

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Любімова Олександра Вікторовича
на тему «Адаптивні методи, алгоритми та програмні засоби балансування
реактивності та енергоспоживання бортових обчислювачів
наносупутників CubeSat»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення**

Публічна презентація дисертаційної роботи Любімова Олександра Вікторовича на тему «Адаптивні методи, алгоритми та програмні засоби балансування реактивності та енергоспоживання бортових обчислювачів наносупутників CubeSat» відбулася на засіданні кафедри Інженерії програмного забезпечення, протокол № 6 від 22.01.2026 р. На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи ухвалено такий висновок (результати голосування – одноголосно) про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації:

1. Актуальність теми дослідження. Актуальність досліджень, що проводилися дисертантом з розроблення моделей, методів і програмних засобів балансування реактивності та енергоспоживання бортових обчислювачів наносупутників CubeSat, обумовлена викладеними нижче аргументами.

1. Зростанням складності та енергетичної вразливості бортових обчислювачів наносупутників класу CubeSat. Сучасний етап розвитку космічних технологій характеризується стрімким зростанням кількості місій наносупутників класу CubeSat, які дедалі частіше застосовуються не лише в освітніх і демонстраційних проектах, а й у комерційних, наукових та оборонних системах. Розширення функціональності таких апаратів супроводжується ускладненням бортового програмного забезпечення, зростанням обчислювального навантаження та підвищенням вимог до реактивності систем керування. Водночас CubeSat функціонують в умовах жорстко обмеженого енергетичного бюджету, що робить бортовий обчислювач одним із найбільш критичних елементів системи. Практика експлуатації показує, що значна частина відмов місій пов'язана не з апаратними дефектами, а з неузгодженістю алгоритмів керування енергоспоживанням і реактивністю програмного забезпечення, що зумовлює необхідність розробки нових формалізованих підходів до їх балансування.

2. Обмеженістю відомих сьогодні підходів, орієнтованих на ізольований розгляд часових або енергетичних характеристик. Аналіз сучасних

наукових публікацій і галузевих рішень свідчить, що більшість наявних методів проектування бортового програмного забезпечення зосереджені або на забезпеченні часової коректності в системах реального часу, або на оптимізації енергоспоживання апаратної платформи. При цьому реактивність програмного забезпечення, обчислювальна продуктивність і енергоспоживання здебільшого розглядаються як незалежні характеристики, що призводить до фрагментарних та емпіричних рішень. Відсутність комплексних математичних моделей, які дозволяють формалізовано описувати взаємозв'язок між цими характеристиками та використовувати його для адаптивного керування режимами роботи бортового обчислювача, є суттєвою науково-прикладною прогалиною.

3. Необхідністю адаптивного керування в умовах нестаціонарних навантажень і обмежених обчислювальних ресурсів. Реальні умови експлуатації наносупутників характеризуються нестаціонарністю обчислювального навантаження, зумовленою зміною режимів місії, орієнтації апарата, активністю корисного навантаження та комунікаційних підсистем. У таких умовах статичні методи конфігурації бортового програмного забезпечення виявляються недостатньо ефективними. Разом із тим, застосування обчислювально складних методів оптимізації або машинного навчання часто є неможливим через обмежені ресурси мікроконтролерних платформ авіоніки. Це зумовлює актуальність розробки легковагових адаптивних методів, здатних працювати в режимі реального часу та забезпечувати узгодження вимог до реактивності з енергетичними обмеженнями без порушення детермінованості системи.

4. Практичною значущістю проблеми для національних і міжнародних космічних програм. Досвід експлуатації вітчизняних і міжнародних місій малих космічних апаратів підтверджує, що втрата навіть одного наносупутника має суттєві наукові, фінансові та репутаційні наслідки. Для України, яка розвиває власний космічний потенціал в умовах обмежених ресурсів, підвищення надійності та енергоефективності бортових обчислювальних систем є особливо важливим завданням. Запропоновані в дисертації методи та програмні засоби орієнтовані на використання комерційно доступних апаратних платформ і відкритих програмних фреймворків, що робить результати дослідження актуальними не лише з наукової, а й з практичної точки зору, з можливістю їх впровадження в реальних проєктах CubeSat та безпілотних системах.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота автора над дисертацією проводилася на кафедрі інженерії програмного забезпечення ХАІ відповідно до планів наукових досліджень Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» в рамках

