

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, к.т.н., В.П. Квасніков, д.т.н.

КАЛІБРУВАННЯ МАГНІТОМЕТРА HONEYWELL HMC5883L

Національний авіаційний університет, andrey4453117@gmail.com

В роботі в процесі калібрування магнітометра обчислено коригувальні коефіцієнти, врахування яких дозволяє компенсувати вплив магнітних збурень на магнітометр і визначити такі параметри, як неточність перпендикулярності осей чутливості, коефіцієнти перетворення для кожної осі, які трансформують вихідні коди магнітометра в одиниці магнітної індукції, а також зміщення нуля для кожної осі. Після проведення процедури калібрування показань магнітометра при його обертанні на 360° утворюється фігура, близька до кола з центром в початку координат, проекції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості магнітометра залежно від кута курсу змінюються за гармонічними функціями, а їх коливання відбуваються відносно осі абсцис. Визначені параметри моделі сенсора можна використовувати для визначення вихідних сигналів магнітометра при інтеграції до програмного коду для подальшого врахування магнітних девіацій. Недоліком такої корекції є те, що компенсація магнітних девіацій буде відбуватися тільки при збереженні конкретного місця установки сенсора.

Ключові слова: магнітометр, калібрування, коефіцієнт перетворення, зміщення нуля, магнітна індукція, магнітне поле Землі, магнітна девіація.

Вступ

Магнітометр є сенсором, призначеним для вимірювання напруженості магнітного поля. В наш час за рахунок малих габаритів та низької вартості найбільш популярними є цифрові мікросхеми, до складу яких входять магніторезистивні сенсори, які дозволяють вимірювати напруженість магнітного поля вздовж трьох взаємоперпендикулярних осей X, Y та Z. Одним з таких сенсорів є типовий представник магнітометрів загального призначення HMC5883L виробництва компанії HONEYWELL, який використовується в мобільних пристроях, автомобільних навігаційних системах, квадрокоптерах та ін. [1]. При цьому напрямок та абсолютна величина модуля магнітного поля Землі розраховується за значеннями напруженості кожної з осей магнітометра [2].

Однак на практиці виміряні значення магнітного поля можуть мати значну похибку, що обумовлено такими чинниками:

- наявність штучних електромагнітних полів навколо сенсора (наприклад, від магнітів або проводів живлення);
- спотвореннями магнітного поля наявними поблизу сенсора елементами з нікелю або заліза;
- неперпендикулярністю осей сенсора.

Два перших фактори достатньо просто виключити або при вимірюванні величини спотворення та введенні поправки при розрахунку напруженостей, або при виключенні самої причини завади [3]. Однак для того, щоб виключити вплив третього фактора, необхідно провести калібрування сенсора.

Найбільш поширеними на даний час методами калібрування інерціальних сенсорів є методи з використанням обертових платформ (центрифуг), поворотів в гравітаційному та магнітному полях Землі (стандартний метод), лінійно-рухомих платформ [4], швидкісний метод [5], а також скалярний метод калібрування триосних блоків (тріад) взаємно ортогональних сенсорів [6]. В даній роботі будемо проводити статичні випробування сенсора в магнітному полі Землі з використанням поворотного столу (стандартний метод).

Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) за результатами калібрування магнітометра обчислити коригувальні коефіцієнти, врахування яких дозволяє компенсувати вплив магнітних збурень на магнітометр і визначити такі параметри, як неточність перпендикулярності осей чутливості та коефіцієнти перетворення і зміщення нуля для кожної осі;
- 2) показати, що після проведення процедури калібрування показань магнітометра при його обертанні на 360° утворюється фігура, близька до кола з центром в початку координат, проекції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості магнітометра залежно від кута курсу змінюються за гармонічними функціями, а їх коливання відбуваються відносно осі абсцис;
- 3) використовувати отримані параметри моделі магнітометра для визначення вихідних сигналів при інтеграції до програмного коду для подальшого врахування магнітних девіацій.

Викладення основного матеріалу

В процесі калібрування магнітометра визначаються коригувальні коефіцієнти, врахування яких дозволяє компенсувати вплив шкідливих магнітних збурень на магнітометр і визначити такі параметри:

- неточність перпендикулярності осей чутливості, що обумовлено неточністю встановлення чипів на платі;
- коефіцієнти перетворення для кожної осі, які трансформують вихідні коди магнітометра в одиниці магнітної індукції;
- зміщення нуля для кожної осі (вихідні сигнали магнітометра при відсутності магнітного поля).

