuit}} + E_{\text{comp_energy}}, \quad (1)$$

де E_{line} – енергія, яка витрачається на керування лінією передавання даних, зважаючи на ємність лінії;

$E_{\text{t_circuit}}$ – енергія, що витрачається на електричні ланцюги формування та обробки електричних сигналів лінії (зазвичай між різними електричними та логічними рівнями сигналів);

$E_{\text{comp_energy}}$ – енергія, яка витрачається обчислювальними засобами авіоніки для кодування або декодування інформації для її безпосереднього використання ПЗ.

2. Мультимастерінг (M) – це здатність певної мережевої технології задовольняти потреби одночасного (арбітрованого або не-арбітрованого) доступу до фізичного рівня мережі. Такий, насправді, псевдо-одночасний доступ до лінії передавання даних, не вимагає від користувача певної мережевої технології

власної реалізації розділення доступу до лінії передачі, як програмними, так і апаратними засобами ПЗ (таблиця 2).

Таблиця 1

Таблиця відповідності експертних балів енергетичним витратам на зв'язок

Бал	Енергетичні витрати, 10^{-6} Дж/біт
1	>50
2	35 – 50
3	25 - 35
4	10 - 25
5	< 10

Таблиця 2

Таблиця відповідності експертних балів рівням мультимастерінга

Бал	Опис рівня мультимастерінга
0	Немає мультимастерінгу. Тільки один абонент мережі може ініціювати доступ до передавання. Типове рішення для мереж працюючих у напів-дуплексному / симплексному режимі та внутрішньо-схемних мережевих технологій
1	Обмежений мультимастерінг, де передавання декількома абонентами мережі можливе тільки за умови реалізації контролю доступу в ПЗ
2	Технологія дозволяє працювати з круговою передачею «токену» доступу до лінії зв'язку, але вимагає власної реалізації в ПЗ та не підтримує пріоритетність трафіку
3	Повний мультимастерінг з арбітражем, який дозволяє абонентам безпечно починати та виконувати передавання сповіщень з урахуванням заздалегідь узгодженого алгоритму пріоритетів передавання

3. Стійкість (С) до електромагнітних завад є невід'ємною частиною відмовостійкості будь-якої електроніки, та важливою вимогою при виборі мережевої технології для бортової мережі авіоніки. Відмовостійкість та загальні вимоги до стійкості бортової авіоніки КА (наносупутників тощо) викладені у стандарті ЄКА – ECSS-E-ST-20-07C – Space Engineering Electromagnetic Compatibility [21]. Стандартами, які регулюють електромагнітну якість оточення КА, є Communication Equipment EN55022/32 – Class A [22, 23], та стандартні вимоги до Light Industry IEC 61000-6-3, IEC 61000-6-4 [24, 25], а також певні обмеження та вимоги до методів та типів тестування у вже зазначеному вище стандарті ECSS-E-ST-20-07C.

Стандартним рішенням щодо підвищення відмовостійкості та електромагнітної стійкості є

використання мережевих технологій, побудованих на диференційних електричних сигналах. Бортова мережа супутника вважається достатньо захищеною, якщо дає можливість передавати данні на зазначену стандартом довжину з мінімальною швидкістю передачі від 250 КБод, та при цьому гарантує втрату не більш ніж 1 % від обсягу переданих даних у стандартних умовах експлуатації КА за один сеанс обміну даними усіх підсистем. Таблиця 3 містить залежність експертних балів від рівня стійкості до електромагнітних завад.

Таблиця 3

Таблиця відповідності експертних балів рівню захисту від електромагнітних завад

Бал	Рівень захисту від електромагнітних завад
0	Відсутній захист від електромагнітних завад. Зазвичай це інтерфейси зі звичайним TTL рівнем сигналів та не захищені додатковими ланцюгами захисту. Довжина ліній мережі до 1-2 см
1	Низький захист. Типовий для внутрішньо-схемних інтерфейсних мереж, таких як SPI, UART тощо. Довжина ліній мережі до 5 см.
3	Середній захист. Інтерфейсні лінії мають так звану «підтяжку» до напруги живлення або «землі», але все ще є внутрішньо-схемними. Наприклад – I ² C. Довжина ліній мережі до 10 см.
4	Захист лінії зв'язку довжиною до 1м
5	Потужний захист. Лінії захищені для можливості передавати данні на відстані від декількох метрів до 100 метрів. Вимогами до оточення в такому випадку є загальні індустріальні стандарти IEC 61000-6-3, IEC 61000-6-4

4. Надлишковість (Н) в даних, що передаються, відіграє подвійну роль. Первинна надлишковість, що пов'язана з пріоритетизацією повідомлень та/або адресацією отримувача, – негативну, тому що знижує пропускну здатність каналів зв'язку й збільшує необхідні об'єми пам'яті обчислювальних пристроїв, час та енергію передавання одиниці корисної інформації. Таку надлишковість зазвичай, якщо є можливість, прагнуть знизити шляхом оптимального кодування повідомлень або стиснення даних. Вторинна надлишковість забезпечує безпомилкову передачу повідомлень (контрольна сума, циклічний надлишковий код, бітова надлишковість, Геммінгові коди тощо). У цьому аналізі ми розглядаємо лише первинну надлишковість (таблиця 4).

Таблиця 4

Таблиця відповідності експертних балів
рівню надлишковості

Бал	Первинна надлишковість в відсотках от об'єму повідомлення
1	>30 %
2	20-30 %
3	10-20 %
4	5-10 %
5	<5 %

5. Покриття (П) – це відповідність мережевого протоколу опорній моделі OSI (Open Systems Interconnection) [26], яка є моделлю визначення мережевих протоколів, розподіляючи їх на 7 логічних рівнів (таблиця 5):

- фізичний рівень - Ethernet, USB, Bluetooth
- канальний - Ethernet (MAC), Wi-Fi, PPP;
- мережевий - IP, ICMP, OSPF;
- транспортний - TCP, UDP, SCTP;
- сеансовий - NetBIOS, RPC, PPTP;
- представницький - SSL/TLS, JPEG, MPEG;
- прикладний - HTTP, FTP, SMTP, DNS, SNMP.

Таблиця 5

Таблиця відповідності експертних балів
кількості шарів опорної моделі OSI,
що покривається протоколом

Бал	Кількість шарів опорної моделі OSI, що покривається протоколом
1	Покривається тільки перший фізичний шар моделі
2	1-3
3	4-5
4	6
5	7

6. Швидкість (Ш) передачі даних, це бітова швидкість, або бітрейт, що вимірюється кількістю переданих бітів в одиницю часу (таблиця 6). Бітову швидкість прийнято використовувати до вимірювання ефективної швидкості передачі інформації по каналу, тобто до визначення швидкості передачі «корисної інформації». У системах керування зазвичай використовуються мережі без стиснення даних та з постійною швидкістю потоку даних – CBR (Constant Bit Rate). Для зменшення енерговитрат у авіоніці може бути застосований так званий метод змінної бітової швидкості, але в запропонованій моделі порівняння цей фактор не використовується. Принципово зазначити, що кожна розглянута мережева технологія підтримує змінну швидкість потоку даних засобами налаштування користувацького ПЗ.

