

# Система керування імітатором магнітного поля для наносупутників

Падун<sup>f</sup> О. М., ORCID [0000-0003-1715-9942](https://orcid.org/0000-0003-1715-9942)

Кафедра космічної інженерії, Інститут аерокосмічних технологій  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Київ, Україна

Сергєєв<sup>f</sup> Д. В., ORCID [0000-0001-5613-4874](https://orcid.org/0000-0001-5613-4874)

Лісюк І. Р., ORCID [0000-0001-9645-1583](https://orcid.org/0000-0001-9645-1583)

Коваленко<sup>s</sup> Є. Ю., к.т.н. доц., ORCID [0000-0003-1249-2076](https://orcid.org/0000-0003-1249-2076)

Кафедра електронних пристроїв та систем, Факультет електроніки  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Київ, Україна

Рассамакін<sup>s</sup> Б. М., к.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0001-8097-3678](https://orcid.org/0000-0001-8097-3678)

Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, Теплоенергетичний факультет  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Київ, Україна

**Анотація**—У даній статті представлено результати розрахунку, проектування та розробки імітатора магнітного поля для наносупутників, за основу якого взято принцип клітки Гельмгольца. За допомогою інтегральних напівмостів, одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, мікроконтролера STM32F103ZET6 та Arduino NANO було реалізовано систему керування імітатором магнітного поля. Для зменшення пульсацій розраховано та виготовлено вихідні RLC-фільтри. Випробування системи показали, що отримані результати повністю задовольняють висунуті вимоги.

**Ключові слова** — система керування; клітка Гельмгольца; наносупутник; імітатор магнітного поля.

## I. ВСТУП

За останні десять років набули великої популярності наносупутники формату CubeSat [1]. Такі апарати мають стандартизовані масо-габаритні параметри, що значно зменшує вартість розробки та запуску. Це дозволяє використовувати їх у великій кількості науково-дослідних установ і приватних компаній.

У КПІ ім. Ігоря Сікорського вже розроблено два такі наносупутники, які були успішно запуснені на орбіту. Нині продовжується робота над третім супутником, який призначений для дистанційного зондування поверхні Землі [2].

Перед тим, як бути запуснені на орбіту усі подібні апарати проходять наземні випробування. Важливою складовою майже кожного супутника є його підсистема орієнтації та стабілізації. Її наземні випробування є досить складною задачею, адже треба створити умови, максимально наближені до умов на

земній орбіті. До складу підсистеми входять магнітні датчики та електромагніти, для випробування та калібрування яких використовуються спеціальні стенди-імітатори магнітного поля.

Оскільки у новому супутнику до підсистеми орієнтації та стабілізації висуваються більш жорсткі вимоги [2], було прийнято рішення про створення подібного стенду у лабораторії наносупутників КПІ ім. Ігоря Сікорського. Ця стаття присвячена розробці системи керування даним стендом.

## II. ІМІТАТОР МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Зазвичай для імітації магнітного поля застосовується конструкція, яка отримала назву котушок Гельмгольца [3] (Рис. 1). Вона складається з двох кільцевих котушок, які розміщені паралельно на одній осі. Відстань між ними дорівнює їх радіусу. При протіканні по котушках струму, на осі між ними, створюється однорідне магнітне поле. Розрахунок



магнітного поля котушок наведено у [4]. Далі будуть показані основні математичні співвідношення, які описують процеси у такій системі.

Розглянемо спочатку магнітне поле, що створюється при протіканні постійного струму  $I$  по кільцевому провіднику радіуса  $R$ . Згідно закону Біо-Савара-Лапласа, елемент провідника зі струмом  $dl$  буде створювати в точці  $A$  магнітну індукцію, модуль якої дорівнює

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{N \cdot I \cdot dl}{r^2},$$

де  $\mu_0$  – магнітна константа,  $I$  – струм через контур,  $N$  – кількість витків,  $dl$  – нескінченно малий відрізок провідника зі струмом,  $r$  – відстань від відрізка контуру зі струмом до точки  $A$ .

Проекція векторів  $dB$  на вісь  $z$ , яка проходить через центри обох контурів, дорівнює

$$dB_Z = dB \cdot \cos \beta = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{4\pi} \cdot \frac{R \cdot dl}{r^3}.$$

Інтегруючи цей вираз по всьому контуру струму

$$r = (z^2 + R^2)^{1/2}$$

та враховуючи те, що, отримаємо вираз для індукції магнітного поля, яку створює в точці  $A$  один з контурів:

$$B_{Z1} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}.$$

Оскільки відстань між кільцями дорівнює  $a$ , другий контур зі струмом створює в точці  $A$  магнітну індукцію, модуль якої розраховується за формулою:

$$B_{Z2} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{((z-a)^2 + R^2)^{3/2}}.$$

Якщо струми в кожному контурі мають однакові величини та напрямки, то індукція магнітного поля в точці  $A$  на відстані  $z$  від першого кільця визначається як сума магнітних індукцій полів, створюваних струмами кожного з двох контурів

$$B_Z = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{(z^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{1}{((z-a)^2 + R^2)^{3/2}} \right).$$

Неоднорідність  $B_Z$  в першому наближенні характеризується першою похідною

$$\frac{\partial B_Z}{\partial z} = \frac{3\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left( \frac{-z}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{-(z-a)}{((z-a)^2 + R^2)^{5/2}} \right).$$

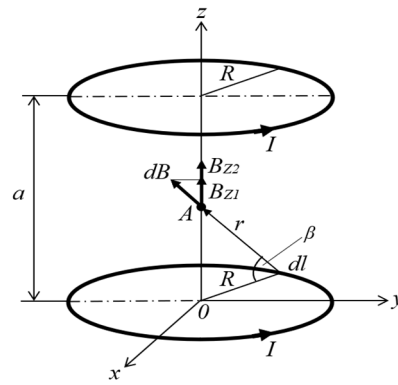


Рис. 1 Магнітне поле котушок Гельмгольца

При  $z = \frac{a}{2}$  перша похідна  $\frac{\partial B_Z}{\partial z}$  дорівнює нулю.

