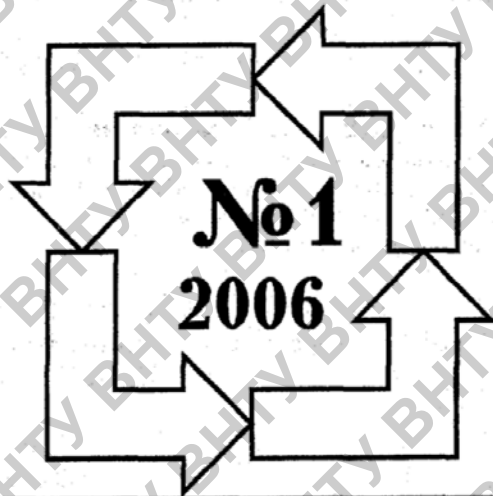


**МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЖУРНАЛ**

**ВИМІРЮВАЛЬНА
ТА
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА
ТЕХНІКА
В
ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСАХ**



ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ

Міжнародний науково-технічний журнал
Вимірювальна та обчислювальна
техніка в технологічних процесах

Заснований в травні 1997 р.

Виходить 2 рази на рік

Хмельницький, 2006, №1(27)

Засновники:

Технологічний університет Поділля (м. Хмельницький)

ВАТ НДІ “Уконд” (м. Хмельницький)

Українська технологічна академія (м. Київ)

Видавець: Хмельницький національний університет

(Технологічний університет Поділля)

Головний редактор І.В. Троцишин

Редакційна колегія:

І.Л.Афонін (Україна, Севастополь), **В.Ф.Бардаченко** (Україна, Київ), **В.І.Водотовка** (Україна, Київ, Хмельницький), **Г.Ф.Гордієнко** (Україна, Хмельницький), **В.Б.Дудикевич** (Україна, Львів), **В.М.Локазюк** (Україна, Хмельницький), **Г.С.Калда** (Україна, Хмельницький), **В.В.Календін** (Росія, Москва), **В.Г.Камбург** (Україна, Хмельницький), **В.Г.Каплун** (Україна, Хмельницький), **С.А.Кравченко** (Росія, Санкт-Петербург), **Г.О.Козлик** (Україна, Київ), **В.П.Кожем'яко** (Україна, Вінниця), **Ф.Ф.Колпаков** (Україна, Харків), **В.Т.Кондратов** (Україна, Київ), **В.Д.Косенков** (Україна, Хмельницький), **О.М.Кошев** (Росія, Пенза), **І.В.Кузьмін** (Україна, Вінниця), **А.О.Мельник** (Україна, Львів), **Ю.Ф.Павленко** (Україна, Харків), **О.М.Петренко** (Англія, Лондон), **В.О.Поджаренко** (Україна, Вінниця), **В.П.Ройзман** (Україна, Хмельницький), **О.Н.Ротштейн** (Ізраїль, Єрусалим), **В.П.Тарасенко** (Україна, Київ), **Ю.О.Скрипник** (Україна, Київ, голова редакційної колегії), **М.М.Сурду** (Україна, Київ), **П.М.Сопрунюк** (Україна, Львів), **Й.І.Стенцель** (Україна, Северодонецьк), **М.А. Філінюк** (Україна, Вінниця), **В.Д.Щіделко** (Україна, Київ).

Відповідальний секретар Л.В.Троцишина

Технічний редактор Л.В.Троцишина

Редактор-коректор Л.О. Сорокіна

Адреса редакції: Україна, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, Хмельницький національний університет, редакція журналу “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”, (кімн. 4-331), тел: (0382) 72-88-74.

E-mail: vottp@orion.tup.km.ua

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ №2398 від 9 січня 1997 року.

