

УДК 007.52

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317885>

**В. В. Мелешко**<sup>1</sup>, *к.т.н., доцент*, **С. В. Тарнавський**<sup>2</sup>, *к.т.н.*,  
**А. В. Загірський**<sup>3</sup>, *магістр*

## ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ ЗА ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

**Уа**

Розглядаються структура та можливості приладу орієнтації, який використовує вектор сили тяжіння та магнітне поле Землі. Прилад складається з трьох акселерометрів та трьох магнітометрів, які жорстко встановлені на рухомому об'єкті. Показані можливі характеристики названих чутливих елементів, а також параметри сили тяжіння та індукції в заданій точці на поверхні Землі (для прикладу в Києві). Показані також характеристики готових курсовертикалей (AHRС). Приведені два алгоритми визначення магнітного курсу по визначених тангажу та крену об'єкта: алгоритм триад та алгоритм Одинцова. Шляхом моделювання показано, що при відносно грубих чутливих елементах (акселерометри з похибкою більше  $10 - 2 \text{ м/с}^2$ , магнітометри з похибкою більше 100 нТл) доцільно використати метод триад. Для більш точних чутливих елементах краще працює метод Одинцова. У разі оцінки характеристик враховані систематичні похибки приладів, маючи на увазі, що шумові завади добре фільтруються. Можливі низькочастотні завади при русі по пересіченій поверхні не розглядаються. Складений бюджет похибок для визначення істинного географічного курсу, який включає: похибки розрахунку параметрів магнітного поля Землі, похибки магнітної девіації, сезонні та суточні варіації магнітного відхилення, похибки магнітометрів та акселерометрів,

---

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

<sup>3</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

а також похибки алгоритмів визначення магнітного курсу.

**En**

The structure and capabilities of the orientation device that uses the gravity vector and the Earth's magnetic field are considered. The device consists of three accelerometers and three magnetometers, which are rigidly installed on the movable object. The possible characteristics of these sensitive elements, as well as the parameters of gravity and induction at a given point of the Earth (for example in Kiev). It are also shown the characteristics of devices AHRS. There are two algorithms for determining the magnetic course on the designated pitch and rolls: the algorithm of the triad and the Odintsov algorithm. Modeling shows that with relatively rough sensitive elements (accelerometers with an error more than  $10^{-2} \text{ m/s}^2$ , magnetometers with an error of more than 100 nT) it is advisable to use the triad method. With more accurate sensitive elements, the Odintsov method works better. When evaluating the characteristics, the systematic errors of the devices are taken into account, keeping in mind that noise interference are well filtered. Possible low - frequency interference when moving on the rough surface is not considered. The budget of errors for determining the true geographical course, which includes: errors of the calculation of characteristics of the Earth's magnetic field parameters, magnetic deviation errors, seasonal and diligent variations of magnetic deviation, errors of magnetometers and accelerometers, as well as errors of algorithms.

## Вступ

Системи орієнтації мобільних об'єктів можуть ґрунтуватися на використанні різних векторів: сили тяжіння, кутової швидкості обертання Землі, індукції магнітного поля Землі (МПЗ), напрямках до відомих об'єктів (сонце, зірки, супутники Землі, природні та штучні орієнтири). Широко використовуються вимірювальні модулі (IMU), що містять гіроскопи, акселерометри та магнітометри. Вони вимірюють вектор кутової швидкості об'єкта, вектора сили тяжіння та вектор індукції МПЗ.

Найбільш просто визначити орієнтацією об'єкта по вектору сили тяжіння  $\vec{g}$  та вектору індукції МПЗ  $\vec{B}$ . Однак обидва ці вектори залежать від збурень. Напрямок вектора може бути  $\vec{g}$  спотворений прискореннями руху об'єкта або гравітаційними відхиленнями, а вектор індукції  $\vec{B}$  може бути спотворений впливом Сонця або магнітних полів об'єкта. Слід зазначити, що гравітаційні аномалії описані на картах, магнітна індукція обчислюється відповідно до відомих математичних моделей [6] для визначених координат. Параметри МПЗ можна отримати за допомогою калькулятора МПЗ [7].