Знайдемо другу похідну:

$$\frac{\partial^2 B_Z}{\partial z^2} = \frac{3\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2} \cdot \left( \frac{5z^2}{(z^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{(z^2 + R^2)^{5/2}} + \frac{5(z-a)^2}{((z-a)^2 + R^2)^{7/2}} - \frac{1}{((z-a)^2 + R^2)^{5/2}} \right).$$

У точці  $z = \frac{a}{2}$  друга похідна дорівнює нулю за умови, що  $a = R$ . Умови рівності нулю першої та другої похідної дозволяють стверджувати, що для отримання найкращої однорідності поля відстань між кільцями має дорівнювати їх радіусу. Магнітне поле на осі котушок Гельмгольца поблизу точки  $z = \frac{a}{2}$  має високий ступінь однорідності, що дозволяє використовувати їх у системі імітації. Більш детальний аналіз магнітного поля котушок Гельмгольца, зокрема розміру зони однорідності, наведено в [3].

Для того, щоб контролювати напрям вектора магнітної індукції в трьох осях, використовується система, що складається з трьох пар котушок Гельмгольца, що розташовані взаємно перпендикулярно одна до одної. Така конструкція має назву клітки Гельмгольца. Подібна система описана у багатьох літературних джерелах [5], [6], [7]. Після вивчення цього матеріалу слід виділити наступні твердження:

- Котушки квадратної форми простіші в реалізації та забезпечують більшу зону однорідності магнітного поля у порівнянні з круглими котушками такого ж розміру [5], [7].
- Для досягнення максимального об'єму зони однорідності поля, відстань між квадратними котушками повинна дорівнювати  $0,5445L$ , де  $L$  - довжина сторони котушки [6].
- Ніяких переваг, з точки зору однорідності поля, не можна досягти, додавши більше двох котушок на одну вісь [6].





Рис. 2 Загальний вигляд стенду із супутником

У лабораторії наносупутників КШ ім. Ігоря Сікорського була побудована клітка Гельмгольца, яка зображена на Рис. 2. Вона складається з шести квадратних котушок зі стороною 1,5 м, кожна з яких має 52 витки мідного дроту діаметру 1,3 мм. Каркас виконаний за алюмінію, оскільки відносна магнітна проникність цього металу близька до одиниці, а отже він майже не буде впливати на створюване магнітне поле.

Розрахунок та моделювання клітки описані в [8]. За результатами дослідження при силі струму у котушці 3,7 А модуль вектора магнітної індукції дорівнює приблизно 200 мкТл, що достатньо для імітації будь-якого положення супутника на орбіті з урахуванням необхідності компенсації навколишнього магнітного поля Землі під час випробувань [8]. При заданих розмірах клітки та силі струму котушок область однорідності магнітного поля має форму близьку до сферичної з радіусом 293 мм [8]. Це дозволяє розмістити в ній супутник формату CubeSat з розмірами 10x10x30 см. Саме таким створюється супутник PolyITAN-3. Також зазначається, що для проведення випробувань крок зміни модуля вектора магнітної індукції повинен відповідати похибці магнітного датчика супутника [8]. При значенні останнього 20 нТл необхідний крок зміни сили струму дорівнює 1 мА [8].

Для зручного використання клітки Гельмгольца під час випробувань необхідно розробити спеціалізовану систему керування, яка повинна задовольняти наступні вимоги:

- напруга живлення: 24 В;
- робочий струм котушки: 3,7 А;
- крок зміни струму: 1 мА;
- коефіцієнт пульсації струму у котушці не більше 5%;

- має можливість змінювати напрямок протікання струму у котушках;
- має можливість контролювати параметри створюваного магнітного поля;
- має можливість керування через веб-інтерфейс.

### III. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

У [5] описано клітку Гельмгольца та її систему керування, які створено у Болонському університеті (University of Bologna). Система побудована на базі повільного 8-бітного мікроконтролера ATMega128. Котушка імітатора живиться від генератора струму, який складається з декількох операційних підсилювачів та силового транзистора. Останній працює в активному режимі, що призводить до його значного нагріву. Мікроконтролер керує генератором за допомогою 10-бітного цифрового потенціометра. Це дозволяє отримати лише 1024 кроки регулювання струму, чого може бути недостатньо. Для зміни напрямку протікання струму використовується блок перемикачів навантаження у вигляді мостової схеми з чотирьох польових транзисторів. Для керування цими транзисторами необхідна напруга, вища ніж на навантаженні. Описана система складається з великої кількості елементів та потребує багато різноманітних напруг живлення, у тому числі і від'ємну -25 В. Основною перевагою є висока якість вихідної напруги та відсутність додаткової фільтрації.

