УДК 533.95 https://doi.org/10.15407/itm2026.02.038

Б. В. ЮРКОВ, https://orcid.org/0009-0002-4606-7799
С. Ю. АСМОЛОВСЬКИЙ, https://orcid.org/0009-0000-5423-9365
С. М. КУЛАГІН, https://orcid.org/0000-0002-2862-5809
М. П. РІЗНИЧЕНКО, https://orcid.org/0000-0001-6151-4089

АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА МАГНІТНОГО ПОТОКУ В СИСТЕМАХ ПАСИВНОГО ДЕОРБІТИНГУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, 15, вул. Лешко-Попеля, м. Дніпро, Україна, 49005; e-mail: Yurkov.B.V@nas.gov.ua

Зі зростанням кількості об'єктів на низьких навколоземних орбітах питання надійного та простого деорбітингу стає все більш актуальним, особливо для малих космічних апаратів. Активні рушійні системи дозволяють контролювати процес зниження орбіти, однак вони ускладнюють конструкцію, збільшують масу та вартість апарата. Це стимулює розвиток пасивних рішень, які не потребують палива та мінімально впливають на загальну архітектуру супутника.

У даній роботі розглядається використання збірок постійних магнітів як пасивного способу підсилення гальмівної сили, що виникає внаслідок взаємодії з іоносферною плазмою. Ідея базується на тому, що магнітне поле, створене магнітами, впливає на рух заряджених частинок плазми, що приводить до обміну імпульсом і появи сили, спрямованої проти руху апарата. Ефективність такого підходу значною мірою визначається не лише величиною магнітної індукції, а й просторовим розподілом поля, зокрема сумарним магнітним потоком.

Основна увага приділяється порівнянню та оптимізації кількох коаксільних конфігурацій магнітів. У роботі розглянуто шість варіантів коаксіальних конфігурацій, що відрізняються геометричними розмірами магнітів та напрямками їхніх полюсів. Для кожної з конфігурацій оцінено розподіл магнітного поля та магнітний потік з використанням комп'ютерного моделювання.

Отримані результати показують, що правильно спроєктовані коаксільні конфігурації дозволяють суттєво підвищити концентрацію магнітного потоку порівняно з простими рішеннями, що потенційно приводить до збільшення гальмівної сили. Це підкреслює важливість оптимізації топології магнітного поля та демонструє перспективність компактних пасивних магнітних систем для задач деорбітингу.

***Ключові слова**: пасивний деорбітинг, низька навколоземна орбіта, конфігурація магнітного поля, магнітна система.*

The rapid growth in the number of objects in low-Earth orbits and the active deployment of large satellite constellations are making the problem of near-Earth space debris increasingly critical. Current international regulations limit the post-mission orbital lifetime of a spacecraft to 5 years, making the issue of reliable and simple deorbit ever more relevant, especially for small spacecraft.

Traditional active propulsion systems require significant propellant and power resources and increase system complexity, which is critical for small spacecraft. This drives the development of passive methods, among which the use of magnetic systems interacting with the ionospheric plasma is promising.

This paper presents the results of a study on coaxial assemblies of permanent magnets as the core element of a passive deorbit system. The concept is based on the interaction between the magnetic field generated by the magnets and charged particles in the plasma, which leads to momentum exchange and the generation of a force opposing the spacecraft's motion. The effectiveness of this approach is largely determined not only by the magnitude of the magnetic field, but also by its spatial distribution, particularly by the total magnetic flux.

The object of this study is a coaxial magnetic system consisting of a steel flange, outer neodymium ring magnets, and central cylindrical magnets. Six variants of coaxial configurations were considered, differing in the geometric dimensions of the central magnets (15, 20, and 30 mm) and in their pole orientations (S–S–S and S–N–S). For each configuration, the magnetic field distribution and magnetic flux were evaluated using computer simulation.

The simulation results show that the S–N–S configuration increases the magnetic flux by 7–12.5% compared to the S–S–S configuration at identical overall dimensions of the magnetic system. Doubling the diameter of the central element provides an approximately 23% increase in flux, thus confirming the effectiveness of scaling the inner part of the assembly. This highlights the importance of optimizing the magnetic field topology and demonstrates that compact passive magnetic systems are promising for deorbiting applications.

***Keywords**: passive deorbit, low-Earth orbit, magnetic field configuration, magnetic system.*

Вступ. Стрімке зростання кількості штучних об'єктів на низьких навколоземних орбітах [1] перетворило проблему космічного сміття на одну з ключових для сучасної космічної діяльності. Активне розгортання супутникових угруповань та широке використання малих космічних апаратів [2] призводять до необхідності враховувати питання завершення місії вже на етапі

© Б. В. Юрков, С. Ю. Асмоловський, С. М. Кулагін, М. П. Різниченко, 2026

The article is an open access article distributed underthe terms and conditions of the Creative Commons Attributions (CC BY) license (https/creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

проєктування. Відповідно до сучасних регуляторних норм, термін деорбітінгу космічного апарата після завершення місії не має перевищувати 5 років [3, 4]. Це встановлює жорсткі інженерні вимоги до проєктування систем зведення з орбіти.