© Хмельницький національний університет, 2005

© Редакція “Вимірювальна та обчислювальна
техніка в технологічних процесах”, 1997

Ю.М. Воловик, М.А. Шутило
Вінницький національний технічний університет
А.Ю. Воловик
Укртелеком, м. Вінниця

ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМАХ ДИСКРЕТНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ВІД ЗБОЇВ У РОБОТІ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

Вступ та постановка задачі

У системі посадки сантиметрового діапазону невід'ємною частиною бортового пристрою обробки посадочних даних є спеціалізований обчислювач, однією із задач якого є фільтрація первинних вимірювань кутових координат за алгоритмом Калмана [1-3,7]

$$x_0^*(k+1/k+1) = A(k+1,k)x_0^*(k/k) + K_0(k+1)[y(k+1) - C(k+1)A(k+1,k)x_0^*(k/k)]; \quad (1)$$

$$K_0(k+1) = P(k+1/k) C^T(k+1) [C(k+1) P(k+1/k) C^T(k+1) + R(k+1)]^{-1}; \quad (2)$$

$$P(k+1/k) = A(k+1,k)P(k/k) A^T(k+1) + B(k+1,k)Q(k)B^T(k+1, k); \quad (3)$$

$$P(k+1/k+1) = [I - K_0(k+1) C(k+1)] P(k+1/k). \quad (4)$$

Тут введено наступні позначення: $x_0^*(k+1/k+1)$ - вектор поточних оцінок кутових координат повітряного судна; $y(k+1)$ - вектор поточних спостережень кута місця; $A(k+1,k)$, $B(k+1,k)$, $C(k+1)$ - системні матриці, відповідних розмірів; $K_0(k+1)$ - матриця передачі фільтра; $P(k+1/k)$, $P(k+1/k+1)$ - кореляційні матриці похибок екстраполяції на крок уперед та фільтрації, відповідно; $Q(k)$, $R(k+1)$ - кореляційні матриці випадкових збурень та шумів каналу спостережень,

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах №1'2006

відповідно; I - одинична матриця.

Рекурентна форма даного алгоритму фільтрації дає змогу виконувати обробку посадочних даних у темпі їх надходження за допомогою вмонтованих мікропроцесорних засобів або спеціалізованої мікро - ЕОМ, причому у оперативній пам'яті зберігається відносно невелике число поточних параметрів. Однак, в реальних умовах не виключена імовірність спотворення процесу розрахунків вищезазначених параметрів через обмежену надійність застосованих апаратних засобів. У першому наближенні, такі спотворення прийнято розглядати як наслідки збоїв у роботі елементів пам'яті пристрою обробки кутових даних [4-6] і які суттєво знижують безпеку посадочного процесу, адже результати обробки надходять безпосередньо у систему автоматичного керування польотом повітряного судна, на індикаторні та пілотажні прилади.

Обґрунтування та аналіз математичної моделі потоку аномальних похибок, обумовлених збоями у регістрах пам'яті

Перш ніж проводити детальний аналіз точності алгоритмів дискретної фільтрації [8] за наявності збоїв у пам'яті слід зауважити, що обчислювальний процес за схемою алгоритму Калмана може бути побудований у двох варіантах:

1. Матричний коефіцієнт передачі та кореляційна матриця похибок фільтрації перераховуються по мірі надходження нових результатів спостережень у відповідності до формул (1) - (4). Такий варіант реалізації обчислювального процесу потребує значних апаратних та програмних засобів і є прийнятним як для лінійних так і нелінійних процедур оцінювання.

2. Другий варіант організації обчислювального процесу прийнятний лише для лінійних процедур оцінювання і оснований на незалежності матриці передачі фільтра та кореляційної матриці похибок оцінювання від послідовності вхідних даних. Цей факт дозволяє апріорно обчислювати елементи матриці передачі фільтра Калмана лише на основі початкової інформації за формулами (2)-(4) та заносити отримані значення у постійно запам'ятовуючий пристрій і таким чином суттєво розвантажити процесор за рахунок виключення проміжних обчислень, які проводяться у темпі надходження результатів спостережень. Процедура фільтрації реалізується за укороченою формою з використанням лише виразу (1).

У даній роботі розглядається саме другий варіант організаційної структури обчислювального процесу, як найбільш поширений для лінійних процедур оцінювання [7-8].