У [7] розглянуто систему, розроблену у Йоркському університеті (York University). Котушка живиться від драйвера, побудованого за мостовою схемою. Для регулювання сили струму використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Завдяки цьому така система має високий коефіцієнт корисної дії, як наслідок – менший нагрів. Також використання ШІМ спрощує інтеграцію драйвера з мікроконтролером та дозволяє отримати високу роздільну здатність регулювання струму. Для фільтрації вихідної напруги використовується RLC-фільтр, який збільшує інерційність системи.

Проаналізувавши два існуючі аналоги системи керування, в кожному з яких використані кардинально різні підходи до регулювання струму, було вирішено використовувати мостову схему та імпульсний метод регулювання. Застосування сучасної компонентної бази, зокрема більш швидкого мікроконтролера, дозволить збільшити частоту перетворення та отримати кращу роздільну здатність регулювання.

### IV. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

З урахуванням вимог до системи та аналізу аналогічних рішень була запропонована структурна схема створюваного пристрою, яка зображена на Рис. 3.



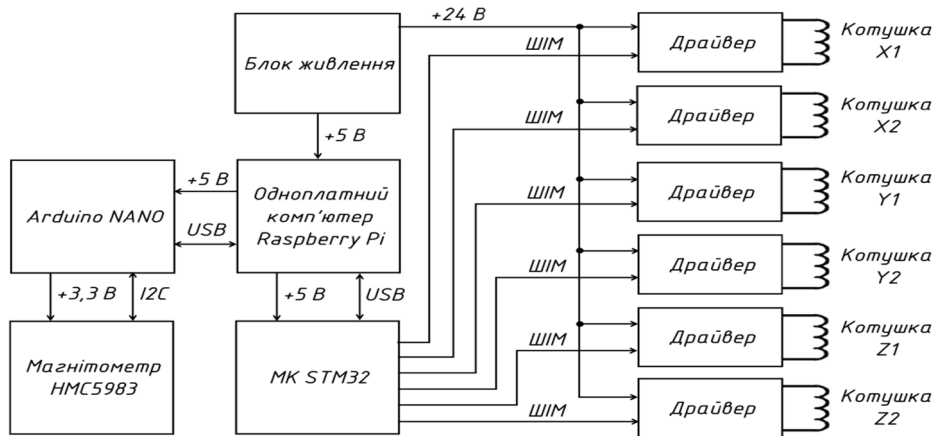


Рис. 3 Структурна схема системи керування

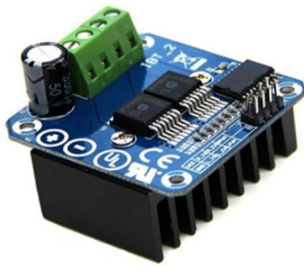


Рис. 4 Модуль на базі BTS7960

Середні значення індуктивності та опору котушок імітатора, що були виміряні експериментально за допомогою методу, описаного у [9], складають 1703 мкГн та 3,5 Ом відповідно. Для забезпечення необхідного робочого струму 3,7 А потрібна напруга не менше 13 В. Тому у якості блока живлення котушок виступають два імпульсних джерела напруги 12 В, потужністю 360 Вт кожне, з'єднаних послідовно для отримання необхідних 24 В.

У якості драйверів котушок були використані готові модулі на базі мікросхем BTS7960 (Рис. 4). Вибір обумовлений високими електричними характеристиками при компактних розмірах, доступністю та легкістю використання даного модуля. Також у випадку виходу з ладу його можна буде легко та швидко замінити, тобто збільшується ремонтпридатність пристрою.

Мікросхема BTS7960 [10] являє собою інтегральний напівміст, який складається з  $p$ -канального транзистора верхнього плеча,  $n$ -канального транзистора нижнього плеча та схеми керування ними. Вона має входи логічного рівня, що полегшує підключення до мікроконтролера. У схемі драйвера (Рис. 5) дві такі мікросхеми формують повний міст. Мікросхема 74НС244 є неінвертуючим буфером та необхідна для узгодження логічних рівнів.

Резистори R2-R5 слугують для підтяжки входів керування до землі. Резистори R6, R8 задають швидкість наростання вихідного сигналу [10]. Вихід IS

мікросхеми BTS7960 є джерелом струму, який пропорційний струму через транзистори напівмоста [10]. Тому падіння напруги на резисторах R7, R9 можна використовувати для вимірювання струму навантаження. Силова частина схеми живиться напругою 24 В, сигнальна частина – напругою 3,3 В. Присутні фільтруючі конденсатори на лініях живлення.

Утворена схема працює за принципом реверсивного імпульсного регулятора постійної напруги, що дозволяє подавати на навантаження напругу будь-якої полярності [11]. На плату драйвера надходять два керуючі сигнали від мікроконтролера, відповідно для кожної з двох мікросхем BTS7960. Для регулювання напруги на навантаженні використовується широтно-імпульсна модуляція. Мікроконтролер формує ШІМ-сигнал з певним коефіцієнтом заповнення. Коефіцієнт заповнення визначає середнє значення напруги, яке може становити від 0 до 3,3 В на виводі мікроконтролера, що відповідає 0..24 В на навантаженні.