Найбільш поширеним підходом є активний метод деорбітингу з використанням власної рушійної установки із складу космічного апарата. Принцип даного методу полягає у створені імпульсу гальмування. В результаті відбувається зниження орбіти космічного апарата. Всі рушійні установки, що можуть бути використані для цієї мети, можна поділити таким чином: рідинні рушійні установки малої тяги, твердопаливні рушійні установки малої тяги, електрореактивні рушійні установки [5]. Проте незважаючи на ефективність даного методу, рушійні установки потребують запасу палива, ускладнюють конструкцію космічного апарата та конкурують за ресурси з корисним навантаженням і енергосистемою. Особливо критичними ці фактори є для малих супутників, де масо-габаритні обмеження є визначальними.

Окремим напрямом є активні методи видалення космічного сміття контактними або безконтактними засобами. Контактні засоби базуються на використанні спеціалізованих космічних апаратів-буксирів. Такі концепції передбачають дистанційне захоплення об’єкта за допомогою маніпуляторів, сіток або гарпунів з його подальшим буксируванням у щільні шари атмосфери. Безконтактний засіб передбачає дистанційний вплив на об’єкт. Зокрема використання наземних або орбітальних лазерних установок для створення гальмівного імпульсу шляхом лазерної абляції поверхні апарата. Проте складність точного наведення, висока вартість місій обслуговування та потенційні ризики непередбачуваної фрагментації об’єктів під час захоплення суттєво обмежують масове впровадження таких рішень [6].

У зв’язку з цим зростає інтерес до пасивних методів деорбітингу, які не потребують активного керування та палива.

Серед існуючих пасивних рішень можна виділити аеродинамічні вітрила та електродинамічні троси. Водночас такі системи зазвичай передбачають використання розгортних конструкцій або протяжних елементів, що створює додаткові ризики, пов’язані з надійністю розгортання, механічною міцністю та складністю інтеграції. Це стимулює пошук альтернативних підходів, які залишаються компактними, надійними та повністю пасивними.

Одним із таких підходів є використання магнітного поля для взаємодії з іоносферною плазмою [7, 8]. Під час руху космічного апарата в плазмовому середовищі магнітне поле впливає на траєкторії заряджених частинок, що приводить до обміну імпульсом між апаратом і потоком плазми. У результаті виникає сила, спрямована проти руху апарата, яка сприяє поступовому зниженню орбіти. На відміну від електродинамічних систем, такий підхід не потребує електроживлення або довгих провідників, що робить його привабливим для малих і ресурсно обмежених платформ.

У цьому контексті постійні магніти є простим і надійним засобом формування необхідного магнітного поля. Водночас ефективність такої системи визначається не лише величиною магнітної індукції, але й просторовим розподілом поля та характером його взаємодії з плазмою. Зокрема, важливими параметрами є сумарний магнітний потік і ступінь його концентрації в області взаємодії.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження впливу конфігурації постійних магнітів на розподіл магнітного поля та магнітний потік для визначення ефективних рішень у системах пасивного деорбітингу.

Для досягнення цієї мети сформовано таку задачу: визначити параметри магнітного поля для декількох коаксіальних конфігурацій постійних магнітів та провести їх порівняльний аналіз.

Об’єкт та методика дослідження. Об’єктом дослідження була коаксіальна магнітна система (МС), конструктивну схему якої наведено на рис. 1. Система складається зі сталевого фланця (сталь 10880, поз. 1), двох зовнішніх неодимових кільцевих магнітів (поз. 2) та двох центральних неодимових циліндричних магнітів (поз. 3).

Для проведення порівняльного аналізу та оптимізації характеристик МС було сформовано низку конфігурацій, у яких висота магнітів, їхнє взаємне розташування та марка матеріалу залишалися фіксованими. Варіюванню підлягали такі параметри:

– діаметр центральних магнітів (поз. 3) становив d=15; 20 та 30 мм;
– орієнтація полюсів центральних магнітів (рис. 2).

Такий підхід дає змогу виявити безпосередню залежність характеристик магнітного поля МС від геометричних параметрів і магнітних полюсів центральних магнітів.

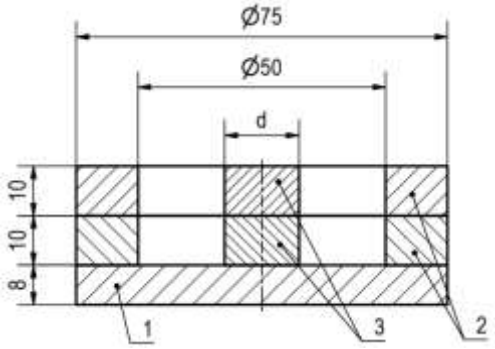
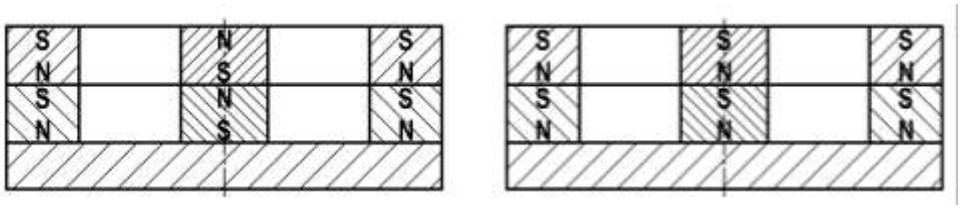


