

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 обґрунтована участю України в міжнародному проєкті QB50, у якому бере участь КПІ ім. Ігоря Сікорського, наносупутник “PolyITAN-2-SAU” (ПоліТАН–2) формату CubeSat. Проєкт QB50 спрямований на одержання нових наукових та прикладних результатів натурних вимірів параметрів нижньої термосфери Землі. Вказані дослідження виконувались за допомогою груп однотипних наносупутників, кожний з яких вирішували певний конкретний сегмент загального для групи наносупутників завдання. Наносупутники (НС) виробництва окремих членів міжнародної наукової спільноти відповідали єдиним вимогам побудови, конструктивних рішень, систем одержання та радіопередачі експериментальних результатів, високоточними системами навігації та орієнтації, відповідати міжнародним вимогам до систем керування та ін. Вказані вимоги передбачались вирішувати шляхом відбору кращих рішень та конструкцій окремих національних творчих колективів розробників наносупутників.

Таким чином, розробка та створення наносупутників формату **CubeSat** було актуальним національним завданням.

Крім того, наносупутник формату CubeSat використовуються для дистанційного зондування Землі, екологічного моніторингу, прогнозу землетрусів, досліджень іоносфери, тощо. Створення НС характеризуються коротким циклом розробки, вони прості в керуванні, вимагають значно менших фінансових витрат для виведення на орбіту. Однак вимоги й обмеження по масі, габаритам і стандартизація обладнання НС створюють нові задачі для їх розробки і експлуатації.

Також, однією з найважливіших задач при створенні модулю керування наносупутником є обмін даними між підсистемами. При створенні системи обміну нерідко виникає проблема передачі даних у нестійких каналах зв'язку. Передача даних у наносупутниках через послідовні інтерфейси RS-485, RS-422, RS-232 без використання спеціалізованих протоколів обміну даними не дає змогу оцінити кількість втрачених пакетів та їх цілісність.

Орієнтація НС на орбіті являє собою складну задачу і потребує її вирішення. На відміну від великих супутників, наносупутники не можуть використовувати датчики та виконавчі органи систем орієнтації від більших космічних апаратів внаслідок обмеження по масі, об'єму та енергетиці. Тому розробка підсистем керування орієнтації та навігації НС також є важливою задачею. Для НС також мають бути розроблені і удосконалені власні системи радіозв'язку зв'язані з обмеженням по електроживленню. Також наносупутник формату CubeSat повинен бути розроблений так, щоб відповіді апарату могли почути та декодувати радіоаматори.

Метою роботи є створення вітчизняних наносупутників з довготривалим ресурсом знаходження орбітах для перевірки нових технологій та досліджень навколоземного простору Землі. Перший для нашої країни, НС "PolyITAN-1"(ПоліІТАН–1), був створений за ініціативою НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та підтримки МОН і виконував роль тестової платформи, на якій були відпрацьовані всі основні підсистеми. Для одержання нових наукових та прикладних результатів при натурних вимірах параметрів нижньої термосфери Землі був запроваджений міжнародний проект **QB50**, у якому бере участь Україна (КПІ ім. Ігоря Сікорського, наносупутник "PolyITAN-2-SAU" формату CubeSat).

Зміст роботи «Новітні технології створення вітчизняних наносупутників "PolyITAN-1" та "PolyITAN-2-SAU", для дослідження навколоземного простору»:

Підсистема обробки та обміну даними (плата центрального процесора)

- Розроблено електронну архітектуру та концепцію електронної платформи, наносупутників Polyitan-1 та Polyitan-2, запропоновано склад електронних модулів та їх функції, створені та експериментально досліджені зразки електронної платформи.

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

- Створено технології протоколу міжмодульного обміну даних, модуля орієнтації та навігації, розроблені та створені технічні засоби та програмне забезпечення їх роботи.

- Удосконалено обмін даними по протоколу Modbus RTU, шляхом створення функцій роботи з внутрішніми даними, що дає змогу здійснювати обмін з мікроконтролером;

- Удосконалено обмін даними з GPS-пристроєм по протоколу BINR, шляхом створення кінцевого автомату, що оптимізує отримання навігаційного рішення (робота з GPS-пристроєм не припиняє загальну роботу системи);

- Запропоновано, розроблено та створено схему алгоритму управління та обміну даними між наземною станцією та наносупутниками "PolyITAN-1" та "PolyITAN -2".