Для аналізу аномальних похибок пристрою обробки одиничних оцінок кутових координат повітряного судна, обумовлених збоями у регістрах пам'яті мікропроцесора, необхідно проаналізувати математичну модель зберігання числових даних. Аналіз моделі почнемо з формалізації механізму виникнення збоїв, припустивши що :

- у пристрої вторинної обробки кутових даних, згідно рекомендацій [8] застосовано восьмирозрядний мікропроцесор;
- старший розряд одnobайтових комірок пам'яті відводиться під знак числа, а інші сім є значимими;
- збої окремих розрядів, включно до знакового, носять незалежний характер і трапляються з імовірністю q ;
- послідовність збоїв у часі утворює пуассонівський потік рідких подій з постійною (для даної апаратної конфігурації) інтенсивністю;
- у випадку, коли статистичні дані про імовірність збоїв відсутні слід вважати, що інтенсивність збоїв на порядок перевищує інтенсивність відмов [5-6, 9].

З врахуванням прийнятих обмежень, вміст комірок пам'яті запам'ятовуючого пристрою у будь-який момент часу k можна представляти у вигляді суми двох складових: детермінованої та випадкової $L(k) = L_0(k) + \Delta L(k)$. Стосовно випадкової складової $\Delta L(k)$, то з посиланням на роботу [4] можна вважати, що вона визначена на дискретній множині $\{-(2^N-1), (2^N-1)\}$, яка містить 2^N елементів, розподілена за біноміальним законом з нульовим середнім значенням та дисперсією, що залежить від довжини вибраної розрядної сітки та імовірності виникнення збоїв

$$S_{\Delta L}^2 = E\{\Delta L(k)\Delta L^T(k)\} = 2 \left\{ q \frac{2^N - 1}{3} + 2q^2 \left(\frac{2^{2N} + 2}{3} - 2^N \right) \right\} \quad (5)$$

Наприклад, при $N=7$ та $q = 2 \cdot 10^{-4}$ дисперсія випадкової складової дорівнює 1.5. Надалі скористаємось отриманою моделлю похибок зберігання даних у комітках пам'яті для аналізу точності укороченого алгоритму дискретної фільтрації Калмана при випадкових спотвореннях матричного коефіцієнта передачі.

При появі випадкових збоїв вміст комірок пам'яті, де зберігаються елементи матриці передачі фільтра представимо у вигляді суми детермінованої та випадкової складових $K(k+1) = K_0(k+1) + DK(k+1)$, де $DK(k+1)$ - випадкова складова, імовірнісна модель якої описується виразом (5).

Умовна кореляційна матриця похибок оцінювання у момент появи збою може бути розрахована на основі виразу (4) за формулою:

$$P_{\Delta k}(k+1/k+1) = \text{Cov}\{x(k+1)/Y_1^{k+1}\} = \{I - [K_0(k+1) + DK(k+1)]C(k+1)\} P_0(k+1/k) \times \\ \times \{I - [K_0(k+1) + DK(k+1)]C(k+1)\}^T + [K_0(k+1) + DK(k+1)] R(k+1) [K_0(k+1) + DK(k+1)]^T, \quad (6)$$

де $P_0(k+1/k)$ - кореляційна матриця похибок екстраполяції на крок уперед до моменту появи збою; $C(k+1)$ - матриця спостережень; $R(k+1)$ - кореляційна матриця шумів каналу спостережень; I - одинична матриця. Шляхом нескладних перетворень формула (6) може бути представлена у вигляді суми чотирьох складових:

$$\{I - K_0(k+1)C(k+1)\} P_0(k+1/k) \{I - [K_0(k+1)C(k+1)]^T + K_0(k+1)R(k+1)K_0(k+1)^T\}, \quad (7)$$

$$\Delta K(k+1) [C(k+1) P_0(k+1/k) C^T(k+1) + R(k+1)] \Delta K^T(k+1); \quad (8)$$

$$K_0(k+1) R(k+1) \Delta K^T(k+1) - \Delta K(k+1) C(k+1) P_0(k+1/k) \{I - K_0(k+1)C(k+1)\}^T; \quad (9)$$

$$K_0(k+1) R(k+1) \Delta K^T(k+1) - \{I - K_0(k+1)C(k+1)\} P_0(k+1/k) C^T(k+1) \Delta K^T(k+1). \quad (10)$$