Статичні випробування магнітометра проводяться в магнітному полі Землі з використанням поворотного столу. Магнітометр Honeywell HMC5883L може вимірювати магнітне поле в діапазоні ± 8 Гауса. Завдяки змінному коефіцієнту підсилення (GN) чутливість сенсора може варіюватися від 0.73 мГс/LSB (мілігаус на молодший значущий розряд) до 4.35 мГс/LSB при зміні GN від 0 до 7 відповідно. Настроювання та зчитування даних проводиться по шині I²C [7].

Сенсор має 12 одnobайтних реєстрів, два з яких є реєстрами настроювань (*Register A* та *Register B*) і дозволяють змінювати частоту видачі даних, режим вимірювання, кількість вибірок під час одного вимірювання та коефіцієнт підсилення. За допомогою реєстра режиму (*Mode Register*) можна вибрати режим функціонування перетворювача: неперервний (*Continuous-Measurement Mode*) або однократний з переходом до режиму очікування (*Single-Measurement Mode*). До шести реєстрів, розташованих за адресами 0x03÷0x08, заносяться результати вимірювань. Для результатів вимірювань за однією віссю виділяються два реєстри (*Output Register A* та *Output Register B*), при цьому реєстр *A* є старшим реєстром пари, а результат вимірювання представляється 12-бітним кодом. В реєстрі статусу (*Status Register*) використовуються тільки два біти – біт готовності (*RDY*) та біт блокування (*LOCK*). Біт готовності встановлюється після того, як дані будуть записані у всі шість реєстрів за адресами 0x03÷0x08. Для реалізації апаратного, а не програмного, опитування його функція дублюється виводом *DRDY*. Біт блокування встановлюється або при читанні даних з одного чи декількох (але не з усіх) вихідних реєстрів, або при читанні реєстра режиму. Інші три реєстри є ідентифікаційними реєстрами (*Identification Registers*), які дозволяють пристрою керування за необхідності визначати даний сенсор.

Обмін даними проводиться за шиною I²C. Для зручності зчитування даних використовується функція автоматичного інкременту адреси вихідних реєстрів з подальшим переходом до адреси 0x03 (старший реєстр осі X) при завершенні зчитування даних з усіх вихідних реєстрів. Особливістю даного сенсора є те, що реєстри розташовані непослідовно, що враховано при розробці програмного забезпечення для мікроконтролера (при послідовному зчитуванні спочатку мають зчитуватися дані осі X, потім осі Z, а в останню чергу – осі Y).

При отриманні даних для калібрування магнітометр встановлюється на поворотний стіл у двох положеннях (рис. 1). Зчитування даних проводиться при повороті вимірювального перетворювача в площині горизонту навколо вертикальної осі з кроком 30° впродовж хвилини. Система орієнтації видає сигнал з частотою 100 Гц, який записується в одновірний масив довжиною 10 елементів. Під час зчитування дані послідовно записуються в текстовий файл у вигляді таблиці для подальшого імпорту в математичні пакети та обчислення. В таблиці 1 наведено усереднені значення сигналів для 13 значень кута повороту в двох положеннях. При цьому в першому положенні (рис. 1, а) вісь чутливості X спрямована на північ, вісь Z – вертикально вгору, а у другому положенні (рис. 1, б) – вісь чутливості X спрямована на північ, вісь Y – вертикально вниз.

Для оцінки показань вимірювального перетворювача побудовано графіки сигналів магнітометра з дев'ятьма (без калібрування), які при його повному оберті навколо вертикальної осі мають утворювати коло з центром в початку координат (рис. 2). Аналізуючи дані залежності, робимо висновки, що магнітне поле збурень деформує коло і зміщує його центр. Для компенсації впливу магнітних збурень необхідно визначити коригувальні коефіцієнти, за допомогою яких будуть алгоритмічно коригуватися показання магнітометра. Тому вихідні сигнали магнітометра необхідно представити у такому вигляді:

$$\begin{aligned} U_x &= k_{xx}T_x + k_{xy}T_y + k_{xz}T_z + U_{0x}; \\ U_y &= k_{yx}T_x + k_{yy}T_y + k_{yz}T_z + U_{0y}; \\ U_z &= k_{zx}T_x + k_{zy}T_y + k_{zz}T_z + U_{0z}. \end{aligned} \quad (1)$$

де T_x, T_y, T_z – проєкції магнітної індукції магнітного поля Землі (МПЗ) на осі чутливості вимірювального перетворювача; U_x, U_y, U_z – безрозмірні показання вимірювального перетворювача; U_{0x}, U_{0y}, U_{0z} – нульові сигнали; k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} та $k_{xy}, k_{xz}, k_{yx}, k_{yz}, k_{zx}, k_{zy}$ – масштабні та перехресні коефіцієнти.

