

УДК 531.383

С. В. Іванов, Я. В. Шлапак

СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЇ НА ОСНОВІ МІКРОМЕХАНІЧНОГО ІНЕРЦІАЛЬНОГО МОДУЛЯ

Вступ

Малі габарити та злітна маса зумовлюють необхідність мініатюрних інформаційно-вимірювальних систем для визначення параметрів орієнтації об'єктів в просторі, побудованих на різних фізичних принципах. Такі системи знаходять широке застосування для визначення параметрів орієнтації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) мікро- та міні класу, а також в системах керування рухомих об'єктів.

На сьогоднішній день ведеться активна робота по створенню нових інтегрованих систем орієнтації та йде розробка малогабаритних, простих в застосуванні і низькоенергозатратних пристроїв. Наразі вирішена задача створення малогабаритних безплатформових систем орієнтації (БСО) (AHRS M2 (Innalabs), WOM3 (Inertial Labs), AHRS510GA (Crossbow Technology), MMQG (System Donner), КомпНав-2 (ООО «Текнол»), STB-1X (ЗАО НТЦ «Рисса»)) та створені алгоритми для компенсації похибок як складових датчиків так і самої БСО [1-5] і проектування та застосування фільтра Калмана [6-8].

Проте, на даний момент, задача створення точної малогабаритної інерціальної системи орієнтації, що мала б низьке енергоспоживання і цінову доступність і яка могла б автономно працювати на значних проміжках часу, не вирішена.

Постановка задачі

Задачею роботи є розробка алгоритмічно-програмного забезпечення для підвищення точності БСО низької точності, випробування його роботи на інерціальному вимірювальному модулі ADIS16354 фірми Analog Devices, а також виконання аналізу характеристик точності визначення параметрів орієнтації БСО.

Визначення складу та параметрів точності системи орієнтації для БПЛА

В даній роботі використано мікромеханічний інерціальний модуль ADIS16354 (рис. 1), який має низьку масу та малі габарити і низьку вартість, що робить його використання актуальним в БСО для малогабаритного БПЛА. Цей пристрій має у своєму складі трьохосьовий

блок гіроскопів та трьохосьовий блок акселерометрів. Прийом даних по каналу SPI та передача в USB відбувається за допомогою модуля на базі контролера MCS 51. Основний обчислювач (комп'ютер з середовищем LabVIEW) виконує:

- 1) прийом даних та їх децимацію до частоти 50 Гц;
- 2) обробку даних (температурну компенсацію та фільтрацію сигналу);
- 3) визначення кутів Ейлера-Крилова на основі кватерніонів по сигналу від датчиків кутової швидкості (ДКШ);
- 4) визначення початкових кутів орієнтації та корекцію кутів Ейлера-Крилова по сигналам від акселерометрів у випадку рівномірного прямолінійного руху БПЛА.

Особливістю запропонованого алгоритму БСО є метод визначення моментів корекції в залежності від характеру руху об'єкта та введення порогу корекції.

Визначення початкових кутів орієнтації та результати роботи системи орієнтації без корекції

Визначення початкового кватерніона виконується по залежностям (1), які базуються на використанні параметрів Родріга-Гамільтона [3].

$$\begin{aligned}
 \lambda_0 &= \cos\frac{\Psi}{2} \cos\frac{\vartheta}{2} \cos\frac{\gamma}{2} - \sin\frac{\Psi}{2} \sin\frac{\vartheta}{2} \sin\frac{\gamma}{2} \\
 \lambda_1 &= \cos\frac{\Psi}{2} \cos\frac{\vartheta}{2} \sin\frac{\gamma}{2} + \sin\frac{\Psi}{2} \sin\frac{\vartheta}{2} \cos\frac{\gamma}{2} \\
 \lambda_2 &= \sin\frac{\Psi}{2} \cos\frac{\vartheta}{2} \cos\frac{\gamma}{2} + \cos\frac{\Psi}{2} \sin\frac{\vartheta}{2} \sin\frac{\gamma}{2} \\
 \lambda_3 &= \cos\frac{\Psi}{2} \sin\frac{\vartheta}{2} \cos\frac{\gamma}{2} + \sin\frac{\Psi}{2} \cos\frac{\vartheta}{2} \sin\frac{\gamma}{2} ,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де Ψ, ϑ, γ – кути ристання, крену, тангажа відповідно;

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – числа кватерніона.



