

Реферат

НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ РОБОТИ «НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ НАНОСУПУТНИКІВ “ПОЛІТАН” ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАВКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТОРУ»

Представлено Національним технічним університетом України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Автори: Рассмакін Б.М., к.т.н., Байсков М.Ф., Коваленко Є.Ю., к.т.н., Душейко М.Г., Лауш А.Г., Першин М.О., Хомініч В.І., к.т.н., Бендасюк Н.М.

Актуальність роботи

Роль космічних технологій у житті сучасної людини важко переоцінити. Не даючи чогось безпосередньо, вони водночас слугують опорою багатьох технологій, у тому числі повсякденного використання. Це – прогнозування погоди, геофізичні дослідження, будівництво, аграрна промисловість, зв'язок та багато чого іншого. Розробка супутників потребує багато часу (кілька років) і є досить дорогою, що майже унеможливує їх використання для малобюджетних, проте важливих задач (де застосовувати їх буде економічно недоцільно) та значно відтермінує отримання практичного результату від початку теоретичних досліджень для умов космосу. Тому в світі розвинувся концепт наносупутників (НС) – апаратів масою в кілька кілограм із низькою вартістю розробки та запуску. Маючи невеликий об'єм, вони часто запускаються «побіжно» із більшими апаратами, що дає змогу проводити запуски значно частіше. Розробкою НС займаються менші колективи, ніж у випадку звичайних супутників, що робить її дешевшою та швидшою. Для деяких же задач, як то картографування іоносфери та діагностування стану магнітосфери, набагато доцільніше використовувати групу НС, а не один чи кілька великих апаратів, оскільки запуск кількох десятків НС за ціною одного великого супутника дає можливість отримувати інформацію не один раз на виток, а майже постійно. А для задач, що вимагають тривалого перебування на низькій орбіті, НС – це практично єдиний рентабельний спосіб, оскільки час існування будь-якого апарата на такій орбіті досить короткий – через лічені місяці він гальмується та згорає в атмосфері.

Концептуально, за критерієм використання НС усі країни можна розділити на три категорії.

1. **Не мають НС узагалі.** Задачі космічних досліджень і збору інформації або виконуються великими супутниками країни, або, що значно частіше, замовляються іноземним космічним компаніям. При цьому такі країни є залежними від останніх і не можуть проконтролювати достовірність отриманих даних.

2. **Мають свої НС із покупною електронною платформою (тобто покупними платами, які потім збираються, немов конструктор).** Як правило, такі апарати ненадійні, а команди, які працюють із ними, не знають усіх тонкощів роботи, тому в цілому ситуація не сильно відрізняється від попереднього пункту, за винятком якихось не дуже важливих задач.

3. **Мають технологію, технологічну базу, алгоритми виготовлення, випробувань та інфраструктуру збору інформації.** Надійність НС таких країн дає можливість покласти на них деякі космічні задачі національного масштабу та використовувати їх для власних й іноземних приватних компаній. Це робить країну незалежною від іноземних компаній, збільшує довіру до отриманих даних і дає змогу отримувати вигоду за рахунок продажу інформації, самих апаратів або їх систем. Також досвід, отриманий під час розробки та експлуатації, враховується під час побудови великих супутників.

До 2014 року Україна розробляла лише великі космічні апарати (КА “СМ-КФ”, “Океан-О”, проекти серії “Січ” та інші), а досвіду з НС не мала взагалі. Запуск і успішна експлуатація на орбіті НС PolyITAN-1 (ПоліТАН-1), а потім і PolyITAN-2-SAU (ПоліТАН-2) привели до появи єдиної в Україні платформи і технологій розробки, виготовлення та експлуатації малих космічних апаратів – НС, а також до створення космічної системи на базі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (далі КПІ ім. Ігоря Сікорського). Це дає можливість використовувати її для задач національного масштабу. Оскільки весь процес розробки та випробувань проходить у межах країни (а в основному – в межах КПІ ім. Ігоря Сікорського), використання платформи є повністю незалежним від зовнішніх (не залежних від України) факторів. Характеристики ж розроблених підсистем в апаратах відповідають рівню кращих закордонних аналогів, а деякі і перевищують їх.