Таблиця 6

Таблиця відповідності експертних балів
швидкості передачі даних

Бал	Швидкість передачі даних
1	< 10 КБод
2	10 – 250 КБод
3	250 – 1000 КБод
4	1МБод – 50 МБод
5	>50 МБод

7. Складність (К) програмної реалізації підтримки мережевого інтерфейсу оцінюється через дві складові (таблиця 7):

- наявність підтримки першого рівня моделі OSI периферійним цифровим автоматом мікроконтролера (МК) або центрального процесора (ЦП);
- цикломатичну складність ПЗ, яке потрібно розробити для підтримки заявлених шарів мережевої моделі OSI.

Звісно, будь-яка мережева технологія з більшим покриттям шарів моделі OSI, буде мати більшу цикломатичну складність. Але треба зазначити, що більшість стандартизованих рішень ПЗ мають сталі та відкриті реалізації, які надають змогу відносно швидко та просто переносити прикладні шари моделі OSI на певні конфігурації апаратури.

Таблиця 7

Таблиця відповідності експертних балів
складності програмної реалізації

Бал	Складність програмної реалізації
1	Складна реалізація, що вимагає великої кількості «know-how»
2	Реалізація вимагає розробки складного драйверу, але декодування даних та перевірка їх цілісності надається засобами ЦП
3	Реалізація відносно проста та вимагає адаптування стандартизованих бібліотек до певної периферії ЦП – тобто реалізації HAL (Hardware Abstraction Layer)

4. Вибір стандартизованих мережевих інтерфейсів для порівняння

Прикладним завданням порівняння таких мереж є необхідність у прийнятті технічного рішення щодо вибору бортової мережі наносупутника ХАІ-ІКА, який є класичним наносупутником CubeSat з типовим розміром 3U, а також одним з підзавдань при розробці ТЗ на розробку БО «Боривітер»/«Falco» [27].

Публікація [28] надає інформацію про сучасний стан використання бортових мереж у наносупутниках класу CubeSat (рис. 4).

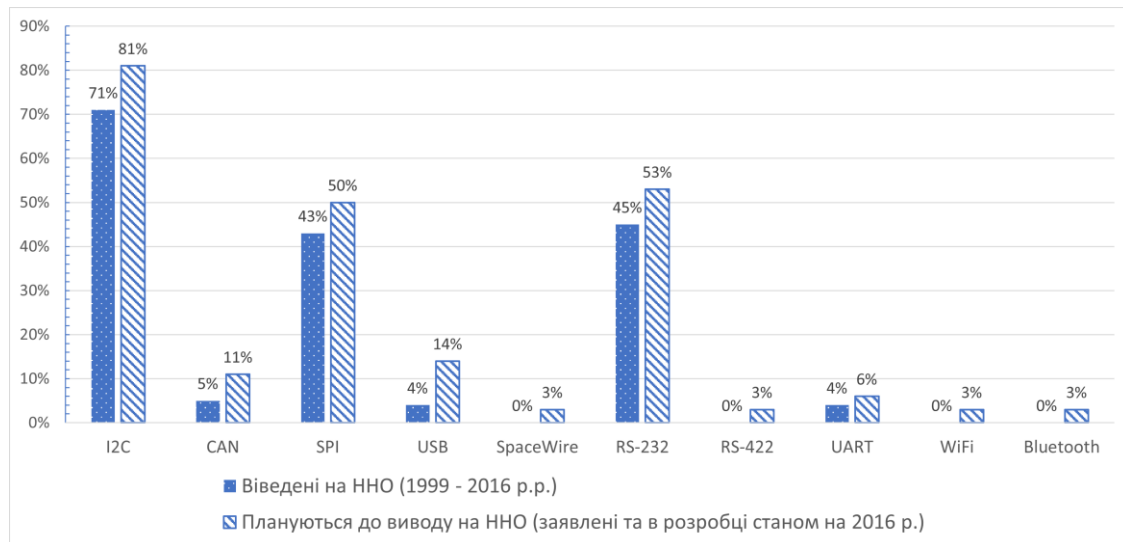


Рис. 4. Відносна присутність реалізації стандартизованих інтерфейсів в бортових мережах CubeSat [28]

У порівнянні з 2016 роком, завдяки розповсюдженню мікропроцесорів з вбудованим трансивером CAN, інтерфейс CAN збільшив свою частку присутності та використання в бортових мережах наносупутників. На сьогодні, частка використання мережевої технології CAN складає приблизно 30% від усіх використаних мережевих технологій.

Взявши до уваги вище зазначене, можна сформулювати наступний список стандартизованих мережевих інтерфейсів для подальшого порівняння:

- I²C – Inter-Integrated Circuit;
- SPI – Serial Peripheral Interface;
- CAN – Controller Area Networks;
- TIA/RS-485 – Recommended Standard 485.

Усі ці інтерфейси масово застосовуються не тільки в наносупутниках та бортовій авіоніці БПЛА та ЛА, але й в промисловості взагалі. Більш складні та професійні мережі космічного призначення як то SpaceWire, MIL-STD-1533, а також «внутрішні» розробки АТ «ХАРТРОН» та ДП «КБ Південне», не будуть розглянуті у статті, оскільки вимагають набагато складнішої архітектури як апаратного, так і програмного забезпечення. Також, типовим рішенням реалізації таких інтерфейсів є застосування засобів ПЛІС (Програмована Логічна Інтегральна Схема), що суттєво впливає на вартість, та має суттєві імпорتنі та експортні обмеження.

Далі розглянуто особливості реалізації чотирьох стандартизованих інтерфейсів, обраних для порівняння.

4.1. Мережева технологія SPI

Інтерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) [10], який було запропонована компанією Motorola у 1980

році, є звичайним синхронним послідовним інтерфейсом та найпростішою технологією, що розглядаються. Існують як напівдуплексні так і повнодуплексні варіанти реалізації цієї технології.

Типовим використанням цієї технології є внутрішньо-схемний зв'язок (в межах однієї друкованої плати) між двома або декількома периферійними пристроями, наприклад – модулі постійної пам'яті, сенсори, мультиплексори входів/виходів тощо.