Багато робіт присвячені дослідженням та розробці *IMU*, а також алгоритмів орієнтації та навігації. Наприклад, у [1] розглядається рішення навігаційної задачі для наземного робототехнічного комплексу з визначенням орієнтації по магнітометрах та акселерометрах з корекцією по інструментах технічного зору.

У [2] розглядаються варіанти вирішення навігаційної задачі автоматичного мобільного об'єкта, включаючи використання штучного інтелекту, нечіткої логіки, нейронних мереж, генетичних алгоритмів, тощо. У [4] розглядаються можливості визначення магнітного курсу в умовах навколишніх перешкод МПЗ-алгоритмами з нечіткою логікою для пішохідної навігації. У [5] розглядаються можливості фільтрування сигналів IMU для наземного мобільного об'єкта під час руху.

Квантові магнітометри, що мають високу точність вимірювань (долі нТл), використовують для визначення модуля вектора індукції. Враховуючи високу точність сучасних систем позиціонування (супутникових навігаційних систем (СНС), такі прилади дозволяють створювати точні карти магнітного поля та місцевих аномалій [13], [14]. За цими картами та із використанням сигналів квантових магнітометрів знаходять координати рухомих об'єктів. Такий метод навігації вважають альтернативою СНС та перспективою для корекції інерціальних навігаційних систем (ІНС) [15]. Головна проблема цього методу навігації – необхідність завчасного складання карт магнітного поля. У визначенні магнітного курсу квантові магнітометри ще не використовують.

### Постановка задачі

Метою даної роботи є дослідження алгоритмів для обчислення магнітного курсу по сигналах акселерометрів та магнітометрів, а також складання бюджету похибок роботи аналітичного магнітного компаса.

### Характеристики магнітного поля Землі

Оскільки МПЗ використовується для визначення орієнтації, надамо його характеристики для координат (широти та довготи) Києва. Ми отримуємо ці характеристики із [7]:

Таблиця 1.

Характеристики магнітного поля Землі

Magnetic Field							
Model Used:	WMM-2020						
Latitude:	50° 26' 59" N						
Longitude:	30° 31' 25" E						
Elevation:	0.0 km Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E   - W)	Inclination (+ D   - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N   - S)	East Comp (+ E   - W)	Vertical Comp (+ D   - U)	Total Field
2024-11-16	8° 34' 2"	67° 37' 2"	19,413.3 nT	19,196.6 nT	2,892.0 nT	47,140.3 nT	50,981.2 nT
Change/year	0° 7' 43"/yr	0° 2' 27"/yr	-7.3 nT/yr	-13.7 nT/yr	42.0 nT/yr	77.6 nT/yr	69.0 nT/yr
Uncertainty	0° 23'	0° 13'	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

У табл. 1 відповідно до позначень [8,9]

- *Declination* – магнітне схилення  $D$ ,
- *Inclination* – магнітний нахил  $J$ ,
- *Horizontal Intensity* – горизонтальна складова  $H$ ,
- *North component* – північна складова  $Y$ ,
- *Eath component* – східна складова  $X$
- *Vertical component* – вертикальна складова  $Z$ ,
- *Total field* – модуль вектора індукції  $B$ .

Слід зазначити, що магнітне поле нестабільне. Його зміни (варіації) показані у табл. 2 [8].

Таблиця 2.

Значення варіацій елементів магнітного поля

Пора року	Різниця між максимумом і мінімумом		
	$D$ , кут.хв.	$H$ , нТл	$Z$ , нТл
Зима	4,1	9	7
Весна	7,9	27	12
Літо	12,0	44	20
Осінь	8,3	36	12

Для нас особливо важливо враховувати сонячно-добові зміни у магнітному схиленні  $D$ . У табл. 3 – приклад зміни магнітного схилення.

Таблиця 3.

Зміна магнітного схилення

Пора суток, час	0	4	8	12/14	16	20/21	24
Зміна магнітного схилення, кут.хв.	2,5	2,2	2,2	-3/-4,6	-2,6	0,7/1,4	1,5

У нижній лінії табл. 1 показана нестабільність визначення параметрів МПЗ.

