

Ю.М. Безкоровайний, к.т.н., О.А. Суценко, д.т.н., О.В. Ермолаєва
(Національний авіаційний університет, Україна)

Підвищення чутливості індукційного датчика магнітного курсу

Запропоновано модернізацію індукційних датчиків магнітного поля Землі типу ДД-3, що забезпечує підвищення чутливості датчика до компонентів магнітного поля з урахуванням магнітного нахилення у поточних координат літального апарату. Представлені результати математичного моделювання та пропозиції щодо модернізації конструкції індукційних датчиків.

Для вимірювання характеристик магнітного поля та магнітних властивостей речовин застосовують прилади звані магнітометрами. Залежно від виконуваної задачі розрізняють прилади для вимірювання значення напруженості магнітного поля напрямку вектора магнітного поля.

Основним параметром магнітометра є його чутливість, при цьому формалізувати цей параметр, зробити його єдиним для всіх магнітометрів практично неможливо і не тільки тому, що магнітометри відрізняються принципом дії, але і конструкцією перетворювачів і функцією обробки сигналу.

Для вимірювання курсу літальних апаратів використовуються індукційні датчики, засновані на визначенні напрямку лише горизонтальної складової напруженості магнітного поля землі. Чутливими елементами таких датчиків є три феромагнітні зонди, які закріплені на платформі під кутом 60° і утворюють індукційний трикутник. Перевагами використання феромагнітних зондів як чутливі елементи є простота їх конструкції та висока чутливість.

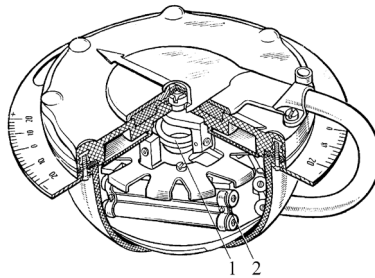


Рис. 1. Зовнішній вигляд індукційного датчика

Основними конструкційними елементами датчика є карданний підвіс 1 який забезпечує розташування феромагнітних зондів 2 в площині горизонту використовуючи ефект маятника, а для демпфування коливань корпус заповнений спеціальною рідиною. Таким чином, схема розташування осей чутливості можна зобразити наступним чином

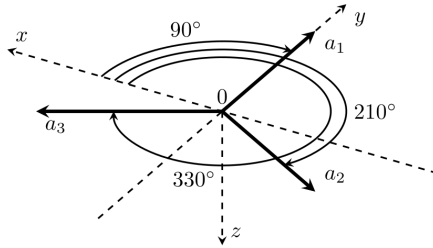


Рис. 2. Розташування осей чутливості трикомпонентного індукційного датчика

Компоненти вектора магнітного поля в системі координат датчика можна визначити як

$$B = \begin{bmatrix} B_{mx} \\ B_{my} \\ B_{mz} \end{bmatrix} = \left| \vec{B}_m \right| \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cos(I) \\ \sin(\psi) \cos(I) \\ \sin(I) \end{bmatrix} \quad (1)$$

де B_m - вектор магнітного поля, ψ - магнітний курс, I - кут магнітного нахилення, B_{mx} , B_{my} , B_{mz} - проєкції вектора магнітного поля на конструкційні осі датчика.

Вихідними сигналами датчика є сигнали, пропорційні проєкціям вектора магнітної підлоги на осі чутливості вимірювальних елементів і з урахуванням (1) має вигляд

$$B_s = [B_1 \ B_2 \ B_3]^T = H \cdot B, \quad (2)$$

де B_1 , B_2 , B_3 - проєкції вектора напрямку магнітного поля на осі чутливості датчика, B - вектор проєкцій магнітного поля (1), H - матриця здійснює перетворення проєкцій (1) в датчика результати вимірювань, яка має вигляд

$$H = \begin{bmatrix} \cos(90) \cos(\theta) & \sin(90) \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(210) \cos(\theta) & \sin(210) \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(330) \cos(\theta) & \sin(330) \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Як випливає з матриці (3) дана конфігурація датчика дозволяє вимірювати лише горизонтальну складову магнітного поля. Для відновлення проєкцій вектора магнітного поля (1) складемо матрицю реконструкції вигляду

$$B = Hr \cdot B_s$$

де B - оцінка вектора проєкцій магнітного поля, $Hr = (H^T H)^{-1} H^T$ - псевдообернена матриця реконструкції, B_s - вектор результатів вимірів магнітного поля (2).

Для врахування напрямку вектора магнітного поля пропонується змінити конструкційний кут установки феромагнітних зондів на внутрішній платформі

датчика індукції для забезпечення їх чутливості щодо конструкційної осі z (див. Рис. 1). Схема розташування осей такого датчика набуде наступного вигляду

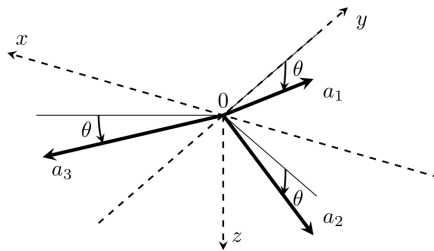


Рис. 3. Ілюстрація зміни кута установки ферромагнітних зондів

Завдання підвищення чутливості зводиться до максимізації векторної проекції магнітного поля землі на осі чутливих елементів індукційного датчика. Зважаючи на те, що дані завдання виконуються в відносно локальній області земної поверхні доцільно проводити оптимізацію стосовно якоїсь області з урахуванням середнього значення магнітного способу.

