

Деркач М.І., Хіст В.В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email: mariiadch@gmail.com*

МАСИВ ГАЛЬБАХА ЯК ЗАСІБ ЕКРАНУВАННЯ ЗАВАД ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ МАГНІТНОЇ НАВІГАЦІЇ БПЛА

***Анотація.** У статті розглянуто використання масиву Гальбаха в конструкції безколекторних електродвигунів з метою зменшення рівня електромагнітних завад під час застосування магнітної навігації в безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Однією з ключових проблем, що обмежує точність магнітної навігації, є вплив магнітного поля, створюваного електродвигунами, інтенсивність якого у сотні разів перевищує рівень геомагнітного фону Землі, що спричиняє істотні спотворення результатів вимірювання. Використання циліндричної конфігурації масиву Гальбаха дає змогу сконцентрувати магнітний потік всередині корпусу двигуна, тим самим мінімізуючи його зовнішнє магнітне випромінювання. Запропоноване технічне рішення сприяє підвищенню точності магнітної навігації БПЛА та створює передумови для підвищення їх радіоелектронної стійкості та зниження виявлюваності.*

***Abstract.** The application of a Halbach array in the design of BLDC motors is examined as a method for reducing magnetic interference in UAV-based magnetic navigation. The main obstacle to achieving high navigation accuracy is the influence of motor-generated magnetic fields, which can exceed the intensity of the Earth's geomagnetic background by several hundred times and lead to significant sensor distortions. A cylindrical Halbach array configuration allows the magnetic flux to be confined within the motor structure, significantly reducing its external magnetic footprint. This solution enhances the precision of magnetic navigation and prospectively enables the deployment of autonomous UAVs that are undetectable and highly resilient to electronic warfare systems.*

***Ключові слова:** магнітна навігація, масив Гальбаха, БПЛА, безколекторні двигуни, густина магнітного потоку*

***Keywords:** magnetic navigation, Halbach array, unmanned aerial vehicle, BLDC motors, magnetic flux density.*

В умовах війни критично важливим є забезпечення надійної навігації в середовищах, де супутникові сигнали недоступні або нестабільні через активне глушіння або блокування засобами радіоелектронної боротьби противника. Однією з перспективних альтернатив є магнітна навігація, яка ґрунтується на вимірюваннях магнітного поля за допомогою магнітометра з подальшим порівнянням отриманих даних із картами магнітних аномалій земної кори. Цей підхід є повністю автономним, оскільки не залежить від супутникових систем і базується на просторовій неоднорідності та високій довгостроковій стабільності геомагнітного поля. Застосування магнітного поля Землі як навігаційного орієнтира є доцільним, оскільки воно є майже невразливим до зовнішніх впливів, доступним у будь-якій точці земної кулі, незалежно від часу доби та погодних умов.

Особливо перспективним є застосування магнітної навігації на сході України, де наразі тривають активні бойові дії. Цей регіон характеризується наявністю значних локальних магнітних аномалій, зумовлених специфікою геологічної будови земної кори та високою концентрацією корисних копалин [1]. Магнітна навігація вже була випробувана на кількох типах літальних апаратів у Сполучених Штатах, і результати тестувань засвідчили, що для досягнення високої точності необхідно мінімізувати вплив власного магнітного поля апарата, зокрема шляхом його екранування або компенсації, щоб забезпечити точне корелювання показників магнітометра з картою магнітних аномалій [2].

У випадку використання магнітної навігації на безпілотних літальних апаратах (БПЛА) основним джерелом спотворення вимірювань магнітного поля є електродвигуни. Сучасні БПЛА, як правило, оснащені безколекторними електродвигунами, які забезпечують високу енергоефективність завдяки тривалому терміну служби, високому крутному моменту та низькому тепловиділенню [3]. Проте магнітне поле, створюване стандартними безколекторними двигунами, не є сконцентрованим у межах корпусу двигуна і значною мірою поширюється назовні, що негативно впливає на точність магнітометричних вимірювань.