Створений формат та структура даних телеметрії, що надходять від супутника до НСУ.

Підсистема електроживлення

- Спроектовано, експериментально досліджено та створено системи електроживлення для наносупутників. Експериментально проведена оптимізація режимів їх функціонування.

- На основі методів невизначених коефіцієнтів Лагранжа та послідовних наближень та їх комбінації розроблена методика оптимізації циклограм за критеріями максимізації запасу енергії та збільшення часу роботи на орбіті в штатному режимі

- Теоретично обґрунтовано, запропоновано та створено систему попарного підключення сонячних батарей до перетворювачів з вбудованим контролером відбору максимальної потужності, яка дозволяє зменшити втрати енергії та суттєво підвищує відмовостійкість роботи наносупутників.

- На основі теоретичного розгляду запропоновано використання у наносупутниках літій-залізних акумуляторних батарей, які у порівнянні з літій-полімерними мають ширший температурний діапазон ($-20\dots+60^{\circ}\text{C}$), виявляють більшу стійкість до глибокого розряду та є вибухобезпечними.

- Проведено розробку технології текстурованих сонячних елементів космічного призначення фотоелементів наносупутників.

- Запропоновано, експериментально досліджено та застосовано при виготовленні фотоелектричного перетворювача наносупутника «ПоліТАН-1» контактну систему на основі Ti/Mo/Ag.

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

- Розроблено топологію та технологію монтажу сонячних батарей наносупутників, експериментально визначені клейові композиції для закріплення захисного скла до фотоелектричних перетворювачів космічного призначення та самого перетворювача до поверхні несучих панелей.

- На основі методів невизначених коефіцієнтів Лагранжа, послідовних наближень та їх комбінації розроблена методика оптимізації циклограм за критеріями максимізації запасу енергії та збільшення часу роботи наносупутників на орбіті в штатному режимі. Удосконалено теорію побудови циклограм роботи автономних систем.

Підсистема орієнтації, стабілізації та навігації

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

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

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

- Створена наземна технологія відпрацювання системи навігації супутників з приладом - імітатором навігаційних сигналів СН 3810, та відпрацьовано інтерфейс обміну між навігаційним приймачом наносупутника та цим приладом. Результати лабораторного відпрацювання повністю узгоджуються з результатами роботи на орбіті приймача супутникової навігації на наносупутнику PolyItan-2-SAU. Отримані результати враховуються при розробці приймача супутникової навігації наступного покоління. Розраховано, що приймач крім супутникових навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС може забезпечити роботу додатково ще по глобальній навігаційній системі GALILEO.

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

Підсистема радіозв'язку

- Вирішені задачі моделювання, проектування, виготовлення та випробування підсистеми радіозв'язку наносупутника ПоліІТАН -1 (PolyItan-1) та наземної станції керування польотом.

- Розроблена електронна архітектура плати радіозв'язку наносупутника Polyitan-1 та концепцію електронної схеми радіолінії 144-146МГц та 435-437МГц, схеми міжмодульного обміну даними наносупутника ПоліІТАН -1.

- Виготовлено підсистема радіозв'язку та погоджено частоти 145,925МГц та 437,575МГц прийомо-передачі в ІАРУ та ІТУ для бортової радіолінії POLYITAN-1.

- Спроектовано, виготовлено, проведено налаштування та перевірка бортової антенної системи з автоматичним розкриттям на орбіті.

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 наносупутників, що розширює можливості аналізу впливу змінного в часі підводу і відводу теплоти до них на навколоремній орбіті.

Функціональні та прийомо-здаточні випробування

- Розроблено технічні умови, програми та методики випробувань перших українських наносупутників PolyITAN1 та PolyITAN2 виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського

- Проведені наземні тепловакуумні дослідження та прийомо-здаточні випробування інженерних та льотних моделей, елементів, вузлів та наносупутників в 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 наносупутників формату CubeSat.

- Створені розрахункові та експериментальні фізичні технології імітації зовнішніх теплових впливів, які діють на наносупутники при їх положенні на навколоремних орбітах.

