

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Стенд-імітатор магнітного поля для випробувань системи
орієнтації та стабілізації наносупутника»

Київ – 2021 рік

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Стенд-імітатор магнітного поля для випробувань системи орієнтації та стабілізації наносупутника» містить 62 сторінки, 35 ілюстрацій, 3 таблиці та 15 використаних джерел.

Метою проекту є проектування та випробування стенду-імітатору магнітного поля.

Під час виконання дипломного проекту було: розглянуто світові аналоги стендів для випробування систем орієнтації наносупутників, методи визначення орієнтації; визначено параметри стенду-імітатору; стенд-імітатор був побудований та введений в експлуатацію; розроблено та протестовано програмне забезпечення керування та калібрування, розроблена методика випробувань та показані перспективні дослідження.

Результати роботи можуть бути використані при випробуванні наносупутників формату CubeSat.

Ключові слова: наносупутник, магнітне поле, стенд, імітатор, котушка, моделювання, орієнтація, стабілізація.

ANNOTATION

The explanatory note to the diploma project "Magnetic field simulator for testing the system of orientation and stabilization of the nanosatellite" contains 62 pages, 35 illustrations, 3 tables and 15 used sources.

The aim of the project is to design and test a magnetic field simulator stand.

During the implementation of the diploma project were: considered world analogues of stands for testing orientation systems of nanosatellites, methods for determining orientation; the parameters of the stand-simulator are determined; the stand-simulator was built and put into operation; control and calibration software was developed and tested, experiment procedure was defined and perspective researches are described.

The results can be used when testing nanosatellites of the CubeSat format.

Key words: nanosatellite, magnetic field, stand, simulator, coil, modeling, orientation, stabilization.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ**

МПЗ- Магнітне поле Землі

СК- Система керування

Наносупутник- космічний апарат виконаний по стандартам міжнародного формату CubeSat

МКС- Міжнародна космічна станція

ШІМ- Широтно-імпульсна модуляція

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Темою дипломного проекту є стенд-імітатор магнітного поля для випробувань системи орієнтації та стабілізації наносупутника. В рамках цієї теми було вирішено зробити наступне:

- Дослідити проблематику випробування системи орієнтації наносупутників та провести аналіз існуючих аналогів.
- Провести геометричне проектування.
- Обрати програму для моделювання параметрів магнітного поля
- Дослідити на точність результати розрахунку результати роботи обраної програми, відпрацювати методологію проведення розрахунку.
- Провести моделювання напруженності магнітного поля.
- Провести дослідження сфери однородності стенду.
- На основі отриманих даних провести проектування стенду та системи керування.
- Провести калібрування стенду.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. Постановка задачі

1.1 Досвід «КПІ ім. Ігоря Сікорського» у створенні наносупутників формату CubeSat

Розроблений в даній роботі стенд є спеціалізований під малогабаритні космічні апарати, а саме під наносупутники формату CubeSat.

CubeSat (спутник U-класу) - це різновид мініатюризovanого супутника для космічних досліджень, який складається з кубічних модулів розміром 10 см × 10 см × 10 см. Маса супутника CubeSat розміром 1 U складає не більше 1,33 кілограма (2,9 фунта). Ці супутники часто використовують комерційні готові компоненти для своєї електроніки та конструкції. Супутники CubeSat виводяться на орбіту з Міжнародної космічної станції або запускаються як вторинні корисні вантажі на ракеті-носії. Станом на 1 січня 2021 року було запущено понад 1350 таких супутників. [1]

У 1999 році Державний університет Каліфорнійського політехнічного університету та Стенфордський університет розробили специфікації CubeSat для просування та розвитку навичок, необхідних для проектування, виготовлення та випробування малих супутників, призначених для низької орбіти Землі (LEO), і які виконують ряд наукових досліджень.

Зазвичай використання включає експерименти, які можуть бути мініатюризovanі або такі задачі, як спостереження Землі або аматорське радіо. Наукові експерименти з недоведеною базовою теорією також можуть опинитися на борту наносупутників, оскільки їх низька вартість може виправдати більші ризики.

У травні 2018 року два супутники MarCO стали першими наносупутниками, які залишили орбіту Землі на шляху до Марса разом із успішною місією InSight.

PolyITAN-1 - перший український наносупутник, створений в Національному Технічному Університеті України «Київський Політехнічний Інститут ім. Ігоря Сікорського » (КПІ ім. І. Сікорського) в кооперації з українськими

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

радіоаматорами. Активна розробка космічного апарату формату CubeSat почалася в 2009 році. 19 червня 2014 року в 19:11:11 UTC ракета-носій «Дніпро» була успішно запущена і супутник Polyitan-1 був виведений на орбіту в першій групі супутників, що відокремилися від ракети-носія.

Супутник розроблений на платформі «CubeSat» з використанням процесора Cortex-M3, STM32F105. Конструкція забезпечує механічне поєднання бортової апаратури і всіх елементів супутника в єдине ціле, монтаж кабельної мережі, зачеховки, їх фіксацію на момент транспортування, виведення на орбіту і приведення в робочий стан на орбіті. Конструкція наносупутника складається з ферми, приладових панелей, Сотопанелі, елементів кріплення до адаптера ракетноносія, елементів кріплення і монтажу. Ферма є єдиною зварною конструкцією з габаритами 116x116x110 мм і складається з плити настановної, верхньої окантовки, а також силових поперечних елементів. Установча плита зроблена у вигляді квадратної фрезерованної плити розміром 140x140x6 мм. Для забезпечення необхідного теплового режиму та радіаційного захисту апаратури, розміщеної всередині корпусу, до відкритих гранях ферми кріпляться п'ять сонячних батарей. У конструкціях сонячних батарей застосовувалися кремнієві фотоперетворювачі з ККД 17,2 ... 17,5%. Фотоперетворювачі виготовлені в КПІ ім. І. Сікорського. Сотопанельний каркас являє собою тришарову панель з полегшеним алюмінієвим стільниковим заповнювачем, двома вуглепластиковим обшивками і приклеєною діелектричної поліамідною плівкою.

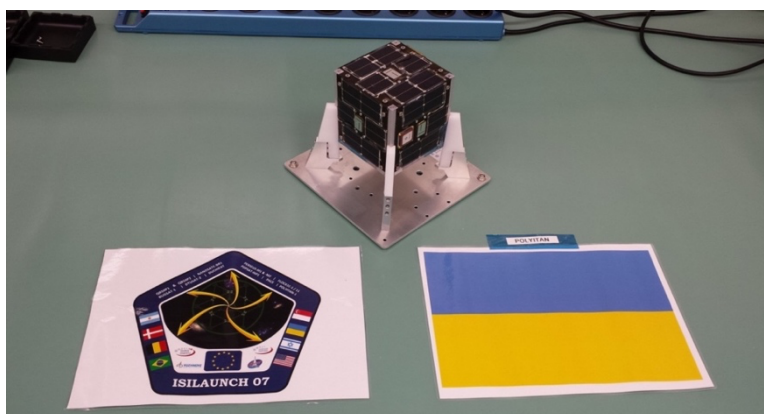


Рис.1.1 Наносупутник PolyITAN-1 [2]

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

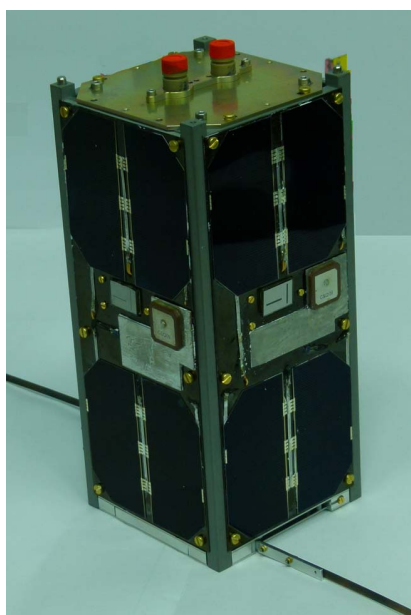


Рис.1.2 Наносупутник PolyITAN-2 [2]

Наносупутник "PolyITAN-2" розроблений в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського". Було проведено проектування другого наносупутника невеликого розміру для космічних досліджень, розробка нових структурних і технічних рішень, застосування сучасних апаратних компонентів з низькими енергетичними характеристиками, високими характеристиками даних, малих розмірів і низької вартості, для широкого кола корисних навантажень. Роботи проводились командою вчених, для того, щоб Україна увійшла і залишилася стійким учасником на міжнародному ринку науково-технологічних наносупутників і космічних модулів. Крім того, ця мета спрямована на вирішення низки дослідницьких, освітніх, наукових і технологічних завдань:

- проектування сучасних лабораторій для практичних занять висококваліфікованих професіоналів для ракетно-космічної галузі України;
- проведення випробувальних польотів пристроїв терморегулювання, сонячних батарей і аматорських систем радіозв'язку, побудованих в КПІ ім. Ігоря Сікорського;

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- функціональне тестування приймачів стандартних сигналів супутникової навігаційної системи GPS / GLONASS;
- побудова систем навігації і орієнтації для подальшого їх застосування в космічних модулях;
- розвиток мережі обміну даних і бортового комп'ютера, побудованого на базі сучасних технологій в сфері електроніки
- участь в міжнародній космічній програмі дослідження шару термосфери як найменш вивченого шару атмосфери Землі. [2]

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2 Методи керування орієнтацію космічного апарату та проблематика орієнтації наносупутників формату cubesat.

Проблематика орієнтації наносупутників.

Першим блоком методів орієнтації є системи, що базуються на законі збереження моменту імпульсу.

Закон збереження моменту імпульсу стверджує, що момент кількості руху у замкненій системі зберігається під час еволюції цієї системи з часом. Тобто момент імпульсу замкнутої системи тіл залишається незмінним при будь-яких взаємодіях тіл системи. Закон збереження кількості руху є наслідком ізотропності простору. [3]

Маховик - використовується в основному космічними кораблями для тривісного контролю положення, для якого не потрібні ракети або зовнішні аплікатори крутного моменту. Вони забезпечують високу точність наведення, і особливо корисні, коли космічний корабель повинен обертатися на дуже малі величини, наприклад, тримати телескоп, спрямований на зірку.

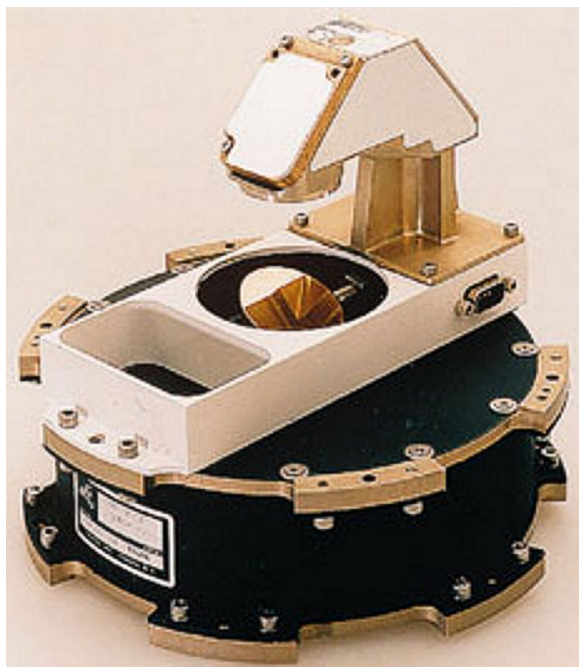


Рис. 1.2. Приклад маховика [4]

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Маховик іноді експлуатується як (і називається) колесом імпульсу, керуючи ним з постійною (або майже постійною) швидкістю обертання, щоб надати супутнику велику кількість збереженого моменту імпульсу. Це змінює динаміку обертання космічного корабля таким чином, щоб моменти збурень, перпендикулярні одній осі супутника (осі, паралельній осі обертання колеса), не приводили безпосередньо до кутового руху космічного корабля навколо тієї самої осі, що і момент опору; натомість вони призводять до (як правило, меншого) кутового руху (прецесії) цієї осі космічного корабля навколо перпендикулярної осі. Це має наслідком тенденцію до стабілізації цієї осі космічного корабля, спрямованої в майже фіксованому напрямку, дозволяючи створити менш складну систему управління орієнтацію. До супутників, що використовують цей підхід до стабілізації "зміщення імпульсу", належать SCISAT-1; орієнтуючи вісь колеса імпульсу паралельно вектору нормалі орбіти, цей супутник має конфігурацію "зміщення імпульсу тону". [4]

Проблемою маховиків є обмеження по швидкості обертання. При виконанні орієнтації маховик може досягти максимальної швидкості, тоді він повинен бути розвантаженим за допомогою додаткового засобу орієнтації.

Іншою такою системою є гіродін.

Гіродін (англ. Control moment gyroscope) — інерціальний пристрій, що обертається та застосовується для високоточної орієнтації та стабілізації, як правило, космічних апаратів (КА), що забезпечує правильну орієнтацію в польоті і запобігає безладному обертанню.

Гіродін — це двоступеневий керуючий силовий гіроскоп, який виступає в ролі гіростабілізатора. На космічному апараті він замінив простіші системи на базі двигуна-маховика. Принцип роботи цих інерційних пристроїв заснований на законі збереження моменту імпульсу. Наприклад, коли двигун-маховик розкручується в одну сторону, то космічний апарат, відповідно, починає крутитися в інший бік. Якщо під впливом зовнішніх чинників КА почав розвертатися в певному напрямку, досить збільшити швидкість обертання

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

маховика в ту ж сторону, щоб він компенсував момент («приймав обертання на себе») і небажаний поворот КА припиниться.

Принцип же роботи гіродіна полягає в створенні гіроскопічного моменту, що діє через опори гіроскопа. [5]



Рис. 1.3. Технічний персонал Боїнга готує гіродін CMG-1 для екіпажу STS-93, який встановить його на ферму Z1 Міжнародної космічної станції. [5]

Магнітні котушки є ще одним інструментом орієнтації космічного апарату. Магніторкер або магнітний торкер (також відомий як динамометричний стрижень) - це супутникова система для управління орієнтацією та стабілізацією, побудована з електромагнітних котушок. Магніторк створює магнітний диполь, який взаємодіє з навколишнім магнітним полем, як правило, земним, так що створювані протидії забезпечують потрібний крутний момент.

Зазвичай використовуються три котушки, хоча зменшеної конфігурації двох або навіть одного магніту може бути достатньо там, де не потрібен повний контроль положення. Збірка з трьома котушками зазвичай має форму трьох перпендикулярних котушок, оскільки ця установка вирівнює симетричність обертання полів, які можуть створюватися; незалежно від того, як зовнішнє поле і засоби керування розташовані по відношенню один до одного, однаковий

крутний момент завжди може бути створений, використовуючи різну кількість струму на трьох різних котушках.

Поки струм проходить через котушки, а космічний корабель ще не стабілізований у фіксованій орієнтації щодо зовнішнього поля, обертання апарату буде продовжуватися.

Магніторки легкі, надійні та енергоефективні. На відміну від двигунів, вони також не потребують витратного пального, тому теоретично вони можуть працювати необмежено довго, доки є достатня потужність, яка відповідає резистивному навантаженню котушок. На орбіті Землі сонячне світло є одним із таких практично невичерпних джерел енергії. [6]

Ще однією перевагою перед маховиками та гіроскопами є відсутність рухомих частин і, отже, значно вища надійність.



Рис. 1.4. Приклад магнітної котушки супутника фірми ISIS

Наносупутники формату CubeSat мають значні вагові та габаритні обмеження. Окрім цього часто супутники даного класу мають обмежене фінансування. Всі вищезазначені фактори провокують пошук оптимальної

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

компоновки системи орієнтації та стабілізації, яка буде легкою, негабаритною, недорогою, надійною та забезпечувати потрібну точність орієнтації.

