

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 531.383

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІРОМАГНІТНОЇ
КУРСОВЕРТИКАЛІ ПРИ МАГНІТНИХ ЗБУРЕННЯХ**

Клішута А. В., Нестеренко О. І.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

Під час дії на гіромагнітну курсовертикаль магнітних збурень корекція датчиків кутової швидкості (ДКШ) за сигналами магнітометрів стає хибною. Виникає необхідність вимкнення магнітної корекції під час збурень. Недоцільним є вимкнення корекції при високочастотних магнітних збуреннях, а також вимкнення корекції на довгий час, що призводить до накопичення похибки. Необхідно знайти деякий компроміс у вимкненні магнітної корекції. З метою усунення вказаних недоліків, у цій роботі запропоновано алгоритм автоматичного вимкнення корекції ДКШ з використанням смугового фільтру та досліджено вибір параметрів цього фільтру. Представлено два підходи до вибору параметрів фільтру: для забезпечення заданої якості перехідного процесу та для забезпечення необхідної смуги пропускання. Наведено результати експериментальних досліджень курсовертикалі з використанням запропонованої методики.

***Ключові слова:** гіромагнітна курсовертикаль, корекція датчиків кутової швидкості, магнітні збурення.*

Вступ

У гіромагнітній курсовертикалі визначення поточної орієнтації об'єкту ґрунтується на інтегруванні кутової швидкості, що вимірюється блоком датчиків кутової швидкості (ДКШ) з корекцією за сигналами акселерометрів та магнітометрів. Завдяки наявності магнітометрів, курсовертикаль може визначати поточний магнітний курс об'єкту.

Однак, за наявності магнітних збурень корекція ДКШ за сигналами магнітометрів стає хибною. На практиці використовують два методи усунення шкідливого впливу магнітних збурень у гіромагнітних приладах орієнтації [1]:

- раціональний вибір схеми магнітної корекції та її параметрів;
- тимчасове вимкнення магнітної корекції під час збурень.

У цій роботі запропоновано алгоритм автоматичного вимкнення корекції ДКШ за сигналами магнітометрів при магнітних збуреннях та досліджено вибір параметрів цього алгоритму. Також наведені результати експериментальних досліджень гіромагнітної курсовертикалі з використанням запропонованої методики.

Метою роботи є розробка алгоритму автоматичного вимкнення корекції ДКШ гіромагнітної курсовертикалі за сигналами магнітометрів при магнітних збуреннях та методики вибору параметрів цього алгоритму.

Постановка задачі. Теоретичне обґрунтування алгоритму

Наявність магнітних збурень можна ідентифікувати за зміною модуля магнітного поля, проекції якого вимірюються тривісним блоком магнітометрів курсовертикалі: якщо зміна модулю перевищує деяке порогове значення, то корекція ДКШ вимикається. Проте існують випадки, у яких вимкнення корекції є недоцільним та призводить до погіршення роботи системи.

По-перше, при довготривалому постійному магнітному збуренні вимкнення корекції ДКШ на довгий час призводить до накопичення курсової похибки через дрейф ДКШ. Необхідно знайти деякий компроміс у вимкненні магнітної корекції, щоб накопичена похибка не перевищувала похибки, викликані магнітним збуренням.

По-друге, недоцільним є вимкнення корекції при високочастотних магнітних збуреннях, вплив яких може бути істотно зменшений внаслідок низькочастотної динаміки похибок гіромагнітної курсовертикалі, забезпеченої коректним вибором схеми магнітної корекції та її параметрів [1].

Усунення вказаних недоліків можна забезпечити застосуванням смугової фільтрації виміряного модуля магнітного поля перед аналізом його зміни для вимкнення корекції ДКШ.

Передаточна функція $W(s)$ смугового фільтру має вигляд [2]:

$$W(s) = \frac{T_1 s}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

де T_1, T_2 – постійні часу фільтру, $T_1 > T_2$.

На рис. 1 наведено графік асимптотичної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) такого фільтру [2].