Магнітометри виявляють магнітні поля в діапазоні від нано - до мкТл, в той час як поля безколекторних двигунів можуть досягати рівня мТл на близьких відстанях. Це значно перевищує інтенсивність магнітного поля Землі навіть в ділянках з аномаліями, та, відповідно, буде спотворювати результати вимірювань.

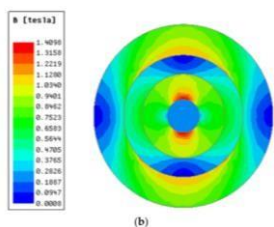


Рис. 1. Розподіл магнітної індукції колекторного двигуна. [4]

Можливим рішенням для зменшення впливу небажаних магнітних полів є застосування масиву Гальбаха. Магнітна збірка Гальбаха це конфігурація постійних магнітів, що дозволяє суттєво посилити магнітне поле з одного боку та повністю мінімізувати його на протилежному. Такий розподіл досягається завдяки періодичному обертанню напрямку намагніченості кожного наступного магніту на 90° відносно попереднього. У разі застосування цієї конфігурації у двигуні, магнітне поле зосереджується всередині, що запобігає його зовнішньому впливу та усуває спотворення показів магнітометра.

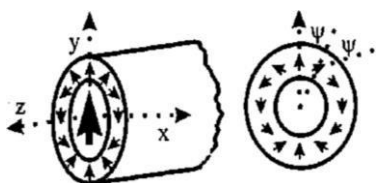


Рис. 2. Конструкція ідеалізованого циліндра Гальбаха. [5]

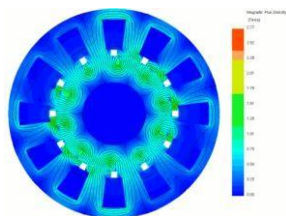


Рис. 3. Розподіл магнітної індукції в Масиві Гальбаха на основі постійних магнітів. [6]

В ідеалізованому випадку (Рис. 2), нескінченно довгий циліндр Гальбаха створює однорідне магнітне поле в напрямку осі y в отворі та нульове поле скрізь за межами циліндра. Тоді величина індукції B в отворі описується формулою $B = B_r \ln \left(\frac{R_0}{R_i} \right)$, де B_r – це залишкова намагніченість матеріалу, R_0 та R_i - зовнішній та внутрішній радіус циліндра відповідно. [5]

У районах із вираженими магнітними аномаліями поєднання геореференсування та використання внутрішніх сенсорів платформи може забезпечити базовий рівень автономії навіть при повній втраті супутникового зв'язку. За умови, якщо дрон використовує магнітну навігацію без підключення до GPS та не передаватиме радіосигналів під час польоту, електромагнітне випромінювання буде мінімальним. Вся інформація може зберігатися на борту, а

сама місія виконуватися автономно з попередньо завантаженим маршрутом. У поєднанні зі слабким зовнішнім магнітним фоном, одержаним завдяки двигунам на основі масиву Гальбаха, це зробить літальний апарат практично невидимим як для радіоелектронних, так і магнітометричних систем виявлення.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку. (n.d.). Аномальне магнітне поле. *Дані Інституту геофізики НАН України ім. С. І. Субботіна*. <http://wdc.org.ua/uk/node/112>
- [2] Canciani, A. J. (2021). Magnetic navigation on an F-16 aircraft using online calibration. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(1), 420–434.
- [3] Praveen, R. P., Ravichandran, M. H., Achari, V. T. S., et al. (2012). A novel slotless Halbach-array permanent-magnet BLDC motor for spacecraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(9), 3615–3623.
- [4] Du, J., Li, C., Zhao, J., et al. (2022). Eddy current loss and structure design in BLDC high-speed PM motor. *Machines*, 10(2), 118.
- [5] Ní Mhíocháin, T. R., Weaire, D., McMurry, S. M., et al. (1999). Analysis of torque in nested magnetic cylinders. *Journal of Applied Physics*, 86(11), 6412–6417.
- [6] EMWorks. (n.d.). *Halbach array in PM motors: A technical overview*. <https://www.emworks.com/en/application/halbach-array-in-pm-motors-a-technical-overview>