Мінімальною кількістю абонентів для мережі SPI є два абоненти, один з котрих є Master (ведучий), а другий є Slave (відомий або підлеглий). Технологія SPI вимагає 4-х провідного фізичного інтерфейсу – MOSI (Master Output Slave Input), MISO (Master Input Slave Output), SCLK (System Clock), SS (Slave Select) (рис. 5).

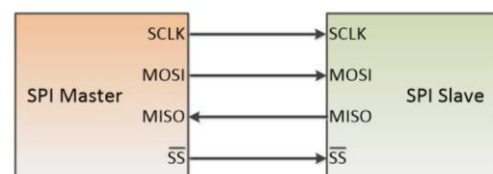


Рис. 5. Мінімальна конфігурація мережі SPI у дуплексній конфігурації

У 2010-х роках, був розроблений інтерфейс Q (Quad) та O (Octal) SPI, де ширина каналу передавання даних стала відповідно 4-х та 8-ми бітною. Цей інтерфейс є певним симбіозом паралельного та послідовного каналу зв'язку. Ці інтерфейси вимагають збільшення кількості ліній зв'язку, тому вони не отримали поширення у авіоніці наносупутників, де завадостійкість та наявність додаткових ланцюгів периферії ЦП/МК є основним дефіцитним фактором.

У випадку декількох відомих абонентів (периферійних засобів) використовується наступна схема комутації (рис. 6).

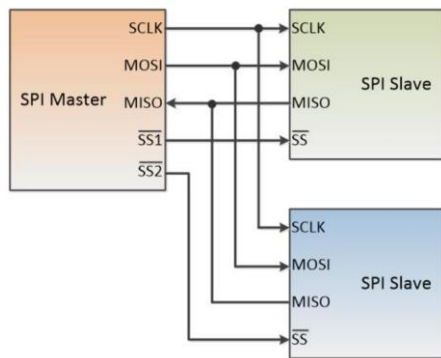


Рис. 6. Схема підключення абонентів мережі SPI з декількома абонентами

Обмін реалізується на рівні примітивних цифрових автоматів та двох зсувних регістрів (рис. 7).

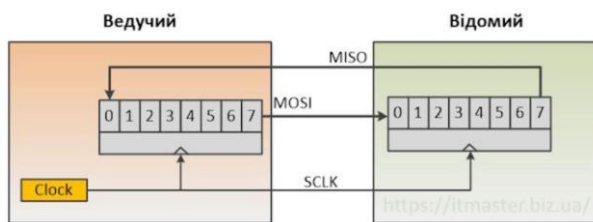


Рис. 7. Приклад реалізації дуплексного синхронного зв'язку між двома периферійними пристроями

Приклад обміну одним байтом між ведучим та відомим пристроєм показаний на рисунку 8.

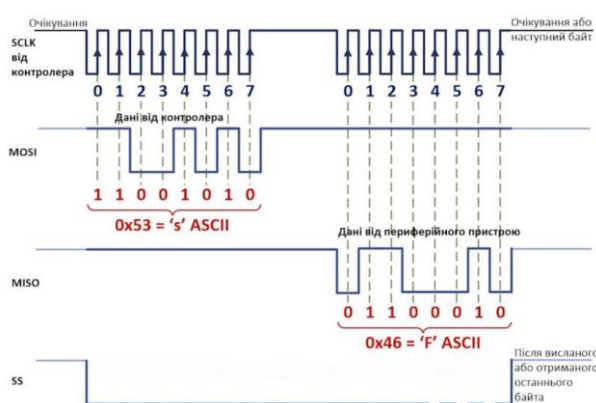


Рис. 8. Приклад обміну даними у мережі SPI

Протокол SPI дозволяє мати одного ведучого (зазвичай мікроконтролер) та декількох відомих абонентів. Для обрання певного відомого абонента для сеансу обміну даними використовується сигнал «Обрати відомого» - SS. Протокол SPI не дозволяє мати

декількох ведучих на одній фізичній лінії.

Протокол SPI реалізує тільки перший (фізичний) рівень мережевої моделі OSI, та навіть не забезпечує контролю цілісності даних, таких як контрольна сума або навіть контроль паритету. Типові пакети даних розділені тільки «старт» та «стоп» послідовностями які надають можливість цифровим автоматам виконати розділення бітового потоку на байти (рис. 8).

Адресація певного з декількох відомих абонентів виконується електричним шляхом, керуючи окремими для кожного відомого абоненту лініями SS.

4.2. Мережева технологія I2C

Інтерфейс I²C (Inter-Integrated Communication), який була запропонована компанією Philips Semiconductors в 1982 році, є також синхронним послідовним інтерфейсом, що дозволяє втілювати мультимастерінг та багато-абонентну мережу. Технологія I²C дозволяє втілити суто напівдуплексний та двонаправлений обмін між абонентами мережі, але використовує всього двох-провідний фізичний інтерфейс – SDA, SCL.

Зазвичай, максимальною швидкістю передавання даних є 400 КБод, та стандартною – 100 КБод. Технологія I²C надає часткову реалізацію OSI моделі до 3-го, мережевого рівня.

Типовим підключенням абонентів до мережі за технологією I²C є наступна конфігурація (рис. 9).

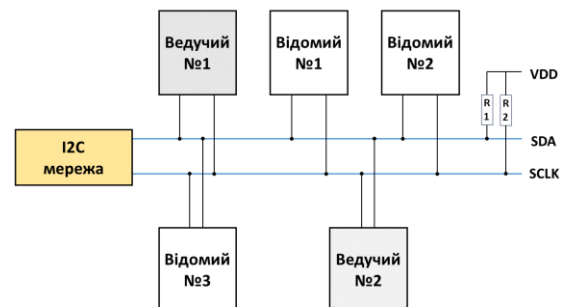
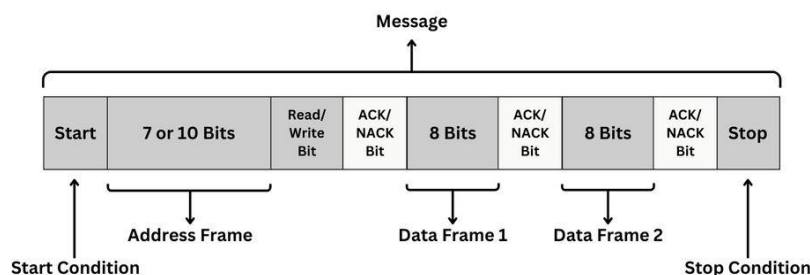


Рис. 9. Типова конфігурація абонентів в мережі I²C

Технологія I²C підтримує більшу ніж SPI кількість шарів мережевої моделі OSI та використовує структуру мережевого повідомлення (рис. 10), яка дозволяє реалізувати більш гнучку багато-абонентну мережу, де кожен абонент має унікальну адресу. Також, на відмінність від більш простих мережевих технологій як то SPI, UART та RS-485, технологія I²C надає можливість контролю якості передачі та прийняття повідомлення на рівні цифрового автомату ЦП. Це надає можливість спростити реалізацію ПЗ мережевого драйвера.