Таким чином, робота по створенню вітчизняних наносупутників є актуальною, а розробка наносупутників формату CubeSat також й актуальним національним завданням.

Метою роботи є створення вітчизняних наносупутників формату CubeSat з довготривалим ресурсом знаходження орбітах для перевірки нових технологій та досліджень навколоземного простору Землі.

Розвиток електронної платформи PolyITAN формату CubeSat відбувається відповідно до виконання з 2012 року 8 НДР та однієї НТР на загальну суму 5582 тис. грн (детальний список наведено в т. 2) і таких державних угод, законів і програм:

1. Закону України «Про затвердження Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми на 2013–2017 роки» та затвердженої КМУ концепції Державної цільової науково-технічної космічної програми на 2018–2022 роки, де «...передбачено забезпечити запуск університетського

(молодіжного) наносупутника (масою до 10 кілограмів)...» (тема “Освіта” ДКА України, PolyITAN-2-SAU, 2016 р.).

2. Угоди про співпрацю в міжнародному світовому проекті «QB50 Project» між Інститутом гідродинаміки Фон Кармана (Льєж, Бельгія) та КПІ ім. Ігоря Сікорського від 27.06.2014р. Місія проекту – запуск угруповання з 50 НС формату Cubesat, створених командами з різних університетів світу для виконання завдань із дослідження нижніх шарів термосфери. Для цієї мети був розроблений другий НС PolyITAN-2-SAU.

3. Виконання загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013–2017 роки. Найменування завдання «Розділ 4. Проведення наукових космічних досліджень – науково-освітня програма... створення університетської космічної системи “УМС-1” (PolyITAN- 2-SAU)».

4. Запуск космічного апарата, державний бюджет – 199 000 грн. (спонсор фонд Калініна, Україна – 28 000 дол. США), 2016 р.

5. Виконання загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2018–2022 роки: «Розділ 1. Створення нових зразків космічної техніки згідно Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року, яку затверджено Розпорядженням КМУ №238 від 30 березня 2011 року», «Розділ 2. Створення сучасної системи аерокосмічної розвідки на основі нових технологічних рішень та забезпечення оперативного доступу до даних аерокосмічної розвідки у режимі часу, наближеного до реального, згідно Стратегії національної безпеки України, введеної в дію Указом Президента від 26.05.2015 №287/2015, та Воєнній доктрині України, введеної в дію Указом Президента від 24.09.2015 №555/2015» та «Розділ 3. Розвиток української космічної програми та удосконалення виробничого та науково-технічного потенціалу галузі згідно Стратегії сталого розвитку «Україна-2020», схваленої Указом Президента України від 12.01.2015р. №5/2015».

Відповідно до Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2018–2022 роки (повний текст наведений у додатках т. 2):

– Нормативні документи, які спрямовані на забезпечення розвитку космічної галузі України, є основою для обґрунтування необхідності надання науковому об'єкту «КОМПЛЕКС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ СТЕНДІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ ВИРОБІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ» (надалі Комплекс) статусу такого, що становить національне надбання, та внесення його до Державного реєстру, є наступні [наводиться перелік з 8 документів]. Розробку, дослідження та випробування виробів космічного призначення необхідно здійснювати на вітчизняній матеріально-технічній базі українськими спеціалістами.

