

УДК 629.7.053

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771352018143829>Нечипоренко О. М.¹, к. т. н, доцент, Брижан С. С.², бакалавр

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАГНІТОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

En Due to the reliability analysis of a digital magnetometric system based on a three-axis magnetometer, the method of the magnetometer structural redundancy, represented the parallel structure of redundancy, was chosen to improve reliability. The choice of the backup elements number under loaded redundants is made and the number of magnetometers in the redundant system is three. Algorithms for diagnostics and magnetometer failures eliminating in a magnetometric system was developed.

Due to the presented algorithm the program was developed. Installation of this program on Arduino microcontroller allowed to diagnose the failure of one of the magnetometers in the magnetometric system, to restore the operating state (to eliminate the failure) and, thus, significantly improve the reliability of the magnetometric system.

Ru На основе анализа надежности цифровой магнитометрической системы на базе трехосевого магнитометра, для повышения надежности выбран метод структурного резервирования магнитометра, представляющий параллельную структуру резервирования. Обусловленно выбор количества резервных элементов при нагруженном резервировании – общее количество магнитометров в резервируемой системе равняется трем. Разработаны алгоритмы диагностирования и устранения отказов магнитометра в магнитометрической системе.

Вступ

Завдяки розвитку електроніки і технології мікроелектронних механічних систем з'явилися МЕМС-магнітометри, що надають функцію компаса у мікросхемному виконанні і входять до складу складних навігаційних систем малих безпілотних літальних апаратів (МБЛА), зокрема квадрокоптерів.

Актуальність теми даного дослідження полягає в розробці методів підвищення надійності МБЛА в цілому, так і їх складових частин, систем і елементів.

Вирішені задачі: із огляду літератури відомі деякі способи підвищення надійності магнітометра, такі як: калібровка в лабораторних («чистих»)

¹ НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра аерокосмічних і роботизованих систем

² НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», факультет авіаційних і космічних систем

умовах [1, 2, 3], калібрівка в умовах експлуатації [4, 5].

Вирішені задачі: із огляду літератури відомі деякі способи підвищення надійності магнітометра, такі як: калібрівка в лабораторних («чистих») умовах [1, 2, 3], калібрівка в умовах експлуатації [4, 5].

До невирішених задач відноситься підвищення надійності роботи магнітометра у разі відмови у показаннях (на одній із осей вимірювання, на трьох осях, відмовив весь датчик).

Постановка задачі

Метою дослідження є розробка метода підвищення надійності і точності магнітометричної системи під час проектування та забезпечення надійної роботи в умовах експлуатації на літальному апараті за допомогою впровадження у систему додатково двох магнітометричних датчиків і алгоритму діагностування їх відмови шляхом порівняння показань.

Об'єкт дослідження

Магнітометр є пристрій для вимірювання інтенсивності одної або декількох складових магнітного поля. В основі конструкції інтегрального магнітометра лежить анізотропний магніторезистивний ефект. Чутливий елемент виготовляється із пермалоевої плівки, здатної змінювати свій опір у залежності від напрямку струму, що протікає через неї, і напрямку вектора її намагніченості. У свою чергу, вектор намагніченості плівки визначається напрямом силових ліній магнітного поля, в якому знаходиться чутливий елемент (рис. 1).