### Характеристики поля сили тяжіння

Прискорення сили тяжіння в загальному випадку відповідає векторній різниці  $\vec{g} = \vec{g}' - \vec{u} \times (\vec{u} \times \vec{R})$  гравітаційного прискорення  $\vec{g}'$  та відцентрового прискорення від обертання Землі  $\vec{W}_{uc} = \vec{u} \times (\vec{u} \times \vec{R})$ , де  $\vec{u}$  - вектор кутової швидкості Землі,  $\vec{R}$  – радіус сферичної Землі. Величина відцентрового прискорення  $W_{uc} = u^2 R \cos \varphi$ , де  $\varphi$  – географічна широта. Величину прискорення  $\vec{g}$  можна обчислити по формулі [10]

$$g = 9,78049 (1 + 0,0052884 \cdot \sin^2 \varphi - 0,0000059 \cdot \sin^2 2\varphi).$$

На широті Києва  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ . При зміні широти на  $1^\circ$  (відповідає 111 км) величина прискорення змінюється на  $8,9e-4 \text{ м/с}^2$ , що відповідає менше 0,01 %.

Коли об'єкт рухається, виникають переносні та коріолісові прискорення. Їх можна обчислити за формулами

$$W_{\xi}^{nk} = \omega_{\eta} V_{\zeta} - \omega_{\zeta} V_{\eta}, \quad W_{\eta}^{nk} = \omega_{\zeta} V_{\xi} - \omega_{\xi} V_{\zeta}.$$

Можна прийняти, що у сталому русі вертикальна швидкість  $V_{\zeta} = 0$ . Тоді  $W_{\xi}^{nk} = -\omega_{\zeta} V_{\eta}$ ,  $W_{\eta}^{nk} = \omega_{\zeta} V_{\xi}$ ; Під час руху на північ ( $V_{\xi} = 0$ ) і швидкості 100 м/с на широті  $\varphi = 50$  градусів отримаємо

$$W_{\xi}^{nk} = -u \sin \varphi V_{\eta} \approx 5e^{-3} \text{ м/с}^2.$$

Це прискорення може спричинити відхилення приладової вертикалі (згідно з показами акселерометрів) від справжньої вертикалі приблизно на 1,7 кут.хв. Для об'єктів, що рухаються зі швидкістю менше 100 м/с = 360 км/год, впливом переносних та прискорень Коріоліса може нехтувати.

### Характеристики вимірювальних модулів

Для визначення орієнтації об'єкта (кути курсу, тангажа, крену), можна використовувати вимірювальні модулі, що містять акселерометри, гіроскопи та магнітометри (ІМУ), інерціальні вертикалі (AHRS). Велика номенклатура таких пристроїв представлена на веб-сайті <https://geo-matching.com/>.

Одним із провідних виробників таких пристроїв є *InertialLabs*. Покажемо, наприклад, дані однієї з приладів [11].

**Таблиця 4.**

Основні характеристики точності датчиків *INS-P* фірми *Inertial Labs*

Параметр	Одиниця вимірювання	Числове значення
Стабільність нуля ДКШ в пуску	град/год	1
Випадковий дрейф ДКШ	град. / $\sqrt{\text{год}}$	0,2
Стабільність нуля акселерометра в пуску	mg	0,02
Випадковий дрейф акселерометра	м / с / $\sqrt{\text{год}}$	0,035

У таблиці вказується ДКШ - датчик кутової швидкості.

Для вимірювання магнітного поля Землі зазвичай використовуються три- вісні магнітометри, що жорстко встановлюються на рухомому об'єкті.

У табл. 5 покажемо характеристики магнітометра *Honeywell*.

Таблиця 5.