Перша складова дорівнює кореляційній матриці похибок оцінювання для випадку відсутності збоїв $P_0(k+1/k+1)$; вираз (8) можна звести до вигляду $\Delta K(k+1) P_2(k+1/k+1) \Delta K^T(k+1)$, де через $P_2(k+1/k+1) = C(k+1) P_0(k+1/k) C^T(k+1) + R(k+1)$ позначена кореляційна матриця нев'язок фільтра Калмана, який працює за нормальних умов. Сума членів (9) - (10) дорівнює нулю. У цьому можна переконатись, якщо використати властивість симетрії матриць $R(k+1)$, $P_0(k+1/k)$ і привести вказану суму до вигляду

$$\{K_0(k+1)R(k+1) - [I - K_0(k+1)C(k+1)]P_0(k+1/k)C^T(k+1)\} \Delta K^T(k+1). \quad (11)$$

Далі з врахуванням тотожностей

$$P_0(k+1/k+1)C^T(k+1)R^{-1}(k+1) = K_0(k+1);$$

$$[I - K_0(k+1)C(k+1)]P_0(k+1/k) = P_0(k+1/k+1),$$

неважко показати, що вираз у фігурних дужках (11) дорівнює нулю.

Подальше осереднення по випадковій змінній $\Delta K(k+1)$ дозволяє записати явний вираз для кореляційної матриці похибок оцінювання у момент виникнення збою значень матричного коефіцієнта передачі фільтра

$$P(k+1/k+1) = E_{\Delta k}\{P_{\Delta k}(k+1/k+1)\} = P_0(k+1/k+1) + S^2_{\Delta k}(k+1) P_2(k+1/k+1), \quad (12)$$

де $S^2_{\Delta k}(k+1)$ - дисперсія випадкової складової коефіцієнта передачі фільтра.

Слід зауважити, що формула (12) отримана у припущенні, що випадкові процеси $x'(k+1/k+1)$, $z(k+1)$, $\Delta K(k+1)$ є взаємно незалежними. Подальший вплив збою, що стався, на точність оцінювання кута місця повітряного судна слід розраховувати за наступною формулою [7-8]:

$$P(k+2/k+2) = [I - K(k+2)C(k+2)] P(k+2/k+1) [I - K(k+2)C(k+2)]^T + K(k+2)R(k+2)K^T(k+2).$$

Аналіз результатів статистичного моделювання похибок укороченого фільтра Калмана другого порядку за наявності збоїв у регістрах пам'яті

Більш детальне дослідження впливів збоїв на точність оцінювання кутових координат повітряного судна проводилось методом Монте-Карло стосовно другого варіанту організації обчислювального процесу з орієнтацією на використання восьмирозрядного мікропроцесорного засобу.

Моделювання похибок, обумовлених збоями окремих розрядів комірок пам'яті запам'ятовуючого пристрою, де зберігались поточні значення коефіцієнтів передачі дискретного фільтра $K_1(k+1)$ та $K_2(k+1)$ проводилось стосовно длянки планування повітряного судна. Динамічні властивості фільтрованого параметра - кута місця повітряного судна моделювались різницеvim рівнянням другого порядку

$$\begin{pmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ w(k) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

а модель каналу спостережень описувалась рівнянням

$$y(k+1) = x_1(k+1) + n(k+1), \quad (14)$$

де $x_1(k)$ - значення кута місця на поточний k -й момент часу; $x_2(k)$ - значення швидкості зміни кута місця у цей же момент часу; T - період оновлення кутових даних; $y(k)$ - результати первинних спостережень кута місця; $w(k)$, $n(k+1)$ - гаусівські білі шуми з нульовими середніми значеннями та кореляційними матрицями $Q(k)$, $R(k+1)$, відповідно.

Масив поточних оцінок кутових координат повітряного судна у вертикальній площині обчислювався у відповідності до виразів

$$x'_1(k+1/k+1) = x'_1(k/k) + T x'_2(k/k) + K_1(k+1)z(k+1);$$

$$x'_2(k+1/k+1) = x'_2(k/k) + K_2(k+1)z(k+1);$$

$$z(k+1) = y(k+1) - x_1(k/k) - T x_2(k/k),$$

за наступних початкових даних, типових для високоточних вимірювань:

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} 3.0 \\ 0.01 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}'(0/0) = \begin{bmatrix} 2.5 \\ 0.006 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}(k+1) = 0.0036; \quad \mathbf{Q}(k) = 0.0001;$$

$$\mathbf{P}(0/0) = \begin{bmatrix} 0.625 & 0.0 \\ 0.0 & 0.06 \end{bmatrix}; \quad N = 7; \quad S_{\Delta k}^2 = 1.5; \quad q = 2 \cdot 10^{-4}; \quad T = 0.0247.$$