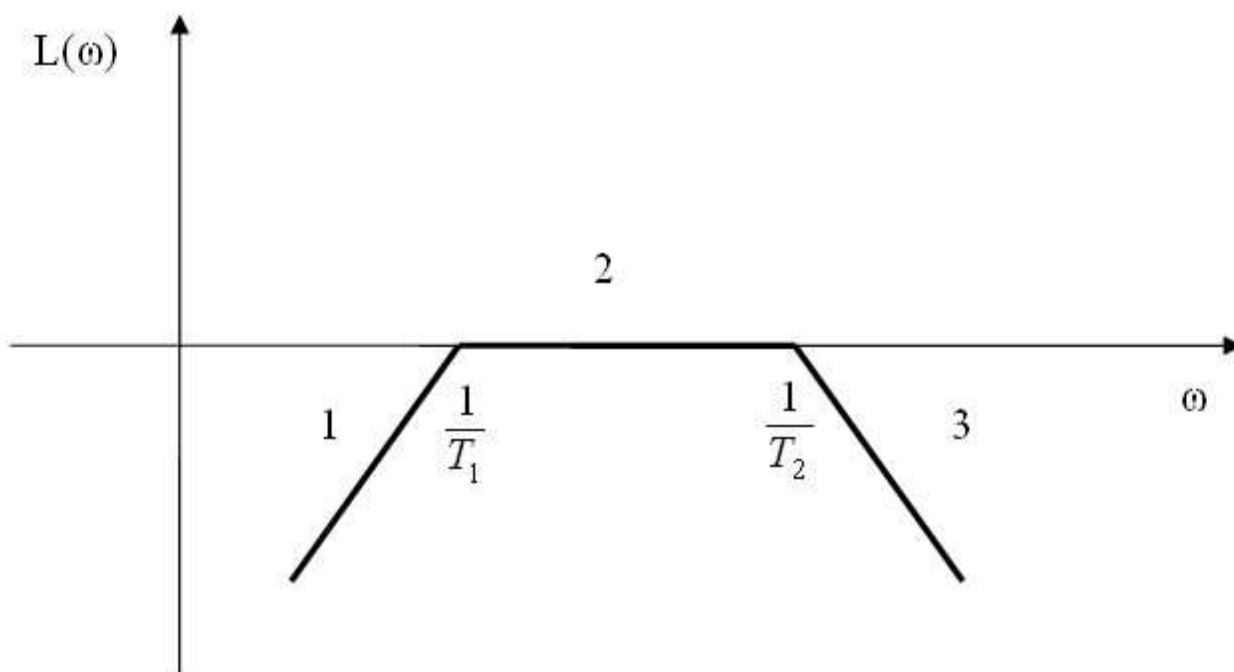


Рис. 1. Асимптотична ЛАЧХ смугового фільтру

Постійні часу T_1, T_2 формують смугу пропускання фільтру ω_n

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} < \omega_n < \omega_2 = \frac{1}{T_2}. \quad (2)$$

ЛАЧХ можна умовно розбити на три окремі ділянки. Фільтр пропускає всі частоти у вузькій смузі між нижньою частотою зрізу ω_1 і верхньою частотою зрізу ω_2 (ділянка 2). Саме в цій смузі частот можливе вимкнення корекції ДКШ. На ділянках частот 1 та 3 вимкнення корекції ДКШ не відбувається. Високочастотна ділянка 3 забезпечує виконання умови про недоцільність вимкнення корекції при високочастотних магнітних збуреннях та пригнічує шум. Низькочастотна ділянка 1 забезпечує роботу корекції ДКШ при довготривалому постійному магнітному збуренні. Отже, використання смугового фільтру задовольняє описаним вище вимогам щодо корекції.

Розглянемо методики вибору параметрів смугового фільтру для забезпечення заданої якості функціонування курсовертикалі при магнітних збуреннях.

Вибір параметрів для забезпечення заданої якості перехідного процесу

Перехідна характеристика динамічної ланки з передаточною функцією (1) при нульових початкових умовах має вигляд [2]

$$h(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (3)$$

і зображена на рис. 2, ця характеристика відображає перехідний процес на виході смугового фільтру при стрибку магнітного поля на одиницю.