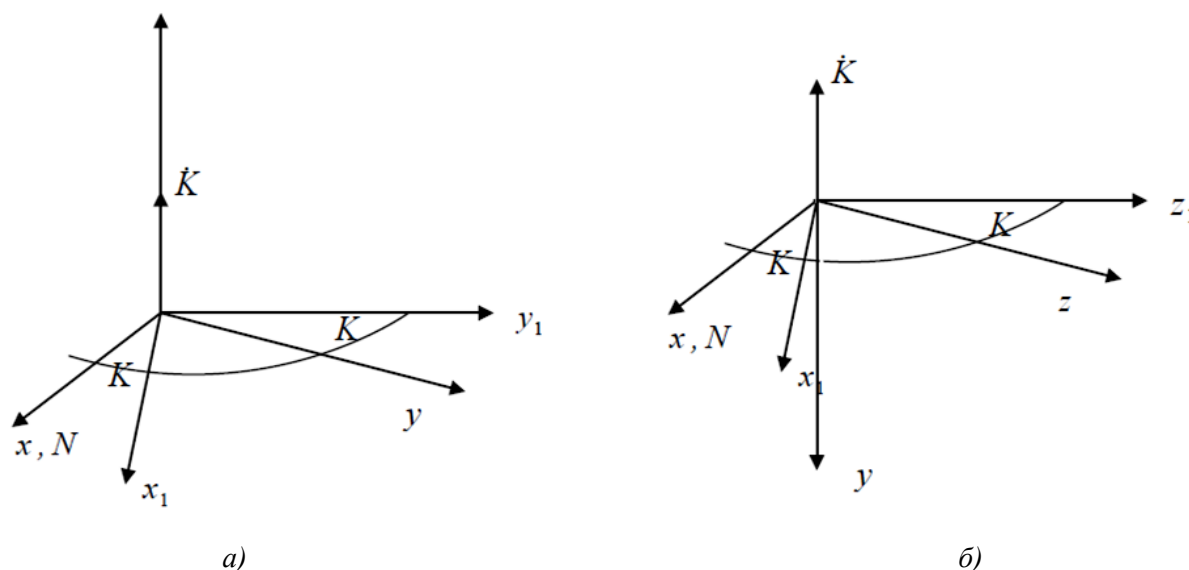
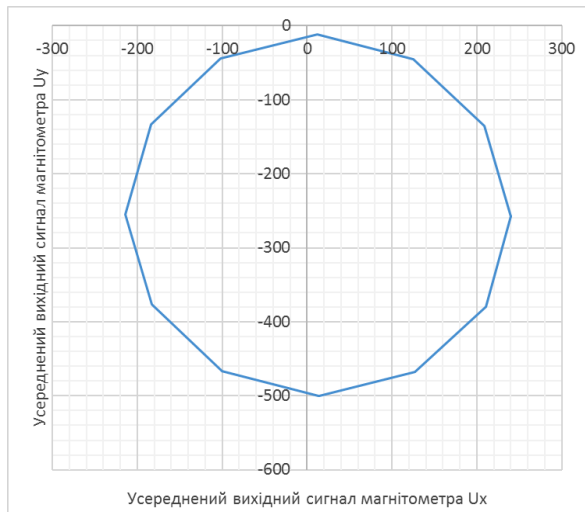