Рис. 10. Структура мережевого повідомлення в I²C

Треба зазначити, що у 2016 році компанія NXP (раніше Philips Semiconductors) запропонувала стандарт dI²C (Differential Inter Integrated Circuit) [29], який надає переваги диференційних електричних інтерфейсів до розглянутого розповсюдженого внутрішньо-схемного інтерфейсу I²C. Найбільш поширеними перевагами нового протоколу dI²C є його стійкість до електромагнітних завад та стійкість до проблем зсунутих рівнів «землі» у випадку між-платного з'єднання. Наразі, запропонований інтерфейс ще не отримав достатнього розповсюдження та не був знайдений в розглянутих авторами існуючих COTS рішеннях авіоніки наносупутників.

4.3. Мережева технологія CAN

Інтерфейс CAN (Controller Area Network), який був запропонований компанією Robert Bosch GmbH у 1986 році, був первинно розробленим для втілення швидкого цифрового зв'язку в автомобілях. Інтерфейс задовольняє наступні вимоги: стійкість до електромагнітних завад, мультимастерінг, арбітраж та низька латентність в системі реального часу для керування вузлами та агрегатами автомобіля.

Мережа CAN є послідовним асинхронним напівдуплексним інтерфейсом зв'язку з шириною каналу в 1 біт. На відмінність від інших розглянутих в цієї статті мережевих технологій, CAN це мережа з диференційним електричним рівнем сигналів, що надає можливість працювати в системах з різною напругою живлення, а також мати найміцніший захист від електромагнітних завад.

В 1991 році був запропонований стандарт CAN 2.0, основною метою якого стало формулювання 29-бітного ідентифікатора абоненту мережі, замість 11-бітного. Згодом у 2012 році, був запропонований стандарт CAN FD 1.0 де FD означає Flexible Data-Rate (тобто гнучку швидкість передачі даних).

Після успішного впровадження технології в авто-індустрію та застосування у мільйонах автовок по всьому світу був створений консорціум, який запропонував у 1993 році розгалуження стандарту на два рівні за моделлю OSI – фізичний та рівень даних.

Фізичний рівень був викладений у стандарті ISO 11898-2, рівень даних у ISO 11898-1. Пізніше був впроваджений третій стандарт – ISO 11898-3 який стандартизував використання CAN у завданнях функціональної безпеки.

Технологія CAN має найбільш поширену кількість варіантів реалізації у прикладних задачах, таких як космос – CANAerospace, SpaceCAN, libCSP та інші, авіації – ARINC 825/826, GORE CAN, автоматизації – CANOpen, CanFestival, DeviceNet тощо.

На фізичному рівні CAN використовує виту пару з сигналами CAN L та CAN H. Уся «шина» мережі CAN термінована двома резисторами з опором 120 Ом з обох боків (рис. 11). Це необхідно для коректного навантаження мережі та запобігання утворення стоячих хвиль.

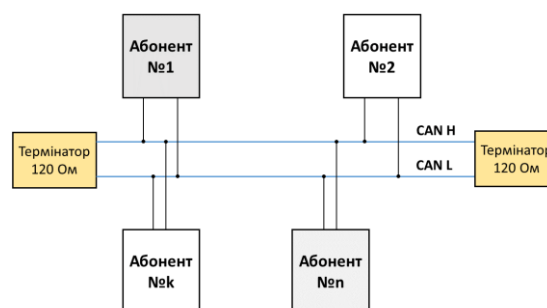


Рис. 11. Топологія мережі CAN

Мережева технологія CAN може бути використана як суто звичайний фізичний рівень – тобто звичайна диференційна лінія зв'язку, так і у поєднанні з іншими рівнями мережевої моделі OSI, а саме у відповідності до стандарту CAN 2.0A/B. Ця стаття не порівнює суто фізичний рівень технології, а одразу розглядає відповідний стандарт CAN 2.0A.

Типовий інформаційний пакет даних в мережевому обміні між абонентами мережі CAN має достатньо велику надлишковість, особливо у випадках обміну малими обсягами даних (рис. 12). Корисне навантаження одного мережевого пакету CAN лежить в межах 0 ... 8 байтів.

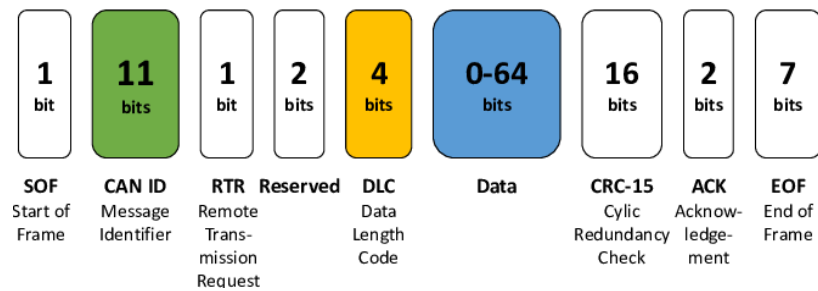


Рис. 12. Структура мережевого повідомлення в CAN

4.4. Мережева технологія Recommended Standard 485 (RS-485)

Інтерфейс, який був розроблений та стандартизований компанією Electronic Industries Association (EIA) у 1983 році, є найстарішою та найрозповсюдженішою мережевою технологією у галузі АСУ ТП. Стійкість до електромагнітних завад, невибагливість до фізичної якості дротів та простота впровадження технології на рівні ПЗ – зробила цю технологію дуже популярною і в інших галузях.

Технологія є логічним продовженням популярного послідовного периферійного інтерфейсу RS-232 який був започаткований у 1960-х роках та активно використовувався в персональних комп'ютерах аж до часів винаходу Universal Serial Bus (USB) у 1990-х.

Пізніше відбулося злиття двох сертифікуючих компаній – Electronic Industries Association (EIA) та Telecommunications Industry Association (TIA) та було вирішено назвати мережеву технологію TIA-485, яка до сих пір активно іменується індустрією як RS-485.

До переваг технології TIA-485 можна віднести багато-абонентність (до 32 абонентів), диференційно-балансований сигнальний рівень передавання та велику відстань передавання даних (до ~1,2 км).

Стандарт TIA-485 специфікує тільки фізичний рівень за моделлю мережевих технологій OSI, та є зазвичай напівдуплексним асинхронним послідовним каналом передавання даних (рис. 13).

Так як технологія TIA-485 потребує всього дві лінії для передавання даних то вона є дуже ефективною з точки зору вартості застосування та має дуже просту реалізацію як на апаратному, так і на програмному рівнях.