Драйверами керує мікроконтролер STM32F103ZET6. Він має 32-розрядне ядро, яке здатне працювати на частоті 72 МГц, та 6 16-бітних таймерів, у кожного з яких є чотири канали порівняння [12]. Це дозволяє генерувати 12 незалежних ШІМ-сигнали високої частоти з необхідним кроком зміни коефіцієнта заповнення.

Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi забезпечує бездротовий зв'язок з персональним комп'ютером через WI-FI та дозволяє організувати веб-інтерфейс, який значно полегшить взаємодію користувачів з системою. Під час роботи імітатора Raspberry Pi відправляє мікроконтролеру STM32 значення коефіцієнту заповнення для кожного драйвера котушок та зчитує покази магнітометра. В обох випадках використовується інтерфейс USB. Для живлення Raspberry Pi застосовується понижуючий перетворювач на базі LM2596, який забезпечує стабілізовану вихідну напругу 5 В.



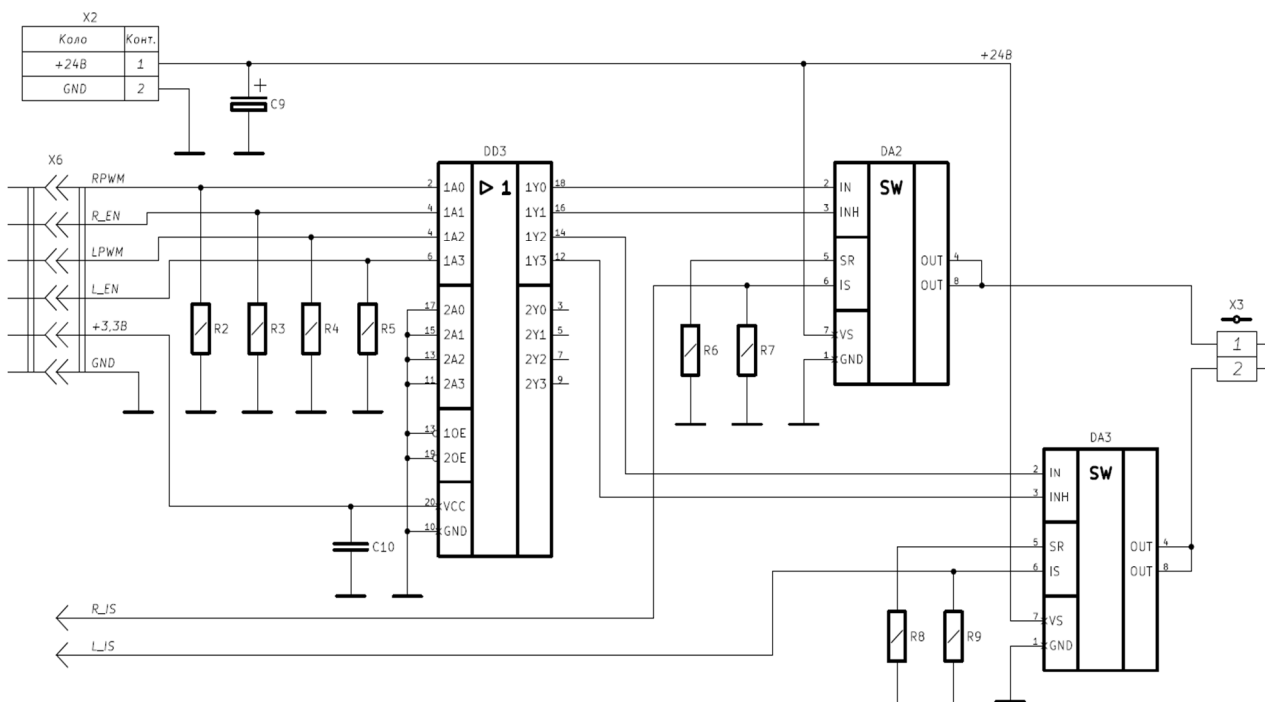


Рис. 5 Принципова схема драйвера

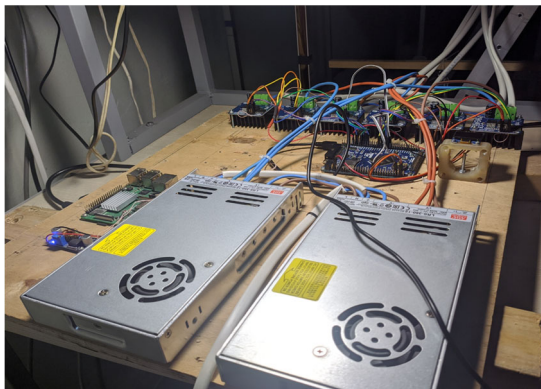


Рис. 6 Зовнішній вигляд макету

діапазон вимірювання та достатню роздільну здатність. Підключення здійснюється по інтерфейсу I2C. Магнітометр розташований всередині стелу на доволі великій відстані від системи керування. Використання довгих дротів призводить до нестабільної роботи інтерфейсу I2C, тому було прийнято рішення розташувати поряд з магнітометром плату Arduino NANO, яка буде знімати покази датчика та передавати їх на Raspberry Pi по інтерфейсу USB.

Описана вище система була зібрана у вигляді експериментального макету, який зображений на Рис. 6.