Вплив випадкових збоїв на вміст комірок пам'яті постійного запам'ятовуючого пристрою, де зберігались розрахункові значення оптимального матричного коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_0(k+1)$, враховувався додаванням випадкової складової $\Delta K(k+1)$ з нульовим середнім значенням та дисперсією $S_{\Delta k}^2(k+1)$, розрахованою за формулою (5). Імовірність збою приймалась рівною $2 \cdot 10^{-4}$, а число значущих розрядів дорівнювало семи, так як один розряд відводився під знак числа. Закон розподілу ймовірностей випадкових значень $\Delta K(k+1)$ було апроксимовано нормальним законом з середнім a та дисперсією $S_{\Delta k}^2(k+1)$, що дозволило спростити процес моделювання за допомогою вмонтованого датчика випадкових чисел. Правомірність такої заміни обумовлена симетричністю та унімодальністю біноміального закону розподілу величин $\Delta K(k+1)$ з використанням асимптотичних властивостей при великій кількості можливих значень дискретної множини визначення, а саме 2^8 елементів [4].

За результатами статистичного експерименту, суть якого полягала у стократній імітації процесу фільтрації для обох варіантів організації обчислювального процесу за алгоритмом Калмана, визначались вибіркові середні значення похибок фільтрації та їх кореляційна матриця $P_{m-k}(k+1/k+1)$. При цьому збої імітувались як в усталеному так і перехідному режимах. З метою адекватності умов порівняльного аналізу, моменти виникнення збоїв оставались фіксованими на протязі усього статистичного експерименту. Вибіркові значення кореляційної матриці похибок фільтрації порівнювались з розрахунковими значеннями, отриманими на основі формули (12). За умов відсутності збоїв і повній апріорній інформації про прийняті моделі та діючі збурення, вибіркові та розраховані значення практично співпадали, відносна похибка не перевищувала 15-20%.

За наявності збоїв статистика похибок відрізняється від апріорної, тому що фільтр втрачає оптимальні властивості. Порівняння розрахункових та вибіркових значень кореляційних матриць $P(k+1/k+1)$, $P_{m-k}(k+1/k+1)$ дозволяє оцінювати втрати точності калманівським фільтром, а також виявити вплив аномальних похибок, що з'явилися, на характер подальшого процесу фільтрації. Окрім того, таке порівняння ще дає змогу аналізувати різні варіанти організації обчислювального процесу з точки зору швидкості компенсації наслідків збою, що стався.

На рис.1 показаний результат спогворення оптимальних значень коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_0(k)$ за рахунок однократного збою у пам'яті на початку перехідного та усталеного режиму роботи і характер його зміни у часі. Неважко бачити, що збої проявляють себе у вигляді окремих дельта-імпульсів у послідовності розрахованих оптимальних значень коефіцієнта передачі $K_0(k)$.

На рис.2 представлена одна з можливих реалізацій оцінок кута місця повітряного судна, яка розраховувалась за формулою (1).

Кількісну оцінку точності фільтрації за умов можливих збоїв, можна отримати, якщо звернутись до рис.3, де представлена залежність вибіркових дисперсій оцінок кута місця повітряного судна від дискретного часу.

Аналіз наведених залежностей показує, що у поява збоїв у комірках пам'яті, де зберігаються значення матричного коефіцієнта передачі, зокрема $K_0(k)$,

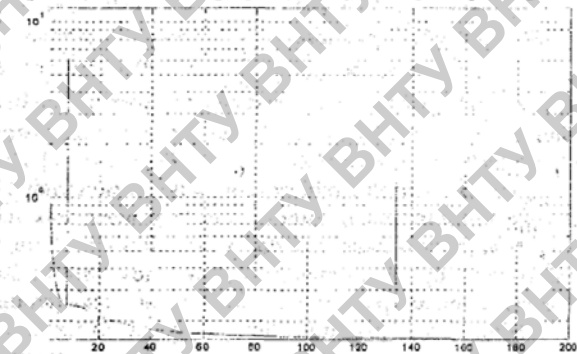


Рис.1. Результат спогворення оптимальних значень коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_0(k)$ за рахунок збоїв у регістрах пам'яті