Технічні характеристики трикомпонентного магнітометра із чутливими елементами типу *HMC1001*

Характеристика	Показники
Частота видачі сигналів	1 – 100 Гц
Розрядність АЦП	24
Роздільна здатність	$\pm 0,0005 \mu\text{T}$
Шум вимірювань СКВ ( $3\sigma$ )	$< 0,001 \mu\text{T}$
Нелінійність коефіцієнта передачі	$< 0,2\%$

Також використовується більш грубі магнітометри. Так, у *IMU* фірми *XSens* використовують магнітометри з шумом  $0,05 \text{ мкТ}$ .

Використовуючи магнітометри та акселерометри, можна побудувати магнітний компас, який називається аналітичним, оскільки курс отримується шляхом обчислення по сигналах магнітометрів та сигналах акселерометрів. При цьому обчислюють також тангаж та крен.

Для отримання кутів орієнтації також розроблені *AHRS* (*attitude heading reference system*). Для прикладу наведемо характеристики *miniAHRS* фірми *InetrialLabs* (табл. 6.).

Таблиця 6.

Характеристики курсовертикалі *miniAHRS*

Характеристика	Показники
Точність курсу в статиці, RMS	0,3 град.
Точність курсу в динаміці в температурному діапазоні - - $40\dots+75 \text{ }^\circ\text{C}$ , RMS	0,6 град.
Точність крена и тангажа в статиці, RMS	0,08 град.
Точність крена и тангажа в динаміці в температурному діапазоні, RMS	0,1 град.
Маса	20 грам
Розміри	$53 \times 19 \times 13 \text{ мм}$
Інтерфейс	RS-422

### Алгоритми для отримання кутів орієнтації

Оскільки кути орієнтації, в основному, отримують за допомогою акселерометрів та магнітометрів, встановлених жорстко на борту об'єкта, для отримання кутів курсу, тангажу, крену потрібно виконати певні перетворення, які ми будемо називати алгоритмами.

Першим опишемо алгоритм, представлений та деталізований А. А. Одинцовим [8], [9], пізніше представлений М. J. Caruso [12]. Суть його полягає у наступному.

На рис. 1 показані системи координат:  $\xi\eta\zeta$  - географічна супровідна тригранна, вісь  $\eta$  спрямована вздовж вектора горизонтальної компоненти  $H$ , вісь  $\zeta$  протилежна вектору  $\vec{g}$  (ми позначаємо цю систему буквою  $g$ );  $x_0y_0z_0$  - координатна система, пов'язана із об'єктом, її положення встановлюється відносно  $\xi\eta\zeta$  кутами магнітного курсу  $k_M$ , тангажа  $\vartheta$  и крена  $\gamma$  (позначим цю систему буквою  $b$ ). На рис. також показані проєкції вектора індукції МПЗ  $\vec{B} = \vec{H} + \vec{Z}$  ( $B_x, B_y, B_z$ ) та вектора сили тяжіння  $\vec{g}$  ( $g_x, g_y, g_z$ ). Зауважимо, що істинний курс  $k = k_M + D$ , акселерометри видають уявне прискорення  $\vec{a} = \vec{W} - \vec{g}'$ , що дорівнює різниці векторів абсолютного прискорення  $\vec{W}$  та гравітаційного прискорення  $\vec{g}'$ .

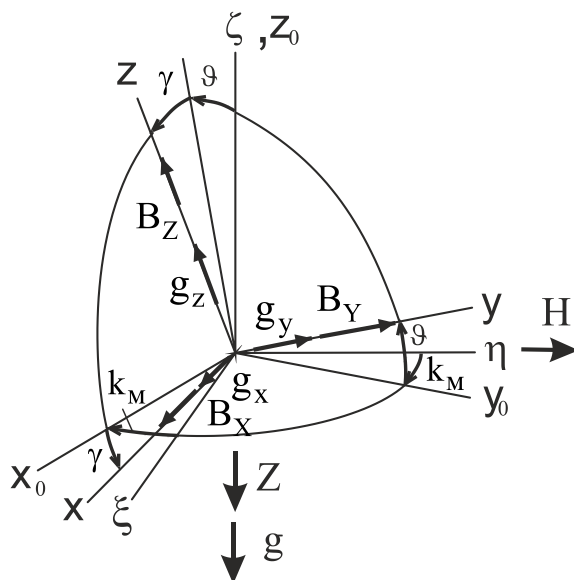


Рис. 1. Проєкції векторів  $B$  і  $g$

Для такої системи кутів у разі  $\vec{W} = 0$

$$a_x = -g \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \gamma, \quad a_y = g \cdot \sin \vartheta, \quad a_z = g \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \gamma.$$