Після цього були проведені перші випробування системи. За їх результатами струм у котушці регулюється від 0 до 6,8 А. Також були отримані осцилограми вихідного струму у різних режимах роботи.

Коефіцієнт пульсацій струму досягає 28% при коефіцієнті заповнення входної напруги 0,1. Останнє свідчить про те, що власної індуктивності котушок недостатньо для згладжування форми струму в них.

#### V. РОЗРОБКА ВИХІДНОГО ФІЛЬТРУ

Для зменшення пульсацій було вирішено встановити між драйвером та котушкою RLC-фільтр. Схема підключення наведена на Рис. 7. Подібний підхід застосований у [7].

Даний фільтр симетричний, тому результат не залежить від напрямку струму. Було розглянуто випадок коли транзистор Q4 відкритий, тобто дросель L2 підключений до землі. Вхідний сигнал подається зі сторони індуктивності L1 [14]. Також

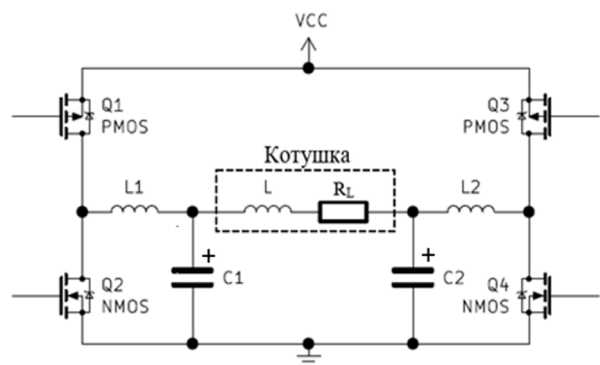


Рис. 7 Схема підключення LC-фільтру

Для контролю створюваного магнітного поля використовується цифровий трьохосьовий магнітометр HMC5983 [13]. Він має необхідний



враховуються опори обмоток дроселів та внутрішній опір конденсаторів [14]. Схема для розрахунку наведена на Рис. 8. Для розрахунку були обрані наступні характеристики елементів фільтра: індуктивність котушок 380 мкГн, опір їх обмоток 0,1 Ом, ємність конденсаторів 1000 мкФ, їх внутрішній опір 0,2 Ом [14]. Для такого фільтра був розрахований комплексний коефіцієнт передачі.

Реактивний опір конденсатора та котушки індуктивності в комплексній формі:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad Z_L = j\omega L,$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $j$  – комплексна одиниця.

Імпеданс навантаження у комплексній формі:

$$Z_H = R_H + j\omega L_H.$$

Імпеданс паралельного з'єднання  $C_2$  та  $L_2$  у комплексній формі:

$$Z_{LC2} = \frac{(Z_{C2} + R_{C2}) \cdot (Z_{L2} + R_{L2})}{Z_{C2} + R_{C2} + Z_{L2} + R_{L2}}.$$

Загальний імпеданс схеми у комплексній формі:

$$Z = Z_{L1} + R_{L1} + \frac{(Z_{C1} + R_{C1}) \cdot (Z_{LC2} + R_{LC2})}{Z_{C1} + R_{C1} + Z_{LC2} + R_{LC2}}.$$

Вхідний струм (струм через індуктивність  $L_1$ ):

$$I_{L1} = \frac{U_{IN}}{Z}.$$

Напруга в точці 1:

$$U_1 = I_{L1} \cdot \frac{(Z_{C1} + R_{C1}) \cdot (Z_{LC2} + R_{LC2})}{Z_{C1} + R_{C1} + Z_{LC2} + R_{LC2}}.$$

Струм через навантаження:

$$I_H = \frac{U_1}{Z_{LC2} + Z_H}.$$

Напруга на навантаженні (вихідна напруга):

$$U_{OUT} = I_H \cdot Z_H.$$

Комплексний коефіцієнт передачі фільтра дорівнює відношенню вихідної напруги до вхідної:

$$K = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}.$$

За отриманим комплексним коефіцієнтом передачі були побудовані основні характеристики фільтра: амплітудно-частотна характеристика (Рис. 9) та фазо-частотна характеристика (Рис. 10).