Рис. 1. Функціональна схема розробленої БСО

Зміна параметрів Родріга-Гамільтона визначається чисельним алгоритмом, побудованим на основі метода послідовних наближень [1]:

$$\lambda_0^{(k+1)} = \lambda_0^{(k)} - 0,5 \left(\lambda_1^{(k)} \omega_{x1} + \lambda_2^{(k)} \omega_{y1} + \lambda_3^{(k)} \omega_{z1} \right) + \varepsilon \cdot \lambda_0^{(k)}$$

$$\lambda_1^{(k+1)} = \lambda_1^{(k)} - 0,5 \left(\lambda_0^{(k)} \omega_{x1} - \lambda_3^{(k)} \omega_{y1} + \lambda_2^{(k)} \omega_{z1} \right) + \varepsilon \cdot \lambda_1^{(k)}$$

$$\lambda_2^{(k+1)} = \lambda_2^{(k)} - 0,5 \left(\lambda_3^{(k)} \omega_{x1} + \lambda_0^{(k)} \omega_{y1} - \lambda_1^{(k)} \omega_{z1} \right) + \varepsilon \cdot \lambda_2^{(k)}$$

$$\lambda_3^{(k+1)} = \lambda_3^{(k)} - 0,5 \left(-\lambda_2^{(k)} \omega_{x1} + \lambda_1^{(k)} \omega_{y1} + \lambda_0^{(k)} \omega_{z1} \right) + \varepsilon \cdot \lambda_3^{(k)},$$

де $\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \left((\lambda_0^{(k)})^2 + (\lambda_1^{(k)})^2 + (\lambda_2^{(k)})^2 + (\lambda_3^{(k)})^2 \right) \right)$ – корекція норми кватерніона,

$\lambda_0^{(k+1)}, \lambda_1^{(k+1)}, \lambda_2^{(k+1)}, \lambda_3^{(k+1)}$ – числа поточного кватерніона,

$\lambda_0^{(k)}, \lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \lambda_3^{(k)}$ – числа попереднього кватерніона,

$\omega_{x1}\omega_{y1}\omega_{z1}$ – проєкції кутових швидкостей по осям чутливості гіроскопів.

Визначення поточних кутів орієнтації по кватерніону визначається по наступним залежностям [2, 3]:

$$\psi = \begin{cases} \arctg\left(-\frac{2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1}\right), & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1 > 0, \\ \arctg\left(-\frac{2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1}\right) + \pi, & 2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2 < 0, 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1 < 0, \\ \arctg\left(-\frac{2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1}\right) - \pi, & 2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2 > 0, 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1 < 0, \end{cases}$$

$$\vartheta = \arcsin(2\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3),$$

$$\gamma = \begin{cases} \arctg\left(-\frac{2\lambda_2\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_1}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1}\right), & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1 > 0, \\ \arctg\left(-\frac{2\lambda_2\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_1}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1}\right) + \pi, & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1 < 0, 2\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1 < 0, \\ \arctg\left(-\frac{2\lambda_2\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_1}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1}\right) - \pi, & 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1 < 0, 2\lambda_2\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_1 > 0. \end{cases}$$

Для роботи системи необхідні початкові кути орієнтації її основи. Визначення початкових кутів крену і тангажа здійснюється на основі даних з акселерометрів по проєкціям вектора прискорення вільного падіння g на осі акселерометра OX_1, OY_1, OZ_1 по наступним формулам [7]:

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{w_{x1}}{g}\right),$$

$$\gamma = \begin{cases} -\arcsin\left(\frac{w_{z1}}{g \cdot \cos \vartheta}\right), & w_{y1} < 0, \\ \arcsin\left(\frac{w_{z1}}{g \cdot \cos \vartheta}\right) + \pi, & w_{y1} > 0, w_{z1} > 0, \\ \arcsin\left(\frac{w_{z1}}{g \cdot \cos \vartheta}\right) - \pi, & w_{y1} > 0, w_{z1} < 0, \end{cases} \quad (2)$$

де ϑ – кут тангажа, γ – кут крену;

w_{x1} , w_{z1} – прискорення по осям чутливості акселерометра OX_1 , OZ_1 відповідно. Чисельне значення g вибрано як прискорення вільного падіння для Києва на висоті 179 м – 9,81054 м/с².

Для реалізації алгоритму БСО було розроблено систему збору та обробки даних в програмному середовищі LabVIEW. Панель управління системи дозволяє користувачу задавати необхідні режими та параметри роботи інформаційно-вимірювальної системи та отримувати, обробляти та зберігати дані роботи системи. Збір та обробка даних проходить на частоті 50 Гц, що дозволяє вимірювати необхідний діапазон вхідних величин.

Аналіз роботи алгоритму проводився на інерціальному модулі з алгоритмічною компенсацією температурної похибки в діапазоні від 15 до 50 С. Таким чином вдалося зменшити дрейф сигналу після інтеграторів, викликаний постійною складовою вхідного сигналу датчиків кутової швидкості. Крім цього в перші 60 секунд роботи відбувається визначення випадкової похибки сигналів ДКШ, яка змінюється від пуску до пуску, і в подальшій роботі проходить її компенсація.

Результати роботи алгоритму в реальній системі без введення в них схеми корекції акселерометрами, наведені на рис. 2, рис. 3. Випробування проводилось на нерухомій основі, виставленій в горизонті. По залежностям кутів від часу, представлених на цих рисунках видно, що похибки визначення параметрів орієнтації від істинного значення (0° для крену і тангажа) за 1 годину можуть скласти більше 100 градусів. Основною причиною цих похибок є випадкова похибка зсуву нуля мікромеханічних ДКШ.

Алгоритм та результати комплексування трьохосьового датчика кутової швидкості з трьохосьовим акселерометром

Для усунення накопичення похибки в систему введена маятникова корекція кутів тангажа і крену, яка здійснюється за принципом, що показаний на рис. 4.