З цієї причини оптимальним вибором є система, що складається з маховиків та магнітних котушок. Маховики забезпечують точність орієнтації, а котушки стабілізують обертання та використовуються в процесі «розвантаження» маховиків, коли вони досягли максимальної швидкості обертання.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.3 Висновок до розділу

В даному розділі було проведено аналіз методів орієнтації космічного апарату та проблематики орієнтації наносупутників. Можна зробити висновок, що магнітна складова орієнтації є визначальною в успіху орієнтації апарату в космічному просторі. Для коректної роботи системи критичними є наземні випробування системи. Стенд-імітатор магнітного поля для таких випробувань і розробляється в даній курсовій роботі.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2. ОГЛЯД АНАЛОГІВ

2.1 Математична модель

Нехай струм протікає в коловому контурі з тонкого провідника. Якщо коло має радіус R , то нескінченно малий елемент провідника зі струмом dl генерує магнітну індукцію по закону Біо-Савара-Лапласа.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{NI dl}{r^2}, \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна стала, I – сила струму, що протікає в контурі, N – кількість витків, dl – нескінченно малий відрізок провідника, r – відстань від відрізка провідника до точки A .

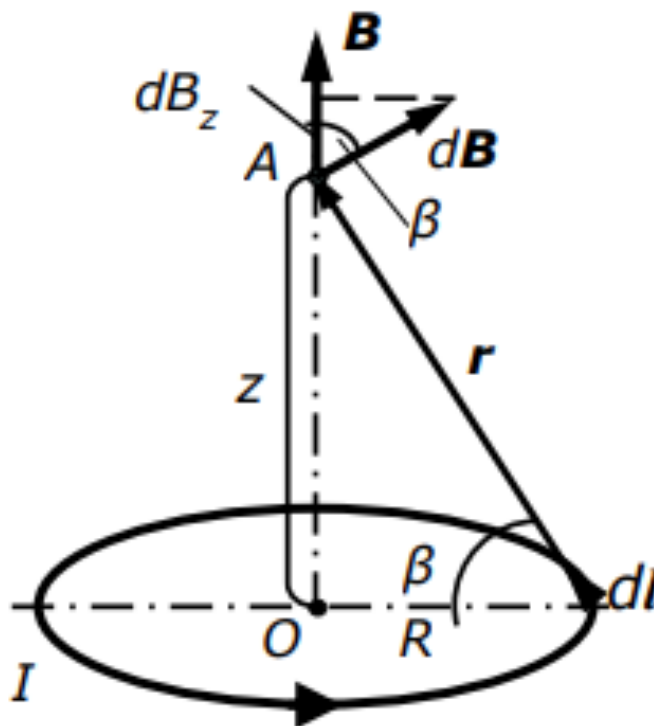


Рис. 2.1 – Магнітна індукція колового провідника зі струмом

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Результуючі елементи магнітної індукції dB формують конус векторів, де проєкції, що лежать в площині, що паралельна площині котушки будуть скомпенсовані одна одною. При цьому сумарний вектор магнітної індукції B буде направленим по осі котушки z . Його значення є сумою проєкцій на вісь z складових векторів dB :

$$dB_z = dB \cdot \cos \beta = \frac{\mu_0 NI}{4\pi} \cdot \frac{R dl}{r^3} \quad (2)$$

Результатом інтегрування по довжині контуру з врахуванням рівності $r = (z^2 + R^2)^{1/2}$ буде наступний вираз:

$$B = B_z = \frac{\mu_0 NI}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (3)$$

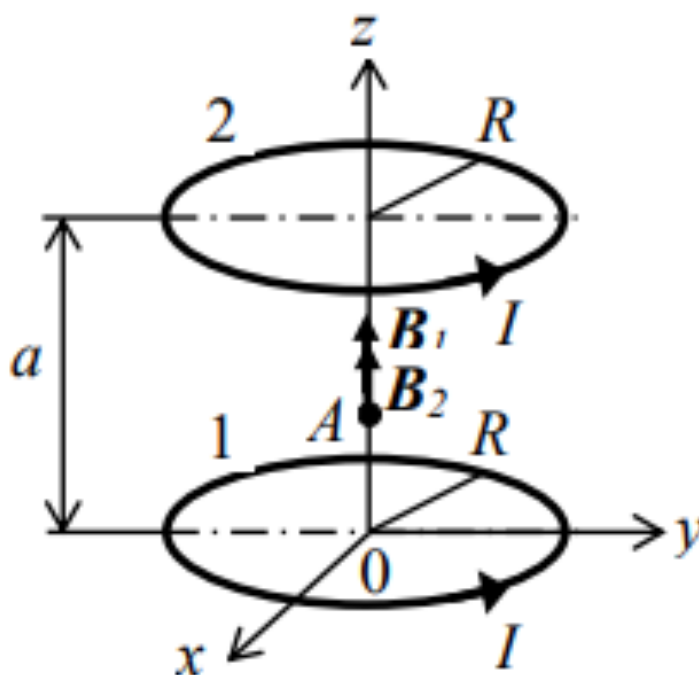


Рис. 2.2 – Магнітне поле котушок Гельмгольца

У випадку коли два однакових колових провідника радіусом R розміщені співвісно (по осі z) на відстані a один від одного та напрямки протікання струму співпадають, дана система буде мати назву котушки Гельмгольца. Коли співнаправлені струми однакові за величиною, магнітна індукція створюваного

поля в центрі системи є сумою індукцій магнітних полів від двох провідників зі струмом. Враховуючи формулу (3) отримаємо:

$$B_{1z} = \frac{\mu_0 NI}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}; \quad B_{2z} = \frac{\mu_0 NI}{2} \cdot \frac{R^2}{((z - a)^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Значення магнітної індукції у точці з координатою z по спільній осі колових контурів буде рівним:

$$B_z = \frac{\mu_0 NIR^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{(z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{((z - a)^2 + R^2)^{3/2}} \right). \quad (5)$$

Визначивши першу похідну від даного виразу, можна проаналізувати неоднорідність B_z

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{3\mu_0 NIR^2}{2} \cdot \left(\frac{-z}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{-(z - a)}{((z - a)^2 + R^2)^{5/2}} \right). \quad (6)$$

Далі знайдемо другу похідну, оскільки при заданих умовах ($z = \frac{a}{2}$), перша похідна рівна нулю.

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = \frac{3\mu_0 NIR^2}{2} \cdot \left(\frac{5z^2}{(z^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{5(z - a)^2}{((z - a)^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{((z - a)^2 + R^2)^{5/2}} \right) \quad (7)$$

Як можна побачити, друга похідна $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$ рівна нулю у точці $z = \frac{a}{2}$ за умови, що $a = R$.

З рівностей (6) та (7) можна знайти необхідні умови для максимізації області гомогенності магнітного поля. Отже, якщо колові провідники розташовані на відстані, що рівна їх радіусам, можна отримати найкращі

									Арк.
									21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ				

характеристики магнітного поля. З цієї причини була обрана дана конструкція для створення стенду-імітатора магнітного поля.

Для забезпечення просторового керування напрямком вектору магнітної індукції по трьом осям, потрібно побудувати систему, де три пари котушок Гельмгольца будуть розташовані перпендикулярно одна одній. В цьому випадку конструкція буде мати назву клітка Гельмгольца. Результуюче магнітне поле визначається за правилом суперпозиції векторів магнітної індукції трьох пар котушок Гельмгольца.

2.2 Стенд, що розроблений в Department Of The Air Force Air University, Air Force Institute Of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA

Клітка Гельмгольца спроектована, побудована та випробувана для забезпечення динамічного, 3-осьового, рівномірного магнітного поля для виключення магнітного поля Землі та створення середовища, подібного до геомагнітного поля, яке супутник сприймає би на орбіті. Система орієнтації супутника формату CubeSat на вхід отримує магнітний вектор і вектор “Сонця”, які поєднуються з даними світлових датчиків і магнітометра в CubeSat. Орієнтація оцінюється на борту CubeSat за допомогою оптимального алгоритму швидкого оцінювання кватерніонів. Досліджуються можливості клітки Гельмгольца, включаючи однорідність створюваного магнітного поля, а також точність визначення положення на борту. Результати показують, що опорна колона поблизу клітки впливає на однорідність магнітного поля. Бажане магнітне поле +/- 2 Гауса було досягнуто у двох із трьох напрямків, і клітка обладнана для імітації динамічного магнітного поля, як це було б на орбіті. Визначення ставлення за допомогою OFQEA досягається з точністю до +/- 6° похибки.

Конструкція системи керування даного стенда має різні дані максимального магнітного поля в різних напрямках. Цей факт обмежує можливості стенду по «прискореним» циклограмам та ускладнює процес калібровки. [7]

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

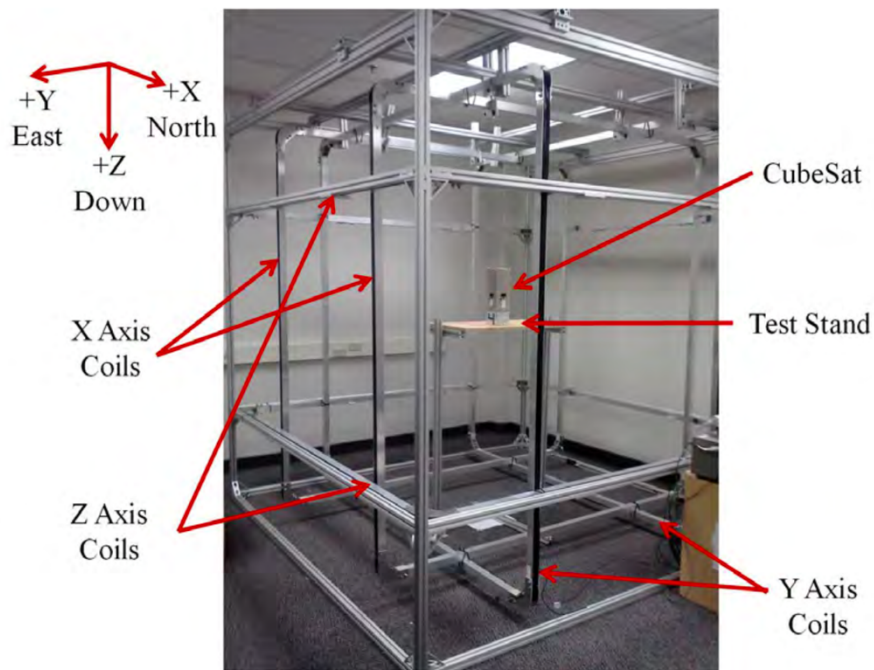


Рис. 2.3. Загальний вигляд стану Air Force Institute Of Technology [7]

3.2 Стенд, що розроблений в University of Bologna

Головною метою цього симулятора є відтворення умов орбітального магнітного поля в заданому об'ємі обсязі. Симулятор дозволяє проводити калібрування наземних супутникових магнітних датчиків і може бути використаний при випробуванні системи управління орієнтацією.

Стенд може бути пов'язаний з ПК або використаний як автономна система, здатна зберігати супутникові орбітальні дані та дані про положення. Інтерфейс ПК дозволяє моделювати практично будь-який орбітальний режим і зміну позиції в режимі реального часу за допомогою орбітального та орієнтаційного інтегратора, а можливості зберігання дозволяють використовувати дані, отримані за допомогою різних комерційних інтеграторів.

Система базується на шести з'єднаних квадратних котушках (близько 50 см на сторону) з осі, вирівняними за взаємно перпендикулярними напрямками,

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

та окремим регулятором струму. Сфера однородності з майже гомогенним магнітним полем лежить в об'ємі куба зі стороною 15 см.

Запропонована система є інноваційною через недорогу керуючу електроніку, засновану на єдиному інтегрованому мікропроцесорі, який може автономно управляти котушками, закривати контур управління на основі еталонних вимірювань магнітометра та отримувати дані експерименту.

Метою цього проекту є виготовлення системи, здатної імітувати магнітне поле вздовж орбіти супутника для імітації його процесу орбітальної орієнтації.

Для досягнення цієї мети першою вимогою до стенду є здатність компенсувати магнітне поле Землі, після цього виставляється магнітне поле, що подібне до орбітального. На широті Італії напруженість магнітного поля Землі становить близько 0,45 Гауса, а напруженість поля, що підлягає моделюванню, було зафіксовано на рівні 0,45 Гауса, в результаті чого загальне магнітне поле 0,9 Гауса було мінімальною вимогою до котушки та електричної системи.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

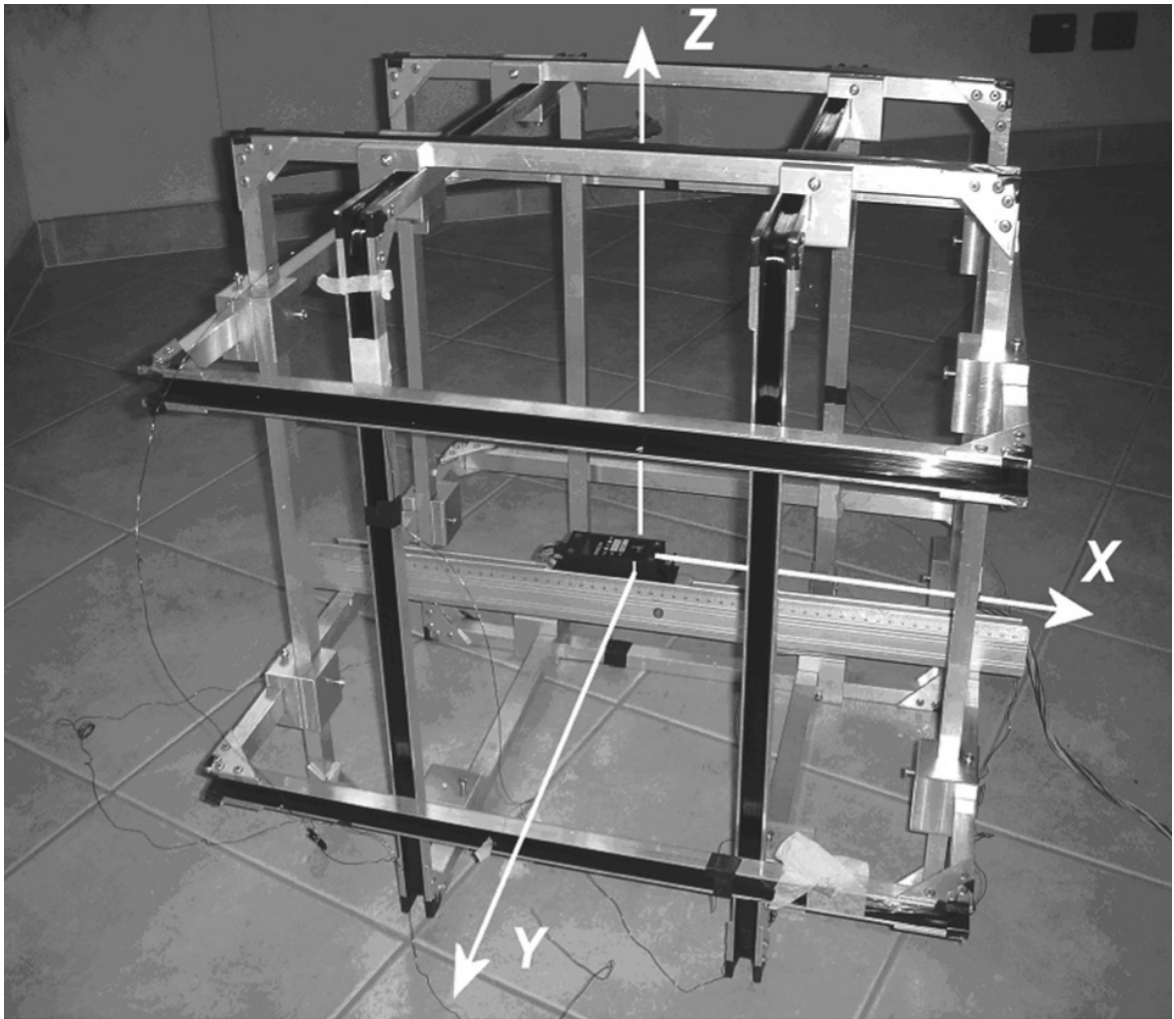


Рис. 2.4. Загальний вигляд стенду University of Bologna [8]

Розмір сторони котушки складає 50 см. Оскільки кожна пару котушок потрібно було вставити в іншу, кожна пара мала дещо різні розміри.