Рис. 1 – Конструктивна схема коаксіальної магнітної системи



а) Орієнтація S-N-S б) Орієнтація S-S-S

Рис. 2 – Орієнтація полюсів магнітної системи

Загалом розглянуто шість варіантів конфігурацій МС (таблиця 1), що дозволило виявити залежність розподілу магнітної індукції та сумарного магнітного потоку від геометричних і полярних параметрів системи. Оцінка характеристик поля для кожної комбінації виконувалася за допомогою методів комп’ютерного моделювання з урахуванням обмежень на загальну масу та габарити пристрою.

Таблиця 1 – Зведена інформація по конфігурації магнітних систем

Назва конфігурації МС	Діаметр центрального магніту (d), мм	Орієнтація полюсів МС
Конфігурація 1	15	S-S-S
Конфігурація 2	20	
Конфігурація 3	30	
Конфігурація 4	15	S-N-S
Конфігурація 5	20	
Конфігурація 6	30	

Визначення характеристик поля для кожної конфігурації МС виконувалось за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів. При цьому приймалися такі основні припущення: середовище вважалося вакуумом, вплив плазми на розподіл магнітного поля не враховувався.

Для забезпечення адекватності математичної моделі характеристики неодимових магнітів задавалися на основі натурних вимірювань індукції реальних зразків. Значення залишкової індукції та коерцитивної сили визначалися ітераційним шляхом до досягнення збіжності розрахункових значень із результатами експериментальних вимірювань, отриманих на контрольних відстанях від поверхні магніту.

Результати дослідження. Результати визначення розподілу топології магнітного поля МС для всіх конфігурацій МС наведено на рис. 3 – 5.

Результати визначення розподілу магнітної індукції вздовж переднього зрізу МС на відстані 0,5 мм та продольної осі для всіх конфігурацій МС наведено на рис. 6 – 9.

Аналіз результатів дослідження. З рис. 3 – 5 видно, що однакова орієнтація полюсів (конфігурації 1–3) призводить до більш розсіяної структури магнітного поля. Це призводить до того, що частина магнітної енергії зосереджується в середині коаксіальної збірки, та витоками в сторони та назад. В той час як при протилежній полярності (конфігурації 4–6) чітко видно ефект «магнітної лінзи». Це створює більш компактну та інтенсивну область взаємодії безпосередньо над МС, а основна частина магнітної енергії зосереджується у передній півсфері і зменшуються витоки в сторони і назад.

Аналіз отриманих залежностей розподілу магнітної індукції (рис. 6 – 7) показує, що зі збільшенням діаметра магнітів спостерігається зростання максимальної магнітної індукції в робочій області. Водночас змінюється і просторовий розподіл поля – зона підвищених значень магнітної індукції розширюється, що потенційно збільшує область ефективної взаємодії з плазмою.

З рис. 8 і 9 видно, що конфігурації з орієнтацією полюсів S-N-S (конфігурації 4–6) мають як вищі пікові значення індукції безпосередньо біля зрізу, так і більш інтенсивний градієнт поля у ближній зоні порівняно з орієнтацією S-S-S (конфігурації 1–3), що обумовлено ефектом фокусування поля. Це вказує на те, що конфігурації з протилежною полярністю (S-N-S) забезпечують вищу густину магнітної енергії в робочій області, що впливатиме на характер взаємодії з потоком заряджених частинок.

На основі отриманих значень магнітної індукції було виконано розрахунок магнітного потоку для кожної конфігурації. Розрахунок виконувався шляхом інтегрування, що дозволило отримати узгоджені значення потоку для всіх досліджуваних варіантів.

Отримані значення магнітного потоку, а також супутні параметри, наведено в таблиці 2 та на рис. 10.