Мережевий протокол TIA-485 специфікує наступні характеристики першого рівня моделі OSI: рівні напруги для передавання «0» та «1», специфікації до трансиверів приймання та передавання даних, максимальну довжину кабелів передавання та стійкість до електромагнітних завад. Ширина каналу зв'язку – 1 біт.

Існує велика кількість програмних протоколів (OSI 2) реалізації зв'язку між абонентами мережі TIA-485, але найпоширенішим є протокол ModBus RTU [30], який дозволяє організувати адресний мережевий простір за моделлю – один ведучий та багато відомих абонентів. Другим за популярністю, протоколом передавання даних у мережі TIA-485, є широківідомий Profibus, запропонований компанією Siemens. Найбільшу популярність все ж таки має ModBus RTU, який є відкритим протоколом на відмінність від пропрієтарного комерційного Profibus.

На відміну від протоколу CAN, TIA-485 не вирішує проблем арбітражу, та мультимастерінгу, реалізація фізичного інтерфейсу не надає можливості «перехоплення» доступу до електричного каналу передачі, що у свій час відзначається меншими енерговитратами на створення логічних «0» та «1». Це у свій час робить TIA-485 більш енергетично ефективним ніж CAN.

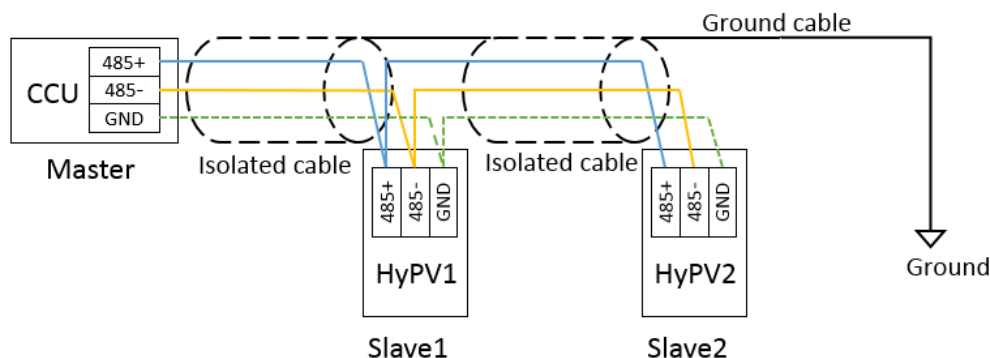


Рис. 13. Типова мережа абонентів за технологією TIA-485

В межах цієї статті пропонується порівняння суто фізичного рівня ТІА-485, так як більш верхні рівні OSI моделі не стандартизовані.

5. Результати

Для проведення експертизи залучено 5 фахівців організацій ТОВ «ЕКТОС-Україна», ТОВ «ТЕХТО-ІФ» та ТОВ «Фалко-Інжиніринг», від яких отримано оцінки одного суб'єктивного показника - К (складність програмної реалізації мережевої технології). Інші показники не потребують узгодження, оскільки визначаються стандартами та специфікаціями інтерфейсів (таблиця 8, рис. 14).

Збір да подальше опрацювання наданих балів показників було здійснено методом Делфі.

Консолідацію експертних оцінок, яка є важливим етапом узгодження оцінок для прийняття рішення, виконано медіанним методом. В цьому методі використовується медіана (середнє значення в ряду), що дозволяє зменшити вплив екстремальних викидів в оцінках.

В якості метода експертного оцінювання важливості показників використано пряме призначення ваг, коли експерти безпосередньо присвоюють ваги

кожному показнику, виходячи зі свого досвіду та знань. Консолідацію оцінок виконано медіанним методом, як і в попередньому випадку. Після нормалізації та приведення суми ваг до одиниці для кожного експерта було отримано таблицю 9.

Таблиця 8

Результати експертного оцінювання показників

Показники	Інтерфейси			
	SPI	I ² C	CAN	TIA-485
Е (Енергоефективність)	4	3	2	3
М (Мультимастерінг)	0	3	5	0
С (Стійкість до електромагнітних завад)	1	3	5	5
Н (Надлишковість)	5	4	3	5
П (Покриття у відповідності до мережевої моделі OSI)	1	1	4	1
Ш (Швидкість передавання даних)	4	3	3	3
К (складність реалізації мережевої технології засобами ПЗ)	3	3	1	2

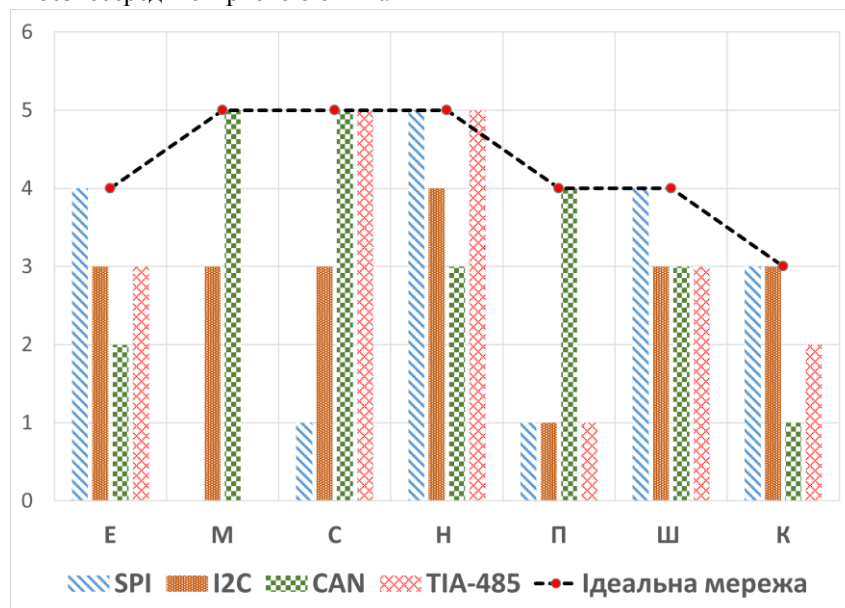


Рис. 14. Діаграма оцінки показників стандартизованих інтерфейсів в порівнянні з «ідеальною» мережею

Таблиця 9

Результати експертного визначення ваг показників

Параметр моделі	Питома вага у важливості для проектування авіоніки наносупутників CubeSat
Е (Енергоефективність)	0,3
М (Мультимастерінг)	0,15
С (Стійкість до електромагнітних завад)	0,15
Н (Надлишковість)	0,1
П (Покриття у відповідності до мережевої моделі OSI)	0,15
Ш (Швидкість передавання даних)	0,1
К (складність реалізації мережевої технології засобами ПЗ)	0,05

Підсумкова таблиця 10 впорядковує інтегральний показник ефективності стандартизованих інтерфейсів для використання в бортовій мережі наносупутників CubeSat як зважену (див. таблицю 9) суму результатів експертного оцінювання показників (див. таблицю 8), тим самим визначає пріоритет, тобто доцільність та необхідність апаратно-програмної реалізації певних інтерфейсів в бортовій мережі наносупутника ХАІ-ІКА.