Як приклад розглянемо визначення оптимального кута установки для забезпечення максимальної чутливості індукційного датчика до флуктуацій напруженості магнітного поля.

Як показник якості використовуємо функціонал заснований на осередненні максимального значення сигналу ферромагнітних сенсорів при різних значеннях магнітного курсу

$$f(\theta, I) = \frac{1}{360} \int_{(0)}^{(360)} h_{\infty} [Hr(\theta) B(\psi, I)] d\psi. \quad (4)$$

Для визначення оптимального кута встановлення використаємо критерій вигляду

$$\theta(I) = \underset{\theta \in (0, 90)}{\text{arg}} f(\theta, I). \quad (5)$$

В якості прикладу оцінемо значення кута установки ферромагнітних зондів при виконанні виміру магнітного поля в околицях Києва (Україна). В якості джерела вихідних даних щодо магнітного нахилення скористаємося моделлю магнітного поля землі 2020 року [1]. Дані моделі наведено у Табл. 1.

Як результат обчислення критерію (5) отримаємо значення

$$\theta(68.7) = 72.129 \text{ град.}$$

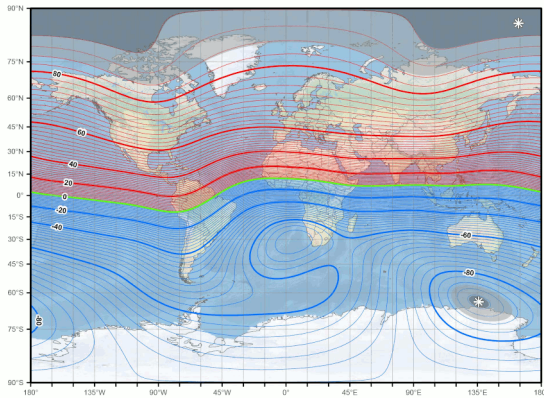


Рис. 4. Карта нахилення магнітного поля землі

Таблиця 1.

Параметри моделі магнітного поля Землі

Параметр	Значення
Модель магнітного поля Землі	WMM-2020 (calculator version 0.5.1.11)
Широта	50.45056 град.
Довгота	30.52417 град.
Висота	2000 м. над рівнем моря
Нахилення	68.7 град.

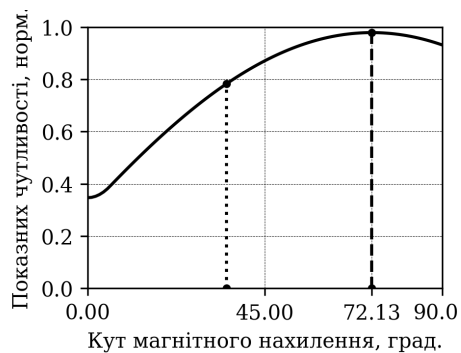


Рис. 5. Оцінка чутливості блоку магнітних зондів при зміні кута встановлення при магнітному нахиленні 68.7 град.

В залежності від середнього значення кута магнітного нахилення можна визначити оптимальне значення кута встановлення магнітних зондів

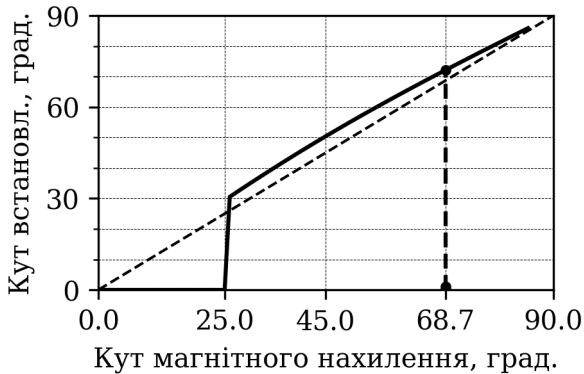


Рис. 6. Залежність оптимального кута встановлення магнітних зондів від абсолютного значення магнітного нахилення

Як слідує з графіка на Рис. 6. при малих кутах магнітного нахилення, що характерно при польотах в області екватора показних (5) вироджується і модернізація магнітного датчика недоцільна. Проте у високих широтах показних чутливості може підвищувати чутливість датчика на 20 та більше процентів (як слідує з графіка на Рис. 5).

Таким чином запропонована модернізація конструкції магнітних датчиків, що використовують магнітні зонди, для підвищення їх чутливості і, відповідно, точності визначення магнітного курсу за допомогою введення неортогонального розташування осей чутливості.

Запропонована модернізація доцільна для літаків, що виконують польоти в локальній географічній області або при обмежених широтах при виконанні таких завдань як аерофотозйомка або місцевих авіарейсів

Список літератури

1. Chulliat, A., W. Brown, P. Alken, C. Beggan, M. Nair, G. Cox, A. Woods, S. Macmillan, B. Meyer and M. Panizza, 2020. The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: Technical Report, National Centers for Environmental Information, NOAA. doi: 10.25923/ytk1-yx35
2. Калькулятор магнітного поля Землі [Електронний ресурс] .- Режим доступу: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>.