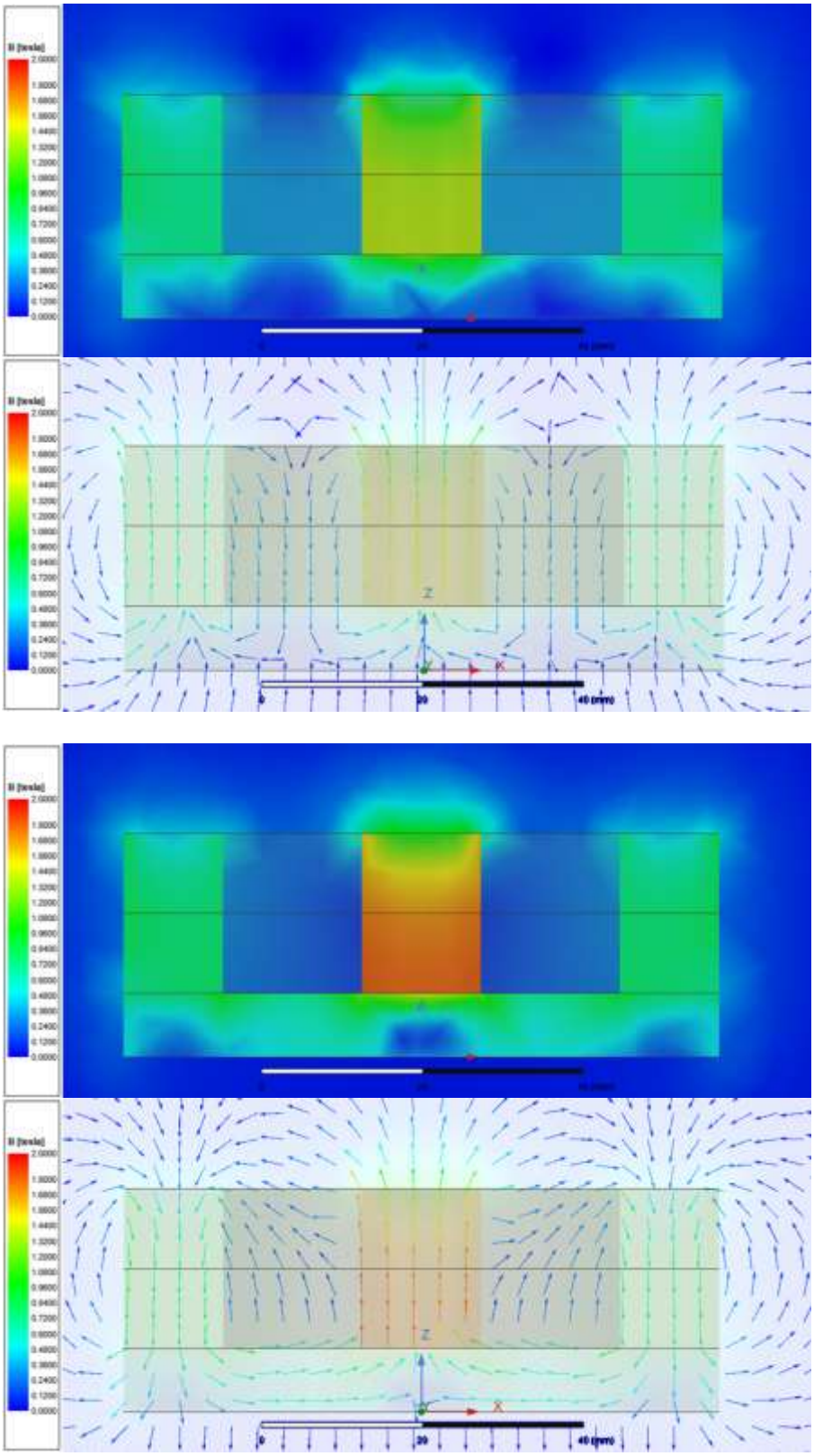


Рис. 3 – Розподіл топології магнітного поля для конфігурацій 1 (зверху) і 4 (знизу)