держбюджетних науково-дослідницьких робіт: НДР «Технології розробки програмного забезпечення для платформ екосистем Інтернету речей і хмарних сервісів, терміни виконання» (ДР № 0121U109086 2022-2023 рр.); НДР «Технологія розроблення програмного забезпечення для інноваційних систем спеціального та подвійного призначення» (ДР № 0124U001426, 2024-2026 рр.); гранту національного фонду досліджень України «Експериментальне відпрацювання бортового обчислювача безпілотного літального апарата подвійного призначення» (ДР № 0124U004847, 2024-2025 рр.).

3. Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації одержані такі нові наукові результати:

- вперше розроблено комплексну математичну модель для розрахунку енергетичних витрат бортового обчислювача, обчислювальної продуктивності та реактивності бортового програмного забезпечення, яка на відміну від існуючих дозволяє врахувати всі взаємозв'язки між характеристиками системи та забезпечує всебічний аналіз бортових обчислювачів;

- вперше розроблено метод ідентифікації параметрів комплексної математичної моделі для розрахунку енергетичних витрат, обчислювальної продуктивності та реактивності бортового програмного забезпечення, який на відміну від існуючих рішень використовує рекурсивний метод найменших квадратів, що забезпечує онлайн-ідентифікацію параметрів моделі з урахуванням нестационарності навантаження та обмежених обчислювальних ресурсів;

- вперше удосконалено метод адаптивного регулювання режимів роботи бортових обчислювачів наносупутників CubeSat, який на відміну від існуючих використовує концептуальне рішення послаблених систем жорсткого реального часу, що дозволяє забезпечити гнучкість і баланс між реактивністю бортового програмного забезпечення та енергетичною ефективністю обчислювача.

- дістало подальшого розвитку методичне, алгоритмічне та програмне забезпечення системних програмних засобів бортових обчислювачів наносупутників CubeSat в напрямку зменшення енергетичних витрат бортового обчислювача в умовах обмежень систем реального часу та забезпечення реактивності бортових систем.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи полягає в тому, що основні наукові положення дисертації реалізовано у вигляді інженерних алгоритмів і відповідних програмних засобів. Розроблений метод адаптивного регулювання режимів роботи бортового програмного забезпечення дозволяє підвищити енергетичну ефективність бортових обчислювачів наносупутників CubeSat. Це забезпечує подовження тривалості автономної роботи апарата, підвищує продуктивність обчислень і знижує ризик відмов у критичних умовах. Результати можуть бути впроваджені у системах керування обчислювальними ресурсами автоматичних мобільних платформ для розширення їх функційності та зниження витрат на експлуатацію. Усі розроблені моделі й методи доведено до рівня інженерних методик, програмних засобів та

комп'ютерної реалізації, ефективність яких обґрунтовано теоретично й підтверджена практично.

Результати роботи було впроваджено:

- у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» (акт впровадження від 17 жовтня 2025);
- при виконанні науково-дослідних проєктів, що виконувались у Національному аерокосмічному університеті «Харківський авіаційний інститут» (облікова картка проєкту 0124U004847);
- у аванпроєкті та стендових випробуваннях в складі КА що розроблявся НТУ КІІ СКБ «Шторм» (лист підтримки від 29 серпня 2025);
- у науково прикладній роботі з провідним космічним підприємством АТ «ХАРТРОН» (акт впровадження від 1 жовтня 2025);
- у прикладній роботі з підприємством ТОВ «АБАКУС-ТЕХ» (акт впровадження від 6 жовтня 2025).

5. Апробація/використання результатів дисертації. Основні положення та ідеї дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: науково-технічних конференціях: "Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering" (м. Харків, 2022, 2023, 2024); "Dependable System, Services and Technologies Conference (Athens, Greece 2022, 2023); «Людина та Космос» та «Космічні горизонти» (Дніпро, Україна, 2023-2024 рр.), круглих столах МОН «Молоді науковці» (Київ, Україна, 2024-2025), КриКТехС (Харків, Україна, 2025), міжнародному симпозіумі електричних летальних апаратів та БПЛА (Львів, Україна, 2025). А також на хакатонах – «Апаратні рішення для відновлення України» (Львів, Україна, 2024), «Sigma Unicorn Startup» (Київ, Україна, 2024), «Sikorskiy Challenge» (Київ, Україна, 2025), «NASA SpaceApp Challenge» (Київ, Україна, 2025), «Science2Business» (Київ, Україна, 2024).