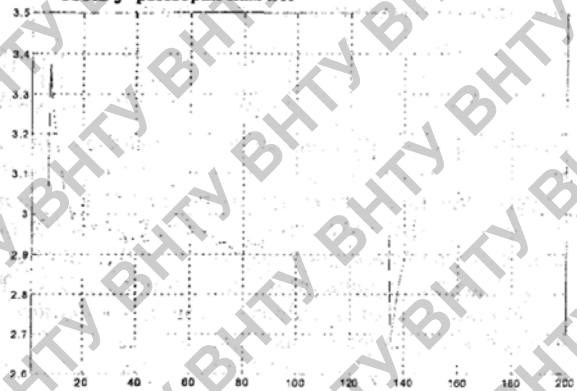


Рис.2. Поточні оцінки кута місця повітряного судна за наявності збоїв у регістрах пам'яті, де зберігались оптимальні значення $K_0(k)$

призводить до утворення аномальних похибок у оцінках кута місця повітряного судна, які перевищують відповідну похибку фільтра Калмана за умов відсутності збоїв, що найменше на один-два порядки. Таке суттєве погіршення точності вимірювань кутових координат у процесі посадки повітряного судна є неприпустимим. Тому важливо ще на етапі ескізного проектування посадочної системи задати обґрунтовані вимоги до надійності окремих вузлів цифрової апаратури обробки посадочних даних, виходячи з заданого допуску на величину максимально припустимої похибки. Наприклад, обмеження області допуску величиною $\pm 2\sigma$, де $\sigma = P^{1/2}_0(k/\kappa)$ – оптимальне середньоквадратичне значення похибки фільтра Калмана, який працює за умов відсутності збоїв, передбачає зниження імовірності збоїв окремих розрядів у комірках пам'яті до величини $10^{-6}-10^{-7}$, а це потребує додаткових заходів щодо підвищення надійності елементів пам'яті (відповідного апаратного резервування, застосування мажоритарних схем та тощо). Результати відповідних розрахунків наведено у табл.1, де виділений прямокутник відповідає області допустимої точності оцінювання за умови появи збоїв заданої інтенсивності.

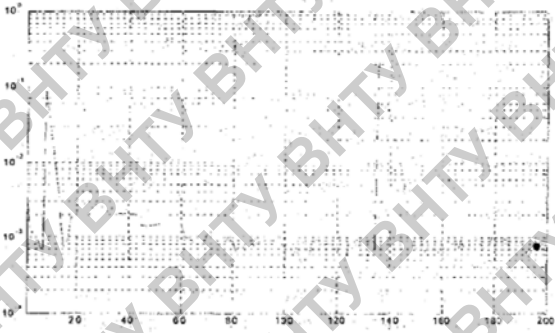


Рис.3. Точність оцінювання кута місця повітряного судна за наявності збоїв значень $K_1(k)$

Таблиця 1
Область допустимої точності оцінювання при заданій інтенсивності збоїв

Дисперсія похибок оцінювання $P(k) \cdot 10^{-4}$, град	7	7.5	8	9	10	12	16	21	35	42	61
Імовірність збоїв окремого розряду $q \cdot 10^4$	1	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100

Окрім того процедура фільтрації під впливом збою у пам'яті втрачає оптимальні властивості, тому що елементи матриці передачі фільтра заново не перераховуються, унаслідок цього оцінки кута місця стають зміщеними та лише асимптотично ефективними і повільно сходяться до ustalених значень. Така властивість особливо характерна для результатів досліджень впливу збоїв у комірках пам'яті, де зберігаються значення коефіцієнтів передачі по швидкості $K_1(k)$, на точність оцінювання кута місця повітряного судна. На рис.4 показана типова реалізація процесу спотворення вмісту комірок пам'яті, де зберігались значення коефіцієнта передачі фільтра по швидкості зміни кута місця повітряного судна $K_1(k)$. Незавжди бачити, що і для цього варіанту, спотворення $K_1(k)$ проявляються у вигляді окремих дельта-імпульсів на часовій осі, причому вони аж ніяк не впливають на величину коефіцієнта передачі $K_1(k)$.