Таблиця 10

Доцільність та необхідність апаратно-програмної реалізації інтерфейсів в бортовій мережі наносупутника ХАІ-ІКА

Пріоритет	Інтерфейс	Загальний бал
1	CAN	3,35
2	I ² C	2,8
3	TIA-485	2,7
4	SPI	2,55

Висновки

Розроблений метод оцінювання стандартизованих мережевих інтерфейсів для використання в бортовій мережі наносупутників CubeSat надає можливість їх системного порівняння та обґрунтування вибору. Всі розглянуті стандартизовані мережеві інтерфейси широко розповсюджені в індустрії, дозволяють вирішити завдання проектування авіоніки наносупутника, хоча і мають певні недоліки. Навіть порівнюючи дві класичні внутрішньосхемні мережеві технології – SPI та I²C, з більш складними та між-модульними технологіями – CAN та TIA-485, принципових відмінностей в проектуванні ПЗ та АЗ наносупутників класу CubeSat не було знайдено.

Базуючись на загальному балу порівняння технологій, автори рекомендують використовувати мережеві технології CAN та I²C для побудови бортової мережі наносупутника ХАІ-ІКА. Ця рекомендація буде втілена в побудову системної мережевої архітектури як наносупутника ХАІ-ІКА, так і БО «Борівітер»/«Falco». Слід зазначити, що оскільки в ТЗ на БО «Борівітер»/«Falco» зазначена вимога максимальної підтримки COTS компонентів, то мережеві технології TIA-485 та SPI мають також підтримуватись за наявності доступної периферії ЦП. Це надасть можливість суттєво розширити як сумісність БО з іншими модулями авіоніки, так і збільшити вірогідність подальшого застосування БО в різноманітних за складністю та новизною наносупутниках.

Оскільки енергоефективність є метрикою з найбільшою питомою вагою, то для її подальшого пропрацювання планується більш детально вивчити витрати енергії на керування лінією зв'язку та на засоби

ПЗ. Аналіз складності ПЗ, та необхідний на його роботу процесорний час, і будуть чинниками подальшого порівняння ефективності мережевих технологій.

Також окремо слід зазначити, що коротко розглянутий в статті диференційний інтерфейс dI²C потребує подальшого аналізу як основи доволі потужного та сучасного рішення для внутрішньосхемного та міжблочного з'єднань засобів авіоніки у оточеннях з великим рівнем електромагнітних завад.

Внесок авторів: концептуалізація, методологія – **Олександр Любимов**; постановка завдання, аналіз – **Ігор Туркін**; розробка моделі порівняння – **Олександр Любимов**; аналіз результатів, візуалізація – **Олександр Любимов, Ігор Туркін**; написання – підготовка чернетки, написання – рев'ю та редагування – **Олександр Любимов, Ігор Туркін**.

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 цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

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

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Подяки

Автори дякують колективам компаній ТОВ «ЕКТОС-Україна», ТОВ «ТЕХТО-ІФ» та ТОВ «Фалко-Інжиніринг» за надані та вироблені прототиपी БО «Борівітер»/«Falco» які розглядались в даній статті.

Література

1. Developer resources [Electronic resource] / CubeSat. – Available at: <https://www.cubesat.org/cubesatinfo> (accessed: 15.03.2024).

2. *Small satellites for space science: A COSPAR scientific roadmap [Text]* / R. M. Millan, R. von Steiger, M. Ariel, S. Bartalev, M. Borgeaud, S. Campagnola, J. C. Castillo-Rogez, R. Fléron, V. Gass, A. Gregorio, D. M. Klumpar, B. Lal, M. Macdonald, J. U. Park, V. S. Rao, K. Schilling, G. Stephens, A. M. Title, & J. Wu // *Advances in Space Research*. – 2019. – Vol. 64, iss. 8. – P. 1466–1517. DOI: 10.1016/J.ASR.2019.07.035.
3. Moeller, G. *Tomographic Radio Occultation Methods Applied to a Dense Cubesat Formation in Low Mars Orbit [Text]* / G. Moeller, C. O. Ao, & A. J. Mannucci // *Radio Science*. – 2021. – Vol. 56, iss. 7. – Article no. e2020RS007199. – P. 71-99. DOI: 10.1029/2020RS007199.
4. Swartwout, M. *CubeSat Database [Electronic resource]*. – Available at: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/cubesat-database>. (accessed 15.06.2022).
5. Albalooshi, A. *Fault Analysis and Mitigation Techniques of the I2C Bus for Nanosatellite Missions [Text]* / A. Albalooshi, A.-H. M. Jallad, & P. R. Marpu // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 34709-34717. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3262410.
6. Liubimov, O. *Data Model and Methods for Ensuring the Reliability and Relevance of Data for the CubeSat Projects [Text]* / O. Liubimov, & I. Turkin // *12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. – Athens, Greece, 2022. – P. 1-7. DOI: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018658.
7. Liubimov, O. *Use Of Open-Source Cots/Mots Hardware And Software Platforms For The Build Up Of The Cubesat Nanosatellites [Text]* / O. Liubimov, & M. Liubimov // *Journal of Rocket-Space Technology (online)*. – 2023. – Vol. 31, iss. 4. – P. 138–147. DOI: 10.15421/452318.
8. Jung, L. *TRACE - CubeSat [Electronic resource]*. – Available at: <https://tudsat.space/section/cubesat/>. (accessed: 15.03.2024).
9. Mikhaylov, K. *Evaluation of Power Efficiency for Digital Serial Interfaces of Microcontrollers [Text]* / K. Mikhaylov, & J. Tervonen // *5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*. – Istanbul, Turkey, 2012. – P. 1-5. DOI: 10.1109/NTMS.2012.6208716.
10. *PC-bus specification and user manual [Electronic resource]* / NXP Semiconductors. – Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>, (accessed: 15.03.2024).
11. *KeyStone Architecture. Serial Peripheral Interface (SPI). User Guide. (Texas Instruments) [Electronic resource]*. – Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprugp2>. (accessed: 15.03.2024).
12. *KeyStone Architecture. Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). User Guide. (Texas Instruments) [Electronic resource]*. – Available at: <https://www.ti.com/lit/sprugp1>. (accessed: 15.03.2024).
13. *Ke Ao: A Low-Cost 1U CubeSat for Aerospace Education and Research in Hawaii [Text]* / L D. Young, M. A. Nunes, A. Trimble, C. Amendola, A. M. Brandt, H. Patton, A. Perez, R. Terry, W. Tuifua, D. Whittingham, K. Williams, & A. Imai-Hong // *35th Annual Small Satellite Conference*, Logan, UT, USA. – 2021. – P. 2-44. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250042383> (accessed 24.03.2024)
14. *Design of the fault tolerant command and data handling subsystem for ESTCube-1 [Text]* / K. Laizans, I. Sünter, K. Zalite, H. Kuuste, M. Valgur, K. Tarbe, V. Allik, G. Olentšenko, P. Laes, S. Lätt, & M. Noorma // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. – Vilnius, Estonia, 2014. – Vol. 63, iss. 2S. – P. 222-231. DOI: 10.3176/proc.2014.2S.03.
15. *KAUSAT-5 Development and Verification based on 3U Cubesat Standard Platform [Text]* / S. Song, S.-Y. Lee, H.-R. Kim, & Y. Chang // *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*. – 2017. – Vol. 45, iss. 8. – P. 686-696. DOI: 10.5139/JKSAS.2017.45.8.686.
16. *CAN Specification Version 2.0. Bosch [Electronic resource]*. – Available at: <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>. (accessed: 15.03.2024).
17. *ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 – SpaceWire – Links, nodes, routers, and networks [Electronic resource]* / European Cooperation for Space Standardization. – Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50-12c-rev-1-spacewire-links-nodes-routers-and-networks-15-may-2019/>, (accessed: 15.03.2024).
18. *Review and rationale of MIL-STD-1553 A and B [Electronic resource]* / Data Device Corporation. – Available at: <https://www.milstd1553.com/wp-content/uploads/2012/12/MIL-STD-1553B.pdf>. (accessed: 15.03.2024).
19. Alanazi, A. *Statistical Analysis of CubeSat Mission Failure [Electronic resource]* / A. Alanazi, & J. Straub // *32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*. – 2018. – 8 p. – Available at: https://www.researchgate.net/publication/350833992_Statistical_Analysis_of_CubeSat_Mission_Failure. (accessed: 15.03.2024).
20. *ECSS-E-ST-50C – Communications [Electronic Resource]* / European Cooperation for Space Standardization. – Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50c-communications/>. (accessed: 15.03.2024).
21. *ECSS-E-ST-20-07C Rev.2 – Electromagnetic compatibility [Electronic resource]* / European Cooperation for Space Standardization. – Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/>. (accessed: 15.03.2024).