Звідси

$$\vartheta = \arcsin(a_y / g), \quad g \equiv |\vec{g}| = |\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}; \quad \gamma = -\arctg(a_x / a_z). \quad (1)$$

Складемо матрицю напрямних косинусів між системами координат  $\xi\eta\zeta$  та  $x_0y_0z_0$ :

$$[\xi\eta\zeta]^T = C^{gb} [x_0y_0z_0]^T.$$

Матриця напрямних косинусів

$C^{gb}$	x	y	z
$\xi$	$c_{11} = \cos \gamma \cos k_m + \sin \gamma \sin \psi \sin \vartheta;$	$c_{12} = \cos \vartheta \sin k_m$	$c_{13} = \cos k_m \sin \gamma - \sin k_m \cos \gamma \sin \vartheta;$
$\eta$	$c_{21} = -\cos \gamma \sin k_m + \sin \gamma \cos k_m \sin \vartheta;$	$c_{22} = \cos \vartheta \cos k_m;$	$c_{23} = -\sin k_m \sin \gamma - \cos \gamma \cos k_m \sin \vartheta;$
$\zeta$	$c_{31} = -\cos \vartheta \sin \gamma;$	$c_{32} = \sin \vartheta;$	$c_{33} = \cos \vartheta \cos \gamma.$

Вихідні сигнали магнітометрів, осі чутливості яких орієнтовані по осях пов'язаної системи координат  $b$ , відповідно до рис. 1 і табл. 7

$$B_x = H(\cos k_m \sin \theta \sin \gamma - \sin k_m \cos \gamma) + Z \cos \theta \sin \gamma,$$

$$B_y = H \cos k_m \cos \vartheta - Z \sin \vartheta,$$

$$B_z = -H(\sin k_m \sin \gamma + \cos k_m \cos \gamma \sin \theta) - Z \cos \theta \cos \gamma.$$

Як бачимо із рис. 1,

$$k_m = \arctg(-H_{x0} / H_{y0}).$$

Тут

$$H_{x0} = B_x \cos \gamma + B_z \sin \gamma,$$

$$H_{y0} = B_x \sin \gamma \sin \vartheta + B_y \cos \vartheta - B_z \sin \vartheta \cos \gamma.$$

У результаті формула для обчислення кута магнітного курсу

$$k_m = \arctg \frac{-(B_x \cos \gamma + B_z \sin \gamma)}{(B_x \sin \gamma - B_z \cos \gamma) \sin \theta + B_y \cos \theta}. \quad (2)$$

Назвемо наведені обчислення (1), (2) кутів магнітного курсу, тангажу, крену *алгоритмом Одинцова*.

Наведемо інший алгоритм, який називається *алгоритмом триад*.

Проекції індукції МПЗ, вимірюємі магнітометрами у зв'язаній системі координат (ЗСК, позначається буквою  $b$ ):

$$\vec{B}_b = [b_{xb} \ b_{yb} \ b_{zb}]^T.$$

Проекції вектора уявного прискорення з акселерометрів у ЗСК

$$\vec{a}_b = [a_{xb} \ a_{yb} \ a_{zb}]^T.$$

За інформацією про координати місця від СНС або з карти потрібно розрахувати по формулах або за допомогою калькулятора [2] компоненти магнітного поля Землі (МПЗ) у географічній системі координат (ГСК)



$$\vec{B}_g = [0 \quad H \quad -Z]^T.$$

Модуль вектора  $|\vec{B}| = \sqrt{H^2 + Z^2}$  або  $|\vec{B}| = \sqrt{b_{xb}^2 + b_{yb}^2 + b_{zb}^2}$ .