Опора котушки була виготовлена з алюмінієвої труби висотою 1,5 см, тому зовнішня пара котушок має розмір 53 см, центральна - 50 см, а внутрішня - 47 см.

Блоки з алюмінію були розроблені з блокувальними гвинтами для з'єднання котушок та утримання їх на місці, що дозволяє налаштувати та правильно вирівняти систему.

Дріт був укладений у тонку ізоляцію та мав номінальний діаметр 0,511 мм і питомий опір 0,0838 Ом / м. При 100 витках на кожній котушці опір кожної котушки був 17: Ом для першої котушки, 18,4 для другої та 19,4 для третьої.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щоб уникнути короткого замикання через старіння ізоляції дроту та механічних навантажень, внутрішні частини кожної опори котушки були ізольовані кількома шарами непровідного матеріалу, при цьому особлива увага приділялася до країв конструкції. Під час виготовлення котушок до дроту постійно підключався мультиметр для виявлення можливого короткого замикання.

Намотка котушок була виконана в п'ять шарів по 20 витків кожен.

Пари котушок були послідовно з'єднані, щоб гарантувати, що через однакові котушки пари протікає абсолютно однаковий струм.

Система є рухомою, оскільки вона встановлена в стійці для зручності транспортування та використання в різних місцях, що дозволяє дослідникам знайти чисте електромагнітне середовище в приміщенні для випробувань та розмістити систему у відповідному місці, якщо обладнання, що перевіряється, не може переміщуватись.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

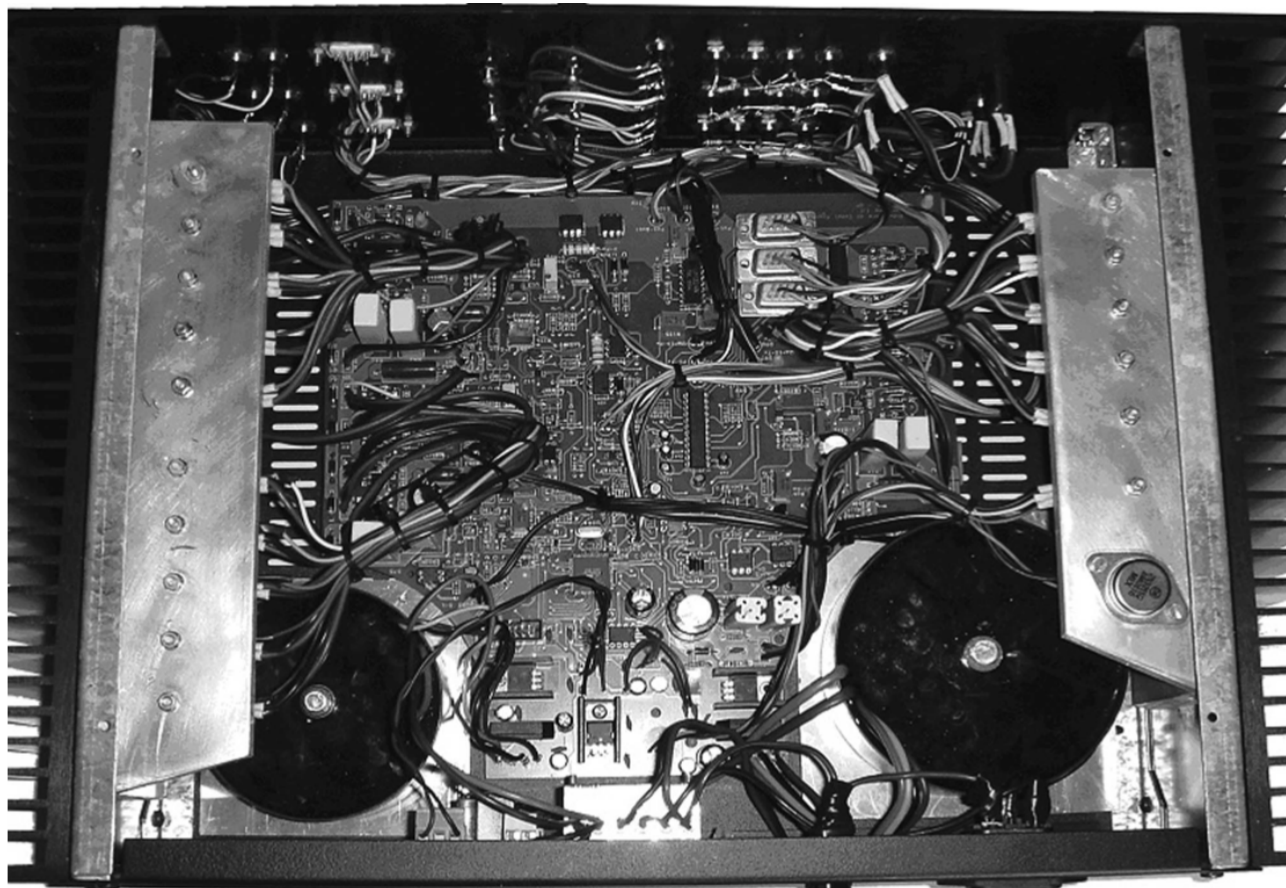


Рис. 2.5. Система керування стендом University of Bologna [8]

Електронне управління пристроєм має два основних завдання: встановити силу струму в кожній парі котушок і зчитати магнітне поля за допомогою магнітометра. Схема управління взаємодіє по лінії RS232 з ПК, який здійснює орбітальне моделювання в реальному часі, встановлюючи необхідні рівні магнітного поля одночасно зберігаючи показання магнітометра. Магнітометри також використовують з'єднання RS232, і можуть бути підключені по-парно: таким чином, можна використовувати перший магнітометр як еталонний пристрій, а другий - як прилад, що перевіряється.

Провівши розрахунок клітки Гельмгольца та врахувавши коефіцієнт запасу для створення магнітного було визначено максимальну силу струму рівною 0,47 А.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ

Арк.

27

Висновки аналізу аналогу:

- Розміри сфери однородності не дозволяють випробувати наносупутник розміром більше за 1U.
- Велика кількість різних за значенням керуючих напруг, що ускладнює схему.
- Конструкція передбачає активне охолодження силових елементів системи керування, що ускладнює технологічність

2.3 Стенд, що розроблений в Йоркському університеті (York University)

Клітка Гельмгольца університету міста Йорк являє собою повну і незалежну систему, яка буде використана для наземних випробувань наносупутників, що дозволяє перевіряти автоматизовані системи магнітного контролю над орієнтацією. Головною метою цього симулятора є відтворення умов магнітного поля на орбіті з недорогими механічними та електронними конструкціями. Система здатна створити область однорідного, спрямованого магнітного поля для наносупутникових наземних випробувань.

Даний стенд має довжину сторони приблизно один метр, на кожній котушці намотано 36 витків дроту 16 AWG. Каркас виготовлений з алюмінію. Зібрана конструкція показана на Рис 2.7.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

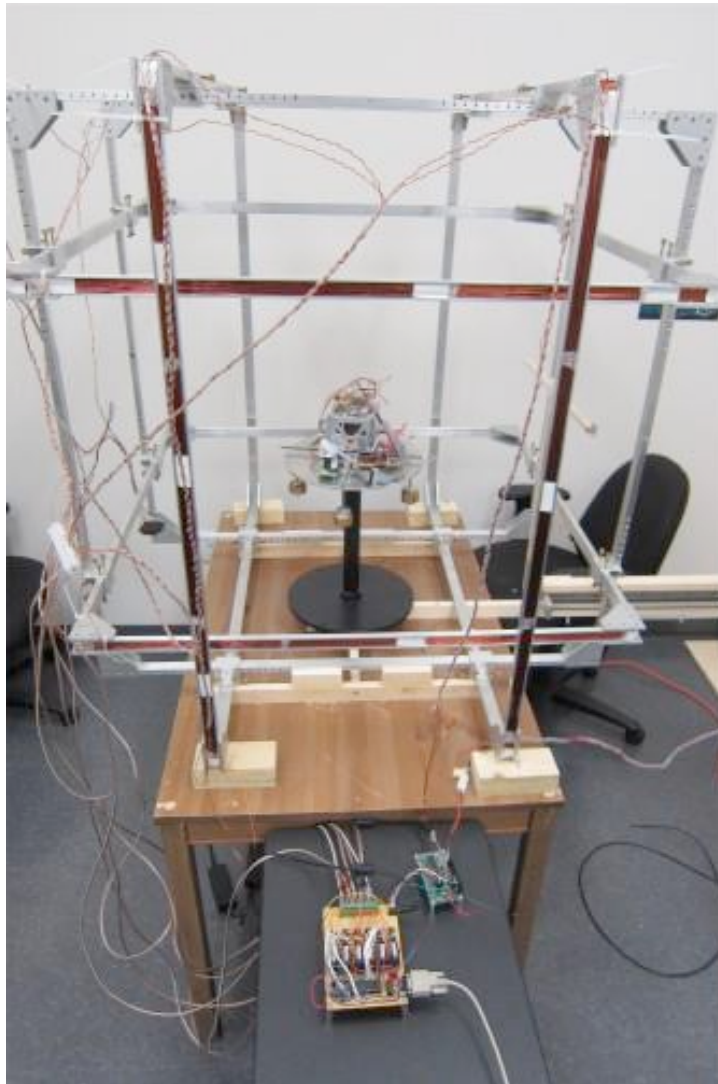


Рис. 2.6 Зовнішній вигляд клітки Гельмгольца в університеті Йорку [9]

Система керування дозволяє виконувати дві основні задачі. Перша задача це керування струмом в кожній окремій котушці, друга задача це зчитування значень магнітного поля. Будова схеми показана на Рис 2.8. Силове джерело має напругу 12 В.

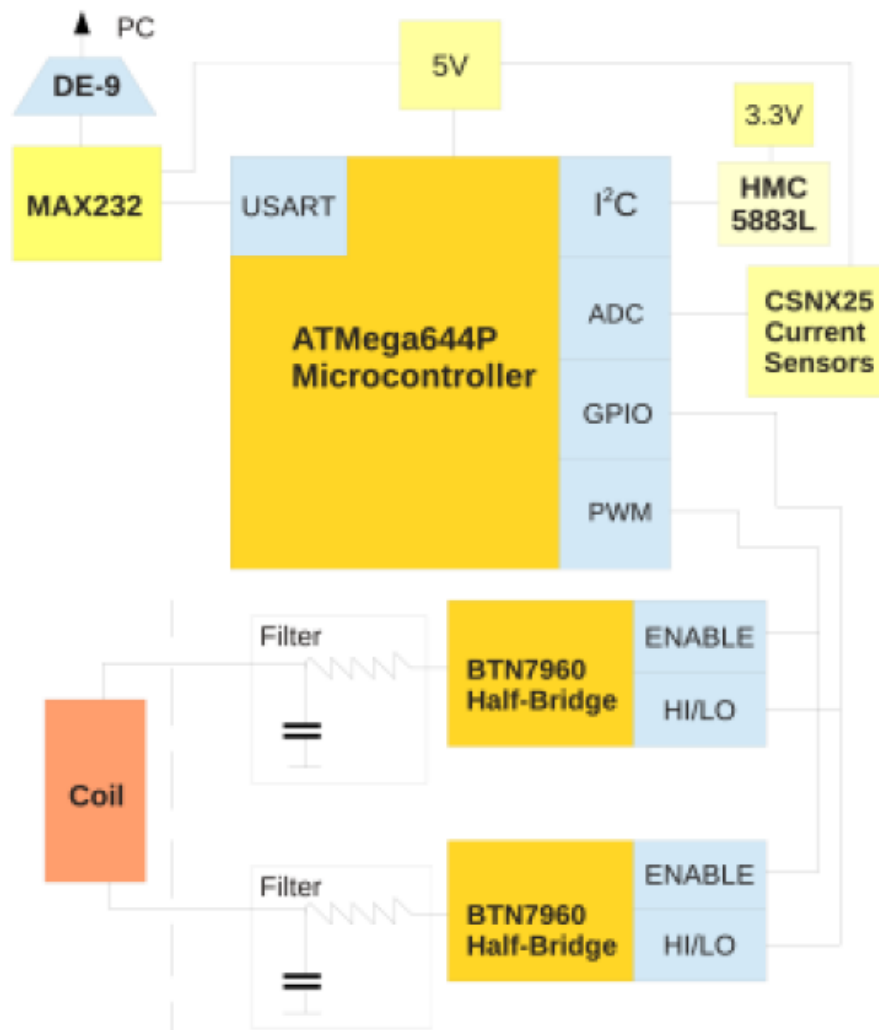


Рис. 2.7 Система керування стенду [9]

Керування стендом виконується за допомогою програмного пакету MATLAB, котушки підключені до драйверів попарно, тобто керування відбувається зразу по обидвом котушках однієї осі. Перший магнітометр розташований на випробуваному наносупутнику, другий розташований в стенді і виконує роль еталонного. Загальна схема підключення системи зображена на Рис 2.8.

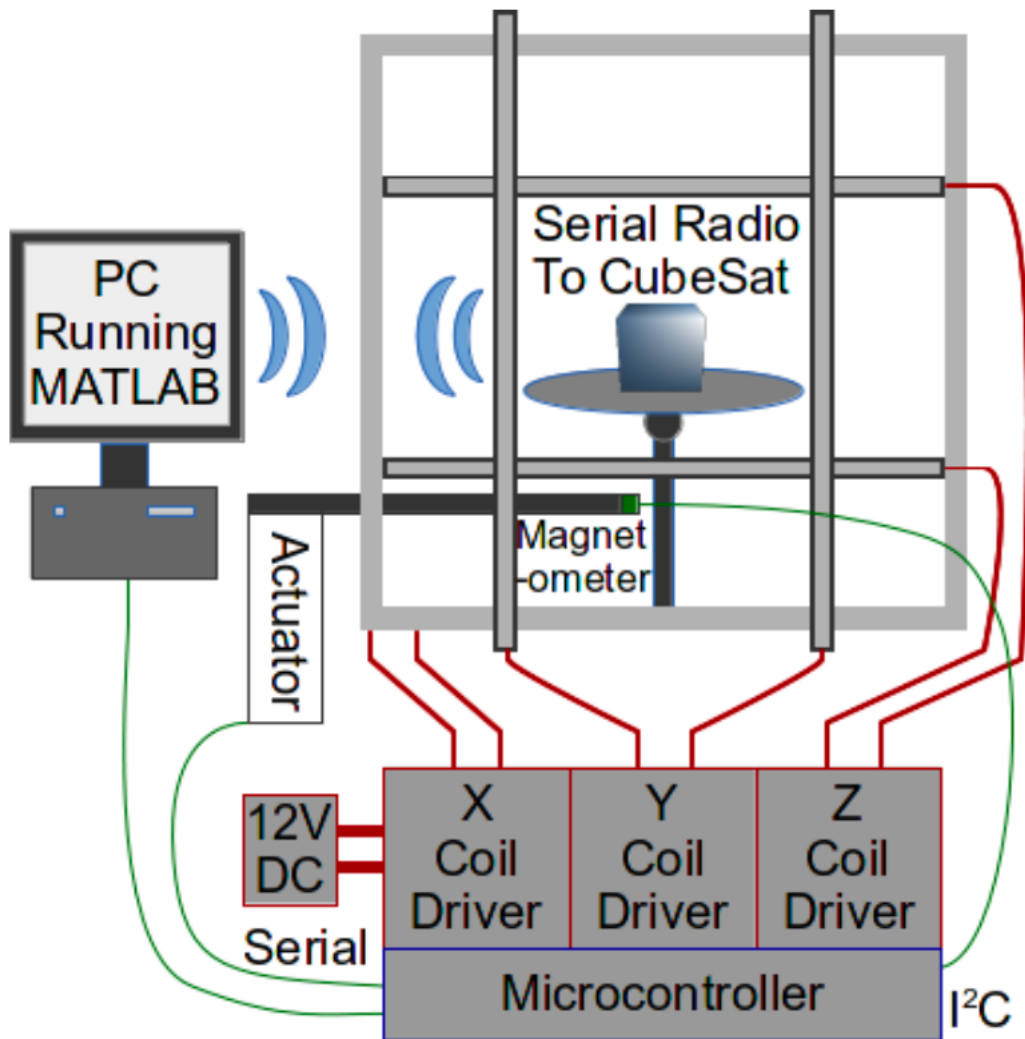


Рис. 2.8 Схема підключення системи станду [9]

Висновки аналізу запропонованої конструкції:

- Система використовує імпульсне регулювання струму. Це гарантує високий коефіцієнт корисної дії, але у випадку за малої індуктивності котушки, форма струму буде неякісною, а отже отримане магнітне поле не буде придатним для випробувань космічної техніки. В цьому випадку в систему необхідно вбудувати фільтр, а це призведе до збільшення інерційності.
- Даний стенд демонструє достатні характеристики точності магнітного поля, але його розміри обмежуються супутниками розміром 3U, тобто 10x10x30 см.