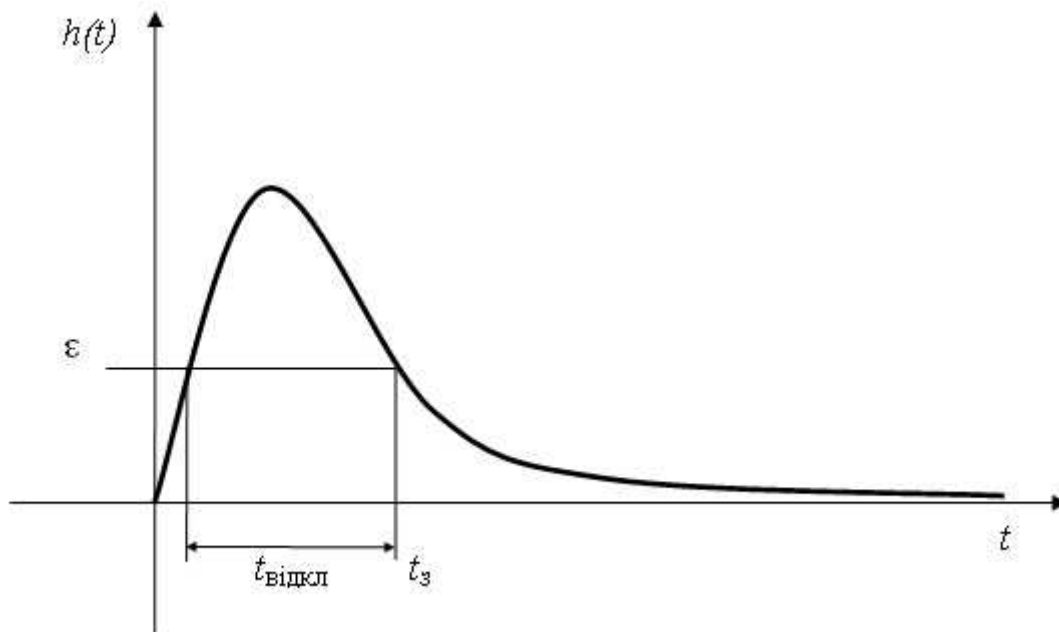


Рис. 2. Перехідна характеристика смугового фільтру

При стрибку збурення на величину M_3 значення модулю магнітного поля після

фільтрації M_ϕ визначається за формулою

$$M_\phi(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \cdot M_3. \quad (4)$$

Вимкнення корекції відбуватиметься у випадку, коли значення магнітного поля після фільтрації M_ϕ перевищуватиме поріг M_π . На рис. 2 зображено відносний поріг

$$\varepsilon = \frac{M_\pi}{M_3}, \quad (5)$$

де $t_{\text{відкл}}$ – час вимкнення корекції, t_3 – час затухання перехідного процесу

Поріг вимкнення корекції M_π обирають залежно від припустимого значення похибки $\Delta\alpha_3$, викликаного магнітним збуренням, до моменту включення корекції [2]:

$$\Delta\alpha_3 = \frac{M_\pi}{H}, \quad (6)$$

де H – горизонтальна складова магнітного поля Землі.

Вибір постійних часу T_1 , T_2 ґрунтується на необхідних характеристиках перехідного процесу.

Найбільша постійна часу T_1 визначає час затухання перехідного процесу t_3 , який з точністю до ε визначається за виразом [2]:

$$t_3 = T_1 \cdot \ln(1/\varepsilon). \quad (7)$$

Якщо у ДКШ є залишкове зміщення нуля ω_0 , то за час $t_{\text{відкл}}$ буде накопичуватись похибка $\Delta\alpha_n$.

$$\Delta\alpha_n = \omega_0 \cdot t_{\text{відкл}} \approx \omega_0 \cdot t_3. \quad (8)$$

Залежно від залишкового зміщення нуля ДКШ, збільшення часу затухання призводить до накопичення похибки. Якщо задати припустиму похибку $\Delta\alpha_n$, то відповідно до (7) і (8) величина постійної часу T_1 матиме наступне обмеження:

$$T_1 < \frac{\Delta\alpha_n}{\omega_0 \cdot \ln(1/\varepsilon)}. \quad (9)$$

Для того, щоб вимкнення корекції виконувалося якомога швидше при появі збурення, необхідно, щоб постійна часу T_2 була якомога меншою. Проте з іншого боку, при зменшенні T_2 буде збільшуватись частота ω_2 , що призведе до більшого зашумлення модуля магнітного поля після фільтрації. Також значення постійної часу T_2 має обмеження, яке обумовлене реалізацією фільтру в цифровому вигляді відповідно до теореми Шеннона [3]. Бажано, щоб смуга пропускання ω_2 не перевищувала $0,1 f_d$, де f_d – частота дискретизації фільтру. Ця умова накладає обмеження на значення постійної часу T_2

$$T_2 = \frac{1}{\omega_2} > \frac{10}{2\pi f_d}. \quad (10)$$

Розглянемо приклад розрахунку параметрів смугового фільтру вимкнення корекції ДКШ для курсовертикалі, побудованої на мікромеханічних ДКШ. За вихідні дані для розрахунку візьмемо характеристики курсовертикалі АНRS фірми Inertial Labs [4].