6. Дотримання принципів академічної доброчесності. За результатами розгляду дисертація Любімова О.В. визнана оригінальною роботою, яка не містить фактів академічного плагиату, фабрикації чи фальсифікації. Зміст основних розділів дисертації перевірено 27.01.2026 р. на наявність текстових запозичень в системі «Turnitin» у порівнянні з файлами бібліотеки корпоративного облікового запису Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» та мережі Інтернет. Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 20 наукових публікацій, у тому числі:

- 0 одноосібних монографій, 0 одноосібних розділів у колективних монографіях;
- 9 статей у наукових фахових виданнях України за спеціальністю, в т.ч. 5 статей у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;

- 1 стаття у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та/або Scopus;

- 3 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1 – Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, чи одноосібних монографій, що відповідають зазначеним вимогам;

- 0 патентів України на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу;

- 0 патентів України на корисну модель;

- 7 тез виступів на наукових конференціях.

Основні публікації наведені нижче:

Статті у наукових фахових видання, затверджених МОН України.

1. 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. (Кат. Б) *(Особистий внесок: постановка завдання, аналіз вхідних даних, розробка методології дослідження)*

2. Turkin I., Liubimov O., Zakharenko V. Optimization of energy consumption of the CubeSat on-board computer under real-time limitations. Aerospace Technic and Technology, 2024, vol. 0, iss. 3, pp. 126-137. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.10. (Кат. Б) *(Особистий внесок: Формування основної концепції статті та методології наукових питань, формування проблеми оптимізації енергоспоживання, планування та проведення наукового експерименту)*

3. Turkin I., Liubimov O., Volobuieva L., Valkovyi V. Hardware and software of CubeSat nanosatellites' on-board computers: a systematized literature review // Aerospace Technic and Technology. – 2025. – № 3.- P.137-154. - DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.3.11> (Кат. Б) *(Особистий внесок: Розробка концепту, методології дослідження)*

4. Liubimov O., Turkin I. Experimental study of FreeRTOS operating system reactivity in power saving modes of the onboard computer microcontroller// Aerospace Technic and Technology. – 2024, № 4, – P. 71–86. – DOI: 10.32620/aktt.2024.4.09 (Кат. Б) *(Особистий внесок: розробка апаратного та програмного забезпечення, виконав дослідження, виконання пошуку ресурсів, зроблено візуалізацію та проведена верифікація тексту)*

5. Liubimov O., Turkin I., Leshchenko O., Valkovyi V. Experimental evaluation of the efficiency of containerization technology in the onboard software of a nanosatellite CubeSat // Aerospace Technic and Technology. – 2024, № 4, – P. 87–103. – DOI: 10.32620/aktt.2024.4.10 (Кат. Б) *(Особистий внесок: розробка апаратного та програмного забезпечення, виконав дослідження, виконав пошук ресурсів, зробив візуалізацію та провів верифікацію тексту)*

6. Turkin I., Liubimov O., Volobuieva L. Reactivity model of nanosatellite and UAVs embedded computing systems // Aerospace Technic and Technology. – 2025. – № 6. – P. 128–142. – DOI: 10.32620/aktt.2025.6.12 (Кат. Б) *(Особистий внесок: розробка математичної моделі реактивності, виконання експериментів)*

7. Liubimov O., Turkin I. Multicriteria evaluation of industry-known interfaces of onboard network of CubeSat nanosatellites // Aerospace Technic and Technology.