2.4. Висновки до розілу

Виходячи з четвертого розділу, де було розглянуто сучасні аналоги стендів-імітаторів магнітного поля, було сформовано деякі основні характеристики яким має відповідати стенд, а саме:

- Модуль вектора магнітної індукції всередині стенду - 200 мкТл;
- Крок зміни магнітного поля до 20 нТл;
- Радіус сфери однородності магнітного поля до 400 мм.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. КОНСТРУКЦІЯ СТЕНДУ

3.1 Моделювання магнітного поля та проєктування параметрів стенду

При відлагодженні системи орієнтації наносупутника необхідною є імітація магнітного поля Землі для різних його положень у просторі. Для цього проходить розробка установки виконаної у вигляді трьох пар взаємно перпендикулярних котушок Фанселау, тобто квадратні котушки Гельмгольца. розмірами 1.5x1.5 м. Розмір та форма котушок обрані з конструктивних міркувань. Нижче наведений її розрахунок та принципові схеми.

Розрахунок проводимо для величини модуля магнітної індукції
 $|B|=200 \cdot 10^{-6}$ Тл в центрі стенду.

Відстань між квадратними котушками для досягнення максимального об'єму однорідного поля повинна бути

$$d=0.5445 \cdot L=0.81675 \text{ м.}$$

Де L-довжина сторони котушки.

Відстань між Y котушками (найбільшими ,оскільки охоплюють дві пари L=1540мм).

$$d_y = 0.5445 \cdot 1540 = 838 \text{ мм}$$

$$r_y = 419 \text{ мм}$$

Відстань між X котушками (найменшими, оскільки вони охоплюються іншими парами). L=1500мм.

$$d_x = 1500 \cdot 0.5445 = 816 \text{ мм}$$

$$r_x = 408 \text{ мм}$$

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Відстань між Z котушками візьмемо як середнє між X і Y.

$$d_z=(838+816)/2=827$$

$$r_z= 414$$

- 1) Діаметр мідного дроту $d=1\text{мм}$, його площа перерізу $S=0.8\text{ мм}^2$
- 2) Питомий опір міді при 20 град. С $\rho=0.0175\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$
- 3) Допустимий питомий струм – $5\text{ А}/\text{мм}^2$, що при перерізі 0.8 мм^2 дає допустимий струм $I=5\cdot 0.8= 4\text{ А}$
- 4) Котушки- квадрати зі стороною $C=1.5\text{ м}$
- 5) Відстань від площини котушки до точки встановлення магнітометра $x=0.375\text{ м}$ (половина радіусу)
- 6) Магнітна проникність вакууму $\mu_0=12566\cdot 10^{-6}\text{ Гн}/\text{м}$

3.2 Силове проєктування. Моделювання магнітного поля.

Для моделювання був обраний програмний пакет Ansys Maxwell, як флагманський продукт сфери комп'ютерного моделювання.

Перед використанням цього продукту була проведена перевірка його налаштувань шляхом розв'язання простої еталонної задачі.

Розглянемо приклад двох круглих котушок Гельмгольца радіусом 1.5 м з заданими в таблиці 1 струмами і кількістю витків. Струм 4 А , 45 витків.

Розрахунок за допомогою програмного продукту:

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

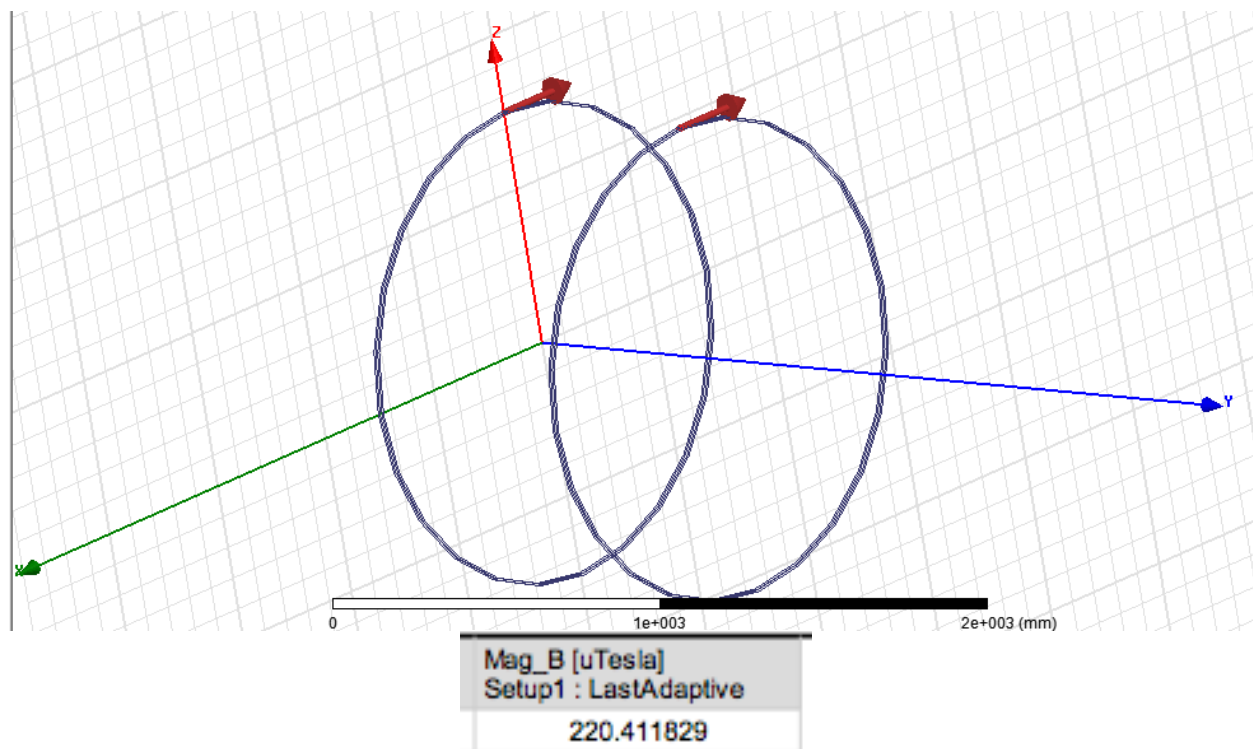


Рис. 3.1. Перевірочне моделювання еталонної задачі

В результаті отримано поле зі значенням модуля магнітної індукції $220 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Тепер проведемо аналітичний розрахунок:

$$B = \frac{\mu_0 * 2\pi I n R^2}{4\pi(R^2 + (\frac{R}{2})^2)^{\frac{3}{2}}} = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} * \frac{\mu_0 I n}{R} = 0.715542 * \frac{1.2566 * 10^{-6} * 184}{0.75} = 220.5914 * 10^{-6} \text{Тл}$$

Значення отримані аналітично і програмно співпадають, отже можна стверджувати, що розрахунок квадратних котушок теж виконаний вірно.

3.2.1 Магнітне моделювання

Розглянемо два критичні варіанти роботи стенду.

1)

Вектор магнітної індукції направлений по осі стенду. В такому положенні поля задіяна тільки одна пара котушок, як наслідок, струм в котушках максимальний

Значення струму в котушках: 192 Ампер-витків. При силі струму 4А кількість витків знаходиться як

$$n=192/4=48;$$

Приймаємо кількість витків в котушках рівною 48.

Стенд створив поле з вектором магнітної індукції рівним $202,437194 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Моделювання:

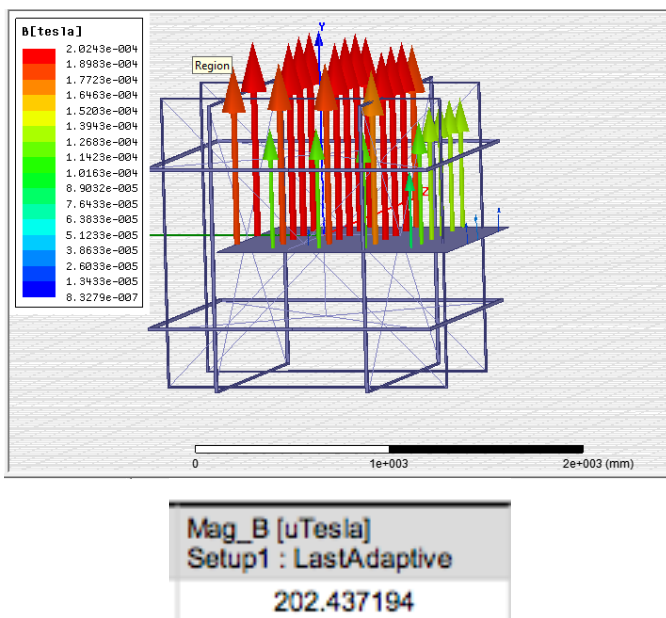


Рис 3.2. Магнітне поле направлено по осі стенду

2)

Вектор магнітної індукції направлений в кут стенду:

При такому режимі роботи задіяні всі три пари котушок, як наслідок, струм в котушках мінімальний.

Значення струму в котушках: 109 Ампер-витків. При 48 витках достатнім буде значення сили струму 2.27 А. Це мінімальне значення сили струму при роботі стенду.

Моделювання:

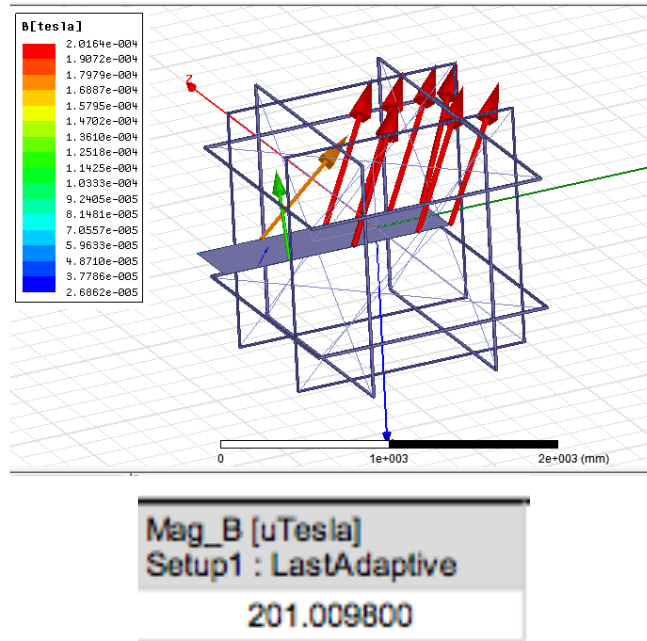


Рис 3.3. Магнітне поле направлено по діагоналі стенду

Порівняльна таблиця 5.1 описує кількість витків в залежності від обраного максимального струму. Вибір робиться виходячи з результатів температурного розрахунку.

Табл. 5.1 Відповідність струму та кількості витків.

I, A	n
4	48
3	64
2.5	76.8
2	96
1	192

3.2.2 Розрахунок кількості витків та діаметру дроту.

Згідно з результатами порівняння можливих варіантів дроту (як функцій кількості витків і навантаження відносно струму) обрано мідний дріт діаметром 1,3 мм, що є оптимумом між зручністю намотки і безпекою для роботи схеми.

3.2.3 Розрахунок потужності джерела живлення котушки.

Для дроту діаметром 1,29 мм допустимий струм дорівнює

3,7 А; Витків на одній котушці:

$$N=192/3.7=52 \text{ шт.}$$

Опір однієї котушки $R=4.172 \text{ Ом}$. Для такого дроту потрібне джерело з напругою від 15 В.

3.2.4 Крок зміни магнітного поля.

Були висунуті вимоги до джерела живлення по кроку зміни сили струму. Для випробувань крок зміни магнітного поля має відповідати похибці магнітометра.

В розрахунку приймаємо крок рівний 20 нТл. Після проведення необхідних комп'ютерних моделювань зроблено висновок, що для забезпечення приросту модулю магнітної індукції на 20 нТл, потрібно обрати джерела які забезпечать вибраний приріст з кроком сили струму 1 мА.

3.2.5. Однорідність поля.

Для дослідження однорідності магнітного поля дослідимо графік зміни модуля магнітної індукції перпендикулярно силовим лініям магнітного поля при роботі стенду на максимальному режимі струму. Так як областю однорідності двох котушок є циліндр, областю однорідності трьох взаємно перпендикулярних осей стенду буде, приблизно, сфера, радіусом рівним радіусу цього циліндра. На прикладі зміни модуля магнітної індукції між двома X котушками (найменшими) по яких тече струм 192 ампер-витка вздовж лінії перпендикулярної до силових ліній між котушками були зроблені висновки щодо однорідності поля.