Вектор прискорення сили тяготіння у ГСК  $\vec{g}_g = [0 \quad 0 \quad -g]^T$ .

Вектор уявного прискорення  $\vec{a}_g = [0 \quad 0 \quad g]^T$ .

Модуль вектора  $|\vec{a}| = g$  або  $|\vec{a}| = \sqrt{a_{xb}^2 + a_{yb}^2 + a_{zb}^2}$ .

Будуємо тріади – системи координат з одиничних векторів у ГСК:

–  $\vec{B}_0 = \vec{B}_g / |\vec{B}|$ , – одиничний вектор;

–  $\vec{a}_{0g} = \vec{a}_g / g$  – одиничний вектор,

–  $\vec{b}1 = \vec{B}_0 \times \vec{a}_{0g}$  – векторний добуток.

Подвійний векторний добуток –  $\vec{n}1 = \vec{B}_0 \times (\vec{B}_0 \times \vec{a}_{0g})$  –  $\vec{n}1 = \vec{B}_0 \times \vec{b}1$ .

Те ж робимо у ЗСК:

–  $\vec{b}_0 = \vec{B}_b / |\vec{B}|$ , – одиничний вектор;

–  $\vec{a}_{0b} = \vec{a}_b / g$  – одиничний вектор;

– векторний добуток  $\vec{b}2 = \vec{b}_0 \times \vec{a}_{0b}$ .

Подвійний векторний добуток  $\vec{n}2 = \vec{b}_0 \times (\vec{b}_0 \times \vec{a}_{0b})$  –  $\vec{n}2 = \vec{b}_0 \times \vec{b}2$ .

Будуємо матриці

$$Mg = [\vec{B}_0 \quad \vec{b}1 \quad \vec{n}1], \quad Mb = [\vec{b}_0 \quad \vec{b}2 \quad \vec{n}2].$$

Отримуємо МНК між ІСК та ЗСК

$$C^{bg} = Mb \cdot (Mg)^{-1}.$$

З матриці  $C^{bg}$  отримуємо кути орієнтації супутника (в радіанах)

$$k_m = \arctg \frac{c_{21}}{c_{22}}, \quad \gamma = -\arctg \frac{c_{13}}{c_{33}}, \quad \vartheta = \arcsin(c_{23}).$$

На рис. 2 показані графіки помилок, обчислені методом Одинцова (dgamO, dtetO, dpsio) та методом тріад (dgamT, dtetT, dpsiT) при систематичних помилках акселерометрів  $\Delta a = 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ м/с}^2$ , помилках магнітометрів  $\Delta T = 15 \dots 150 \text{ нТл}$ .

З цих графіків випливає висновок, що при грубих чутливих елементах краще працює метод тріад (рис.2 в, г), при більш точних елементах краще працює метод Одинцова (рис.2 а, б).

Моделювання показує, що похибки визначення кутів орієнтації методом тріад не перевищують 50 кут.хв. при  $\Delta a = 10^{-2} \text{ м/с}^2$  та  $\Delta B = 150 \text{ нТл}$ ,

## Системи та процеси керування

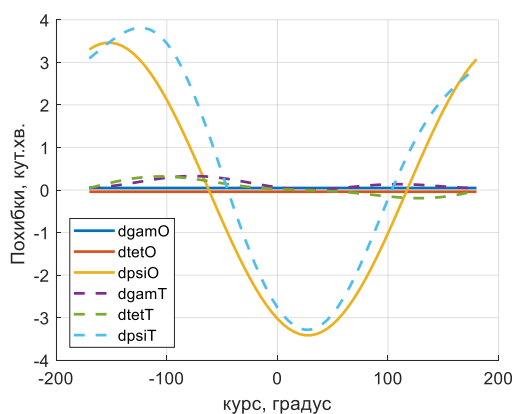
похибки визначення кутів орієнтації методом Одинцова не перевищують 4 кут.хв. при  $\Delta a = 10^{-4} \text{ м/с}^2$  та  $\Delta B = 15 \text{ нТл}$ .