Рис. 1. Положення магнітометра на поворотному столі

Таблиця 1

Усереднені дані вихідного сигналу магнітометра

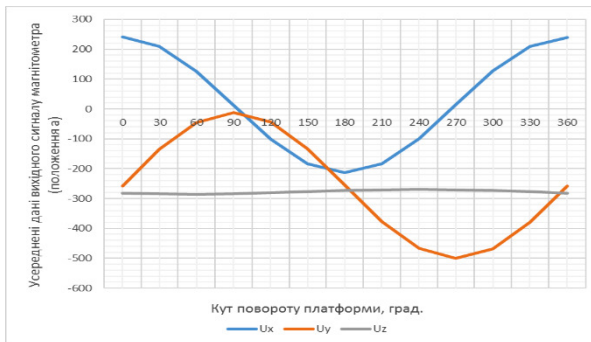
Кут $K, ^\circ$	U_x		U_y		U_z	
	положення а	положення б	положення а	положення б	положення а	положення б
0	240,3558	232,6558	-258,4923	256,7519	-282,8714	114,7131
30	209,1716	199,1959	-135,2888	266,9017	-284,4551	219,0599
60	125,5631	113,8107	-44,8091	275,2361	-285,0419	295,5739
90	11,7449	-0,6559	-11,2143	279,9059	-283,6456	325,0541
120	-101,7102	-113,4541	-43,7399	277,8303	-280,5519	298,9297
150	-183,9562	-194,1136	-132,7759	271,8628	-277,0101	225,2665
180	-213,7425	-222,0211	-254,4305	262,3875	-272,8729	122,2481
210	-182,9617	-189,2329	-376,6771	251,5309	-270,6257	17,9088
240	-100,0683	-104,4479	-466,2854	243,4397	-269,3543	-60,2063
270	13,9952	10,4205	-499,7591	238,7882	-270,5577	-90,3142
300	127,5779	123,8926	-468,2123	240,2207	-273,7365	-64,6301
330	210,3789	205,7122	-379,3324	246,4799	-277,4887	10,9891
360	240,1131	233,0065	-257,2397	256,5758	-281,6103	114,9137



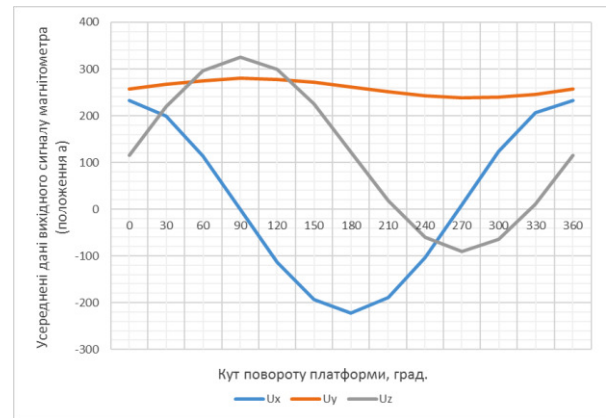
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Графіки залежностей $U_Y = f(U_X)$ з девіаціями (положення а) (а); U_i від кута повороту платформи (положення а) (б); $U_Z = f(U_X)$ з девіаціями (положення б) (в) та U_i від кута повороту платформи (положення б) (г)

В першому положенні магнітометра проєкції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості вимірювального перетворювача в залежності від кута курсу K дорівнюють:

$$T_x = B_{2op} \cos K; \quad T_y = B_{2op} \sin K; \quad T_z = B_{вер}, \quad (2)$$

де B_{2op} , $B_{вер}$ – горизонтальна і вертикальна складові вектора магнітної індукції МПЗ.

Для розрахунків було взято такі значення складових вектора магнітної індукції МПЗ: $B_{2op} = 18964$ Гм, $B_{вер} = -46962$ Гм. Для першого випадку (положення а) для заданого кута курсу за співвідношеннями (1) і (2) отримуємо:

$$- K = 0^\circ, \quad T_x = B_{2op}, \quad T_y = 0, \quad T_z = B_{вер}, \quad \begin{cases} U_{x0} = k_{xx}B_{2op} + k_{xz}B_{вер} + U_{0x}; \\ U_{y0} = k_{yx}B_{2op} + k_{yz}B_{вер} + U_{0y}; \\ U_{z0} = k_{zx}B_{2op} + k_{zz}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases}$$

$$- K = 90^\circ, \quad T_x = 0, \quad T_y = B_{2op}, \quad T_z = B_{вер}, \quad \begin{cases} U_{x90} = k_{xy}B_{2op} + k_{xz}B_{вер} + U_{0x}; \\ U_{y90} = k_{yy}B_{2op} + k_{yz}B_{вер} + U_{0y}; \\ U_{z90} = k_{zy}B_{2op} + k_{zz}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 & - K = 180^\circ, \quad T_x = -B_{zop}, \quad T_y = 0, \quad T_z = B_{вер}, \quad \begin{cases} U_{x180} = -k_{xx}B_{zop} + k_{xz}B_{вер} + U_{0x}; \\ U_{y180} = -k_{yx}B_{zop} + k_{yz}B_{вер} + U_{0y}; \\ U_{z180} = -k_{zx}B_{zop} + k_{zz}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases} \\
 & - K = 270^\circ, \quad T_x = 0, \quad T_y = -B_{zop}, \quad T_z = B_{вер}, \quad \begin{cases} U_{x270} = -k_{xy}B_{zop} + k_{xz}B_{вер} + U_{0x}; \\ U_{y270} = -k_{yy}B_{zop} + k_{yz}B_{вер} + U_{0y}; \\ U_{z270} = -k_{zy}B_{zop} + k_{zz}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases}
 \end{aligned}$$