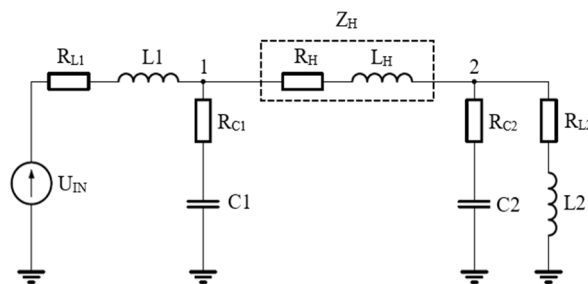


Рис. 8 Схема для проведення розрахунку

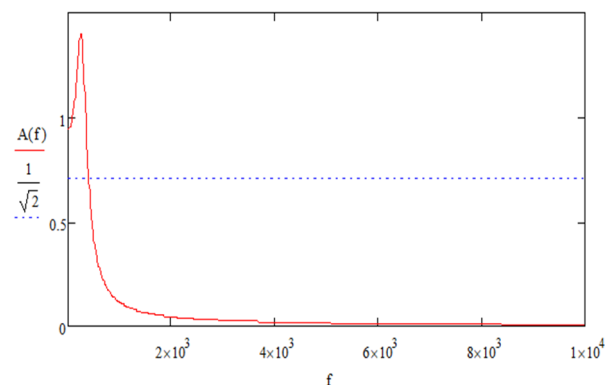


Рис. 9 Амплітудно-частотна характеристика

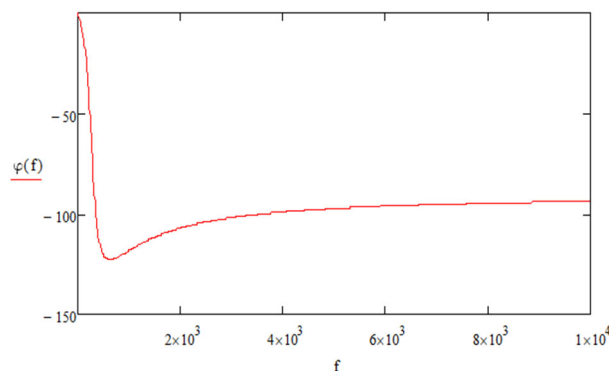


Рис. 10 Фазо-частотна характеристика

Гранична частота — частота, на якій модуль коефіцієнта передачі падає на 3 дБ у порівнянні з його низькочастотним значенням. Для даного випадку вона дорівнює 395,4 Гц. Також присутній резонанс напруги на частоті 245,578 Гц. [14]

Також були аналітично розраховані форми напруги та струму навантаження в усталеному режимі (Рис. 11 та Рис. 12). Для цього вхідна напруга була представлена у вигляді ряду Фур'є та помножена на комплексний коефіцієнт передачі з урахуванням різної частоти кожної окремої гармоніки. Під час аналізу було враховано перші 20 гармонік ряду.



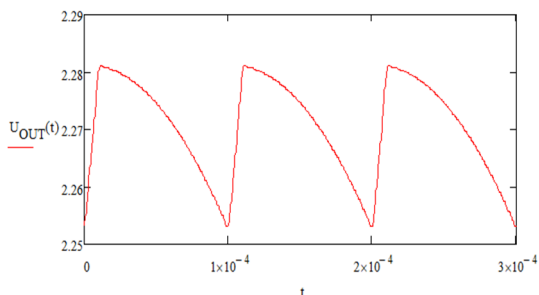


Рис. 11 Форма напруги на навантаженні при коефіцієнті заповнення 0,1.

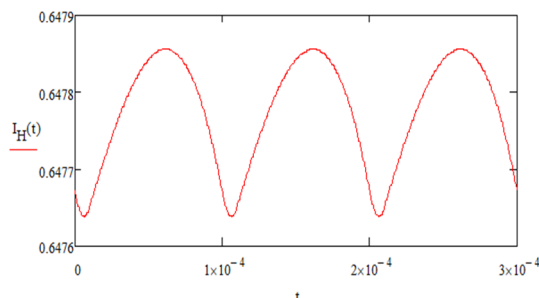


Рис. 12 Форма струму через навантаження при коефіцієнті заповнення 0,1.

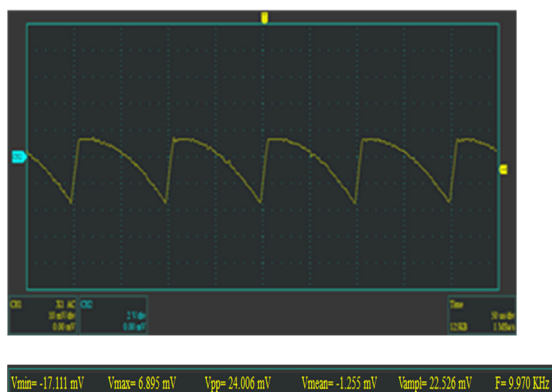


Рис. 13 Осцилограма пульсацій вихідної напруги

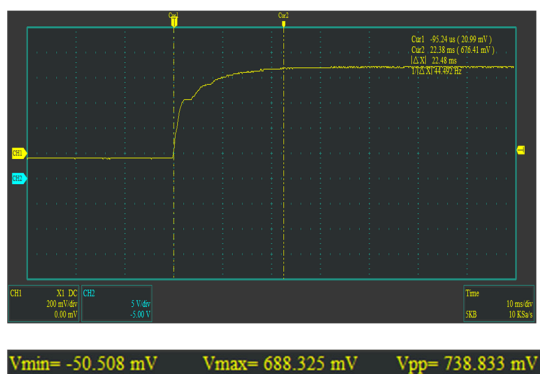


Рис. 14 Осцилограма зміни сили струму котушки

При середньому значенні напруги на навантаженні 2,27 В розмах її пульсацій складає 28 мВ, що дає коефіцієнт пульсацій 1,23%.

Оскільки магнітне поле залежить від струму котушки, його форма більш важлива для роботи стенду. Для того, щоб її знайти, треба розділити вихідну напругу драйвера на комплексний імпеданс котушки.

При середньому значенні струму навантаження 0,648 А розмах його пульсацій складає 0,217 мА, що дає коефіцієнт пульсацій 0,034%. Таке значення більш ніж задовольняє вимоги до постійності параметрів магнітного поля.

Фільтр був зібраний на окремій платі. У ньому використані конденсатори серії EHL від компанії Hitano ємністю 1000 мкФ з робочою напругою 63 В та дроселі, які складаються з 50 витків дротом 1,25 мм та намотані на осерді EE 42/21/15 від компанії Epcos.