Розглянемо бюджет похибок для визначення істинного курсу.

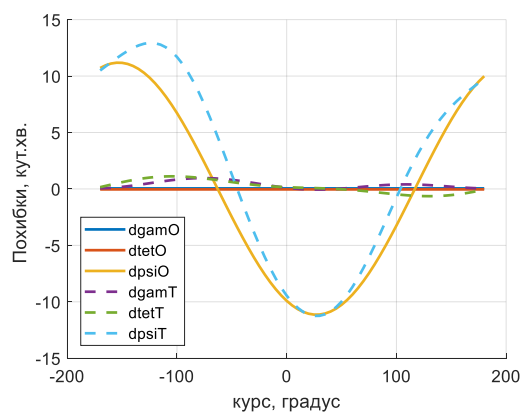
Якщо прийняти, що похибки незалежних від вимірювачів величин: магнітного відмінювання  $D$  до 23 кут.хв., сезонні варіації до 12 кут.хв., суточні варіації до 5 кут.хв. (див. табл. 2,3), остаточно магнітна девіація - 10 кут.хв., то можна прийняти, що, враховуючи незалежність похибок, середнє геометричне цих похибок не перевищить 30 кут.хв.

Отже, для визначення істинного курсу з похибкою не більше 1 градуса, похибка вимірювання магнітного курсу не має перевищувати 30 кут.хв.

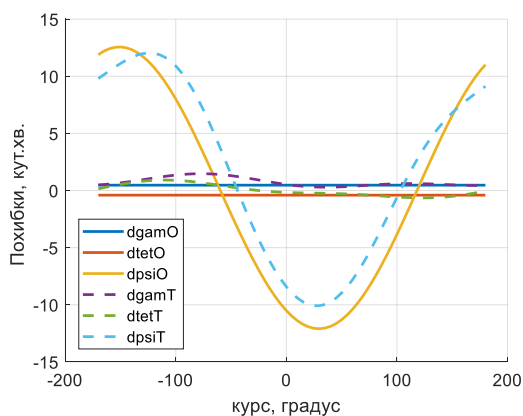
Для цього можна використати любий з методів та вимірювачі з похибками до  $da = 1e-3 \text{ м/с}^2$ , до  $dB = 100 \text{ нТл}$ . При менших похибках вимірювачів доцільно використати метод розрахунків Одинцова.



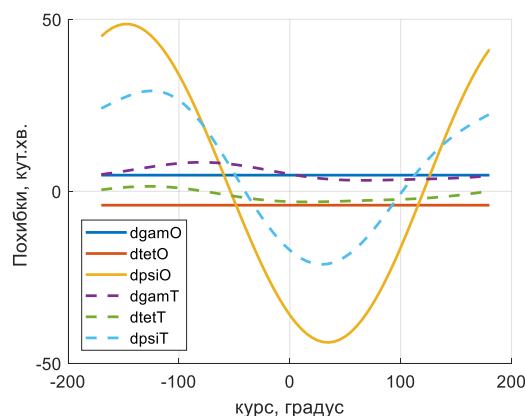
а)  $da = 1e-4 \text{ м/с}^2$ ,  $dB = 15 \text{ нТл}$



б)  $da = 1e-4 \text{ м/с}^2$ ,  $dB = 50 \text{ нТл}$



в)  $da = 1e-3 \text{ м/с}^2$ ,  $dB = 15 \text{ нТл}$



г)  $da = 1e-2 \text{ м/с}^2$ ,  $dB = 150 \text{ нТл}$

Рис. 2. Графіки похибок за  $\vartheta = 30^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$

**Висновки**

Розглянуті характеристики вимірювача магнітного курсу, тангажу та крену на нерухомому об'єкті. Найбільші похибки має вимірюваний магнітний курс.