З отриманих співвідношень можна визначити такі коефіцієнти:

$$k_{xx} = \frac{U_{x0} - U_{x180}}{2B_{zop}}; \quad k_{yx} = \frac{U_{y0} - U_{y180}}{2B_{zop}}; \quad k_{zx} = \frac{U_{z0} - U_{z180}}{2B_{zop}}; \quad (3)$$

$$k_{xy} = \frac{U_{x90} - U_{x270}}{2B_{zop}}; \quad k_{yy} = \frac{U_{y90} - U_{y270}}{2B_{zop}}; \quad k_{zy} = \frac{U_{z90} - U_{z270}}{2B_{zop}}. \quad (4)$$

В другому положенні магнітометра проєкції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості вимірювального перетворювача дорівнюють:

$$T_x = B_{zop} \cos K; \quad T_y = -B_{вер}; \quad T_z = B_{zop} \sin K. \quad (5)$$

Для даного випадку (положення б) для заданого кута курсу з врахуванням (5) отримаємо:

$$\begin{aligned}
 & - K = 0^\circ, \quad T_x = B_{zop}, \quad T_y = -B_{вер}, \quad T_z = 0, \quad \begin{cases} U'_{x0} = k_{xx}B_{zop} - k_{xy}B_{вер} + U_{0x}; \\ U'_{y0} = k_{yx}B_{zop} - k_{yy}B_{вер} + U_{0y}; \\ U'_{z0} = k_{zx}B_{zop} - k_{zy}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases} \\
 & - K = 180^\circ, \quad T_x = -B_{zop}, \quad T_y = -B_{вер}, \quad T_z = 0, \quad \begin{cases} U'_{x180} = -k_{xx}B_{zop} - k_{xy}B_{вер} + U_{0x}; \\ U'_{y180} = -k_{yx}B_{zop} - k_{yy}B_{вер} + U_{0y}; \\ U'_{z180} = -k_{zx}B_{zop} - k_{zy}B_{вер} + U_{0z}. \end{cases}
 \end{aligned}$$

З двох останніх систем рівнянь визначаємо нульові сигнали:

$$U_{0x} = \frac{U'_{x0} + U'_{x180}}{2} + k_{xy}B_{вер}; \quad U_{0y} = \frac{U'_{y0} + U'_{y180}}{2} + k_{yy}B_{вер}; \quad U_{0z} = \frac{U'_{z0} + U'_{z180}}{2} + k_{zy}B_{вер}. \quad (6)$$

Далі визначаємо недостатні коефіцієнти моделі:

$$k_{xz} = \frac{U_{x0} + U_{x180} - 2U_{0x}}{2B_{вер}}; \quad k_{yz} = \frac{U_{y0} + U_{y180} - 2U_{0y}}{2B_{вер}}; \quad k_{zz} = \frac{U_{z0} + U_{z180} - 2U_{0z}}{2B_{вер}}. \quad (7)$$

Вихідний сигнал магнітометра представимо в матричній формі:

$$U = K' \cdot T + U_0, \quad (8)$$

$$\text{де } U = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}; \quad U_0 = \begin{bmatrix} U_{0x} \\ U_{0y} \\ U_{0z} \end{bmatrix}.$$

Використовуючи дані таблиці 1, розрахуємо коефіцієнти та нульові сигнали магнітометра, а результати занесемо до таблиці 2.