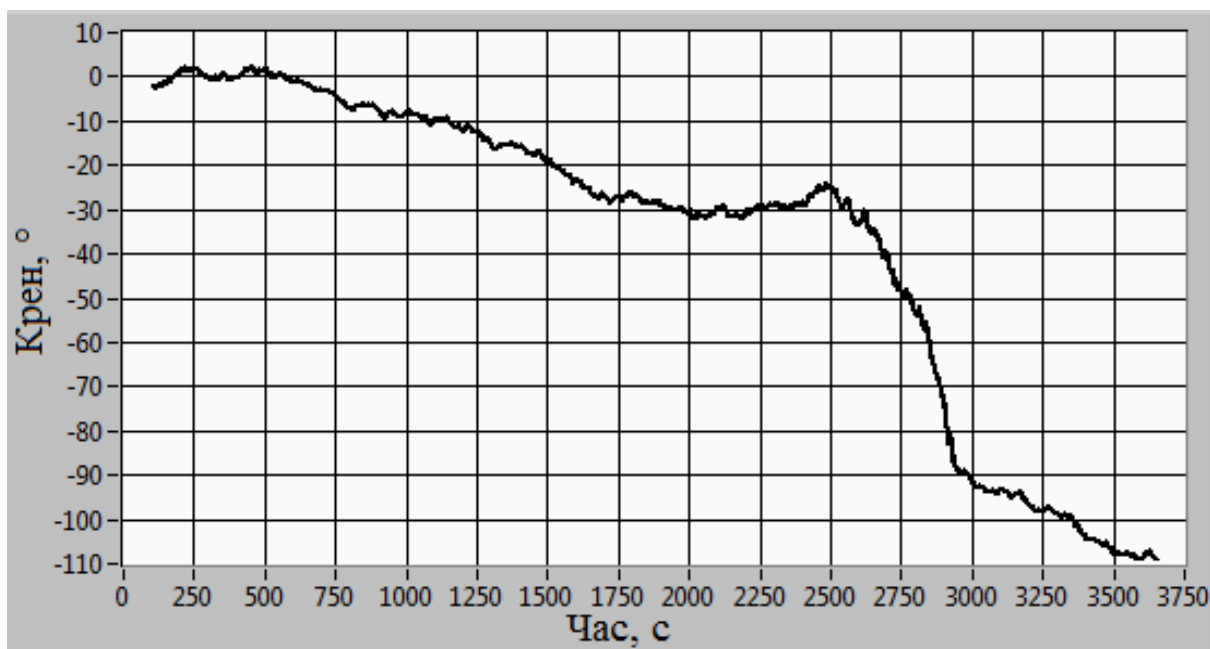


Рис. 2. Зміна кута крену в часі інерціального модуля ADIS16354 без корекції

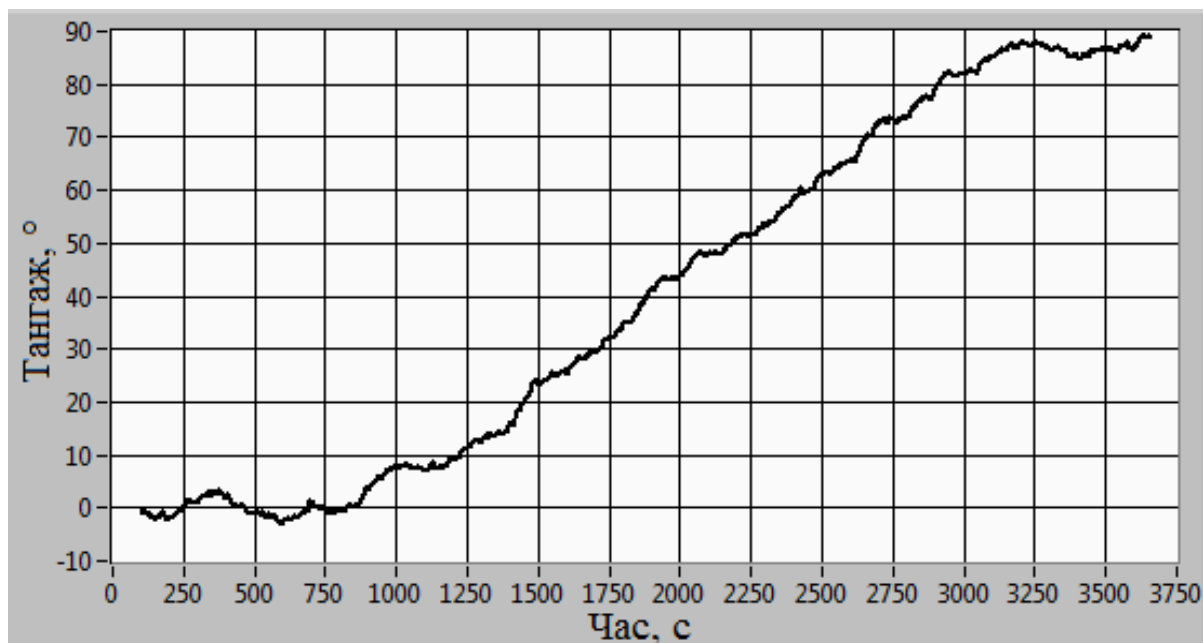


Рис. 3. Зміна кута тангажа в часі інерціального модуля ADIS16354 без корекції

На рис. 4 прийняті наступні позначення: $A(\hat{\omega}, \hat{\alpha})$ – матриця направляючих косинусів переходу від зв'язаної системи координат в географічну систему координат; $L(\vec{W}_x^*)$ – оператор визначення кутів відхилення від вертикалі по сигналам акселерометрів по залежностям (2).