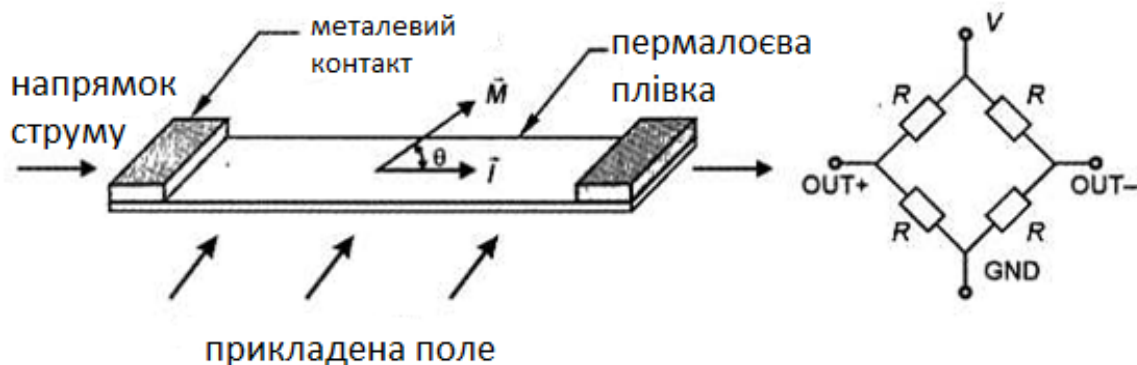


Рис. 1. Функціональна схема роботи магнітометра

Дослідження проводилися на магнітометричній системі, розробленій на базі цифрового трьохосьового магнітометра (компаса) типу *HMC5883* (рис. 2) фірми *Bosch*.

Характеристики магнітометра *HMC5883*: діапазон вимірювань: 1,3 - 8 гаус; точність: 5 мілігаус; від 1 до 2 °; напруга живлення: 2, - 3,6 В;

розміри: 14 x 13 x 5 мм; вага: 2 г; компас зібраний на мікросхемі: *HMC5883L* (рис. 3); з'єднання із контролером: інтерфейс ІІС.

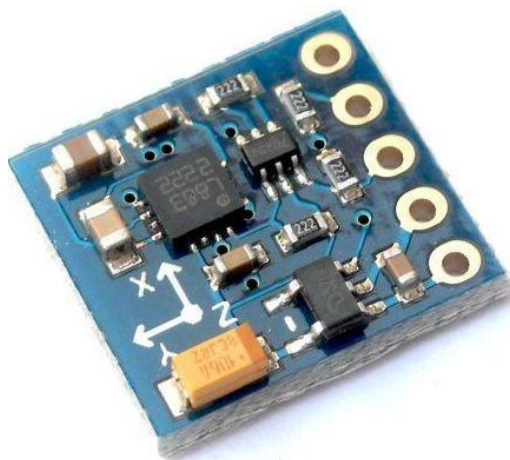


Рис. 2. Трьохосьовий цифровий магнітометр (компас) *HMC5883*

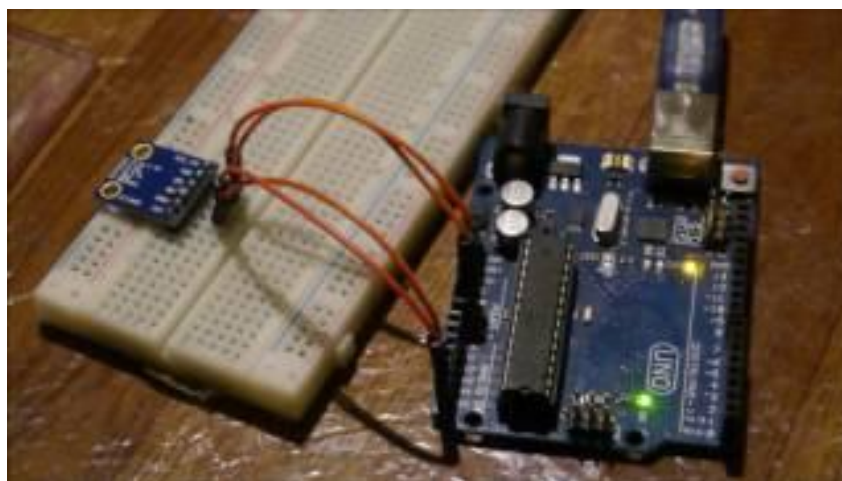


Рис. 3. Підключення магнітометра *HMC5883* до плати *Arduino UNO*

Магнітометр потрібно обов'язково калібрувати перед кожним польотом МБЛА (квадрокоптера). Задачею калібрування є отримання коректувальної матриці, за допомогою якої можна розраховувати актуальні (відкалібровані) значення. Обчислений, відкалібрований результат отримується шляхом множення значень, зчитаних із датчика, на коректувальну матрицю.