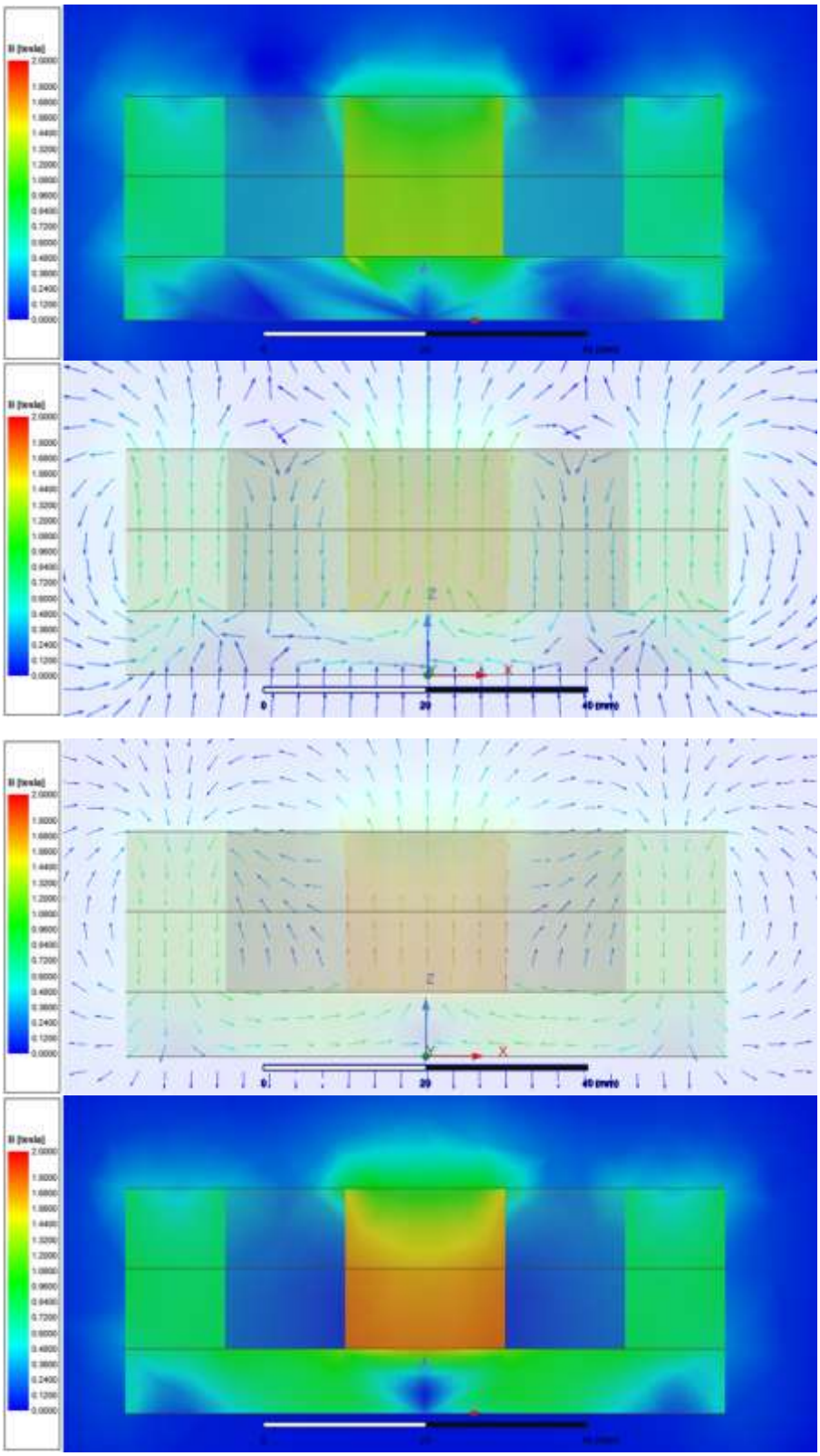


Рис. 4 – Розподіл топології магнітного поля для конфігурацій 2 (зверху) і 5 (знизу)