Таблиця 2

Значення визначених коефіцієнтів моделі та нульових сигналів

Коефіцієнт	k_{xx}	k_{xy}	k_{xz}	k_{yx}	k_{yy}	k_{yz}
Значення	0.012	$-5.9333 \cdot 10^{-5}$	$-1.1079 \cdot 10^{-4}$	$-1.0709 \cdot 10^{-4}$	0.0129	-0.0019

Коефіцієнт	k_{zx}	k_{zy}	k_{zz}	U_{0x}	U_{0y}	U_{0z}
Значення	$-2.6362 \cdot 10^{-4}$	$-3.4507 \cdot 10^{-4}$	0.0088	8.1037	-345.3406	134.6858

Для перевірки знайдених коефіцієнтів визначимо проєкції T_x, T_y, T_z за співвідношенням (8) як $T = K^{-1} \cdot (U - U_0)$ і занесемо результати до таблиці 3.

Таблиця 3

Відкалібровані значення проєкцій T_x, T_y, T_z в гамах (Гм)

Кут K , °	T_x		T_y		T_z	
	положення a	положення b	положення a	положення b	положення a	положення b
0	18965	18961	-277.33	47884	-46975	44.569
30	16445	17023	9208.2	48982	-47275	11775
60	9540.2	10575	16144	49547	-47376	20340
90	27.444	1187.6	19264	49436	-47284	23550
120	-8436.8	-8488.3	16654	48618	-47211	20409
150	-16511	-15842	9045.3	47381	-46846	11678
180	-18963	-18961	-277.33	46040	-46975	-44.569
210	-16001	-17027	-9840.7	45011	-46955	-11278
240	-9524.9	-11011	-16454	44520	-47342	-19037
270	27.444	-1088.5	-18664	44525	-47284	-23601
300	9482.4	7864.1	-16878	45040	-47348	-19564
330	16457	15924	-9467	46577	-47600	-11661
360	19003	19054	-196.84	47966	-47871	280.89

Для перевірки вірності розрахованих проєкцій на рис. 3 наведено залежності сигналів магнітометра з врахуванням калібрувальних коефіцієнтів. Показання сенсора при його повному оберті навколо вертикальної осі практично утворювати коло з центром в початку координат.

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 3, можна зробити висновок, що після проведення процедури калібрування показань магнітометра при його обертанні на 360° утворюється фігура, близька до кола з центром в початку координат. Проєкції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості магнітометра T_x, T_y, T_z залежно від курсового кута K змінюються за гармонічними функціями, а їх коливання відбуваються відносно осі абсцис. Таким чином, визначені коефіцієнти (табл. 2) можна використовувати для визначення вихідних сигналів магнітометра (8) при інтеграції до програмного коду для подальшого врахування магнітних девіацій:

$$\begin{aligned} U_x &= 0.012T_x - 5.9333 \cdot 10^{-5}T_y - 1.1079 \cdot 10^{-4}T_z + 8.1037; \\ U_y &= -1.0709 \cdot 10^{-4}T_x + 0.0129T_y - 0.0019T_z - 345.3406; \\ U_z &= -2.6362 \cdot 10^{-4}T_x - 3.4507 \cdot 10^{-4}T_y + 0.0088T_z + 134.6858. \end{aligned} \quad (9)$$

Однак недоліком такої корекції є те, що компенсація магнітних девіацій буде відбуватися тільки при збереженні конкретного місця установки сенсора.

ВИСНОВКИ

1. В процесі калібрування магнітометра обчислено коригувальні коефіцієнти, врахування яких дозволяє компенсувати вплив шкідливих магнітних збурень на магнітометр і визначити такі параметри: неточність перпендикулярності осей чутливості (обумовлена неточністю встановлення сенсора на платі, коефіцієнти перетворення для кожної осі, які трансформують вихідні коди магнітометра в одиниці магнітної індукції, а також зміщення нуля для кожної осі (вихідні сигнали магнітометра при відсутності магнітного поля).

2. Після проведення процедури калібрування показань магнітометра при його обертанні на 360° утворюється фігура, близька до кола з центром в початку координат, проєкції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості магнітометра залежно від кута курсу змінюються за гармонічними функціями, а їх коливання відбуваються відносно осі абсцис. Визначені параметри моделі сенсора можна використовувати для визначення вихідних сигналів магнітометра при інтеграції до програмного коду для подальшого врахування магнітних девіацій.

3. Недоліком такої корекції є те, що компенсація магнітних девіацій буде відбуватися тільки при збереженні конкретного місця установки сенсора.