– Слід відзначити, що нормативна вимога щодо «забезпечення запуску університетського (молодіжного) наносупутника (масою до 10 кілограмів), на якому молодіжні колективи наукових установ космічної галузі Держави та

провідних технічних університетів зможуть проводити свої наукові експерименти», виконана КПІ ім. Ігоря Сікорського. При цьому розробка, конструювання, дослідження та випробування НС PolyITAN-1 (перебуває на орбіті з 2014 р.) та PolyITAN-2-SAU (перебував на орбіті з травня 2017 до лютого 2019 р.) виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського здійснювалися з використанням власної експериментальної бази. Подальші дослідження та випробування виробів космічної техніки в Україні згідно з нормативними документами включно з університетськими наносупутниками серії CubeSat потребують розвитку наявного в університеті комплексу спеціалізованих дослідницько-експериментальних стендів.

На сьогодні космічна система PolyITAN формату CubeSat складається з:

- **космічного сегмента**– супутників PolyITAN-1 та PolyITAN-2-SAU;
- **наземного сегмента**– наземної станції управління та зв'язку; лабораторій та обладнання для проведення теплових випробувань адаптованих під тести НС; лабораторій та обладнання для проведення термовакuumних випробувань адаптованих під тести НС; лабораторій та обладнання для проведення випробувань сонячних батарей і т.д.



На базі платформи PolyITAN у процесі розробки знаходяться:

Назва	Призначення	Стан
НС PolyITAN-3-PUT	Фото- та відеозйомка Землі	Проведення випробувальних і тестувальних робіт з інженерною моделлю, розпочато підготовку ПМ та комплектацію плат льотної моделі
НС PolyITAN-4	Проведення біологічних дослідів	Розроблено конструкторську документацію

	із рослинами в умовах космосу	
НС PolyITAN-5	Гравітаційні вимірювання	Розроблено конструкторську документацію
Стенд з імітації магнітного поля Землі	Відпрацювання роботи системи орієнтації супутників	Розроблено конструкторську документацію, триває комплектування та збирання

Основні науково-технічні результати роботи і їх новизна *Космічний сегмент*

Підсистема обробки та обміну даними (плата центрального процесора)

– Розроблено електронну архітектуру та концепцію електронної платформи НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2-SAU, запропоновано склад електронних модулів та їх функції, створено та експериментально досліджено зразки електронної платформи.

– Розроблено та створено модуль зв'язку електронної платформи НС з корисним навантаженням – мас-спектрометром FIPEX (ФІПЕКС), відпрацьовано технологію їх сумісної роботи.

– Удосконалено міжмодульний обмін даними за протоколом Modbus RTU завдяки створенню функцій роботи з внутрішніми даними, що дає змогу здійснювати обмін із мікроконтролером;

– Удосконалено обмін даними з GPS-пристроєм за протоколом BINR через створення кінцевого автомата, що оптимізує отримання навігаційного рішення (робота з GPS-пристроєм не припиняє загальну роботу системи);

– Запропоновано, розроблено та створено алгоритм управління та обміну даними між наземною станцією та НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2-SAU. Розроблено формат і структуру даних телеметрії, що надходять від супутника до НСУ.

Підсистема електроживлення

– Спроектовано, експериментально досліджено та створено системи електроживлення для НС. Експериментально проведено оптимізацію режимів їх функціонування.

– Теоретично обґрунтовано, запропоновано та створено систему попарного підключення сонячних батарей до перетворювачів із вбудованим контролером відбору максимальної потужності, яка дає можливість зменшити втрати енергії й істотно підвищує відмовостійкість роботи НС.

– На основі теоретичного розгляду запропоновано використовувати у НС літій-залізні акумуляторні батареї, які порівняно з літій-полімерними мають ширший температурний діапазон роботи (від -20 до $+60$ °C), мають більшу стійкість до глибокого розряду та є вибухобезпечними.

– Проведено розробку технології текстурованих сонячних елементів космічного призначення фотоелементів НС.

– Запропоновано, експериментально досліджено та застосовано при виготовленні фотоелектричного перетворювача HCPolyITAN – 1 контактну систему на основі Ti/Mo/Ag.