Виберемо поріг вимкнення $M_{\text{п}}$ таким, щоб при виникненні збурення до моменту ввімкнення корекції похибка $\Delta\alpha_3$ не перевищила значення $0,2^\circ = 3,5 \cdot 10^{-3}$ рад. У відповідності до виразу (6), при горизонтальній складовій магнітного поля Землі $H = 20 \cdot 10^3$ нТл для міста Києва, матимемо:

$$M_{\text{п}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 70 \text{ нТл.} \quad (11)$$

Якщо прийняти максимальне збурення $M_3 = 100 \cdot 10^3$ нТл, то відносний поріг (5) дорівнюватиме

$$\varepsilon = \frac{70}{100 \cdot 10^3} = 7 \cdot 10^{-4}. \quad (12)$$

Тоді з формули (7) час затухання перехідного процесу фільтра

$$t_3 = T_1 \cdot \ln(1/7 \cdot 10^{-4}) = 7 \cdot T_1. \quad (13)$$

Покладемо, що припустима накопичувана похибка за час вимкнення корекції дорівнює динамічній похибці курсовертикалі АНRS $\Delta\alpha_{\text{н}} = 0,7^\circ$ при стабільності нуля ДКШ $\omega_0 = 0,2^\circ/\text{с}$ [5]. Тоді з виразу (8) матимемо обмеження на час затухання перехідного процесу

$$t_3 = \frac{\Delta\alpha_{\text{н}}}{\omega_0} = \frac{0,7}{0,2} = 3,5 \text{ с.} \quad (14)$$

В результаті, відповідно до виразів (13) і (14) знаходимо значення більшої постійної часу смугового фільтра:

$$T_1 = \frac{t_3}{7} = 0,5 \text{ с.} \quad (15)$$

Враховуючи частоту видачі даних $f_{\text{д}} = 100$ Гц курсовертикалі АНRS [5], у відповідності до виразу (10) менша постійна часу смугового фільтра

$$T_2 > \frac{10}{2\pi \cdot 100} = 0,02 \text{ с.} \quad (16)$$

Вибір параметрів при забезпеченні необхідної смуги пропускання

Азимутальна корекція курсовертикалі не повинна вимикатись під час дії на прилад магнітних збурень, частота яких відповідає робочій частоті об'єкту, на якому розташовано прилад. Відповідно до цього іншим підходом до вибору параметрів є забезпечення безперервної корекції ДКШ в певній робочій смузі частот збурень ω_3 .

Можливі два варіанти взаємного положення частот фільтру і смуги збурень ω_3 зображені на рис. 3 та рис. 4.

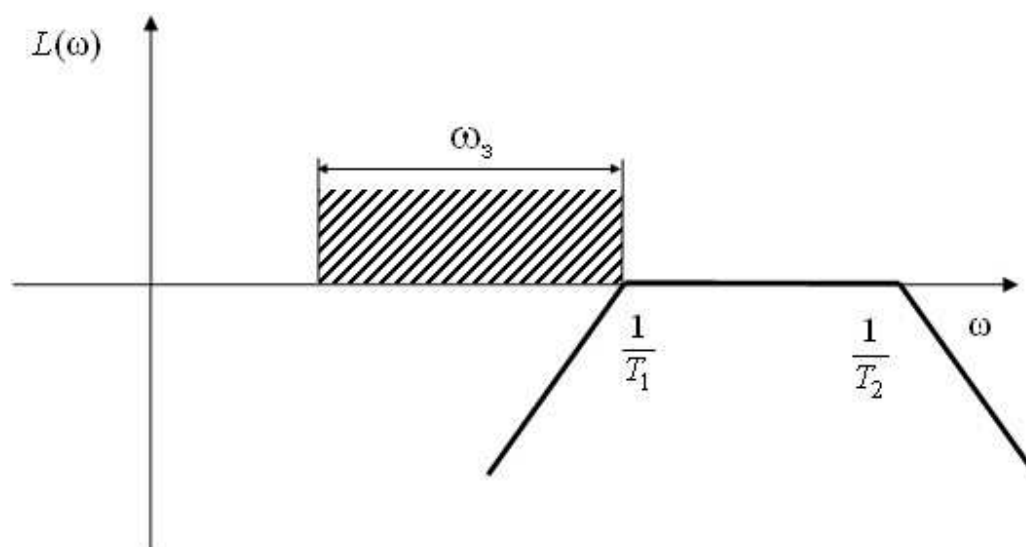


Рис. 3. Асимптотична ЛАЧХ смугового фільтру та смуга збурень. Перший варіант.