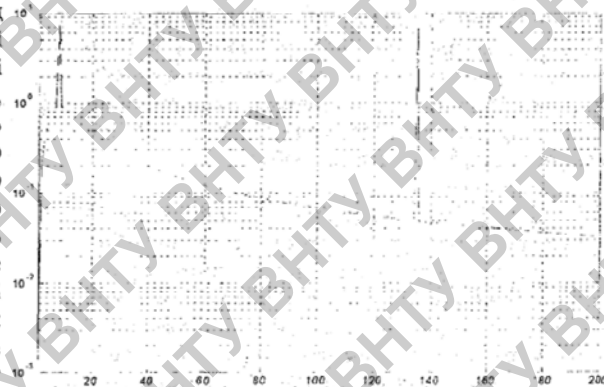


Рис.4. Характер спотворень оптимальних значень коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_1(k)$ за рахунок збоїв у регістрах пам'яті

Порівняння з відповідними характеристиками фільтра Калмана, який працює в умовах відсутності збоїв, показує, що за винятком перехідного процесу, обумовленого дією збою у $K_2(k)$ на фільтр, якісні показники в ustalеному режимі відрізняються несуттєво. Це пояснюється слабким впливом збоїв у $K_2(k)$ на $P_{11}(k)$ через високий темп оновлення посадочних даних, відносно повільною динамікою зміни кута місця повітряного судна у процесі виконання посадочного маневру на ділянці планування та відсутністю результатів спостережень за швидкістю зміни кута місця.

Стосовно збоїв у $K_1(k)$, то вони згідно рис.3 безпосередньо впливають на утворення аномальних похибок у оцінках кута місця повітряного судна і безумовно для їх компенсації виникає потреба апаратного резервування відповідного ступеня або програмного захисту з використанням елементів параметрично - структурної самоорганізації [7, 9], що виходить за межі, окреслені у даній роботі.

Результати досліджень наведені на рис. 5-7 ілюструють процес появи зсуву оцінок кута

місця повітряного судна, який відбувається під впливом збоїв у комірках пам'яті, де зберігались значення коефіцієнта передачі по швидкості $K_2(k)$.

Цей зсув починається з моменту утворення аномальної похибки у оцінках швидкості зміни кута місця на 135 такті (див. рис.6) і повільно досягає усталеного значення через втрату оптимальності числових значень елементами матричного коефіцієнта передачі.

Окрім того, починаючи з цього моменту, оцінки кута місця повітряного судна втрачають властивість ефективності,

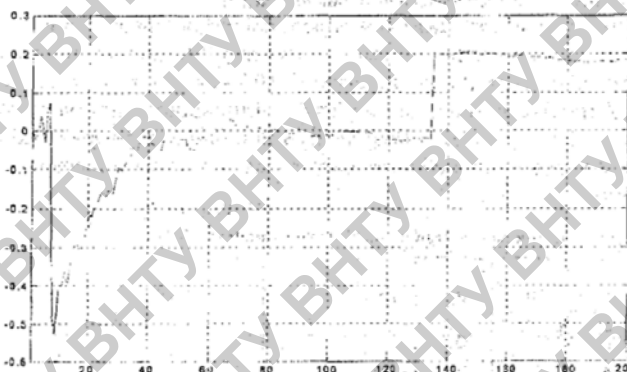


Рис.6. Утворення зсуву у поточній оцінці швидкості зміни кута місця, обумовленого збоями у $K_2(k)$

2. Стосовно низки субоптимальних фільтрів, запропонованих у роботі [8], то усі вони реалізовані за укороченою формою на основі формули (1) і наслідують недоліки алгоритму дискретного фільтра Калмана, які вже розглянуто у даній роботі.

Висновки

Підводячи підсумки результатів статистичного моделювання похибок оцінювання кута місця повітряного судна укороченими фільтрами Калмана другого порядку, які працюють в умовах можливих збоїв у регістрах пам'яті, де зберігаються значення матричного коефіцієнта передачі, можна стверджувати:

1. Розглянуті алгоритми фільтрації кутових даних, за умов наявності збоїв у регістрах пам'яті, найбільш чутливі до збою коефіцієнта передачі $K_2(k)$.
2. За наявності збоїв у пам'яті організація поточних обчислень оцінок кута місця повітряного судна за укороченим варіантом з використанням формули (1) призводить до утворення аномальних похибок у процесі фільтрації, появи зсуву отриманих оцінок та втрати ними властивості ефективності.
3. Порівняно з фільтром Калмана, який працює за умов відсутності збоїв, пікове погіршення у точності складає щонайменше один-два порядки. Таке суттєве погіршення точності оцінювання кутових координат у процесі посадки повітряного судна є неприпустимим і потребує додаткових заходів щодо підвищення надійності елементів пам'яті у вигляді відповідного апаратного резервування, застосування мажоритарних схем та тощо.