22. EN 50561-1:2013(MAIN). *Power line communication apparatus used in low-voltage installations - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement - Part 1: Apparatus for in-home use* [Electronic resource]. – Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/4e0023ef-9771-4e41-bddf-7c7319565ec2/en-50561-1-2013>. (accessed: 15.03.2024).

23. EN 55032:2015 (Main). *Electromagnetic compatibility of multimedia equipment - Emission Requirements* [Electronic resource]. – Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fd8bcfa9-037a-4774-808a-ccf917081aee/sist-en-55032-2015>, (accessed: 15.03.2024).

24. IEC 61000-6-3:2020. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic standards - Emission standard for equipment in residential environments* [Electronic resource] / International Electrical Committee. – Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/27413>. (accessed: 15.03.2024).

25. IEC 61000-6-4:2018. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-4: Generic standards - Emission standard for industrial environments* [Electronic resource] / International Electrical Committee. – Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/26622>. (accessed: 15.03.2024).

26. 35.100. *Open systems interconnection (OSI)* [Electronic resource] / International Standardization Organization. – Available at: <https://www.iso.org/ics/35.100/x/>. (accessed: 15.03.2024).

27. Сторінка-презентація ДКР авторів статті з розробки БО «Борівітер»/«Falco» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.falco.engineering/> (дата звернення: 15.03.2024).

28. Bouwmeester, J. *Survey on the implementation and reliability of CubeSat electrical bus interfaces* [Text] / J. Bouwmeester, M. Langer, & E. Gill // *CEAS Space Journal*. – 2017. – Vol. 9. – P. 163–173. DOI: 10.1007/s12567-016-0138-0.

29. UM10856. *User manual for dI2C demo board*. [Electronic resource] / NXP Semiconductors. – Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10856.pdf>. (accessed: 15.03.2024).

30. MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.0 [Electronic resource] / MODBUS.ORG. – Available at: https://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1.pdf. (accessed: 15.03.2024).

References

1. Developer resources. Available at: <https://www.cubesat.org/cubesatinfo>. (Accessed 15 March 2024).

2. Millan, R. M., von Steiger, R., Ariel, M., Bartalev, S., Borgeaud, M., Campagnola, S., Castillo-Rogez, J. C., Fléron, R., Gass, V., Gregorio, A., Klumpar, D. M., Lal, B., Macdonald, M., Park, U. J., Rao, V. S., Schilling, K., Stephens, G., Title, A. M., & Wu, J. Small satellites for space science. *Advances in Space Research*, 2019, vol. 64, iss. 8, pp. 1466–1517. DOI: 10.1016/J.ASR.2019.07.035.

3. Moeller, G., Ao, C. O., & Mannucci, A. J. (2021). Tomographic Radio Occultation Methods Applied to a Dense Cubesat Formation in Low Mars Orbit. *Radio Science*, 2021, vol. 56, iss. 7, article no. e2020RS007199, pp. 71-99. DOI: 10.1029/2020RS007199.

4. Swartwout, M. *CubeSat Database*. Available at: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/cubesat-database>, (Accessed 15 March 2024).

5. Albalooshi, A., Jallad, A.-H. M., & Marpu, P. R. Fault Analysis and Mitigation Techniques of the I2C Bus for Nanosatellite Missions. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 34709-34717. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3262410.

6. Liubimov, O., & Turkin, I. Data Model and Methods for Ensuring the Reliability and Relevance of Data for the CubeSat Projects. *12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2022, pp. 1-7. DOI: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018658.

7. Liubimov, O., & Liubimov, M. Use of open-source Cots/Mots hardware and software platforms for the build up of the CubeSat nanosatellites. *Journal of Rocket-Space Technology*, 2023, vol. 31, iss. 4, pp. 138-147. DOI: 10.15421/452318.

8. Jung, L. *TRACE - CubeSat*. Available at: <https://tudsat.space/section/cubesat/>. (Accessed 15 March 2024).

9. Mikhaylov, K., & Tervonen, J. Evaluation of Power Efficiency for Digital Serial Interfaces of Microcontrollers. *5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, Istanbul, Turkey, 2012, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NTMS.2012.6208716.

10. *I²C-bus specification and user manual*. NXP Semiconductors. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>. (Accessed 15 March 2024).

11. KeyStone Architecture. *Serial Peripheral Interface (SPI). User Guide*. (Texas Instruments). Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprugp2>. (Accessed 15 March 2024).