– На основі експериментальних досліджень показано вплив параметрів технологічних процесів, структури контактної системи, матеріалів просвітлювальних покриттів на основі оксидних напівпровідників на радіаційну стійкість та коефіцієнт корисної дії фотоелектричних перетворювачів космічного призначення, а також виготовлено їх зразки для супутника PolyITAN–1.

– Розроблено топологію і технологію монтажу сонячних батарей НС, експериментально визначено клейові композиції для закріплення захисного скла до фотоелектричних перетворювачів космічного призначення та самого перетворювача до поверхні несучих панелей.

Підсистема орієнтації, стабілізації та навігації

Орієнтація НС на орбіті являє собою складну задачу, що потребує розв’язання. На відміну від великих супутників, НС не можуть використовувати датчики та виконавчі органи систем орієнтації від більших космічних апаратів унаслідок обмеження за масою, об’ємом та енергією. Тому розробка обладнання для керування орієнтацією та навігацією НС також є важливою задачею.

– Розроблено та створено конструкції мініатюрних щілинних сенсорів кутових координат Сонця, методики їх калібрування. Проведено калібрування сенсорів HCPolyITAN–1 та PolyITAN-2-SAU.

– Розроблено, створено й експериментально випробувано датчик координат Сонця та інструментальне програмне забезпечення для тестування і налагодження компонентів супутника.

– Розроблено алгоритм інтегрування й уточнення параметрів орбіти, а також створено програмне забезпечення та проведено тестування НС спільно з імітатором навігаційних сигналів СН 3810 на Землі.

– Створено наземну технологію відпрацювання системи навігації супутників із приладом – імітатором навігаційних сигналів СН 3810, і відпрацьовано інтерфейс обміну між навігаційним приймачем НС та цим приладом. Результати лабораторного відпрацювання повністю узгоджуються з результатами роботи на орбіті приймача супутникової навігації на НС PolyItan-2-SAU. Отримані результати враховуються при розробці приймача супутникової навігації наступного покоління. Розраховано, що приймач, крім супутникових навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС, додатково може забезпечити роботу також по глобальній навігаційній системі GALILEO.

– На орбіті Землі відпрацьовано вітчизняні підсистеми орієнтації та навігації з приймачем глобальних сигналів GPS\GLONASS.

– Порівняно із системою від одного із головних міжнародних виробників Surrey Satellite Technology .Ltd (http://ysc.sm.bmstu.ru/microsat/e-ibrary/SSTL/Subsys_SGR1020_HQ.pdf) вдалося досягти:

- збільшення точності визначення координат (3м проти 15м);
- збільшення точності визначення швидкості (0,1м/с проти 0,15м/с);
- збільшення точності видачі часової мітки (50 нс проти 500 нс);
- зменшення енергоспоживання на одиницю маси маси (0,9Вт/40г проти 1,3Вт/50г).

Підсистема радіозв'язку

Для НС розроблено й удосконалено власні системи радіозв'язку, що було пов'язано із обмеженнями по електроживленню апаратів. Також НС були розроблені так, щоб відповіді апаратів могли почути та декодувати не тільки спеціалізовані наземні станції, а й радіоаматори.

– Розроблено електронну архітектуру плати радіозв'язку НС PolyITAN-1 та концепцію електронної схеми радіолінії 144–146МГц та 435–437 МГц, схеми міжмодульного обміну даними НС PolyITAN-1.

– Виготовлено підсистему радіозв'язку та погоджено частоти 145,925 МГц і 437,575 МГц прийому-передачі в IARU та ITU для бортової радіолінії PolyITAN-1.

– Спроектовано, виготовлено, проведено налаштування та перевірку бортової антенної системи з автоматичним розкриттям на орбіті.