- Розвинута в роботі методика проведення наземних термовакуумних випробувань дозволяє 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 та випробувань космічної техніки ТВК-2,5 та ТВК – 0,2, який забезпечує повний цикл досліджень та випробувань малих (до 100 кг) об'єктів космічної техніки в одиниці (мікро- та наносупутники, вироби космічного призначення) при фізичній імітації комплексного впливу наднизьких тисків та температур, відповідної чорноти космічного простору та теплових навантажень від Сонця та Землі, внутрішнього тепловиділення бортової апаратури космічних апаратів, циклограм роботи на певних ділянках орбіти при відповідній зміні положення у просторі, діагностичний комплекс вимірювань температур об'єктів у реальному часі.

- Здійснені динамічні дослідження та випробування механічної міцності елементів, вузлів та наносупутників в цілому який відповідає міжнародним вимогам (стандарти QB50_system_requirements_issue_6).

Конструкторська та експлуатаційна документація

- Розроблено каркас сотопанелей сонячних батарей для установки арсенід-галієвих гетероперехідних фотоелектронних перетворювачів на наносупутниках.

- Розроблено конструкторська документація на каркаси НС “PolyITAN-1” та “PolyITAN-2-SAU”.

- Обґрунтовано використання в конструкціях наносупутників вуглепластикових сотопанелей при одночасності використання сотопанельних каркасних несучих конструкцій сонячних батарей, антен, датчиків Сонця, електромагнітів в якості елементів захисту від радіації.

- На основі залежностей, одержаних при наземних експериментальних термовакuumних дослідженнях та випробуваннях і динамічних дослідженнях механічної міцності елементів, вузлів та зразків наносупутників у цілому розроблено розрахункові програми та методики технологій проектування наносупутників формату CUBESAT Обґрунтовані методи забезпечення довготривалості функціонування наносупутників на орбіті, які забезпечується, зокрема, системою автономного електроживлення.

- Розроблено та створено програмне забезпечення перегляду в реальному часі та запису в базу даних результатів термовакuumних випробувань наносупутників.

Наземна станція

- Створено апаратне забезпечення наземної станції для керування наносупутником, прийому, дешифрування та збереження отриманої з наносупутника інформації .

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

- Проведено розрахунок бюджету радіолінії зв'язку; згідно отриманих результатів підбрано необхідну апаратуру, яка дозволяє проводити безперервні сеанси зв'язку із космічними апаратами “PolyITAN-1” та “PolyITAN -2”.

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

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

-Приведені результати радіообміну, декодування та телеметрії наносупутників “PolyITAN-1” та “PolyITAN -2”, які знаходяться на розрахункових орбітах до теперішнього часу.

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

Наукова новизна

Вперше в Україні:

- Проведені теоретичні та експериментальні дослідження електронної платформи, підсистем обробки даних, електроживлення, орієнтації, стабілізації та навігації наносупутників серії “PolyITAN”.

- На основі теоретичних досліджень, експериментів та розробки засобів та методів енергозощадної системи електроживлення , надійного радіозв'язку та енергоефективного теплового режиму роботи електронних платформ обґрунтовані технології забезпечення довготривалого знаходження на орбітах Землі наносупутників “ПоліITAN-1” та “ПоліITAN-2” формату “CubeSat».

- Створені розрахункові та експериментальні фізичні технології імітації зовнішніх теплових впливів, які діють на наносупутники при їх положенні на навколосемних орбітах.

- Розроблено теплофізичні основи моделювання і дослідження конструкцій та електронних платформ наносупутників в прикладних пакетах ESATAN-TMS для наступних типових застосувань при проектуванні наносупутників.

- Проведено теоретичний аналіз теплообміну, температурних полів, термічного опору конструкції та підсистем наносупутників формату формату CubeSat.

Вперше в світі:

- На основі методів невизначених коефіцієнтів Лагранжа, послідовних наближень та їх комбінації розроблена методика оптимізації циклограм за критеріями максимізації запасу енергії та збільшення часу роботи наносупутників на орбіті в штатному режимі.

- На орбіті Землі відпрацьовані вітчизняні підсистеми навігації для формату НС CubeSat з приймачем глобальних сигналів GPS\GLONASS з точністю знаходження по висоти до 3 м .

- Обґрунтовані методи забезпечення довготривалості функціонування наносупутників на орбіті, які забезпечується, зокрема, системою автономного електроживлення. При цьому одержано подальший розвиток теорії побудови

циклограм роботи автономних систем за рахунок знаходження коефіцієнтів, що поінтервально описують роботу джерел енергії та навантажень НС.