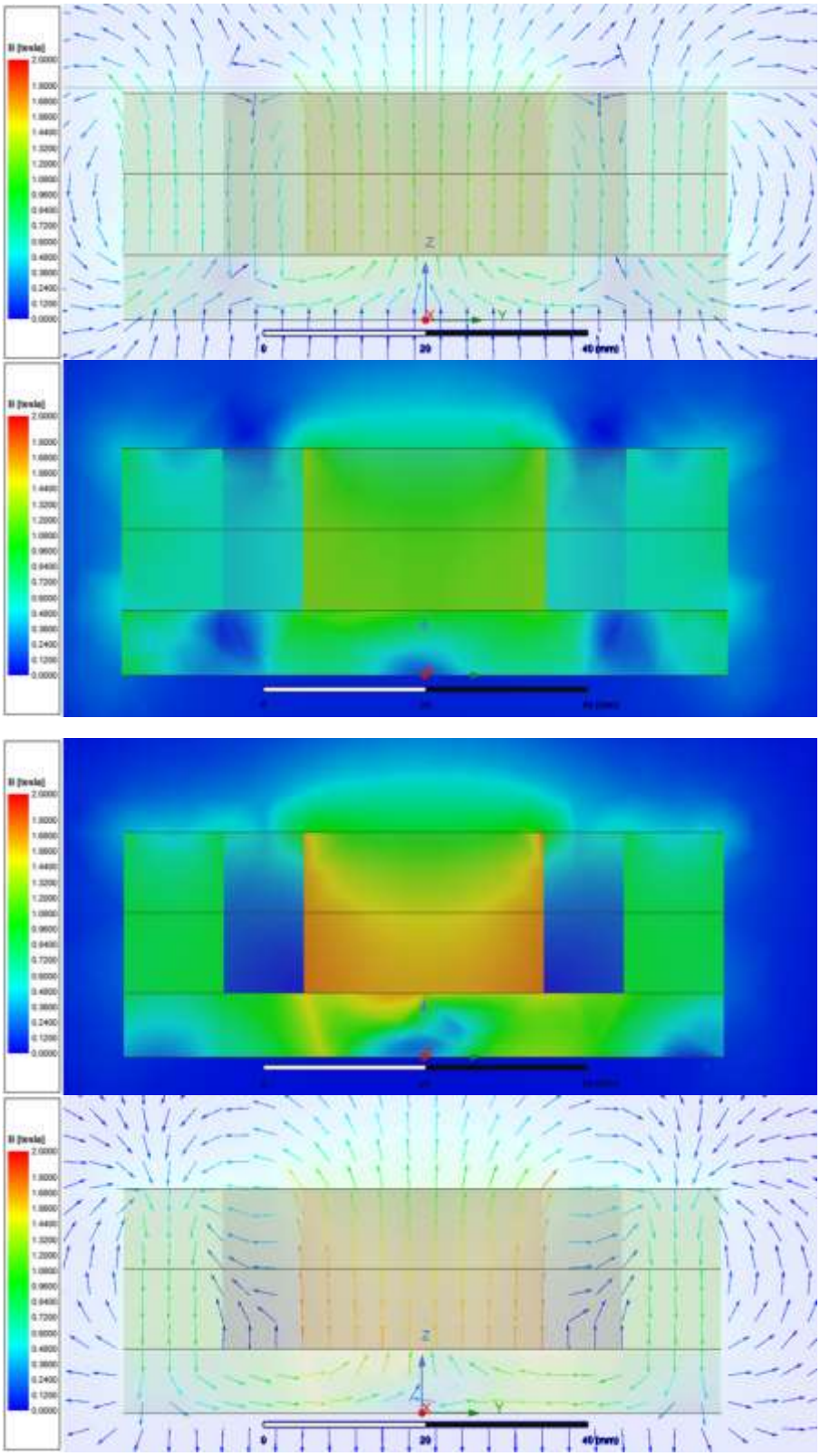


Рис. 5 – Розподіл топології магнітного поля для конфігурацій 3 (зверху) і 6 (знизу)

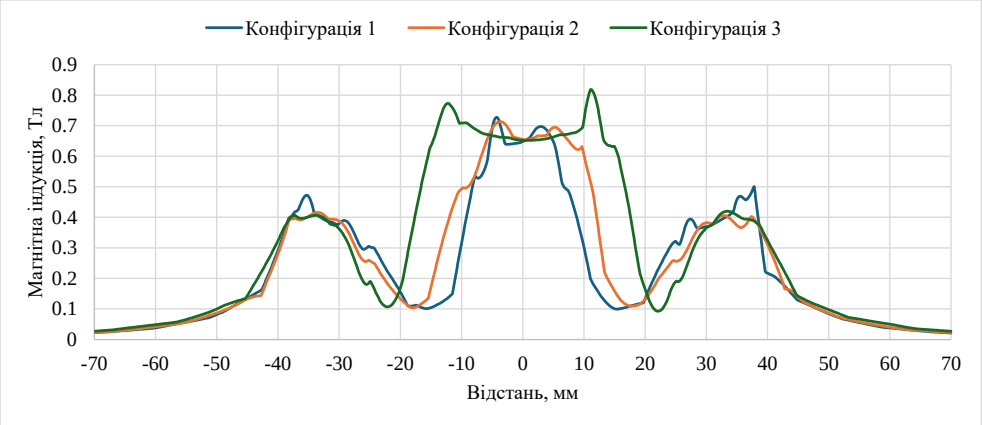


Рис. 6 – Розподіл магнітної індукції вздовж переднього зрізу на відстані 0,5 мм для конфігурацій 1 – 3

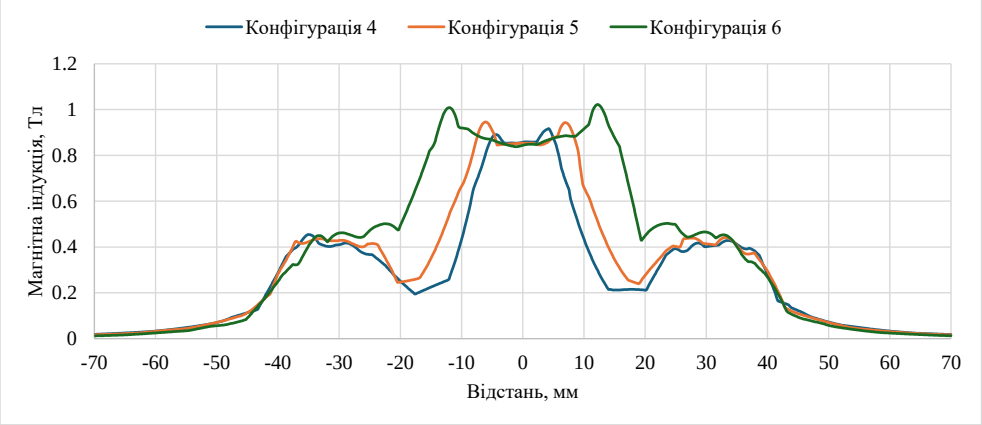


Рис. 7 – Розподіл магнітної індукції вздовж переднього зрізу на відстані 0,5 мм для конфігурацій 4 – 6

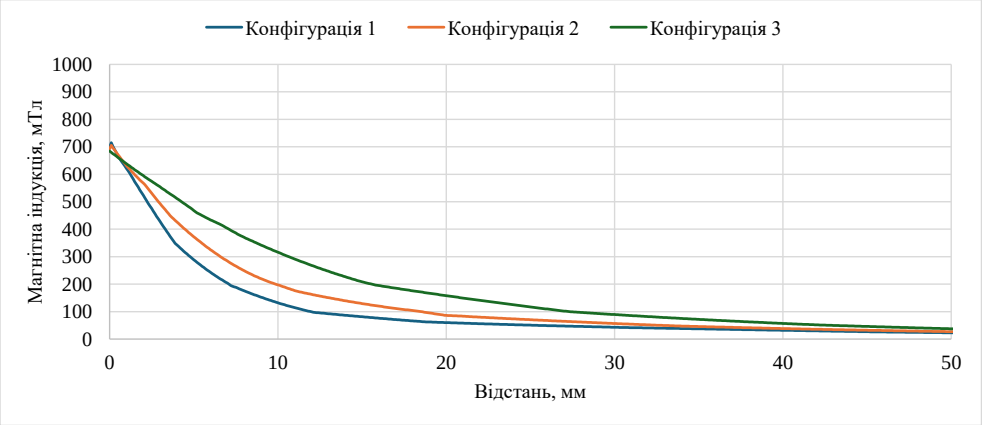


Рис. 8 – Розподіл магнітної індукції вздовж продольної осі від переднього зрізу для конфігурацій 1 – 3