– Вдалося досягти технічних характеристик кращих систем у цьому класі (проте жодна з них не має їх одночасно): Clyde Space. Ltd (CS-UVTRX-01) і ISIS (ISIS TRXUV VHF/UHF):

<i>Фірма</i>	<i>Clyde Space .Ltd</i>	<i>ISIS</i>	<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>
Тип зв'язку	Напівдуплекс	Дуплекс	Дуплекс
Протокол	AХ.25	AХ.25	AХ.25
Вихідна потужність	27–33 dBm		21–33 dBm
Діапазон робочих температур	–25...61°C	–20...50°C	–25...55°C
Габарити	96 × 90мм	96 × 90 × 15 мм	82×82×15 мм
Напруга живлення	6–9В	6,5–12,5В	3,3В (стандарт для цифрової техніки)
Частоти передавача	420–450 МГц	400–450 МГц	400–450 МГц
Відстань між каналами	25кГц		20кГц
Частоти приймача	130–150 МГц	130–160 МГц	130–150 МГц
Чутливість	–120 dBm	–104 dBm	–120 dBm

Підсистема терморегулювання

– Розроблено моделі теплових режимів автономного терморегулювання та охолодження сучасної радіоелектронної апаратури пасивними засобами НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2-SAU.

– Вдосконалено математичну модель розрахунків температурних режимів НС, що розширює можливості аналізу впливу змінного в часі підводу і відводу теплоти до них на навколоземній орбіті.

Наземний сегмент

Функціональні та приймально-здавальні випробування

– Розроблено технічні умови, програми та методики випробувань перших українських НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2-SAU виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського.

– Проведено наземні тепловакуумні дослідження та приймально-здавальні випробування інженерних і льотних моделей, елементів, вузлів і НС у цілому з фізичною імітацією факторів космічного простору, яка відповідає міжнародним вимогам (стандарти EC55-70-02A, EC55-70-04A Європейської космічної агенції).

– Проведено теоретичний аналіз теплообміну, температурних полів, термічного опору конструкції та підсистем НС формату CubeSat.

– Створено розрахункові та експериментальні фізичні технології імітації зовнішніх теплових впливів, які діють на НС при їх розміщенні на навколоземних орбітах.

– Розвинута в роботі методика проведення наземних термовакуумних випробувань дає змогу створювати фізичні моделі імітаторів зовнішніх потоків Сонця та Землі для експериментального дослідження НС.

– Розроблено концепцію побудови комплексу науково-дослідних фізичних експериментальних стендів електро- та тепловакуумних досліджень і випробувань космічної техніки ТВК-2.5 та ТВК-0.2, яка забезпечує повний цикл досліджень і випробувань малих (до 100 кг) об'єктів космічної техніки (мікро- та нано- супутники, вироби космічного призначення) при фізичній імітації комплексного впливу наднизьких тисків і температур, відповідної чорноти космічного простору та теплових навантажень від Сонця і Землі, внутрішнього тепловиділення бортової апаратури космічних апаратів, циклограм роботи на певних ділянках орбіти за відповідної зміни положення в просторі, діагностичний комплекс вимірювань температур об'єктів у реальному часі.

– Здійснено динамічні дослідження та випробування механічної міцності елементів, вузлів і НС у цілому, що відповідають міжнародним вимогам (стандарти QB50_system_requirements_issue_6).

Наземна станція

– Створено апаратне забезпечення наземної станції для керування НС, прийому, дешифрування та збереження отриманої з НС інформації.

– Запропоновано структурну та функціональну схеми побудови наземного сегмента радіозв'язку НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2.

– Проведено розрахунок бюджету радіолінії зв'язку; згідно з отриманими результатами підібрано необхідну апаратуру, яка дає можливість проводити

безперервні сеанси зв'язку із космічними апаратами PolyITAN-1 та PolyITAN-2.

- Створено систему програмних пакетів, які забезпечують автоматизоване керування процесом визначення положення НС, наведення антенного комплексу, підсилення, обробки та декодування сигналу.