12. KeyStone Architecture. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). User Guide*. (Texas Instruments). Available at: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprugp1>. (Accessed 15 March 2024).

13. Young, L. D., Nunes, M. A., Trimble, A., Amendola, C., Brandt, A. M., Patton, H., Perez, A., Terry, R., Tuifua, W., Whittingham, D., Williams, K., &

- Imai-Hong, A. Ke Ao: A Low-Cost 1U CubeSat for Aerospace Education and Research in Hawaii. *35th Annual Small Satellite Conference*, Logan, UT, USA, 2021, pp. 2-44. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250042383>. (Accessed 24 March 2024)
14. Laizans, K., Sünter, I., Zalite, K., Kuuste, H., Valgur, M., Tarbe, K., Allik, V., Olentšenko, G., Laes, P., Lätt, S., & Noorma, M. Design of the fault tolerant command and data handling subsystem for ESTCube-1. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, Vilnius, Estonia, 2014, vol. 63, iss. 2S, pp. 222-231. DOI: 10.3176/proc.2014.2S.03.
15. Song, S., Lee, S.-Y., Kim, H.-R., & Chang, Y. KAUSAT-5 Development and Verification based on 3U Cubesat Standard Platform. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2017, vol. 45, iss. 8, pp. 686-696. DOI: 10.5139/JKSAS.2017.45.8.686.
16. *CAN Specification Version 2.0. Bosch*. Available at: <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>. (Accessed 15 March 2024).
17. *ECSS-E-ST-50-12C Rev.1 – SpaceWire – Links, nodes, routers, and networks*. European Cooperation for Space Standardization. Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50-12c-rev-1-spacewire-links-nodes-routers-and-networks-15-may-2019/>. (Accessed 15 March 2024).
18. *Review and rationale of MIL-STD-1553 A and B*. Data Device Corporation. Available at: <https://www.milstd1553.com/wp-content/uploads/2012/12/MIL-STD-1553B.pdf>. (Accessed 15 March 2024).
19. Alanazi, A., & Straub, J. Statistical Analysis of CubeSat Mission Failure. *32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2018. 8 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/350833992_Statistical_Analysis_of_CubeSat_Mission_Failure. (Accessed 15 March 2024).
20. *ECSS-E-ST-50C – Communications*. European Cooperation for Space Standardization. Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-50c-communications/>. (Accessed 15 March 2024).
21. *ECSS-E-ST-20-07C Rev.2 – Electromagnetic compatibility*. European Cooperation for Space Standardization. Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/>. (Accessed 15 March 2024).
22. *EN 50561-1:2013(MAIN). Power line communication apparatus used in low-voltage installations - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement - Part 1: Apparatus for in-home use*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/4e0023ef-9771-4e41-bddf-7c7319565ec2/en-50561-1-2013>. (Accessed 15 March 2024).
23. *EN 55032:2015 (Main). Electromagnetic compatibility of multimedia equipment - Emission Requirements*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fd8bcfa9-037a-4774-808a-ccf917081aee/sist-en-55032-2015>. (Accessed 15 March 2024).
24. *IEC 61000-6-3:2020. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-3: Generic standards - Emission standard for equipment in residential environments*. International Electrical Committee. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/27413>. (Accessed 15 March 2024).
25. *IEC 61000-6-4:2018. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-4: Generic standards - Emission standard for industrial environments*. International Electrical Committee. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/26622>. (Accessed 15 March 2024).
26. *35.100. Open systems interconnection (OSI)*. International Standardization Organization. Available at: <https://www.iso.org/ics/35.100/x/>. (Accessed 15 March 2024).
27. Storinka-prezentatsiya DKR avtoriv statii z rozrobky BO «Boryviter»/«Falco» [Page-presentation of the R&D work of the authors of the article on the development of the on-board computer “Boriviter”/“Falco”]. Available at: <https://www.falco.engineering/>. (Accessed 15 March 2024).
28. Bouwmeester, J., Langer, M., & Gill, E. Survey on the implementation and reliability of CubeSat electrical bus interfaces. *CEAS Space Journal*, 2017, vol. 9, pp. 163-173. DOI: 10.1007/s12567-016-0138-0.
29. *UM10856. User manual for dI2C demo board*. NXP Semiconductor. Available at: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10856.pdf>. (Accessed 15 March 2024).
30. *MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.0*. MODBUS.ORG. Available at: https://www.modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1.pdf. (Accessed 15 March 2024).

Received 20.05.2024, Accepted 15.06.2024

MULTICRITERIA EVALUATION OF INDUSTRY-KNOWN INTERFACES OF ONBOARD NETWORK OF CUBESAT NANOSATELLITES

Oleksandr Liubimov, Ihor Turkin

The technology of building CubeSat-class nanosatellites has created a breakthrough in exploring near space for research and education. The availability of commercial solutions for the rapid integration of hardware and software

of a CubeSat under development and the launch of such a nano-satellite into Earth orbit as a parasitic payload has made this technology accessible and attractive to universities worldwide. Despite this popularity, the statistics of nanosatellite failures after launch require a systematic approach to their design and construction and the selection of off-the-shelf (COTS) components. The **object of the study is to determine the** overall efficiency of standardized network interfaces when used in the onboard network of CubeSat nanosatellites. The **subject of the article** is a method for comprehensively evaluating the effectiveness of standardized network interfaces for data exchange in the onboard network of CubeSat nanosatellites, taking into account typical scenarios for data and command exchange. The **aim of the study was** to substantiate the method of expert evaluation of the technical efficiency of standardized network interfaces for data exchange in the onboard network of CubeSat nanosatellites, taking into account the following factors: energy efficiency, multi-mastering capability, resistance to electromagnetic interference, redundancy, coverage following the OSI network model, data transmission speed, and complexity of network technology implementation by software. **Objectives:** To analyze modern methods of organizing onboard avionics networks of nanosatellites of the CubeSat class, formulate an expert comparison model, and compare the selected information onboard networks following the model and the list of selected networks and their protocols. **Results:** an expert model consisting of a 7-factor comparison was created, modern and most widely used in the industry onboard networks were selected, and each network was compared according to the proposed model. **Conclusions:** The two most common and efficient models, I²C and CAN, were selected as recommended for use in the avionics of the KhAI1Sat nanosatellite and the “Boryviter”/”Falco” onboard computer being developed by the authors. Although the difference in power consumption between these two types of networks is significant, each has certain advantages in terms of noise immunity, multicasting, and application.

Keywords: energy efficiency; on-board network; CAN; I²C; dI²C; SPI; TIA-485; expert model; Boryviter; Falco; on-board computer; avionics; nanosatellite; KhAI1Sat; OSI; redundancy; CubeSat.

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

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

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

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