Отриманий радіус однорідності з похибкою менше 1%: $R=293 \text{ мм}$, що цілком задовільняє умови щодо розміру сфери однорідності магнітного поля, оскільки в сферу однорідності можна помістити трьохюнітовий наносупутник формату CubeSat. Розміри таких супутників дорівнюють 10x10x30 см і саме таким розробляється третій супутник PolyITAN-3.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

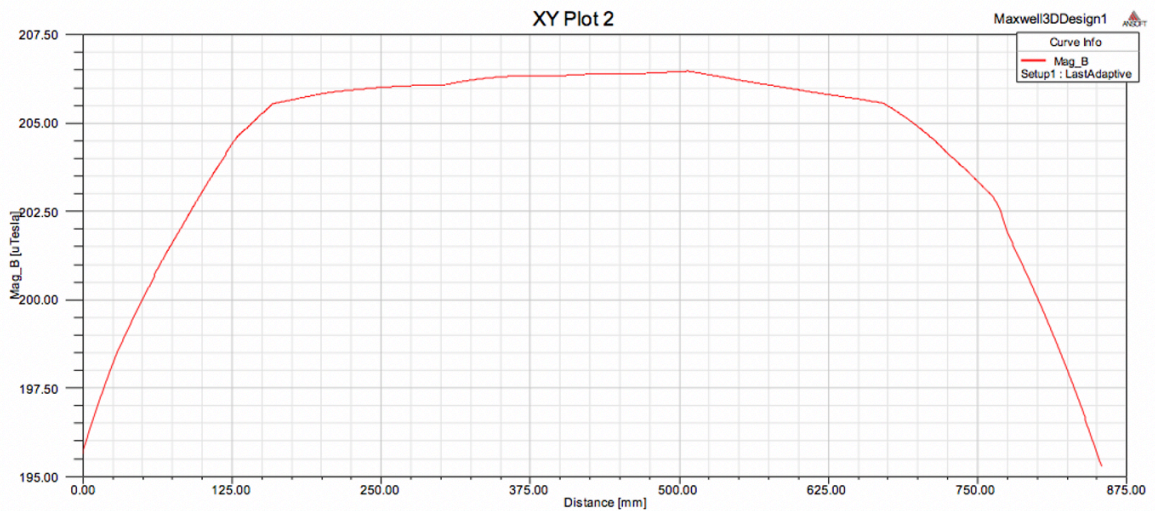
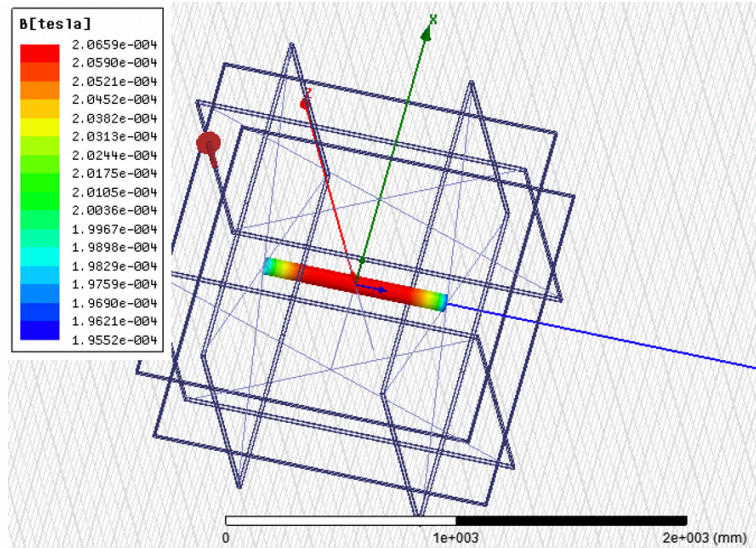
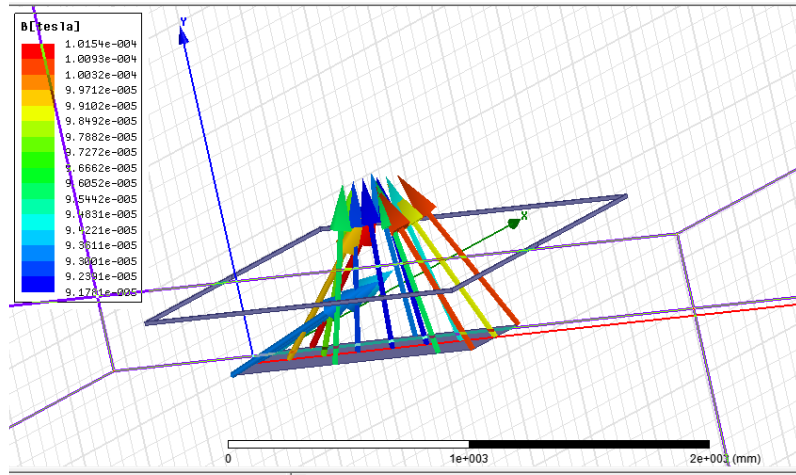


Рис. 3.4. Дослідження сфери однородності магнітного поля

3.3. Перевірка моделювання.

Перед намоткою котушок повинна бути перевіреною правильність розрахунків на прикладі однієї котушки з обраним струмом і кількістю витків. Для прикладу розрахуємо значення магнітної індукції на відстані 0,375 м від котушки з током 4 А та 48 витками.



Mag_B [uTesla]
Setup1 : LastAdaptive
91.781423

Рис 3.5. Еталонний розрахунок

При таких умовах величина модуля магнітної індукції на відстані 0,375 м від котушки по її осі буде дорівнювати $91,781423 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Перед намоткою всіх котушок це значення було підтверджено експериментально і почалася побудова натурального стенда.

На основі отриманих в даному розділі даних була побудована 3D модель стенду-імітатора магнітного поля в програмному пакеті SolidWorks



Рис 3.6. 3D модель стенду

3.4 Система керування.

Електрична частина імітатора складається з:

- 1) драйверів котушок, тобто Н-мостів. широтно-імпульсна модуляція змінює струм, тим самим модуль магнітної індукції поля пари котушок;
- 2) магнітометра, який використовується для зворотнього зв'язку;
- 3) плати з мікроконтролером STM32F103, що забезпечує керування драйверами відповідно до сигналів зворотнього зв'язку;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ

Арк.

41

4) перехідника UART на WIFI/Ethernet, дозволяючого підключити імітатор до комп'ютерної мережі та віддалено ним керувати.

Отже, система управління стенду складається з блоку живлення, керуючого мікроконтролера, одноплатного комп'ютерного пристрою Raspberry Pi і шести драйверів, до кожного драйвера під'єднана котушка. Схема зображена на рисунку 3.7.

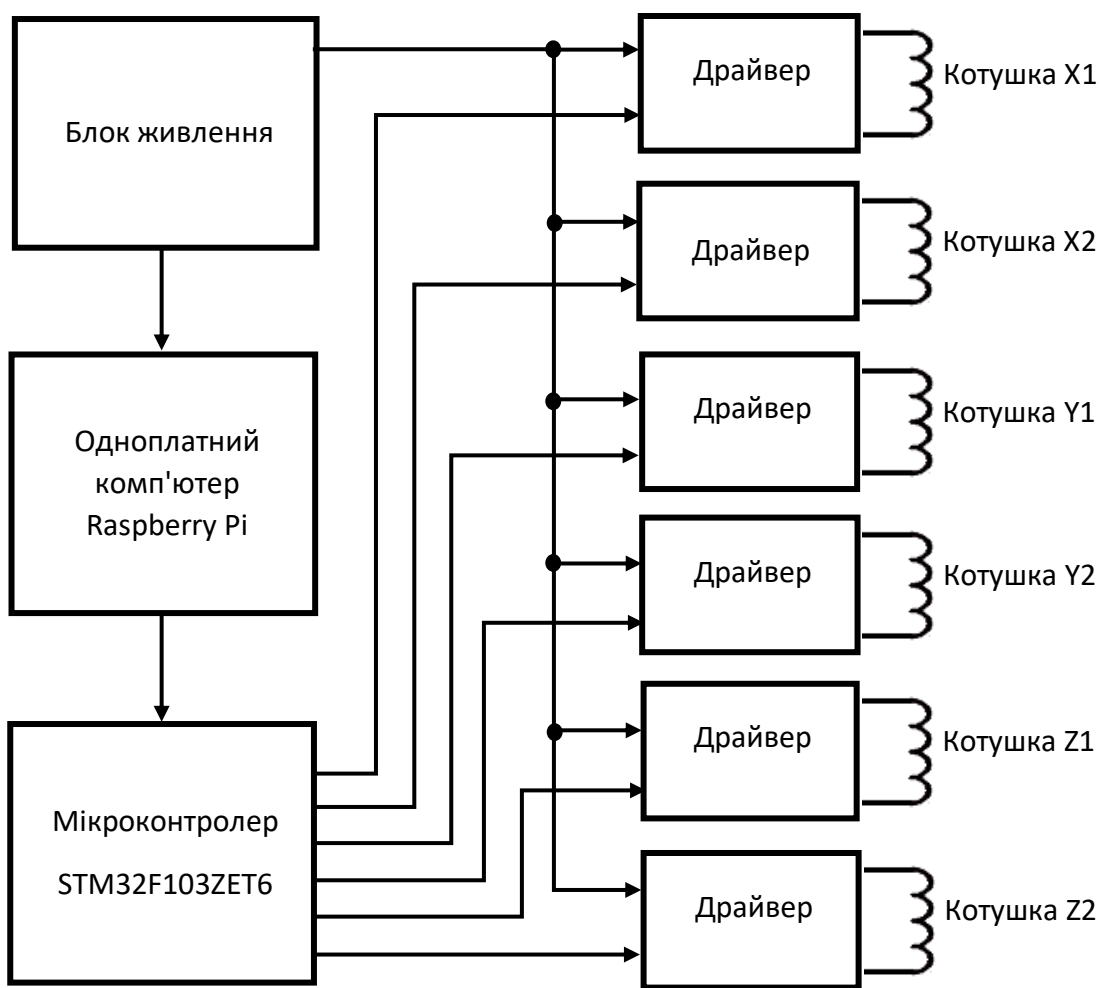


Рис 3.7. Система керування. Структурна схема

Рис 3.8. ілюструє структуру драйверу та схему його підключення до мікроконтролеру та котушки. Дана схема забезпечує керування котушки у всьому її робочому діапазоні у обидвох напрямках генерації магнітного поля. Зворотність напрямку протікання струму забезпечується мостовою схемою. Напруга котушки регулюється з використанням широтно-імпульсної модуляції.

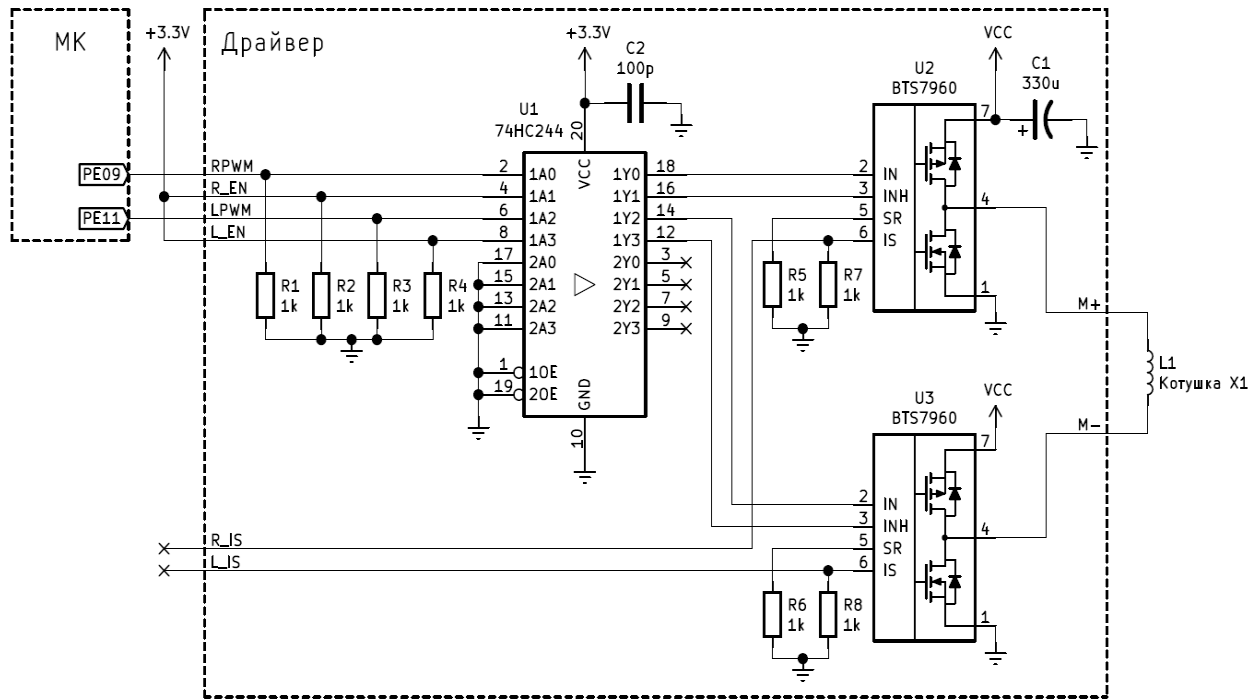


Рис 3.8. Підключення та принципова схема драйвера

Генерація ШІМ- сигналу реалізована функціоналом мікроконтролеру STM32F103ZET6 [11], де шість таймерів формують сигнал для шести котушок, що дозволяє виконувати керування стендом та налаштування кроку зміни магнітного поля шляхом зміни параметрів таймеру.



Рис 3.9. Побудований стенд-імітатор магнітного поля



Рис 3.10. Наносупутник PolyTAN-2 на підвісі стенду-імітатору магнітного поля

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3.5 Висновки до розділу

В даному розділі описане моделювання магнітних параметрів стенду та отримані конструктивні рішення. Конструкція описана в даному розділі була протестована та визнана працездатною та такою, що задовільняє випробування наносупутників формату CubeSat розміром 3U.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

4. Результати

4.1 Калібрування

Після проведення всіх вищеописаних розрахунків, стенд був побудований і підключений до системи керування. Далі почався етап калібрування. На котушки по чергово із сталим кроком подавався сигнал, який зчитувався магнітометром. Далі по побудованим залежностям вівся підбір поправочних коефіцієнтів і формувалися калібровочні таблиці.

Калібрування можна поділити на два етапи. Перший етап- створення точних калібрувальних таблиць відповідності керуючих сигналів і магнітного поля для кожної з котушок. Цей етап проводиться шляхом зміни струму в котушках і запису відповідних значень магнітного поля.

Другий етап- налагодження алгоритму компенсації магнітного поля Землі в стенді. Цей алгоритм виконується при кожному запуску стенду. Після того як поле виставлено рівним нулю. Дані струму визначаються як базові і всі керуючі сигнали подаються відносно них.

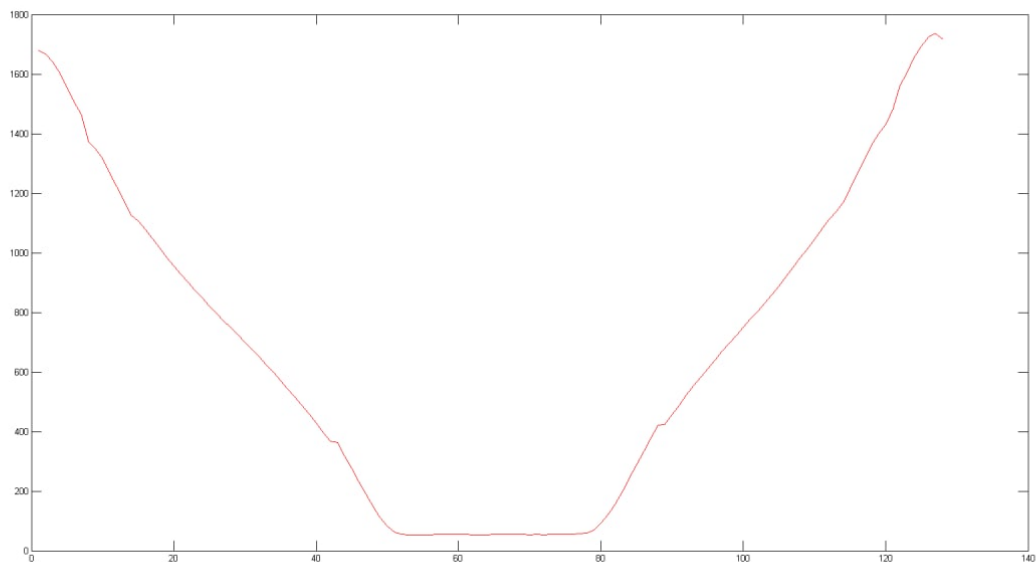


Рис. 4.1. Приклад одного із експериментів із стендом. Залежність магнітного поля від сили струму в котушках

Для калібрування було розроблено декілька алгоритмів:
Алгоритми, зчитування даних стенду при його калібруванні та виставлення нульового поля в центрі, весь код виконаний в середовищі MATLAB.

4.2 Методика проведення випробувань

Розроблений в даному дипломному проєкті стенд-імітатор магнітного поля дозволяє провести наземні випробування системи орієнтації та стабілізації наносупутників формату CubeSat.

Першим важливим режимом роботи, який повинен бути випробуваним на стенді є режим розвантаження маховика. Як і при будь якого дослідженні в стенді першим кроком є визначення локального Земного магнітного поля. Після цього алгоритм компенсації магнітного поля визначає керуючі індекси для виставлення магнітної індукції в центрі стенду рівною нулю. Після цього ці індекси визначаються як базові, відносно яких відбувається керування магнітним полем.