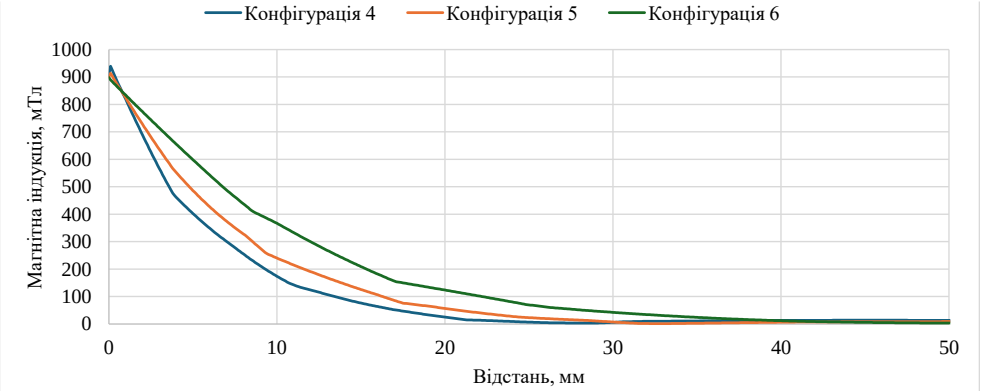


Рис. 9 – Розподіл магнітної індукції вздовж продольної осі від переднього зрізу для конфігурацій 4 – 6

Таблиця 2 – Розрахункові значення магнітного потоку представлених коаксіальних МС

Назва конфігурації	Магнітний потік, Вб
Конфігурація 1	0.004723
Конфігурація 2	0.004793
Конфігурація 3	0.005517
Конфігурація 4	0.005048
Конфігурація 5	0.005409
Конфігурація 6	0.006205

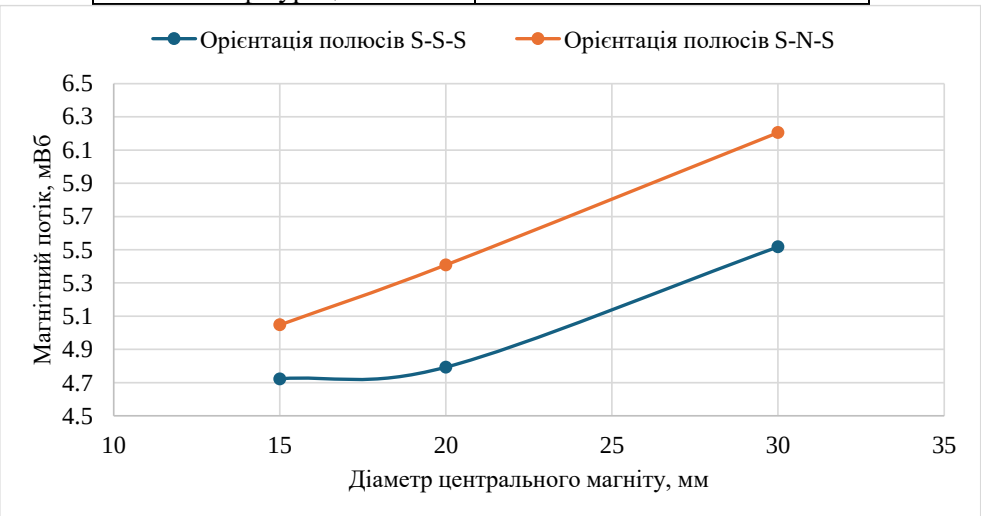


Рис. 10 – Розрахункові значення магнітного потоку представлених коаксіальних магнітних систем

Із таблиці 2 і рис. 10 видно, що конфігурації з орієнтацією полюсів S-N-S (конфігурації 4–6) демонструють вищу ефективність порівняно з односпрямованою орієнтацією S-S-S (конфігурації 1–3). Зокрема, при однаковому діаметрі d=15 мм, перехід від S-S-S до S-N-S забезпечує приріст магнітного потоку на ~6,9 %, а для діаметрів d=30 мм цей приріст становить ~12,5 %. Це пояснюється створенням більш сприятливої топології силових

ліній, які замикаються таким чином, що більша частина магнітного потоку витісняється у робочий простір над переднім зрізом МС.

Безпосереднє збільшення діаметра центрального магніту вдвічі (з 15 мм до 30 мм) у конфігурації S-N-S дає приріст потоку на ~23 %, і на ~17 % у конфігурації S-S-S. Це свідчить про ефективність масштабування центрального магніту.