Для побудови вимірювача істинного географічного курсу з точністю 1 градус при допустимій магнітній девіації до 10 кут. хв., сезонних варіаціях магнітного схилення до 12 кут. хв., суточній варіації до 5 кут.хв., похибці визначення магнітного схилення  $D$  до 23 кут.хв. похибка вимірювання магнітного курсу від впливу похибок магнітометрів та акселерометрів не має перевищувати 30 кут.хв. Це можливо при похибці акселерометрів до  $1\text{e-}3 \text{ м/с}^2$ , похибці магнітометрів до 100 нТл. При збільшенні точності вимірювачів доцільно виконувати обчислення за методом Одинцова. При зменшенні похибки магнітометрів до 50 нТл (похибка акселерометра  $1\text{e-}3 \text{ м/с}^2$ ) похибка вмірювання магнітного курсу не перевищує 15 кут.хв. Найбільший внесок у визначення магнітного курсу вносить помилка визначення магнітного схилення  $D$ .

**Список використаної літератури**

1. Довгополий А. С., Загірський А. В., Збруцький О. В. Основи створення автономної системи керування рухом наземного роботизованого комплексу на малих дистанціях. *Механіка гіроскопічних систем*, № 47 2024, с. 5-44. <https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307756>
2. Muhammad Aizat, Ahmad Azmin and Wan Rahiman. A Survey on Navigation Approaches for Automated Guided Vehicle Robots in Dynamic Surrounding. *IEEE Access*, April 2023. doi: 10.1109/access.2023.3263734.
3. Semih Beycimen, Dmitry Ignatyev, Argyrios Zolotas. A comprehensive survey of unmanned ground vehicle terraintraversability for unstructured environments and sensor technologyinsights. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 47 2023, 101457.
4. Muhammad Haris Afzal, Valérie Renaudin and Gérard Lachapelle. Magnetic Field based Heading Estimation for Pedestrian Navigation Environments. University of Calgary, Canada. 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 21-23 September 2011, DOI: 10.1109/IPIN.2011.6071947.
5. Gang Shi, Xisheng Li, Zhengfu Jiang. An Improved Yaw Estimation Algorithm for LandVehicles Using MARG Sensors. *Sensors* 2018, 18(10), 3251; <https://doi.org/10.3390/s18103251>.
6. Zbrutsky O. V., Meleshko V. V., Ganja A. P., Tarnavsky S. V., Bondarenko O. M., Ponomarenko S. O., Saurova K. System definition of micro- nano satellite orientation. *Механіка гіроскопічних систем*, № 43 2022, р. 46-60. <https://doi.org/10.20535/0203-3771432022275282>.

7. Калькулятор для геомагнітних розрахунків. Режим доступу: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>.
8. *Одинцов А. А.* Ориентация объектов в магнитном поле Земли. Учебное пособие для студентов приборостроительных специальностей / *А. А. Одинцов, В. В. Мелешко, С. А. Шаров* – К.: Корнийчук, 2008. – 142 с.
9. *Одинцов А. А.* Теория и расчёт гироскопических приборов. – Киев: Выща школа, 1985. – 392 с.
10. *Бромберг П. В.* Теория инерциальных систем навигации. – М.: «Наука», 1979. – 296 с.
11. *Нестеренко О. І.* Особливості похибок мікромеханічної інерціальної навігаційної системи у автономному режимі роботи// XXIII Міжнародна конференція «Приладобудування». – К.: НТУУ «КПІ», 2024. – с. 28-31.
12. *M. J. Caruso* “Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems,” IEEE Position Locations and Navigation Symposium, San Diego, 13–16 March 2000, p. 178-184.
13. *Canciani, Aaron J.*, "Absolute Positioning Using the Earth's Magnetic Anomaly Field", 2016. Theses and Dissertations. 251. <https://scholar.afit.edu/etd/251>.
14. *Canciani, Aaron J.*, Magnetic Navigation, ANT Center, Air force Institute of technology. <https://www.gps.gov/meetings/canciani>.
15. *Wang, X., Li, W., Moran, Bill, Gibson, B., Hall, L., Simpson, D., Kealy, A., Greentree, A.* “Quantum Diamond Magnetometry for Navigation in GNSS Denied Environments”, Gravity, Positioning and Reference Frames, REFAG 2022, p. 87-92. DOI:10.1007/1345\_2023\_218.