Далі виставляється магнітне поле, що відповідає магнітному полю в заданій точці орбіти.

Далі супутник із розкрученим до максимальної швидкості маховиком закріплюється на підвісі стенду. Наступним кроком є відпрацювання алгоритму компенсації обертання супутника за допомогою магнітних котушок, що встановлені на супутнику при поступовому зменшенні швидкості обертання маховика.

Наступним випробуванням є випробування системи орієнтації наносупутника. При цьому повторюються вищеописані операції по виставленню нульового магнітного поля в центрі. Далі вмикається імітатор Сонця, що закріплений біля стенду та задається магнітне поле у відповідній точці орбіти. Після цього на супутник подаються команди орієнтації і перевіряється їх відпрацювання для потрібних точок орбіти.

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Перспектива подальших досліджень

В подальших дослідженнях стенд буде використаний для вибору оптимального методу визначення орієнтації університетського наносупутника формату CubeSat, використовуючі польотні дані наносупутника PolyITAN-2.

Критерієм оптимальності методу для університетських наносупутників є точність та необхідна обчислювальна потужність, оскільки космічні апарати даного класу часто мають строгі обмеження по енергоспоживанню та навантаженню центрального процесору. Вибір найбільш оптимального методу визначення орієнтації є надзвичайно важливим для успіху космічної місії, оскільки він дозволить виконати задачі корисного навантаження якісно за критерієм точності та ефективно за критерієм необхідної чисельної потужності.

Для студентських наносупутників формату CubeSat задача вибору ускладнюється невеликими точностями використаних датчиків та можливих неточностей при їх калібруванні та закріпленні. В кості датчиків в більшості випадків використовуються датчики, що вимірюють напрям на Сонце та магнітометри, що фіксують магнітне поле.

Постановкою задачі перспективних наукових досліджень з використанням стенду-імітатора магнітного поля є аналіз п'яти основних відомих алгоритмів визначення орієнтації та їх порівняння і вибір найбільш оптимального. Для аналізу алгоритмів використовуються польотні дані наносупутника PolyITAN-2, який розроблений студентами та викладачами “КПІ ім. Ігоря Сікорського” та почав працювати на орбіті Землі в 2017 році.

Для вирішення задачі були використанні наступні польотні дані з борту наносупутника PolyITAN-2: напрямок на Сонце та напрямок магнітного поля в даній точці польоту. Для відповідних точок орбіти були розраховані теоретичні значення напрямку на Сонце та напрямку магнітного поля. Були розглянути два інтервали польоту супутника. Перший тривалістю 76,97 секунди, другий тривалістю 124,94 секунди, в двох інтервалах задіяні різні датчики напрямку на Сонце. Для кожної точки з проміжку орієнтація супутника була розрахована

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

чотирма методами, а саме методом Тріад, Кватерніонний метод Девенпорта, QUEST (QUaternion ESTimator), OLAE (An Optimal Linear Attitude Estimator). Для вирішення задачі були написані алгоритми в програмному продукті MATLAB.

Опис використовуваних методів

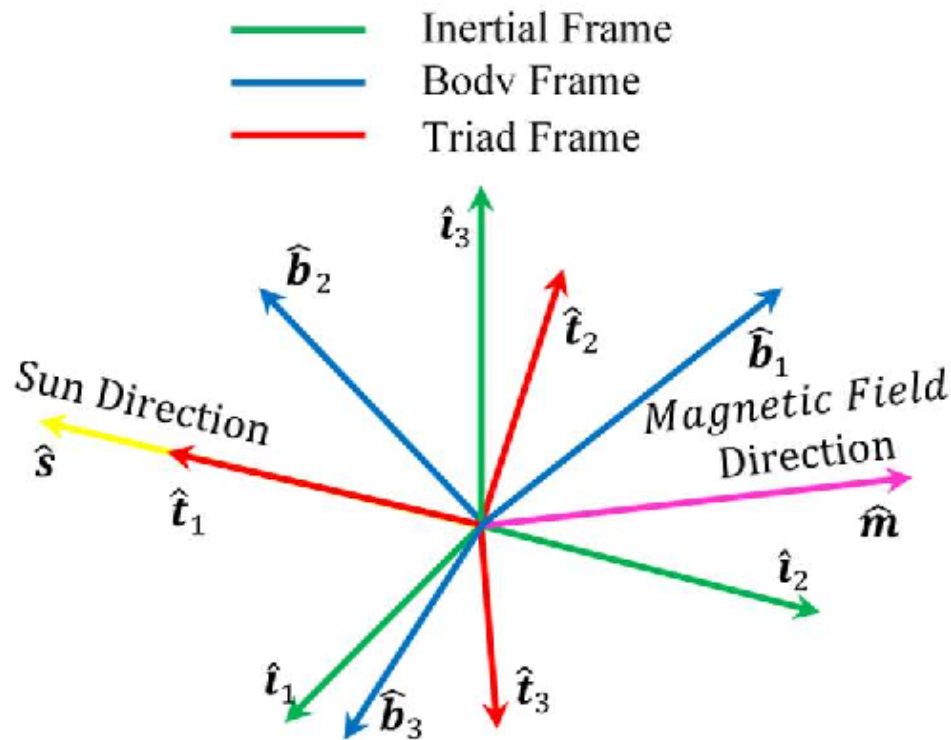


Рис. 4.2 Метод Тріад [12]

1. Метод тріад

В методі тріад вводиться додаткова система координат, одна з осей якої співнаправлений із одним із векторів напрямку найточнішого датчика, друга є векторним добутком першої та напрямком другого датчика, третя доповнює правосторонню систему координат.

Ця система координат визначається використовуючи як виміряні так і розрахункові дані, далі матриця напрямних косинусів визначається з рівності цих систем координат.

										Арк.
										49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ					

Недоліки метода: неповне використання вимірних даних не приймаючи до уваги похибки вимірювання

2. Кватерніонний метод Девенпорта

Даний метод вирішує задачу Ваби, тобто задачу мінімізації цінової функції використовуючи властивості кватерніонів.

Недоліки метода: Великі розрахункові потужності задіяні для знаходження власних значень та векторів для матриць 3×3 . [13]

3. Метод QUEST (QUaternion ESTimator)

Даний метод дозволяє зменшити потрібні розрахункові потужності за рахунок послідовних інтецій із досить точним першим наближенням. [14]

4. OLAE (An Optimal Linear Attitude Estimator)

Даний метод не вирішує задачу Ваби, замість цього він використовує перетворення Келі для знаходження орієнтації супутника. Даний метод є найбільш оптимальним по розрахунковій потужності, оскільки використовує виключно операції з матрицями, перетворюючи задачу знаходження орієнтації на повністю лінійну задачу. [15]

					ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

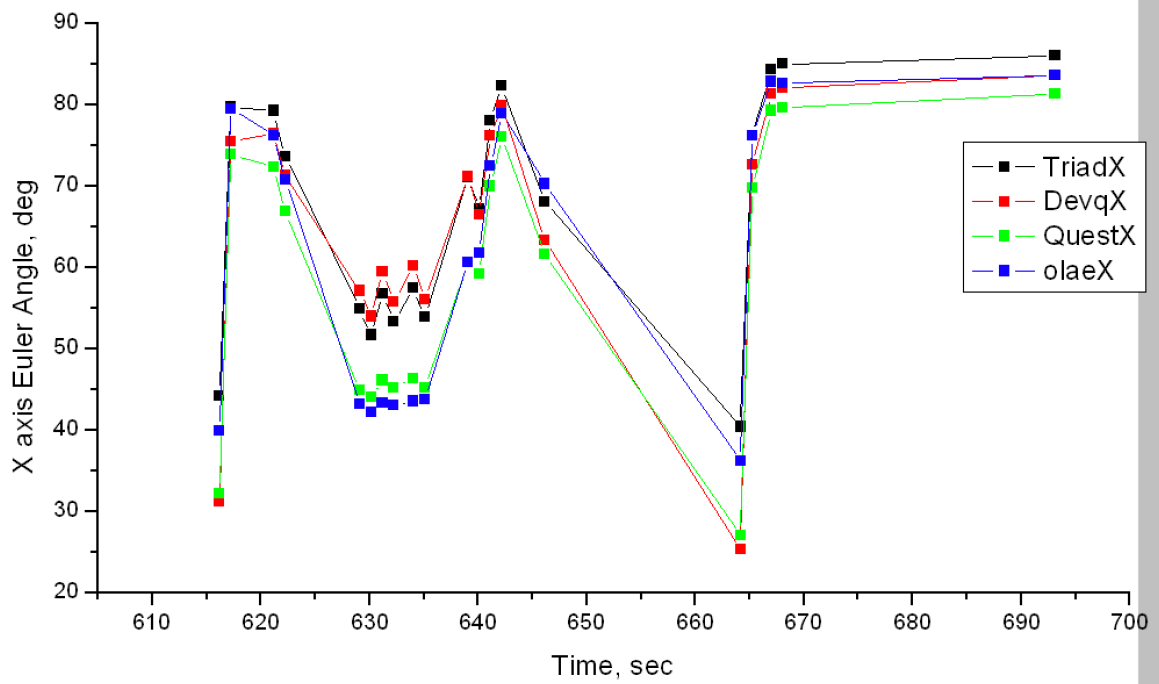


Рис. 4.3 Динаміка супутника по осі X на першому часовому інтервалі

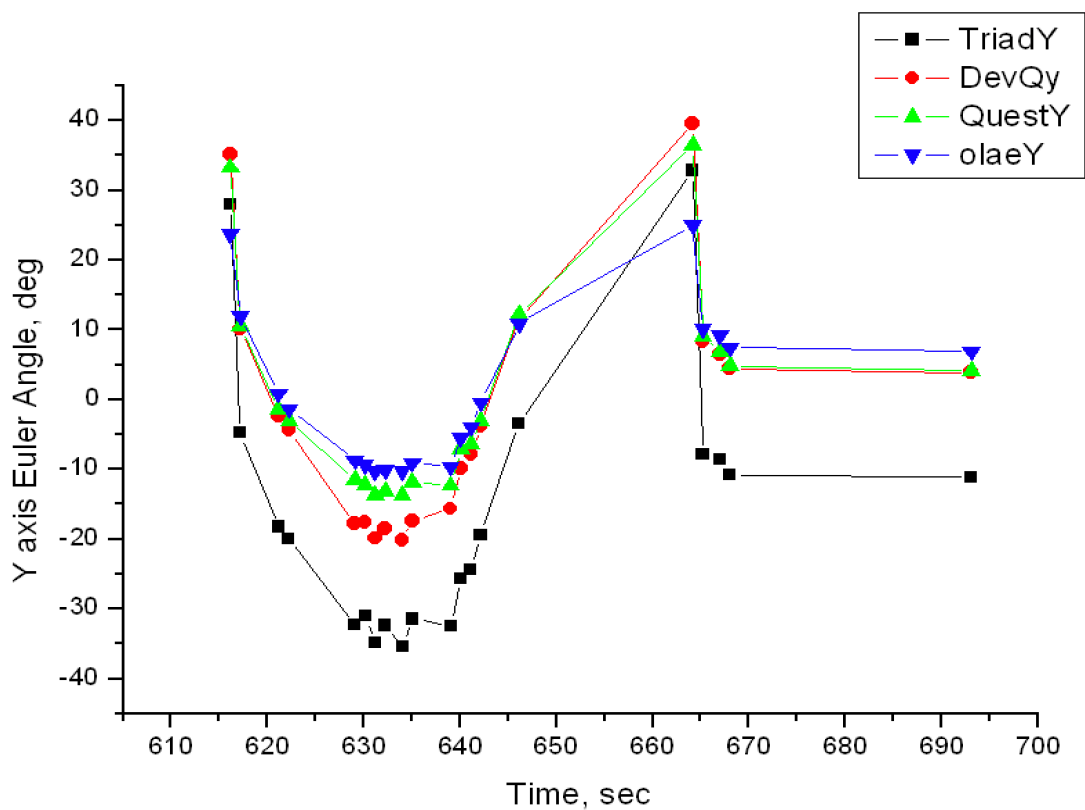


Рис. 4.4 Динаміка супутника по осі Y на першому часовому інтервалі

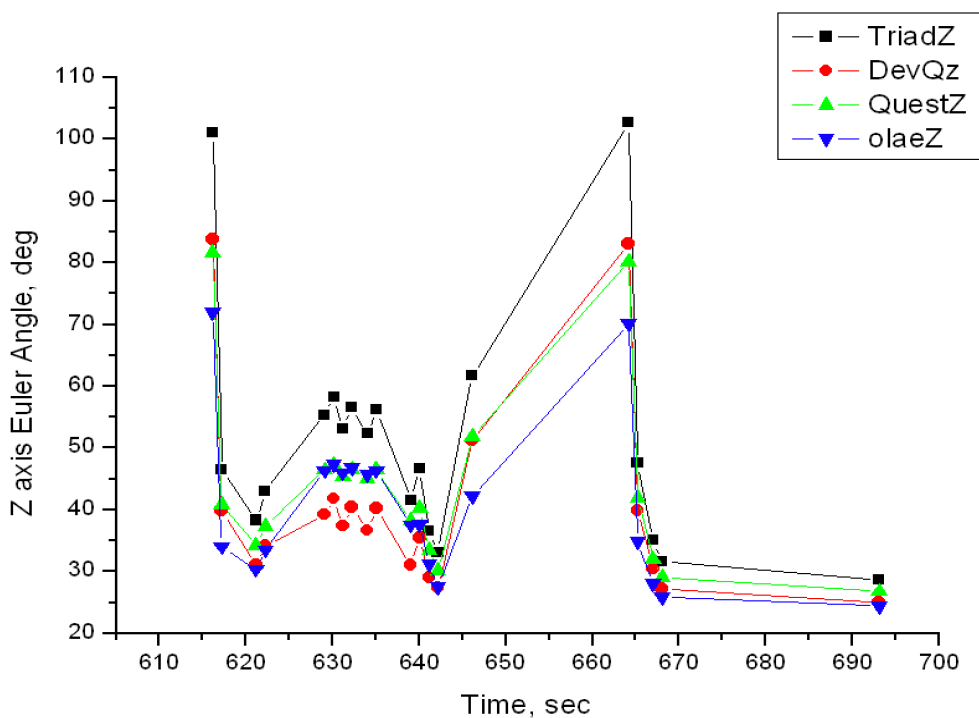


Рис. 4.5 Динаміка супутника по осі Z на першому часовому інтервалі

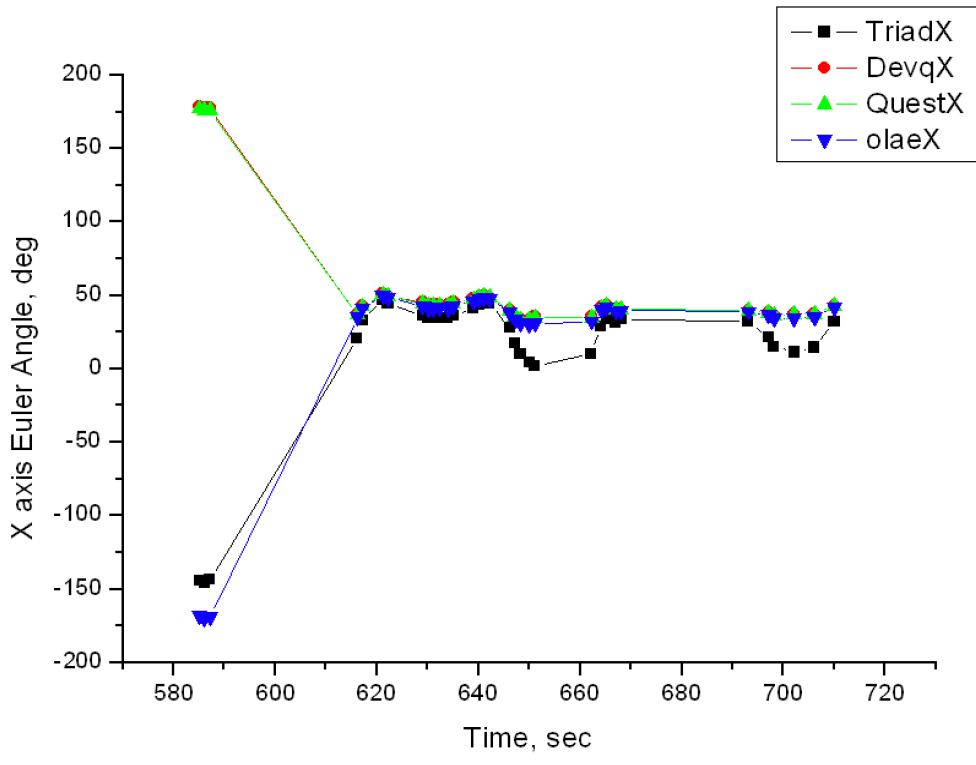


Рис. 4.6 Динаміка супутника по осі X на другому часовому інтервалі

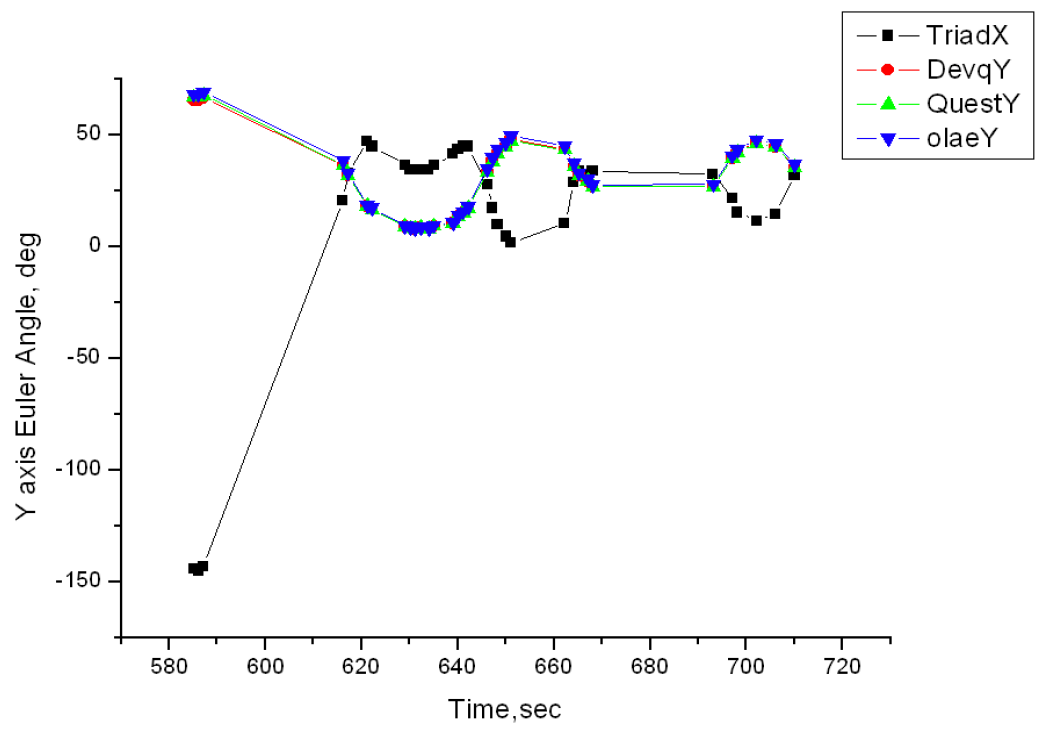


Рис. 4.7 Динаміка супутника по осі Y на другому часовому інтервалі

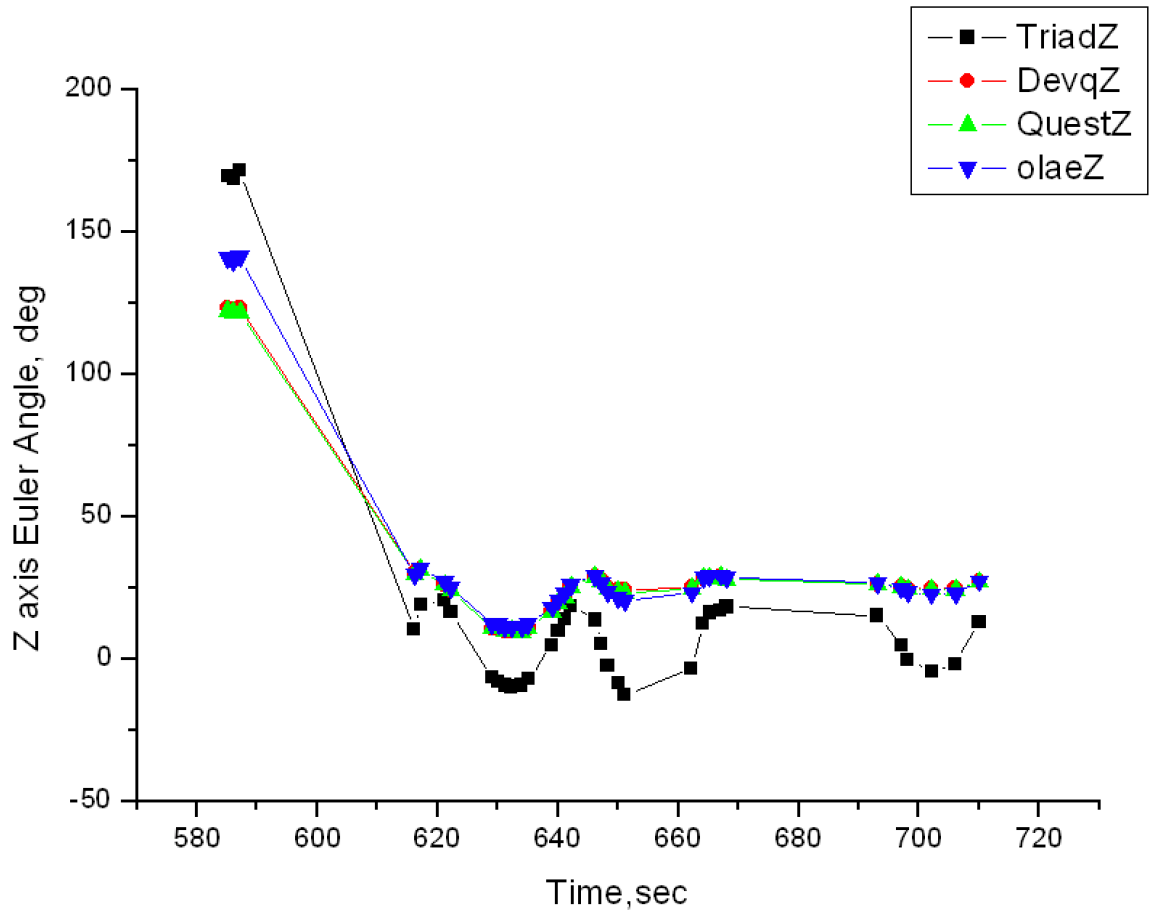


Рис. 4.8 Динаміка супутника по осі Z на другому часовому інтервалі

Табл. 5.1. Значення кутів Ейлера для всіх методів про трьом осям на першому часовому інтервалі

Т[х]	TriadX[Y]	TriadY[Y]	TriadZ[Y]	DevqX[Y]	DevqY[Y]	DevqZ[Y]	QuestX[Y]	QuestY[Y]	QuestZ[Y]	olaеX[Y]	olaеY[Y]	olaеZ[Y]
616.15	44.2862	28.0158	101.0721	31.2563	35.151	83.7738	32.2719	33.2813	81.6564	39.9018	23.7578	71.9512
617.2	79.7334	-4.7554	46.4787	75.5517	10.0789	39.7708	73.9063	10.5016	40.8914	79.5291	11.9012	34.0644
621.18	79.31622	-18.21943	38.32354	76.52638	-2.33389	31.16652	72.38829	-1.35454	34.23692	76.25427	0.82169	30.39242
622.23	73.68503	-19.90159	43.0579	71.40939	-4.35797	34.18355	66.94117	-2.97617	37.33651	70.84324	-1.32611	33.51331
629.1	54.97593	-32.23068	55.37216	57.1727	-17.71376	39.24129	44.9275	-11.54497	46.42773	43.25252	-8.71649	46.38456
630.15	51.72458	-30.93428	58.33953	54.01095	-17.55845	41.81424	44.0747	-12.29437	47.38884	42.2031	-9.39705	47.43648
631.2	56.75886	-34.88721	53.15642	59.47082	-19.90856	37.3843	46.1545	-13.63264	45.34109	43.41401	-10.1854	45.98245
632.25	53.36227	-32.35113	56.6093	55.85671	-18.49962	40.41131	45.2269	-13.11703	46.51471	43.05959	-10.01349	46.78618
634.02	57.51286	-35.43847	52.328	60.28712	-20.19232	36.70972	46.37543	-13.7442	45.08169	43.57987	-10.25344	45.76865
635.08	53.94982	-31.45605	56.28275	56.12729	-17.35362	40.22338	45.22075	-11.79685	46.5324	43.74245	-9.06635	46.39819
639.04	71.13604	-32.44959	41.58774	71.22247	-15.65312	31.05104	60.65473	-12.29837	38.20361	60.71694	-9.63428	37.5627
640.09	67.21819	-25.67743	46.66208	66.49898	-9.84871	35.43788	59.17405	-7.07132	40.33672	61.80136	-5.51141	37.70834
641.14	78.12148	-24.36776	36.59203	76.29501	-7.81019	29.016	70.02242	-6.29844	33.56935	72.54392	-3.90875	31.1489
642.18	82.42572	-19.46868	33.10479	79.96646	-3.76176	27.34402	76.14136	-3.07574	30.19584	78.91255	-0.44155	27.51483
646.15	68.07428	-3.5064	61.73532	63.40024	11.51306	51.20895	61.69365	12.2315	51.87044	70.31032	10.91288	42.19361
664.15	40.44421	32.86375	102.66259	25.30931	39.59722	83.02185	27.05522	36.52722	80.21376	66.19627	25.05589	70.18582
665.22	76.25331	-7.90222	47.59956	72.67169	8.22523	39.91375	69.84795	9.096	41.93649	76.19956	10.05282	34.93954
667.01	84.34949	-8.52662	35.05159	81.33232	6.48539	30.44413	79.304	6.80866	32.0152	82.88579	9.26449	28.04366
668.05	85.06432	-10.8271	31.64864	82.1844	4.47316	27.19875	79.72107	4.82431	29.14236	82.68525	7.46511	25.94716
693.12	86.14858	-11.13152	28.71483	83.65142	3.87836	24.9885	81.37483	4.14392	26.78315	83.61331	6.9021	24.43093

Табл. 5.2. Значення кутів Ейлера для всіх методів про трьом осям на другому часовому інтервалі

Т[х]	TriadX[Y]	TriadY[Y]	TriadZ[Y]	DevqX[Y]	DevqY[Y]	DevqZ[Y]	QuestX[Y]	QuestY[Y]	QuestZ[Y]	olaеX[Y]	olaеY[Y]	olaеZ[Y]
585.11	-144.18621	64.03306	169.81036	178.63091	65.42928	123.45505	177.25657	66.91934	122.31244	-168.34876	68.2767	141.07901
586.15	-145.43194	64.51655	168.68883	177.60967	65.50606	122.81062	176.31885	66.86999	121.71883	-169.66639	68.27676	139.98804
587.18	-143.21143	64.9003	171.60408	177.32924	66.29881	123.08949	175.82136	67.80044	121.80802	-168.98264	69.27771	141.28222
616.15	20.76944	41.38975	10.36149	37.14214	36.69221	30.14469	37.00483	36.55931	29.97529	35.23111	38.32139	29.62153
617.2	33.01891	36.65554	19.10891	42.52954	31.78553	31.27611	42.49015	31.76122	31.23645	41.32597	33.05485	31.76436
621.18	47.30195	21.98401	20.47775	50.76928	17.98632	26.0946	50.76149	17.98673	26.09343	49.93713	18.43082	27.0026
622.23	44.84333	21.71375	16.63886	49.24518	16.81324	23.98449	49.22547	16.8143	23.98204	48.20911	17.33419	25.01331
629.1	36.5198	18.30761	-6.66781	45.04835	8.7876	10.67508	44.63483	8.82225	10.70455	42.81587	9.18311	22.29171
630.15	34.53223	17.93587	-8.19267	43.61848	8.22398	10.73024	43.10343	8.26258	10.75631	41.18773	8.67265	12.28851
631.2	34.53571	17.74736	-9.31216	43.53005	8.02259	9.58746	43.01266	8.06309	9.62361	41.16581	8.42182	11.17167
632.25	34.35205	18.66707	-9.80219	43.92288	8.53409	9.83232	43.33418	8.56757	9.86351	41.42609	8.90837	11.45351
634.02	34.47271	17.75334	-9.31157	43.39955	8.05263	9.53311	42.8895	8.09281	9.56866	41.06244	8.45002	11.10336
635.08	36.26781	19.06973	-7.22989	45.18849	9.1624	10.73784	44.72298	9.19426	10.76487	42.86572	9.53876	12.38122
639.04	41.55752	18.03997	4.92381	47.50574	10.44471	16.76257	47.37976	10.46117	16.76812	45.81736	10.92322	18.16109
640.09	43.70018	20.04432	9.85225	48.93672	13.53162	19.44691	48.87687	13.53762	19.44657	47.58833	13.99648	20.70056
641.14	45.00398	20.83177	13.81144	49.52697	15.26792	21.79123	49.49677	15.27052	21.7897	48.39886	15.72999	22.90568
642.18	44.85504	21.80814	18.6141	48.73767	17.31032	25.23147	48.72452	17.31099	25.22939	47.80835	17.81311	26.15576
646.15	27.79676	38.87341	13.60142	39.75339	33.62014	28.90538	39.68036	33.56504	28.82857	38.35703	34.94855	29.04137
647.2	17.30519	43.13784	5.29513	35.68706	38.32217	27.56418	35.50077	38.128	27.33891	33.60737	39.81623	26.65983
648.25	9.94671	45.94317	-2.55522	33.76267	41.93707	25.22587	33.43238	41.55247	24.82812	30.98247	43.31824	23.34556
650.02	4.55113	48.62688	-8.42179	33.44451	45.26943	24.19908	32.93019	44.66781	23.59502	29.84097	46.55119	21.3598
651.08	1.65139	51.65023	-12.76535	35.37651	48.24399	24.1685	34.61441	47.44861	23.32325	30.88223	49.53352	20.52662
662.23	10.34771	48.33862	-3.30024	35.22969	43.80324	25.26849	34.8704	43.41161	24.84281	32.33393	45.20257	23.27373
664.15	28.92297	41.96123	12.33605	41.79108	36.0419	28.34367	41.70176	35.97751	28.25222	40.37387	37.36535	28.46389
665.22	33.56604	37.39018	16.26685	42.80013	31.99973	28.47767	42.75695	31.97491	28.43895	41.68815	33.10069	28.95401
667.01	31.71658	34.21801	17.1361	40.14912	29.30906	28.94012	40.11323	29.28814	28.90734	39.04493	30.39013	29.35975
668.05	33.83142	31.23702	18.24445	40.46907	26.81669	28.02127	40.44831	26.80718	28.00508	39.53295	27.70947	28.53123
693.12	32.5243	31.96847	15.22696	39.856	27.00334	26.22578	39.82426	26.9886	26.20242	38.86963	27.89172	26.69293
697.1	21.48127	45.46509	4.70582	38.41289	39.44129	25.42407	38.2497	39.29421	25.24602	36.67184	40.68825	24.81243
698.15	15.28945	48.02532	-0.43085	36.53922	42.39083	24.76322	36.27932	42.12729	24.46438	34.27432	43.65166	23.39862
702.11	11.32159	52.19388	-4.66019	37.3867	46.59058	24.89573	36.99584	46.20774	24.44369	34.4508	47.89073	22.7246
706.08	14.65327	50.55565	-1.74166	37.54052	44.70287	24.76555	37.24658	44.41519	24.42687	35.09448	45.9632	23.14372
710.05	31.80286	41.90479	12.81991	42.87918	35.6193	27.12016	42.80974	35.57418	27.05421	41.71984	36.70425	27.35347

З наведених вище графіків та програмного коду були зроблені висновки. По-перше, використання кутів Ейлера для вирішення задачі є недоцільним, оскільки можливі точки невизначеності. На Рис 5.6 та 5.7 існують точки коли кут орієнтації неможливо однозначно описати. По-друге, метод тріад не в повній мірі використовує значення всіх датчиків, тому його результати суттєво відрізняються від інших методів. Через меншу точність в наступних обчисленнях можна не досліджувати метод тріад, оскільки його використання на студентських наносупутниках не є доцільним.