Варто зазначити, що отримані теоретичні значення магнітного потоку можна використовувати як зручний індикатор потенційної ефективності розглянутих конфігурацій. Інтуїтивно це пояснюється тим, що чим більший магнітний потік, тим більший об'єм плазми залучається до взаємодії з магнітним полем, а отже, тим більшим може бути обмін імпульсом і відповідна гальмівна сила.

Такий підхід дозволяє на ранніх етапах оцінити та порівняти різні конфігурації без необхідності одразу переходити до складних і ресурсоємних експериментів у вакуумних камерах із плазмою та прямим вимірюванням тяги. Фактично, магнітний потік у цьому випадку виступає як зручний критерій для попереднього відбору найбільш перспективних варіантів. Крім того, аналіз розподілу магнітного поля та відповідного магнітного потоку дає змогу оцінити вплив орієнтації та полярності магнітів у збірці та визначити конфігурації, у яких досягається більш ефективна концентрація поля в області взаємодії з плазмою.

Водночас важливо розуміти, що цей параметр не визначає силу взаємодії однозначно. Реальна тяга також залежить від характеристик плазмового середовища, таких як густина, швидкість і температура частинок, а також від просторової структури магнітного поля. Тому отримані результати доцільно розглядати як якісну та відносну оцінку ефективності, яка може бути використана для інженерного аналізу, але потребує подальшого уточнення в рамках більш детального моделювання або експериментальної перевірки.

Висновки. З метою дослідження впливу конфігурації постійних магнітів на розподіл магнітного поля та магнітний потік для визначення ефективних рішень у систем пасивного деорбітингу було проведено визначення параметрів магнітного поля для декількох конфігурацій МС. Конфігурації відрізнялись діаметром внутрішніх магнітів та конфігурацією магнітних полюсів. У рамках дослідження було встановлено, що не лише геометричні параметри, але й полярність та взаємна орієнтація магнітів у коаксільній збірці суттєво впливають на розподіл магнітного поля та його концентрацію в області взаємодії. Оптимізація цих параметрів дозволяє підвищити ефективність використання магнітного матеріалу.

Конфігурація 6 (з діаметром центрального магніту 30 мм і орієнтацією полюсів S-N-S) забезпечила максимальний магнітний потік (0.006205 Вб), що робить її найбільш перспективною для створення гальмівної сили серед шести розглянутих конфігурацій МС.

Зміна орієнтації центрального магніту на протилежну (перехід від S-S-S до S-N-S) приводить до зростання магнітного потоку приблизно на (7–12) % залежно від діаметра центрального магніту.

Збільшення діаметра центрального магніту вдвічі (з 15 мм до 30 мм) у конфігурації S-N-S дає приріст потоку на ~23 %, що свідчить про ефективність масштабування центрального магніту.

Встановлений характер залежності свідчить про можливість прогнозованого масштабування характеристик системи шляхом зміни геометричних параметрів магнітів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування впливу параметрів плазмового середовища, проведення більш детального моделювання взаємодії з плазмою, а також експериментальну валідацію отриманих результатів.

1. ESA’s annual space environment report. GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD. Issue 9, Rev. 1. European Space Agency, Space Debris Office. 2025. 118 p. URL: https://www.sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_I9R1_20251021.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
2. Space sustainability report. Inmarsat. 2022. 54 p. URL: https://www.ukspace.org/wp-content/uploads/2022/06/Inmarsat-Space-Sustainability-Report.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
3. Mitigation of Orbital Debris in the New Space Age : Second Report and Order, FCC 22-74, Federal Communications Commission. 2022. 54 p. URL: https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-74A1.pdf (дата звернення: 20.04.2026).
4. ESA space debris mitigation requirements. ESSB-ST-U-007. Issue 1, Rev. 1. European Space Agency, ESB Secretariat. 2025. 80 p. URL: https://esamultimedia.esa.int/docs/technology/ESSB-ST-U-007_Issue_1_Rev_1(23_October_2025).pdf (дата звернення: 20.04.2026).
5. *Abaturov A. O., Dron M. M., Kulyk O. V., Proroka, V. A*. An overview of methods and technical means of space debris removal from low earth orbits. System Design and Analysis of Aerospace Technique Characteristics. 2022. V. 31, Vol. 2. P. 3–13. https://doi.org/10.15421/472209
6. *Muhammad H. J., Akhlaq A.* Space Debris Removal Using Electromagnetic Fields. Preprint (Version 1) available at Research Square. April. 2026. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9376378/v1
7. *Shuvalov V. A., Simanov V. G., Horolsky P. G., Kulagin S. N*. Deceleration of an artificially magnetized spacecraft in the ionospheric plasma. Space Sci. & Technol. 2020. V. 26, Vol. 2. P. 59–71. https://doi.org/10.15407/knit2020.02.059
8. *Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Kuchugurnyi, Y. P*. Drag on a spacecraft produced by the interaction of its magnetic field with the Earth's ionosphere. Physical modelling. Acta astronautica. 2020. V. 166. P. 41–51. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.10.018

Стаття надійшла до редакції 04.05.2026
Після доопрацювання 15.06.2026
Прийнято до друку 02.07.2026