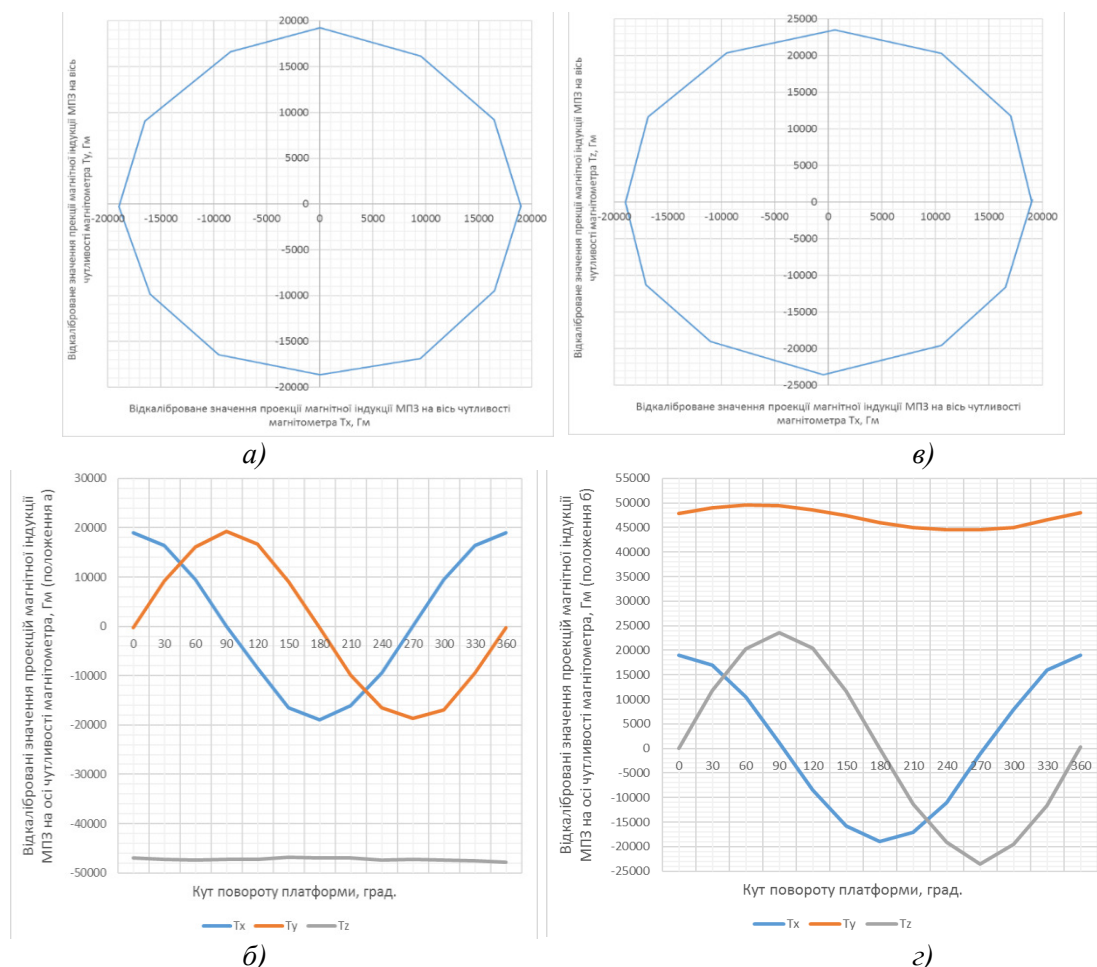


Рис. 3. Графіки залежностей після калібрування: $T_Y = f(T_X)$ з девіаціями (положення а) (а); T_i від кута повороту платформи (положення а) (б); $T_Z = f(T_X)$ з девіаціями (положення б) (в) та T_i від кута повороту платформи (положення б) (г)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.rloeman.ru/review/article.html?di=143960> (Дата звернення: 02.06.2017).
2. Compass Heading Using Magnetometers: технічна документація: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/application-note/an203_compass_heading_using_magnetometers.pdf (Дата звернення: 04.06.2017).
3. Magnetometer: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vectornav.com/support/library/magnetometer> (Дата звернення: 11.06.2017).
4. Синельников, А. Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки [Текст] / Е. А. Синельников. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 176 с.
5. Климкович, Б. В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов [Текст] / Б. В. Климкович // Гироскопия и навигация. – 2014. – №3. – С. 29-40.
6. Измайлов, Е. А. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст] / Е. А. Измайлов, С. Н. Лепе, А. В. Молчанов, Е. Ф. Поликовский // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 145-154.
7. Three-Axis Digital Compass IC HMC5883L: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf> (Дата звернення: 05.07.2017).