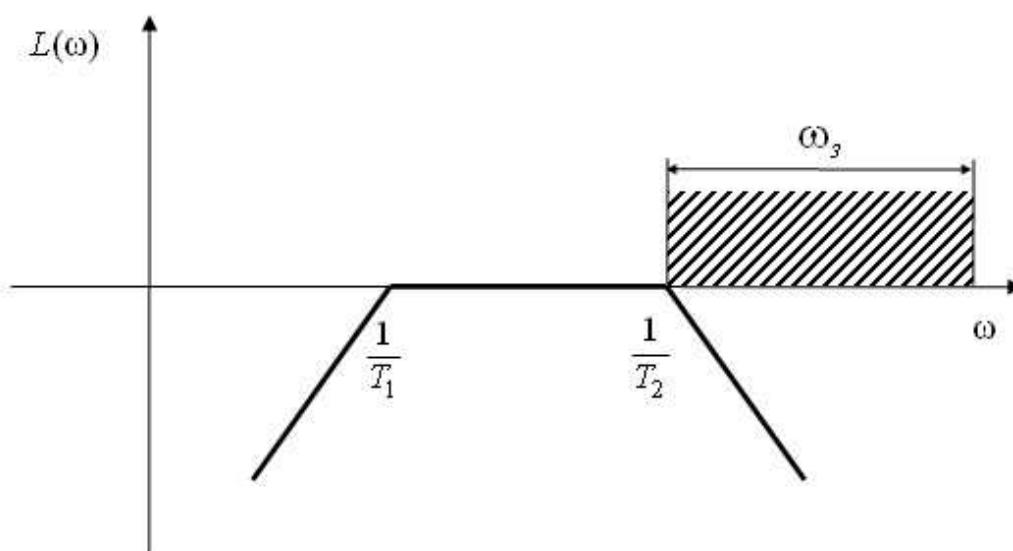


Рис. 4. Асимптотична ЛАЧХ смугового фільтру та смуга збурень. Другий варіант.

У першому варіанті чим більшою буде частота збурення, тим меншими мають бути постійні часу T_1 , T_2 . Однак значення T_2 має обмеження (10), отже такий варіант можливий лише для магнітних збурень із невисокими частотами

$$\omega_3 < 1/T_1. \quad (17)$$

У другому варіанті частота збурень обмежена знизу вимогою (9) до постійної часу T_1 . Тому такий варіант підходить для збурень із частотою

$$\omega_3 > 1/T_2. \quad (18)$$

Наприклад, при використанні гіромагнітної курсовертикалі на безпілотному літальному апараті з двигуном внутрішнього згорання, робоча частота обертання двигуна становить 5 – 15 Гц. З такою самою частотою генеруються електрома-

гнітні збурення. Отже, треба забезпечити, щоб корекція ДКШ не вимикалась при дії магнітних збурень у діапазоні 5 – 15 Гц.

Розрахуємо параметри фільтру з урахуванням робочої частоти для обох варіантів смугового фільтру. Так, для першого варіанту $\omega_3 = 2\pi \cdot 15 \text{ Гц} = 94,2 \text{ с}^{-1}$, і у відповідності до (17)

$$T_1 < \frac{1}{94,2} = 0,01 \text{ с}. \quad (19)$$

Для другого варіанту при $\omega_3 = 2\pi \cdot 5 \text{ Гц} = 31,4 \text{ с}^{-1}$. Тоді у відповідності до (18) маємо

$$T_2 > \frac{1}{31,4} = 0,03 \text{ с}. \quad (20)$$

Вимога (19) до постійної часу T_1 не задовольняє розрахованому раніше значенню (15). У той же час, вимога (20) до постійної часу T_2 відповідає умові (16). Отже, для даного прикладу доцільно застосовувати саме другий варіант смугового фільтру, представлений у цьому розділі.

Результати експериментальних досліджень

Перевірка ефективності запропонованої методики була виконана з використанням курсовертикалі АНRS та програмного забезпечення компанії Inertial Labs [4]. При тестуванні курсовертикаль була закріплена нерухомо, а на 6-12 секундах тесту було прикладене магнітне збурення. Реакція курсовертикалі без вимкнення магнітної корекції ДКШ показана на рис. 5, лінія 1.