Конструктивні методи поліпшення технічних характеристик магнітометрів

Під час використання датчика орієнтації із чутливими елементами у карданних рамках похибка зміни азимута $\Delta\alpha$ (1) залежить від похибки установки карданних рамок в площину нахилу і по вертикалі:

$$\Delta\alpha = b\Delta\delta\sin\alpha + \Delta\beta(\cos\theta - b\sin\theta\cos\alpha), \quad (1)$$

де $\Delta\beta$, $\Delta\delta$ – похибки установки у площині нахилу і по вертикалі відповідно.

Із цього виразу випливає, що похибка вимірювання азимута від помилок установки карданних рамок змінна в азимут і по зенітному куті і залежить від величини магнітного нахилу. Абсолютна гранична похибка вимірювання азимута (2)

$$|\Delta\alpha| = |\Delta\delta|b + |\Delta\beta|(1+b). \quad (2)$$

Якщо врахувати, що на широті Києва $b \approx 3$, то $\Delta\alpha = 3\Delta\delta + 4\Delta\beta$, тобто похибка визначення азимута від помилок установки рамок виявляється значною. Дійсно, нехай похибки $\Delta\delta = \Delta\beta = 1^\circ$, тоді $|\Delta\alpha| \approx 7^\circ$.

Якщо величини неустановок рамок відомі, то азимут (3) знаходять із виразу

$$a_p = \text{arctg} \frac{\sin \alpha - \Delta\beta(b \sin \theta - \cos \alpha \cos \theta)}{\cos \alpha - \Delta\delta b - \Delta\beta \sin \alpha \cos \theta} \quad (3)$$

Під час проведення робіт, у кліматичних умовах із перепадом температури, значний вплив на результати вимірювання надає температурна похибка датчиків. Конструктивні та технологічні способи стабілізації температури при цьому в значній мірі обмежені [5]. У той же час, температурна похибка вимірювання ферозондових датчиків значна, хоча і являє собою лінійну залежність. Для її компенсації отримано вирази для визначення основних кутів орієнтації (4) об'єкта – азимута (α), зенітного (θ) і візирного (φ) кутів:

$$\begin{aligned} \text{tg} \alpha &= - \frac{(d_1 - \Delta_1 t) \sin \varphi + (d_2 - \Delta_2 t) \cos \varphi}{(d_1 - \Delta_1 t) \cos \varphi \cos \theta - (d_2 - \Delta_2 t) \sin \varphi \cos \theta + (d_3 - \Delta_3 t) \sin \theta}, \\ \theta &= \arcsin \frac{Z}{\sqrt{(d_3 - \Delta_3 t)^2 + [-(d_1 - \Delta_1 t) \cos \varphi + (d_2 - \Delta_2 t) \sin \varphi]^2}} - \\ &\quad - \text{arctg} \frac{d_3 - \Delta_3 t}{-(d_1 - \Delta_1 t) \cos \varphi + (d_2 - \Delta_2 t) \sin \varphi}, \\ \text{tg} \varphi &= \frac{-(d_1 - \Delta_1 t) \sin \alpha_0 - (d_2 - \Delta_2 t) (\cos \theta_0 \cos \alpha_0 - b \sin \theta_0)}{(d_1 - \Delta_1 t) (\cos \theta_0 \cos \alpha_0 - b \sin \theta_0) - (d_2 - \Delta_2 t) \sin \alpha_0}, \end{aligned} \quad (4)$$

де t – температура, $\Delta_i = \frac{U_{0i} A_i}{k_i}$;

Z – вертикальна складова напруженості магнітного поля Землі.

Отримані вирази дозволяють визначати шукані кути шляхом розрахунку, а не компенсації температурної похибки датчика орієнтації, якщо температурні коефіцієнти A_i , магнітне нахилення b і основні електричні параметри перетворювача визначені апріорно.