– 2024. – № 3. – P. 138–153. – DOI: 10.32620/aktt.2024.3.12. (Кат. Б) *(Особистий внесок: концептуалізація, методологія, розробка моделі порівняння, аналіз результатів, візуалізація, написання)*

8. Turkin I., Liubimov O., Shevchenko I. Combined model of the hardware-software development process for a student CubeSat nanosatellite data processing module // Open Information and Computer Integrated Technologies. – 2024. – № 101. – P. 148–165. – DOI: 10.32620/oikit.2024.101.10. (Кат. Б) *(Особистий внесок: концептуалізація, методологія)*

9. Liubimov O. Use of micro-services architecture and containerization for the fast development and testing of the CubeSat nanosatellites software // Journal of Rocket-Space Technology. – 2023. – Vol. 31, № 4. – P. 128–137. – DOI: 10.15421/452317 (Кат. Б)

Статті у журналах з квартілями Q1-Q3:

1. Liubimov O., Turkin I., Cheranovskiy V., Volobuieva L. UAV Mission Computer Operation Mode Optimization Focusing on Computational Energy Efficiency and System Responsiveness. Computation. 2024, vol. 12, iss. 12, art. 235. DOI: 10.3390/computation12120235 (Scopus, Q2). *(Особистий внесок: Розробка концепту, методології дослідження, програмного забезпечення, формальний аналіз та валідація, написання, ревію та редагування)*

2. Liubimov O., Turkin I., Pavlikov V., Volobuyeva L. Agile Software Development Lifecycle and Containerization Technology for CubeSat Command and Data Handling Module Implementation. Computation, 2023, vol. 11, iss. 9, art. 182. DOI: 10.3390/computation11090182 (Scopus, Q2). *(Особистий внесок: Розробка концепту, методології дослідження, програмного забезпечення, формальний аналіз та валідація, написання, ревію та редагування)*

3. Turkin I., Volobuieva L., Chukhray A., Liubimov O. Comparison of equivalent circuit and machine learning methods for CubeSat battery discharge modeling // Radioelectronic and Computer Systems. – 2025. – № 3. – P. 231–244. – DOI: 10.32620/reks.2025.3.16 (Scopus, Q2) *(Особистий внесок: розробка методології дослідження, ревію та редагування)*

Статті у журналах WoS/Scopus:

- Liubimov O., Turkin I. Cubesats and their on-board computers: systematic literature review. Space Science and Technology. 2025. Vol 6, Iss. 157, pp. 014-037, DOI: 10.15407/knit2025.06.014 (Scopus, Q4). *(Особистий внесок: Розробка концепту, методології дослідження, аналіз вхідних даних, написання, ревію та редагування)*

Тези та доповіді на конференціях (в тому числі Scopus):

- Liubimov O., Turkin I., Volobuieva L., Iovenko I., Liubimov M. Developing hardware and software for UAV onboard computers: a combined approach with SWOT analysis // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2024 : proceedings of the Int. Conf. ICTM 2024 / eds. O. Lytvynov, V. Pavlikov. – Cham : Springer, 2025. – (Lecture Notes in Networks and Systems ; Vol. 1473). – DOI: 10.1007/978-3-031-94845-9_18. (Scopus) *(Особистий внесок: концептуалізація, методологія)*

- Liubimov O., Turkin I. Data model and methods for ensuring the reliability and relevance of data for the CubeSat projects // Proc. 12th Int. Conf. Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – Athens, Greece, 2022. – Pp. 1–7. – DOI: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018658. (Scopus) *(Особистий внесок: концептуалізація, методологія)*

- Liubimov O., Turkin I., Volobuieva L. The WASM3 interpreter as a hard real-time software platform for the on-board computer of a student nanosatellite // Proc. 13th Int. Conf. Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – Athens, Greece, 2023. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416436. (Scopus) *(Особистий внесок: концептуалізація, методологія, вимірювання та обробка результатів експериментів)*

- Любімов О. Модель модульного та компонентного підходу до проектування ПЗ наносупутників на базі відкритих рішень NASA F'Prime // Матеріали Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і Космос – 2024». – Дніпро, 2024. (Кат. Б, тези)

- Любімов О. Реалізація енергоефективної бортової мережі між типовими модулями малої авіоніки мікросупутників КубСат (CubeSat) // Матеріали Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і Космос – 2024». – Дніпро, 2024. – DOI: 10.62717/2221-4550-2024-1-067. (Кат. Б, тези)

8. Висновок наукового керівника. Дисертаційна робота Любімова Олександра Вікторовича, «Адаптивні методи, алгоритми та програмні засоби балансування реактивності та енергоспоживання бортових обчислювачів наносупутників CubeSat», відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44). Відтак, може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Головуючий на розширеному засіданні
кафедри інженерії програмного забезпечення
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,

д.т.н., професор



Андрій ЧУХРАЙ