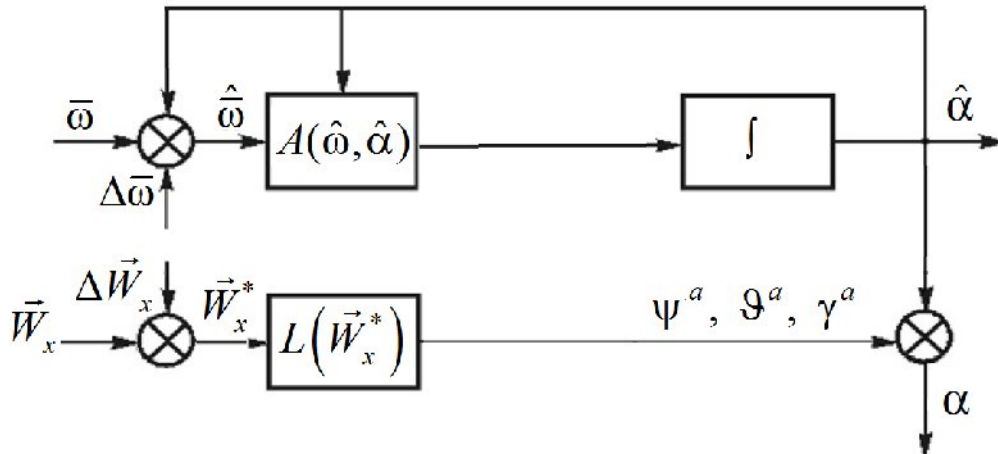


Рис. 4. Функціональна схема алгоритму маятникової корекції БСО

Корекція проводиться не частіше одного разу за 10 секунд. Це пояснюється тим, що за цей відрізок часу похибка не встигає перевищити точності корекції, а часта корекція дає більше навантаження на систему.

Коректування виконується у моменти, коли БПЛА рухається прямолінійно рівномірно. Кути корекції визначаються по значенню сумарного вектора $w = \sqrt{w_{x1}^2 + w_{y1}^2 + w_{z1}^2}$, що дорівнює вектору прискорення вільного падіння $w = g = 9.81054 \text{ м/с}^2$.

В момент корекції обчислювач подає сигнал про початок корекції на блок визначення кутів Ейлера-Крилова. Визначення кутів крену і тангажа проводиться по залежностям (2).

Оскільки строге виконання рівності $w=g$ призводить до того, що корекція може не відбутися, в алгоритмі умова корекції виглядає наступним чином:

$$g - \Delta g < w < g + \Delta g,$$

де Δg – межа спрацьовування корекції, яка визначається з умови необхідної точності визначення параметрів орієнтації.

При цьому похибка визначення кутів $\Delta\alpha$ через введення Δg визначається наступним виразом:

$$\Delta\alpha = \arctg \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta g}{g}},$$

де $\Delta\alpha$ – похибка визначення параметрів орієнтації, яка для $\Delta g = 0,0001^\circ$ (для акселерометрів ADIS16354) складає $\Delta\alpha = 0,18^\circ$.

На рис. 5 та рис. 6 показано результат роботи алгоритму корекції, як залежність кутів тангажа та крену від часу, вимірюваних раз в 300 секунд протягом 3 годин. Виходячи з отриманих даних, розподілених по нормальному закону, похибка визначення кута тангажа при застосуванні

алгоритму корекції дорівнює $\pm 0,2103^\circ$ з вірогідністю 99,7%, а кута крену $\pm 0,3237^\circ$ з вірогідністю 99,7%.