Методи аналізу і підвищення надійності

Всі методи підвищення надійності принципово можуть бути зведені до наступних основних: 1) резервування; 2) зменшення інтенсивності відмов підбором елементів системи; 3) скорочення часу безперервної роботи; 4) зменшення середнього часу відновлення для відновлюваних об'єктів. Реалізація вказаних методів може здійснюватися або під час проектування, або під час виготовлення, або у процесі експлуатації.

У дослідженні було застосовано метод структурного резервування.

Резервуванням називають метод підвищення надійності технічних виробів (ТВ) за рахунок введення надлишковості. Під *надлишковістю* тому розуміють додаткові засоби і можливості, окрім мінімально необхідних, для виконання ТВ заданих функцій. Таким чином, задачею введення надлишковості є забезпечення нормального функціонування ТВ після виникнення відмов у її елементах.

Резервування можна поділити на два види [6]. За видом резервування буває:

- *навантаженим (пасивним)* – резервні елементи функціонують нарівні із основними (постійно включені у роботу); навантажений резерв на практиці часто називають «гарячим»;
- *ненавантаженим (активним)* – резервні елементи вводять у роботу тільки після відмови основних елементів (резервування заміщенням); ненавантажений резерв на практиці часто називають «холодним».

У дослідженні було використано метод навантаженого резервування, коли елемент (пристрій або система) резервується *ідентичними* резервними елементами, підключеними постійно у роботу. Це є резервування, структура надійності якого представляє собою паралельне підключення елементів.

Імовірність безвідмовної роботи (ІБР) для паралельної структури із використанням n магнітометрів НМС5338:

$$P_i(t) = 1 - Q(t) \geq 1 - \sqrt[n]{Q_{c3}} = 1 - Q_{c3}^{\frac{1}{n}}. \quad (5)$$

Для випадку використання 2 ідентичних датчиків:

$$P_p = 1 - \sqrt{(0,95)} = 0,9746. \quad (6)$$

Для випадку використання 3 датчиків (два резервних):

$$P_p = 1 - \sqrt[3]{(0,95)} = 0,983. \quad (7)$$

Для випадку використання 4 ідентичних датчиків (три резервних):

$$P_p = 1 - \sqrt[4]{(0,95)} = 0,9872. \quad (8)$$

Із цих розрахунків і графіку (рис. 4) бачимо, що подальше збільшення кількості резервних датчиків не доцільне. Тому вибираємо кількість $n = 3$ магнітомери.

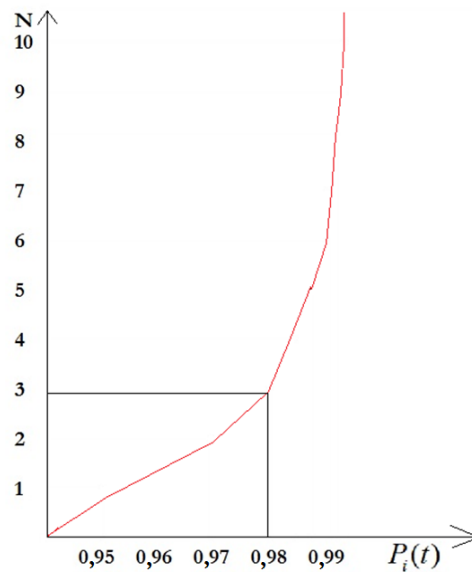


Рис. 4. Залежність ймовірності безвідмовної роботи резервованої магнітометричної системи від кількості резервів

Розроблено алгоритми діагностування відмов магнітометричної системи, на основі яких розроблені програми.

Алгоритм для відмови по одній осі

У випадку, якщо читання АЦП переповнює або переповнює для даного каналу, або якщо під час вимірювання зміщення спостерігається переповнення, цей регістр даних буде містити значення -4096 . Тому по прийнятті цього значення дані із магнітометра вважатимуться не істинними. Блок-схема алгоритму діагностування переповнення (відмови) регістру магнітометричної системи представлена на рис. 5.