З цих причин був проведений повторний розрахунок положень супутника, задаючи його орієнтацію використовуючи кватерніони.

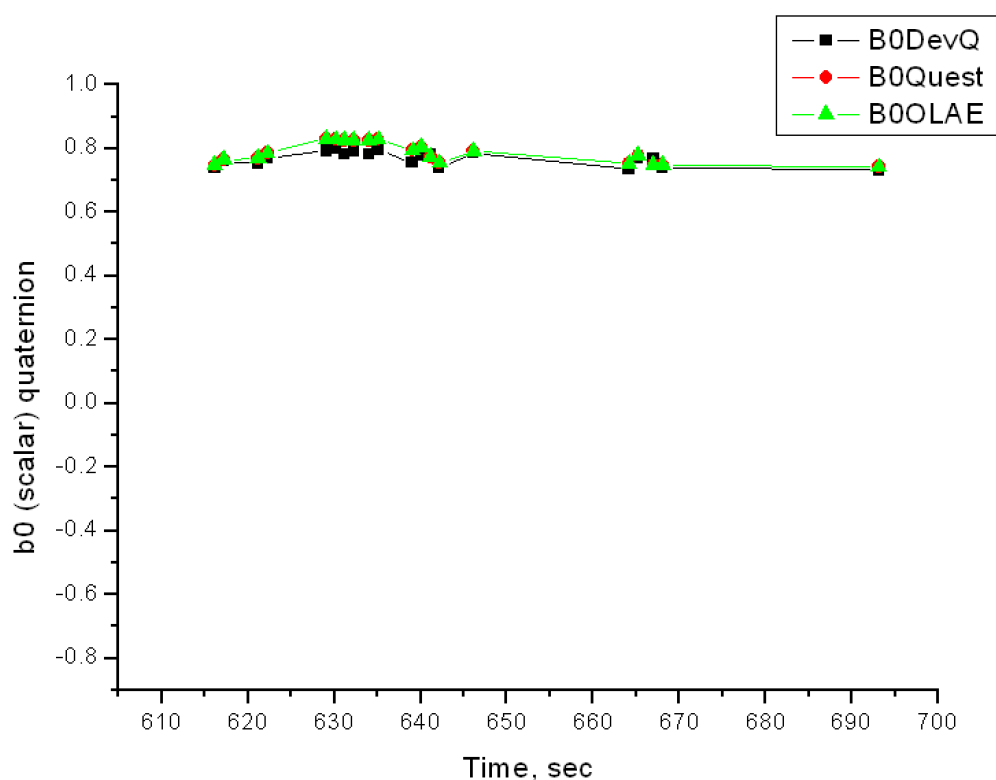


Рис. 4.9. Залежність скалярної частини кватерніону від часу

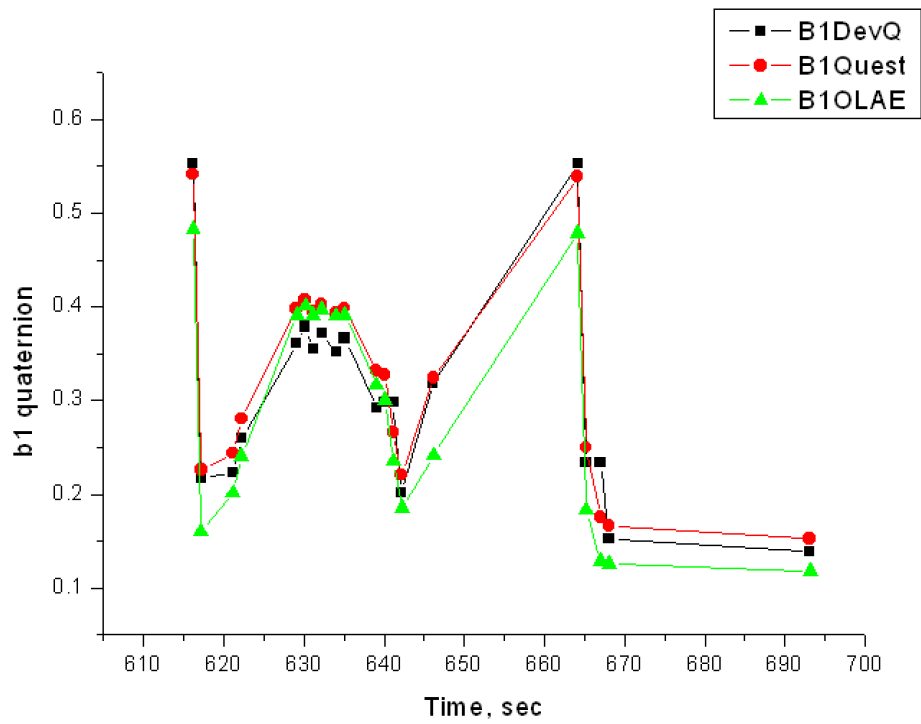


Рис. 4.10. Залежність першої координати векторної частини кватерніону від часу

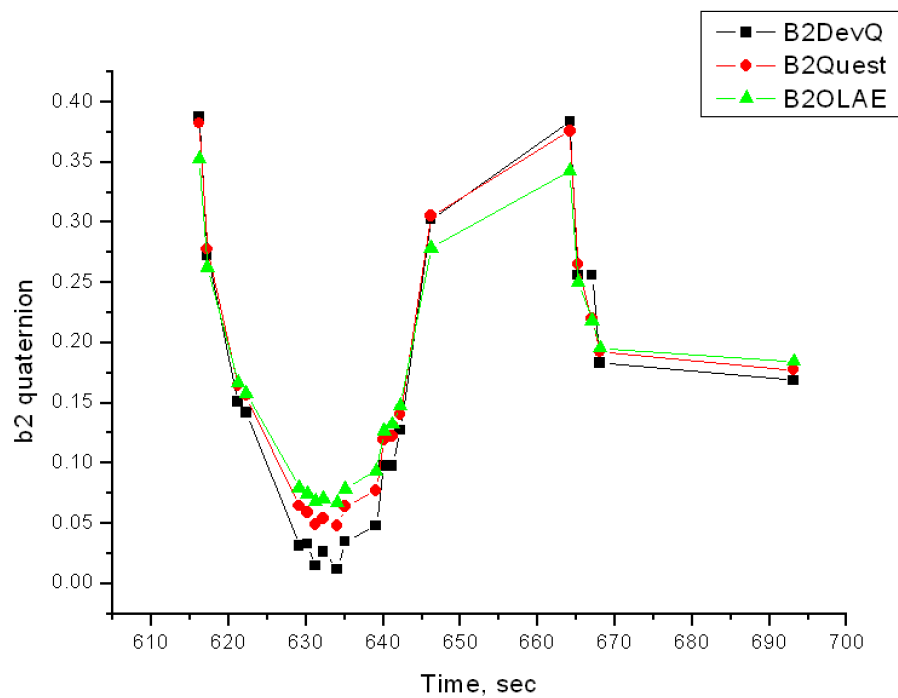


Рис. 4.11. Залежність другої координати векторної частини кватерніону від часу

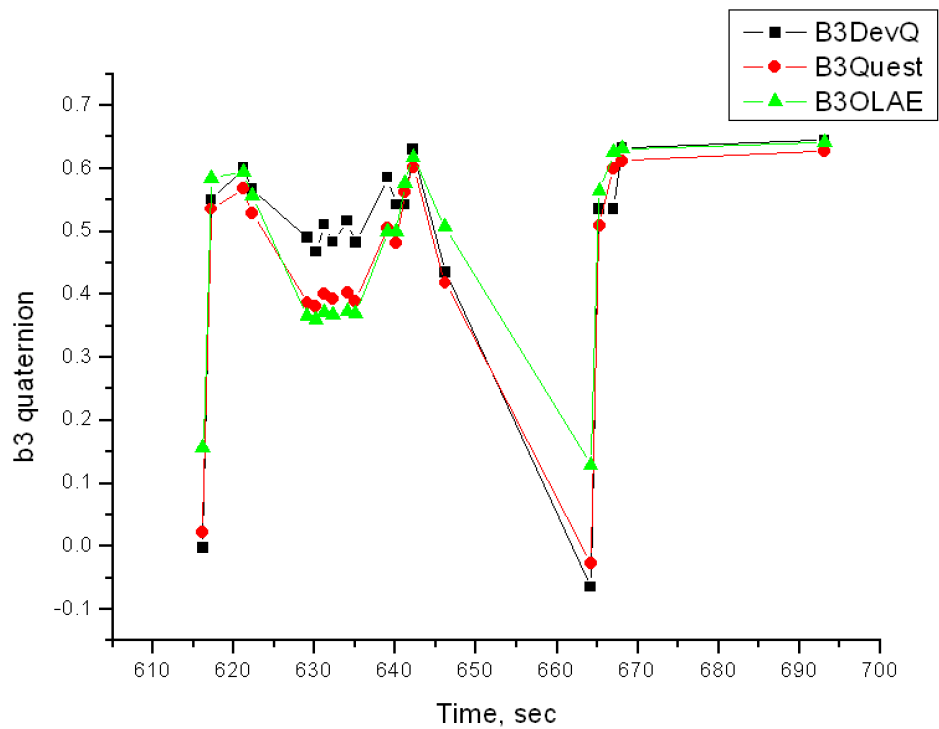


Рис. 4.12. Залежність третьої координати векторної частини кватерніону від часу

Як можна бачити, на Рис 4.3-4.12 на графіках відсутні точки невизначеності, тобто в кожен момент часу, орієнтація наносупутника PolyITAN-2 визначена однозначно, отже вибір кватерніонів як інструменту описання орієнтації є правильним.

Наступним кроком перспективного дослідження є перевірка заданих режимів орієнтації в стенді-імітаторі магнітного поля та порівняння з еталонною орієнтацією з метою визначення похибок методів та вибору оптимального.

4.3 Висновки до розділу

В даному розділі описана процедура калібрування стенду, методика проведення випробувань та перспективи наукових досліджень. Описаний порядок роботи при випробуванні системи орієнтації та результати визначення орієнтації наносупутника PoуITAN-2 по орбітальним даним у кутах Ейлера та кватерніонах. На основі цих даних в подальшому, за допомогою стенду-імітатору, можна бути дослідити методи орієнтації та обрати оптимальний. Критерієм оптимальності є точність, потрібна потужність обчислень та швидкість.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВОК

Під час виконання дипломного проєкту були проаналізовані світові аналоги стендів для випробувань системи орієнтації та їх фізичні принципи.

На основі аналогів та фізичної моделі була обрана компоновка та були розпочаті моделювання магнітного поля.

По результатам моделювання магнітного поля методом кінцевих елементів була обґрунтована конструкція, визначені попередні параметри стенду та спроектована система керування.

Стенд був побудований та введений в експлуатацію. Протестовані алгоритми калібрування, розроблена методика випробувань.

Також були досліджені основні методи визначення орієнтації космічного апарату на прикладі реальних орбітальних даних, зроблений перший етап майбутніх наукових досліджень з використанням стенду.

Отже, стенд-імітатор магнітного поля для випробувань системи орієнтації та стабілізації наносупутника є придатним для випробувань космічної техніки та проведення досліджень у сфері динаміки космічних апаратів.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. CubeSat [Електронний ресурс] // CubeSat. – Режим доступу: <https://www.cubesat.org>(дата звернення: 07.06.2021). – Назва з екрана.
2. CubeSat [Електронний ресурс] // CubeSat. – Режим доступу: <https://www.cubesat.org>(дата звернення: 07.06.2021). – Назва з екрана.
3. Теоретична механіка : конспект лекцій для студентів ф-ту техн. систем та енергоефект. технологій усіх форм навчання. – Суми : Сум. держ. ун-т, 2011. – 104 с.
4. *Родионов В. Г.* Оптимизация структуры генерирующих мощностей. Аккумуляторы – накопители энергии // Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего. — М.: ЭНАС, 2010. — С. 65. — 352 с. — [ISBN 978-5-4248-0002-3](https://www.isbn-international.org/product/978-5-4248-0002-3).
5. Алексеев К. Б. Маневрирование космических аппаратов / К. Б. Алексеев. – Москва : [б. в.], 1970. – 416 с.
6. Actuators for control. – New York : Gordon and Breach Science Publishers, 1991. – 429 p.
7. Megan R. Brewer. Cubesat attitude determination and helmholtz cage design. Thesis - USAF/ - AFIT/GAE/ENY/12-M03
8. Piergentili F. Design, manufacturing, and test of a real-time, three-axis magnetic field simulator [Electronic resource] / Fabrizio Piergentili, Gian Paolo Candini, Marco Zannoni // IEEE transactions on aerospace and electronic systems. – 2011. – Vol. 47, no. 2. – P. 1369–1379. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/taes.2011.5751264>(date of access: 08.06.2021). – Title from screen.
9. Post M. A. Design and construction of a magnetic field simulator for cubesat attitude control testing [Electronic resource] / Mark Andrew Post, Junquan Li, Regina Lee // The journal of instrumentation, automation and systems. – 2014. – Vol. 1, no. 1. – P. 1–9. – Mode of access: <https://doi.org/10.21535/jias.v1i1.125>(date of access: 08.06.2021). – Title from screen.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

10. BTS7960 high current 43A h-bridge motor driver [Electronic resource] // www.handsontec.com. – Mode of access: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf>. – Title from screen.

11. 8-bit AVR microcontroller with 32K bytes in-system programmable flash [Electronic resource] // <https://ww1.microchip.com>. – Mode of access: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. – Title from screen.

12. [PDF] Spacecraft attitude determination methods in an educational context | Semantic Scholar [Electronic resource] // Semantic Scholar | AI-Powered Research Tool. – Mode of access: <https://www.semanticscholar.org/paper/Spacecraft-attitude-determination-methods-in-an-Enger/f2842c4a7b3297f0de88673c2498743cb34816d7>(date of access: 07.06.2021). – Title from screen.

13. Markley F. L. Quaternion Attitude Estimation Using Vector Observations [Electronic resource] / F. Landis Markley, Daniele Mortari // The Journal of the Astronautical Sciences. – 2000. – Vol. 48, no. 2-3. – P. 359–380. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/bf03546284>(date of access: 07.06.2021). – Title from screen.

14. Markley F. L. New quaternion attitude estimation method [Electronic resource] / F. Landis Markley // Journal of guidance, control, and dynamics. – 1994. – Vol. 17, no. 2. – P. 407–409. – Mode of access: <https://doi.org/10.2514/3.21212>(date of access: 08.06.2021). – Title from screen.

15. Mortari D. Optimal Linear Attitude Estimator [Electronic resource] / Daniele Mortari, F. Landis Markley, Puneet Singla // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2007. – Vol. 30, no. 6. – P. 1619–1627. – Mode of access: <https://doi.org/10.2514/1.29568>(date of access: 07.06.2021). – Title from screen.

					<i>ВЛ7309.60.00.00.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62