- Автоматизовано процес корекції доплерівського зсуву під час проведення сеансу зв'язку з малими космічними апаратами.

- Наведено результати радіообміну, декодування і телеметрії НС PolyITAN-1 та PolyITAN-2, які перебувають на розрахункових орбітах до теперішнього часу.

- Розроблено, створено й апробовано при сеансах зв'язку з НС програмне забезпечення наземної станції, а також здійснено прийом, дешифрування, збереження та візуалізацію прийнятої телеметрії супутників.

Практична значимість, обсяг впровадження і досягнутий ефект

Робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми з розробки і впровадження нових технологій проектування, моделювання, випробувань та зборки конструкцій наносупутників ПоліТАН формату Cubesat зі значним ресурсом знаходження на навколоземних орбітах, що відповідають міжнародним вимогам.

Розроблені нові методи оптимізації забезпечення запасу енергії наносупутників при мінімізації енергетичних витрат, а також створені алгоритми побудови циклограм електроживлення, враховуючі енергоспоживання наносупутників одночасно на усіх відрізках часу їх знаходження на орбіті. Запропоновано та впроваджено нові надлегкі, тепло- та радіаційно-захисні конструкційні матеріали, несучі сотопанельні вуглепластикові конструкції космічного застосування. На орбіті Землі відпрацьовані вітчизняні підсистеми орієнтації та навігації з приймачем глобальних сигналів GPS/GLONASS в реальних умовах космосу, підтвержені фізико-технічні основи конструктивно-технологічних рішень плівкових нанокристалічних та монокристалічних пристроїв - фотоелектричних перетворювачів та датчиків кутових координат Сонця.

- Створено технології розробки та виготовлення НС, що дозволяє проводити наукові дослідження та відпрацювання технології на навколоземних орбітах 620-650 км за прикладом Політан-1, який функціонує до теперішнього часу
- Створено технологію дослідження складу термосфери Землі на висотах 100-380 км за допомогою НС формату CubeSat за прикладом “ПоліТАН-2” (PolyITAN-2-SAU)

- “PolyITAN-2-SAU” – запуск 26.05.2017р., функціонував до 6 лютого 2019р.
- створено національний комплекс стендів для проведення тепловакуумних досліджень та випробувань мікро- та наносупутників та об’єктів космічної техніки вагою до 100 кг, що відповідають міжнародним вимогам (стандарти EC55-70-02A, EC55-70-04A Європейської космічної агенції).
- Створена комплексна система дослідження космічного простору КПІ ім. Ігоря Сікорського, що включає в себе розробку і виробництво малих КА та прийом і обробку інформації з них
- Розроблена система дозволила створити сучасну спеціалізовану підготовку фахівців для космічної галузі України

Розвиток роботи з часу попереднього висування роботи:

- наведено опис не лише НС PolyITAN-1, PolyITAN-2-SAU, а й усієї електронної платформи серії НС PolyITAN та космічної системи КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- додано інформацію про супутники PolyITAN-3-PUT, PolyITAN-4, PolyITAN-5;
- описано стенд для імітації магнітного поля Землі для відпрацювання роботи системи орієнтації супутників;
- додано дані, отримані в межах міжнародного проекту QB-50.

Кількість публікацій за темою: 152, ут.ч. 3 енциклопедії, 1 підручник (посібник), 78 статей (8 – у зарубіжних виданнях). Згідно з базою даних Scopus, загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, становить 48, h-індекс (за роботою) = 5; згідно з базою даних Google Scholar, загальна кількість посилань становить 41, h-індекс (за роботою) = 6.

Новизну і конкурентоспроможність технічних рішень захищено 5 патентами.

Рассамакін Б.М	_____
Байсков М.Ф.	_____
Коваленко Є.Ю.	_____
Душейко М.Г.	_____
Лауш А.Г.	_____
Першин М.О.	_____
Хомініч В.І.	_____
Бендасюк Н.М.	_____