Алгоритм діагностування відмови шляхом порівняння показань

У разі отримання некоректних даних із одного з трьох датчиків, вони порівнюються із двома іншими. На основі цих даних виконується відключення магнітометра, що відмовив.

За представленим на рис. 6 алгоритмом розроблено програму, інсталяція якої на мікроконтролері *Arduino* дозволило діагностувати відмову одного із магнітометрів магнітометричної системи, відновити працездатний стан (усунути відмову) і таким чином значно покращити надійність магнітометричної системи.

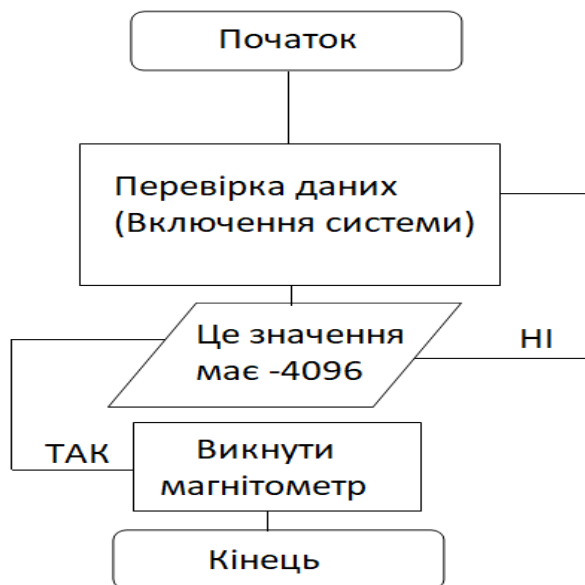


Рис. 5. Блок-схема алгоритму діагностування переповнення (відмови) регістру магнітометричної системи

Висновки

Для МБЛА, зокрема квадрокоптерів, розроблено цифрову магнітометричну систему на базі магнітометра типу *HMC5883*.

На основі аналізу надійності розробленої системи для підвищення надійності вибрано метод структурного резервування магнітометра, що представляє паралельну структуру системи резервування.

Обумовлено вибір кількості резервних елементів під час навантаженого резервування – кількість резервних магнітометрів у резервованій системі дорівнює двом, загальна кількість використовуваних у системі магнітометрів – три компаси типу *HMC5883*.

Розроблено алгоритми діагностування і усунення відмов магнітометра у магнітометричній системі.

Список використаної літератури

1. *Blaylock, B. T.* “Magnetometers,” *Spacecraft Attitude Determination and Control*, edited by J. R. Wertz, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 1978, Chap. 6.3, pp. 180–184.
2. *Psiaki, M. L., Martel, F., and Pal, P. K.*, “Three-Axis Attitude Determination via Kalman Filtering of Magnetometer Data,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 3, 1990, pp. 506–514.
3. *Challa, M., and Natanson, G.*, “Effects of Magnetometer Calibration and Maneuvers on Accuracies of Magnetometer-Only Attitude and Rate Determination,” *Proceedings of the AAS/GSFC 13th International Symposium on*

Space Flight Dynamics, Vol. 1, NASA CP-1998-206858/VOL1, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1998, pp. 389–401.