## VI. ВИПРОБУВАННЯ

Фільтр підключений між драйвером та котушкою стенда. Форма напруги була виміряна за допомогою осцилографа на виході фільтра. Відповідна осцилограма наведена на Рис. 13. Вимірювання проводилося при коефіцієнті заповнення вхідної напруги 0,1.

Розмах пульсацій напруги складає 24 мВ при середньому значенні напруги 1,949 В, що дає коефіцієнт пульсацій 1,23%. Ці значення дуже близькі до отриманих у результаті розрахунку, що свідчить про його правильність.

Форма струму вимірювалася за допомогою резистора опором 0,1 Ом, який був підключений послідовно котушці та виконував роль шунта. Через занадто мале падіння напруги на цьому резисторі, роздільної здатності осцилографа недостатньо для відображення форми струму, але можна стверджувати, що при середньому значенні 0,574 А пульсації струму не перевищують 1 мА. Оскільки опір котушки низький, шунт більшого опору буде сильно впливати на силу струму в ній.

Також була отримана осцилограма зміни сили струму котушки при подачі на неї максимальної напруги (Рис. 14).

Перехідний процес у котушці між вимкненим станом та станом з максимальним струмом займає 23 мс. Супутник у режимі точної орієнтації обертається повільно. Модуль кутової швидкості не перевищує 0,06 град/с [15]. Тому швидкої зміни поля не потрібно, оскільки перехідний процес у 23 мс буде значно меншим необхідного часу реакції системи.

## ВИСНОВКИ

Розроблено та випробувано систему керування імітатором магнітного поля. Вона дозволяє регулювати силу струму у котушках стенду від 0 до 6,8 А та змінювати його напрям. При цьому кожна котушка керується окремим незалежним драйвером,



який побудований за мостовою схемою імпульсного реверсивного регулятора постійної напруги.

Для зменшення пульсацій струму (28,54% від середнього значення), виявлених під час першого випробування, розроблено вихідний RLC-фільтр для драйвера котушки. Його частотні характеристики, форми струму та напруги навантаження були розраховані аналітично. За результатами розрахунку фільтр забезпечує граничну частоту 395,4 Гц, чого достатньо для фільтрації вихідної напруги.

Під час випробування системи з фільтром була виміряна форма напруги котушки імітатора. При середньому значенні напруги 1,949 В розмах пульсацій складає 24 мВ, тобто 1,23%. Експериментальні дані підтверджують результати аналітичного розрахунку. Виміряти форму пульсацій струму котушки не вдалося, оскільки роздільної здатності осцилографа не

вистачає для їх відображення. При цьому можна стверджувати, що вони значно менші за допустимий рівень (5 %).

Також була виміряна тривалість перехідного процесу. Зміна сили струму від нуля до максимального значення займає 23 мс. Така швидкість зміни магнітного поля достатня для імітації польоту супутника по орбіті.

Розроблена система керування магнітним імітатором повністю відповідає вимогам, що були висунуті, та дозволить проводити випробування магнітних систем орієнтації наносупутників, що розробляються у КПІ імені Ігоря Сікорського.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] T. Villela, C. A. Costa, A. M. Brandão, F. T. Bueno and R. Leonardi, "Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, no. 5063145, p. 13, 2019.
- [2] B. B. Rassamakon, M. F. Baiskov, I. Y. Kovalenko and e. al., Stvorenyya, vyprovuvannya ta doslidzhennya na navkolozemnykh orbitakh pershykh vitchyznyanykh nanosuputnykiv "PoliITAN" formatu CubeSat [Creation, testing and research in near-Earth orbits of the first domestic Nano-satellites "PolyITAN" format CubeSat], Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2020, p. 254.
- [3] L. I. Balandina and M. Y. Dokukin, Issledovaniye magnitnogo polya katushek Gel'mgol'tsa [Study of the magnetic field of Helmholtz coils], Moscow: N.E. Bauman MSTU, 2014, p. 21.
- [4] M. M. Doroginitskiy, Raschet katushki Gel'mgol'tsa [Calculation of the Helmholtz coil], Kazan: Kazan Federal University, 2007, p. 22.
- [5] F. Piergentili, G. P. Candini and M. Zannoni, "Design, Manufacturing, and Test of a Real-Time, Three-Axis Magnetic Field Simulator," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 2, pp. 1369 - 1379, April 2011.  
**DOI:** [10.1109/TAES.2011.5751264](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5751264)
- [6] M. Pastena and M. Grassi, "Optimum design of a three-axis magnetic field simulator," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 488 - 501, April 2002. **DOI:** [10.1109/TAES.2002.1008981](https://doi.org/10.1109/TAES.2002.1008981)
- [7] M. A. Post, J. Li and R. Lee, "Design and construction of a magnetic field simulator for cubesat attitude control testing," *Journal of Instrumentation, Automation and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 1 - 9, 2014. **URL:** <https://strathprints.strath.ac.uk/48665/>
- [8] O. M. Padun, I. Y. Kovalenko, B. M. Rassamakin, S. V. Ostapchuk and A. I. Pinchuk, "Rozrobka stendy dlya nazemnykh vyprovuvan' systemy oriyentatsiyi ta stabilizatsiyi nanosuputnykiv seriyi POLYITAN [Development of a stand for ground tests of the orientation system]," *Journal of Rocket-Space Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 125 - 130, 2019. **DOI:** [10.15421/451918](https://doi.org/10.15421/451918)
- [9] Tektronix, "Capacitance and Inductance Measurements Using an Oscilloscope and a Function Generator Application Note," 2015. [Online]. Available: [https://download.tek.com/document/75W\\_28152\\_1.pdf](https://download.tek.com/document/75W_28152_1.pdf). [Accessed 2021].
- [10] Infineon, "Datasheet for BTS 7960," 2004. [Online]. Available: <https://www.infineon.com/dgdl/bts7960b-pb-final.pdf?folderId=db3a3043156fd5730116144c5d101c30&fileId=db3a30431ed1d7b2011efe782ebd6b60>. [Accessed 2021].
- [11] Y. P. Honcharov, O. V. Bud'onnyy, V. H. Morozov and e. al., Peretvoryval'na tekhnika. Chastyna 2: Pidruchnyk [Conversion technology. Part 2: Textbook.], vol. 2, Kyiv: ISDO, 1999, p. 329.
- [12] STMicroelectronics, "Datasheet for STM32F103ZET6," 2018. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103ve.pdf>. [Accessed 2021].
- [13] Honeywell International Inc., "3-Axis Digital Compass IC," 2011. [Online]. Available: [http://www.farnell.com/datasheets/1509871.pdf?\\_ga=2.219060057.1318745487.1555987311-293789508.1555987311](http://www.farnell.com/datasheets/1509871.pdf?_ga=2.219060057.1318745487.1555987311-293789508.1555987311). [Accessed 2021].
- [14] D. V. Serhyeyev, *Imitator mahnitnoho polya dlya nanosuputnykiv : diplomnyy proekt [Magnetic field simulator for nanosatellites: Bachelor theses]*, Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2021, p. 99.
- [15] I. R. Lysyuk, *Systema keruvannya imitatorom mahnitnoho polya dlya nanosuputnykiv : mahisters'ka dysertatsiya xMagnetic field simulator control system for nanosatellites: master's thesis*, Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2021, p. 94.