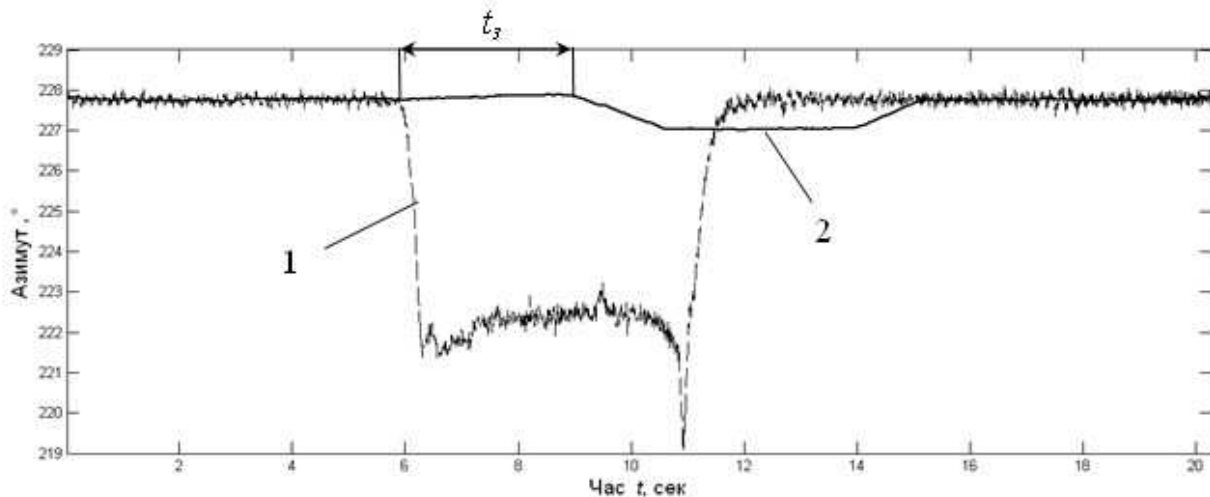


Рис. 5. Графіки кутів курсу

З використанням вищевказаного програмного забезпечення була здійснена обробка записаних даних курсовертикалі з додаванням до алгоритму смугового фільтру магнітометрів з параметрами, розрахованими за виразами (11), (15), (16): $T_1 = 0,5 \text{ с}$, $T_2 = 0,02 \text{ с}$, $M_{\text{п}} = 70 \text{ нТл}$. Результати застосування алгоритму з фільтром показані на рис. 5, лінія 2.

При відсутності вимкнень магнітної корекції (лінія 1), під час дії магнітного збурення значення кута курсу відхилилось від істинного до 9° . При використанні запропонованого алгоритму вимкнення корекції, як видно з графіка (лінія 2), після початку дії магнітного збурення корекція ДКШ вимикається і, відповідно до розрахунку (14), протягом часу $t_3 = 3,5$ с значення кута курсу відповідає істинному. Після закінчення часу t_3 з'являється похибка внаслідок ввімкнення магнітної корекції, проте після припинення дії магнітного збурення похибка поступово зникає.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано алгоритм підвищення точності гіромагнітної курсовертикалі за наявності магнітних збурень за рахунок використання смугового фільтру. Наведені результати експериментальних досліджень вимкнення корекції ДКШ підтверджують ефективність алгоритму і правильність розрахунків порогу та постійних часу смугового фільтру.

Подальші дослідження передбачається проводити в напрямі можливості застосування попередньої смугової фільтрації складових магнітного поля Землі з наступним розрахунком його модуля.

Література

1. Одинцов А. А. Теория и расчет гироскопических приборов / А. А. Одинцов. – К.: Вища школа, 1985. – 392 с.
2. Бесекекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М: Мир, 1984. – 541 с.
4. Нестеренко О. И. Разработка малогабаритных систем ориентации в компании Inertial Labs, USA / О. И. Нестеренко // Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники: междунар. научн.-техн. конф., 21-22 апр. [2011г.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 117 – 124.
5. Attitude and Heading Reference System datasheet. – Режим доступу: <http://www.inertiallabs.com/downloads/new/AHRS-Datasheet.rev1.5Oct2013.pdf>.

*Надійшла до редакції
5 березня 2014 року*

© Клішта А. В, Нестеренко О. І., 2014

УДК 621.757

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ОСЕЙ СОЕДИНЯЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ

*Кузнецова С. В., Симаков А. Л., Пантелеев Е. Ю.
ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия
им. В. А. Дегтярева», г. Ковров, Россия*

Рассмотрена задача определения величины относительного смещения осей соединяемых