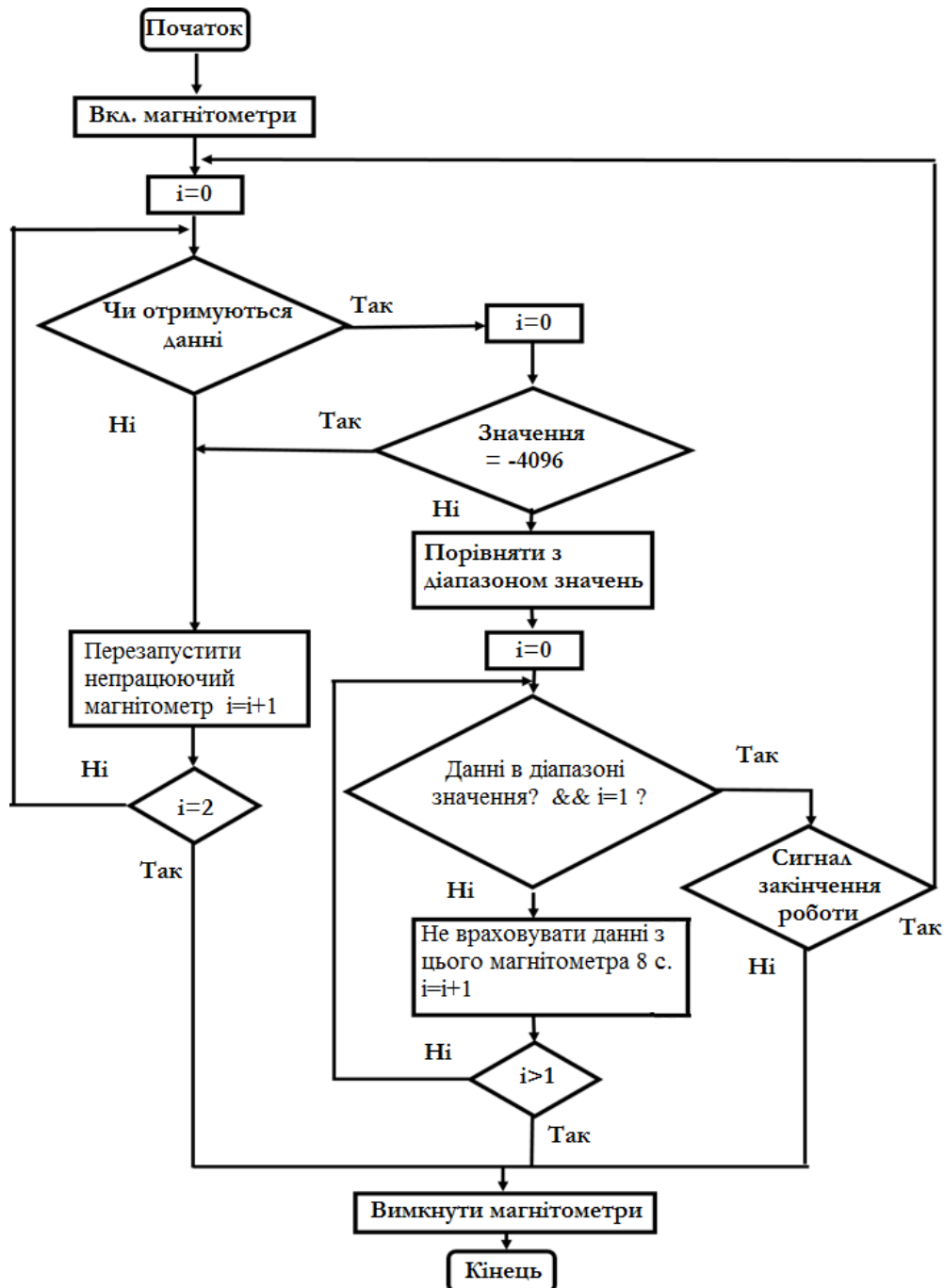


Рис. 6. Блок-схема алгоритму діагностування і усунення відмови одного магнітометра

4. *Deutschmann, J. K., and Bar-Itzhack, I.,* "Evaluation of Attitude and Orbit Estimation Using Actual Earth Magnetic Field Data," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 24, No. 3, 2001, pp. 616–623.
5. *Jung, J., and Psiaki, M. L.,* "Tests of Magnetometer/Sun-Sensor Orbit Determination Using Flight Data," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 25, No. 3, 2002, pp. 582–590.

6. *Нечипоренко О. М.* Основи надійності літальних апаратів [Текст]: навч. посіб. О. М. Нечипоренко. – К.: НТУУ “КПІ», 2010. – 240 с. Бібліогр.: с. 235-239.