Практична цінність

Вперше в Україні створені наносупутники “PolyITAN-1” та “PolyITAN-2-SAU”, які відповідають рівню світових вимог, а по деяким параметрам переважають світові аналоги.

Створений перший український наносупутник “ПоліІТАН-1” (PolyITAN-1) формату CubeSat с ціллю наукових досліджень та відпрацювання технологій на навколоземних орбітах 620-650 км

Створений наносупутник “ПоліІТАН-2” (PolyITAN-2-SAU) формату CubeSat для досліджень складу термосфери Землі на висотах 90-390 км

Наносупутники виведено на навколоземні орбіти і функціонують згідно передбаченим місіям:

- “PolyITAN-1” - 19.06.2014р. – функціонує до теперішнього часу.

- “PolyITAN-2-SAU” - 26.05.2017р. - функціонує до теперішнього часу.

Вперше в Україні створений комплекс стендів для проведення тепло вакуумних досліджень та випробувань мікро- та наносупутників та об’єктів космічної техніки вагою до 100 кг. Експериментально-дослідницькі стенди комплексу відповідають міжнародним вимогам (стандарти EC55-70-02A, EC55-70-04A Європейської космічної агенції) щодо проведення термовакуумних досліджень та випробувань

Створена космічна система наносупутників НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

В рамках вищого навчального закладу забезпечується процес підготовки спеціалістів середньої та вищої кваліфікації для космічної галузі України.

Порівняння параметрів підсистем із зарубіжними аналогами

Очікувані результати не мають вітчизняних аналогів, а рівень розробки перевищує світовий, що підтверджує наступне порівняння основних показників НС «КПІ» та головних міжнародників виробників –Surrey Satellite Technology Ltd:

GPS /GLONASS		Surrey Satellite Technology Ltd *	НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Точність координат, м	визначення	15 м	5 м
Точність швидкості, м/сек	визначення	0,15 м/с	0.1 м/с

Точність видачі тимчасової мітки, нсек	500 нс	50 нс
Енергоспоживання, Вт	1,0 Вт – 1,6 Вт	не більше, 0.9
Інтерфейс обміну даних	RS422, CAN	2 UART, протоколи NMEA, BINR
Габарити, мм	100 x 60 x 15 mm	82 x 82 x 16
Вага, грам	50	40

* http://ysc.sm.bmstu.ru/microsat/e-library/SSTL/Subsys_SGR1020_HQ.pdf

Радіоканал:

Фірма	Clyde Space Ltd	ISIS	НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Назва	CS-UVTRX-01	ISIS TRXUV VHF/UHF	
Тип зв'язку:	напівдуплекс	дуплекс	дуплекс
Модуляція	GMSK (9600 біт/с) AFSK (1200 біт/с)	Приймач: AFSK Передавач: BPSK	Приймач: AFSK (1200 біт/с) Передавач: BPSK (9600 біт/с) QPSK (19200 біт/с)
Протокол	AХ.25	AХ.25	AХ.25
Споживання	4 - 10 Вт (для максимальної вихідної потужності).	<1.7Вт (передавач увімкнений), <0.2Вт (тільки приймач)	4 - 10 Вт (для максимальної вихідної потужності)
Інтерфейс обміну	I2C	I2C	2xRS485
Вихідна потужність	27 – 33 dBm (крок - 3 dBm)		0.125;0.25;0.5;1 Вт, 33 dBm
Діапазон робочих температур:	-25°...61°С	-20...50°С	-25...55°С
Габарити:	96 x 90мм	96 x 90 x 15 мм	82x82x15 мм
Напруга живлення	7.2V номінальна; (6V - 9V)	6.5-12.5V	3.3V
Частоти передавача	420 - 450 МГц	400 - 450 МГц	400 - 450 МГц
Відстань між каналами	25кГц		20кГц
Споживання в режимі прийому	< 250 мВт		< 330 мВт

Частоти приймача	130 – 150 МГц	130 - 160 МГц	130 – 150 МГц
Чутливість	-120 dBm для 12 dB	-104 dBm для BER 10E-5	-120 dBm

Кількість публікацій за темою : 134, в т.ч. 3 енциклопедії, 1 підручник (посібник), 75 статей (6 – у зарубіжних виданнях). Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 48, h-індекс (за роботою) = 4; згідно бази даних Google Shcolar загальна кількість посилань - складає 41, h-індекс (за роботою) = 3. Новизну та конкурентоспроможність технічних