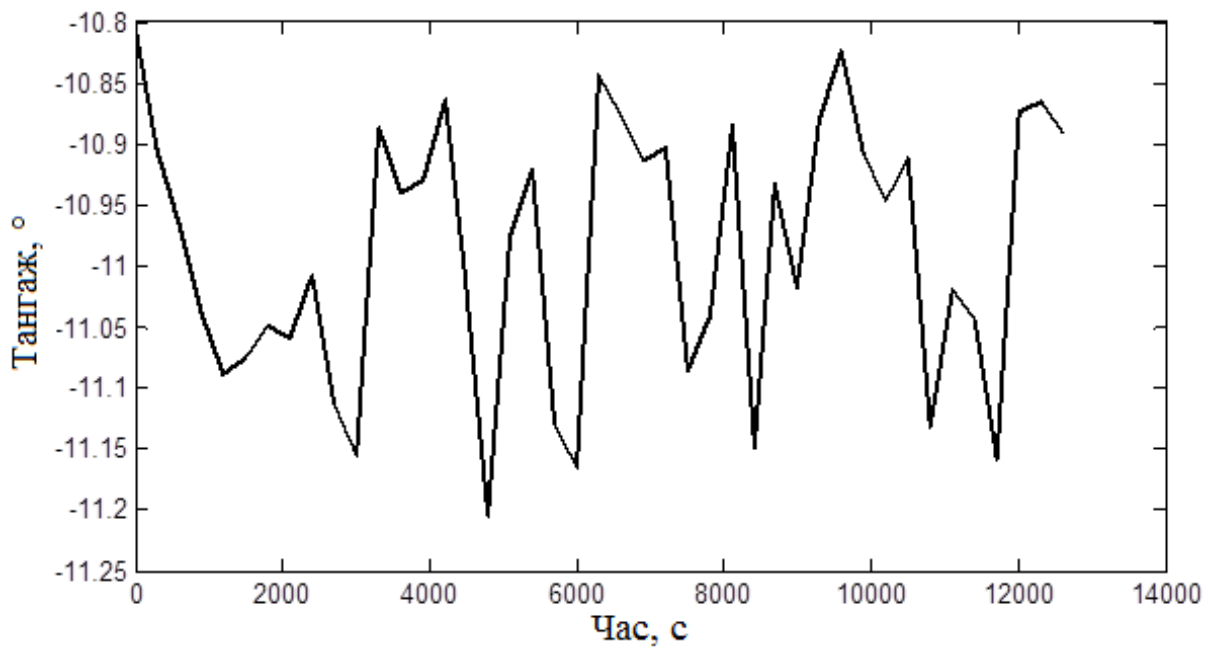


Рис. 5. Зміна кута тангажа в часі інерціального модуля ADIS16354 з корекцією

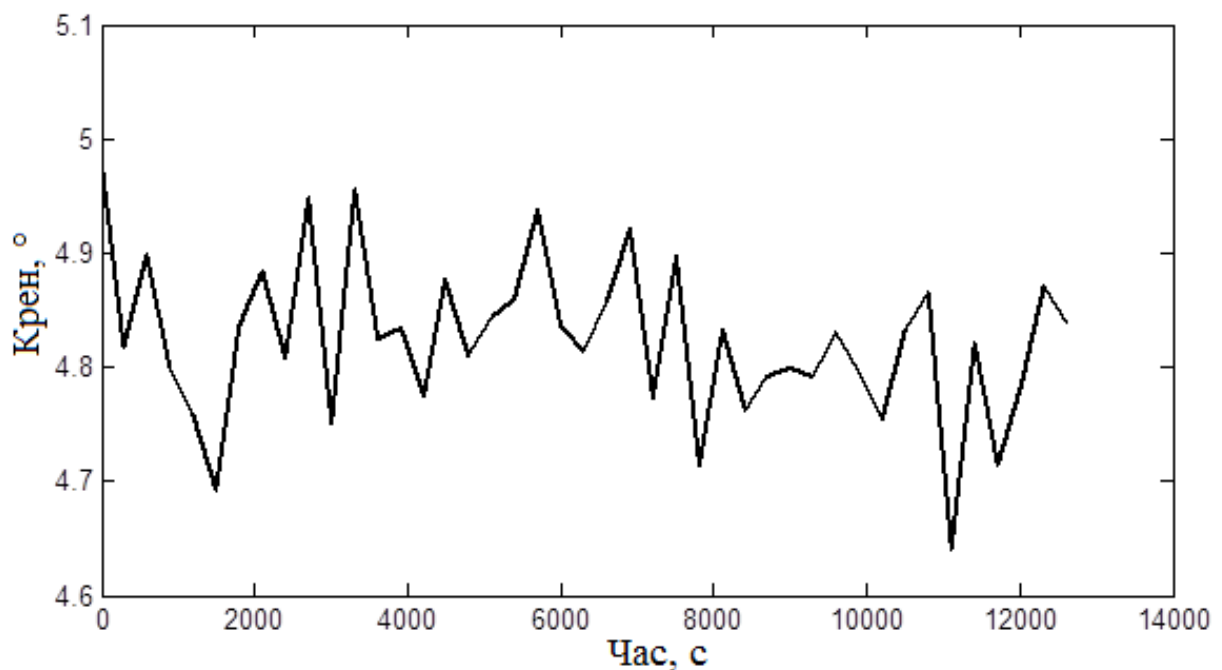


Рис. 6. Зміна кута крену в часі інерціального модуля з корекцією

Висновки

Проведене моделювання і дослідження роботи системи показали, що розроблена система орієнтації може бути використана для визначення

параметрів орієнтації малогабаритного безпілотного літального апарата і забезпечує точність визначення параметрів орієнтації $\pm 0,32^\circ$ при прямолінійному рівномірному русі об'єкта, що є достатньою точністю для визначення параметрів орієнтації малогабаритного БПЛА [7]. На основі розробленого алгоритму та створеного програмного забезпечення можливо створення систем ширшого профілю використання, які будуть забезпечувати достатню точність визначення параметрів орієнтації БПЛА не тільки при прямолінійному рівномірному русі. Таку систему може бути створено на основі розробленого алгоритму комплексування інерціального модуля з магнітометричним датчиком за допомогою фільтра Калмана.

Список використаної літератури

1. *Лазарев, Ю. Ф.* Розроблення і моделювання алгоритмів безплатформової системи орієнтації [Текст]/ Ю. Ф. Лазарев, Я. Г. Бобровицька. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 135 с.
2. *Бранец, В. Н.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела [Текст]/ В. Н. Бранец . – М.: Наука, 1973. – 320 с.
3. *Бранец, В. Н.* Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст]/ В. Н. Бранец . – М.: Наука, 1992. – 280 с.
4. *Джашитов, В. Э.* Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем [Текст]/ В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов . – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ "Электронприбор", 2001. –150 с.
5. *Распопов, В. Я.* Микромеханические приборы : учебное пособие[Текст] / В. Я. Распопов. – Тула: Тульский Гос. Университет, 2002 г. – С. 392.
6. *Андропов, А. В.* Повышение точности определения местоположения внутритрубных инспекционных приборов за счет использования спутниковых радионавигационных систем [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Андропов– Красноярск: КГТИ, 2006. – 16 с.
7. *Шведов, А. П.* Способы повышения точности информационно-измерительных систем ориентации подвижных объектов [Текст]: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. П. Шведов.– Тула: ТГТУ, 2010. – 20 с.
8. *Браммер, Л.* Фильтр Калмана-Бьюси. [Текст] / Л. Браммер. – М.: Наука, 1982. – 200 с.