Література

1. Верещака А.И. Авиационное радиооборудование. -М.: Транспорт, 1996. - 344с.
2. Сосновский А.А., Хаймович И.А. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Справочник. - М.: Транспорт, 1987. - 256с.
3. Сантиметровые системы посадки самолетов / В.М. Бенин, Е.И. Шолупов,

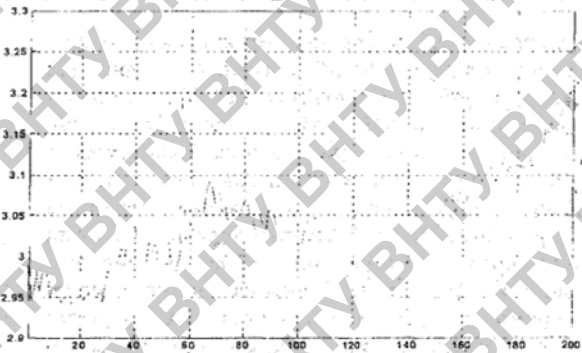


Рис.5. Поточні оцінки кута місця повітряного судна реалізовані за умови наявності збоїв у $K_2(k)$

про що свідчить плавний перехід у вибірковій дисперсії $P_{11}(k)$ до її нового значення на протязі 135 - 150 тактів (див. рис.7).

За аналогічною методикою можна досліджувати:

1. Вплив одночасних збоїв у комірках пам'яті $K_1(k)$ та $K_2(k)$ на точність оцінювання кута місця повітряного судна. Незважаючи на те, що така подія малоймовірна (за умови статистичної незалежності збоїв окремих розрядів, порядок імовірності такої події складас величину 10^{-8}) все ж повністю її ігнорувати не варто.

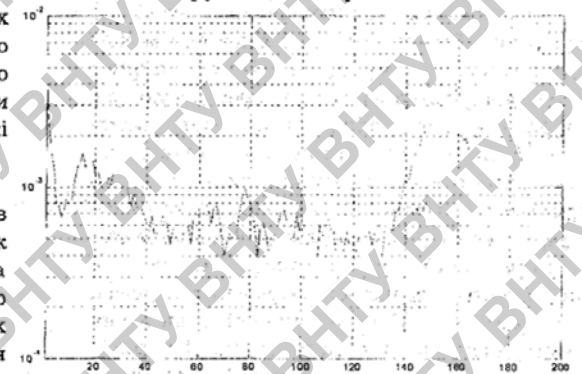


Рис.7. Втрата ефективності (оптимальної точності) оцінками кута місця повітряного судна при наявності збоїв у $K_2(k)$

- В.А.Кожевников, И.А.Хаймович. - М.: Машиностроение, 1985. - 224с.
4. Васильев Г.Я. Влияние сбоев управляющей ЦВМ на точность идентификации // Автоматика и телемеханика. - 1975, - №11. - С.181-187.
 5. Пузанков Д.В. Микропроцессорные системы. - СПб.: Политехника, 2002. -935с.
 6. Горн Л.С., Хазанов В.И., Хазанов Д.Б. Микропроцессоры в приборах для радиационных измерений. - М.: Атомиздат, 1989. - 376с.
 7. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. - М.: Радио и связь, 1985.-344с.
 - 8.Воловик Ю. М., Логвиненко В.В., Шутило М. А., Воловик А.Ю. Порівняльний аналіз ефективності субоптимальних алгоритмів дискретної фільтрації//Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький. -2005. - №2. - С. 92-97.
 9. Авиженис А. Отказоустойчивость - свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем // ТИИЭР.-1988. - Т 66, №10.- С.5-25.
- Надійшла до редакції
14. 11. 2006 року.