Надійшла до редакції 19 жовтня 2021 р.

Прийнята до друку 21 січня 2022 р.





# Magnetic Field Simulator Control System for Nanosatellites

O. M. Padun<sup>f</sup>, ORCID [0000-0003-1715-9942](https://orcid.org/0000-0003-1715-9942)

Department of Space Engineering, Institute of Aerospace Technology  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

D. V. Serhieiev<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-5613-4874](https://orcid.org/0000-0001-5613-4874)

I. R. Lysiuk, ORCID [0000-0001-9645-1583](https://orcid.org/0000-0001-9645-1583)

Ie. Yu. Kovalenko<sup>s</sup>, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0003-1249-2076](https://orcid.org/0000-0003-1249-2076)

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

B. M. Rassamakin<sup>s</sup>, PhD Senior Researcher, ORCID [0000-0001-8097-3678](https://orcid.org/0000-0001-8097-3678)

Department of Nuclear Power Plants and Engineering Thermophysics, Faculty of Thermal Power Engineering  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Nano- and microsatellites are becoming more and more popular in the last ten years. The main reason for this is the low cost of their development and launch. Two such satellites of the CubeSat format have already been developed at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. They have successfully completed their missions in orbit. Work on a new satellite is underway. Before flying into orbit, all satellites must pass a large number of ground tests.

An important part of almost every satellite is its subsystem of orientation and stabilization. Since it contains magnetic sensors and electromagnets, special magnetic field simulators are used to test it. Such a simulator must create a uniform magnetic field with the required parameters. The most common design used to simulate a magnetic field is a Helmholtz cage. It was built in the nanosatellite laboratory of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. This paper deals with the development of a control system for it.

In the beginning, the design, parameters, and operation principle of the Helmholtz cage were described. It consists of six electromagnetic square shape coils with a side of 1.5 meters. Each coil has 52 turns of 1.29 mm wire. Such dimensions make it possible to obtain a spherical zone of uniformity of the magnetic field with a radius of 293 mm. The control system should regulate the current in the coils, change its direction and also control the parameters of the generated magnetic field. The existing solutions for such a system were analyzed. As a result, it was decided to use an H bridge circuit and pulse width regulation.

The structural and schematic diagrams of the control system were developed. Were selected all necessary components, such as power module, central processing unit, microcontroller for PWM signal generation, and magnetometer for magnetic field control. To reduce the ripple of the output current, an RLC filter for the coil driver was developed. Its frequency response, current and voltage curves of its load were calculated analytically and coincided with practical results.

An experimental layout of the control system was assembled. As a result of the tests, it was found that the system regulates the current in the coil from 0 to 6.8 A and can change its direction. The current ripple in the coils does not exceed 1 mA (peak-to-peak) at an average current of 0,574 A. The duration of the transient in the system is about 23 ms. These values meet the requirements and allow simulating any mode of satellite flight in orbit.

The developed control system for the magnetic simulator allows testing the magnetic orientation systems of nanosatellites developed at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute and will help in their preparation for the flight.

**Keywords** — nanosatellites; CubeSat; orientation and stabilization subsystem; control system; magnetic field simulator; Helmholtz cage.

