



Институт морского
флота Украины



Одесский национальный морской
университет

**СБОРНИК
научных трудов**

по материалам международной научно-
практической конференции
*«Современные направления
теоретических и прикладных
исследований»*

15-25 марта 2007 года

Том 4
Технические науки



Одесса 2007

УДК 621.396.96

Ю.М. Воловик, А.Ю. Воловик, М.А. Шугило, В.В. Загорський
ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМАХ ДИСКРЕТНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ
ВІД ЗБОЇВ У РОБОТІ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

Вінницький національний технічний університет
Вінницький технічний коледж

Вступ та постановка задачі

У системі посадки сантиметрового діапазону невідомою 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]

$$\hat{x}_o(k+1/k+1) = A(k+1,k)\hat{x}_o(k/k) + K_o(k+1)[y(k+1) - C(k+1)A(k+1,k)\hat{x}_o(k/k)]; \quad (1)$$

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

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

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

Тут уведено наступні позначення: $\hat{x}_o(k+1/k+1)$ – 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; $K_o(k+1)$ – 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, 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, у 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 математичної моделі потоку аномальних похибок, обумовлених збоями у регістрах пам'яті

Перш ніж поводити 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 обчислювати елементи матриці передачі фільтра Калмана лише на основі апріорної 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 обробки кутових даних, згідно рекомендацій [8] застосовано восьмирозрядний мікропроцесор, причому 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 , а при відсутності статистичних даних про імовірність збоїв слід вважати, що інтенсивність збоїв на порядок перевищує інтенсивність відмов [5-6, 9];

- послідовність збоїв у часі утворює пуассонівський потік рідких подій з постійною (для даної апаратної конфігурації) інтенсивністю.

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 можна вважати, що вона визначена на дискретній множині $[-(2^7-1), (2^7-1)]$, розподілена за біноміальним законом з нульовим середнім значенням та дисперсією, що залежить від довжини вибраної розрядної сітки та імовірності виникнення збою [4]

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

Наприклад, при $N=7$ та $q = 2 \cdot 10^{-4}$ дисперсія випадкової складової дорівнює 1.5. Надалі скористаємось отриманою моделлю похибок зберігання даних у комірках 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

планування повітряного судна. Динамічні властивості параметра – кута місця повітряного судна моделювались різницеvim рівнянням другого порядку

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

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

$$\begin{aligned} \hat{x}_1(k+1/k+1) &= \hat{x}_1(k/k) + T \hat{x}_2(k/k) + K_1(k+1) z(k+1); \\ \hat{x}_2(k+1/k+1) &= \hat{x}_2(k/k) + K_2(k+1) z(k+1); \\ z(k+1) &= y(k+1) - \hat{x}_1(k/k) - T \hat{x}_2(k/k), \end{aligned}$$

за наступних початкових даних, типових для високоточних вимірювань:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 3.0 \\ 0.01 \end{bmatrix}; & \mathbf{x}^*(0/0) &= \begin{bmatrix} 2.5 \\ 0.006 \end{bmatrix}; & R(k+1) &= 0.0036; & Q(k) &= 0.0001; \\ P(0/0) &= \begin{bmatrix} 0.625 & 0.0 \\ 0.0 & 0.06 \end{bmatrix}; & N &= 7; & S_{\Delta K}^2 &= 1.5; & q &= 2 \cdot 10^{-4}; & T &= 0.0247. \end{aligned}$$

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 унімодалльністю 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 вибірових 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 спотворення оптимальних значень коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_1(k)$ 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 $K_1(k)$.

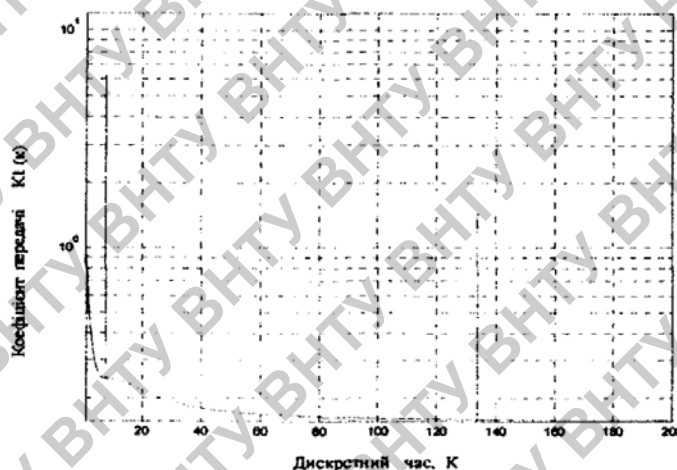


Рис.1. Результат спотворення оптимальних значень коефіцієнта передачі фільтра Калмана $K_1(k)$ за рахунок збоїв у регістрах пам'яті

На рис.2а, представлена одна з можливих реалізації оцінок кута місця повітряного судна, яка розраховувалась за формулою (1). Кількісну оцінку точності фільтрації за умов можливих збоїв можна отримати, якщо звернутись до рис.2б, де представлена залежність вибірових 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 $K_1(k)$, 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.

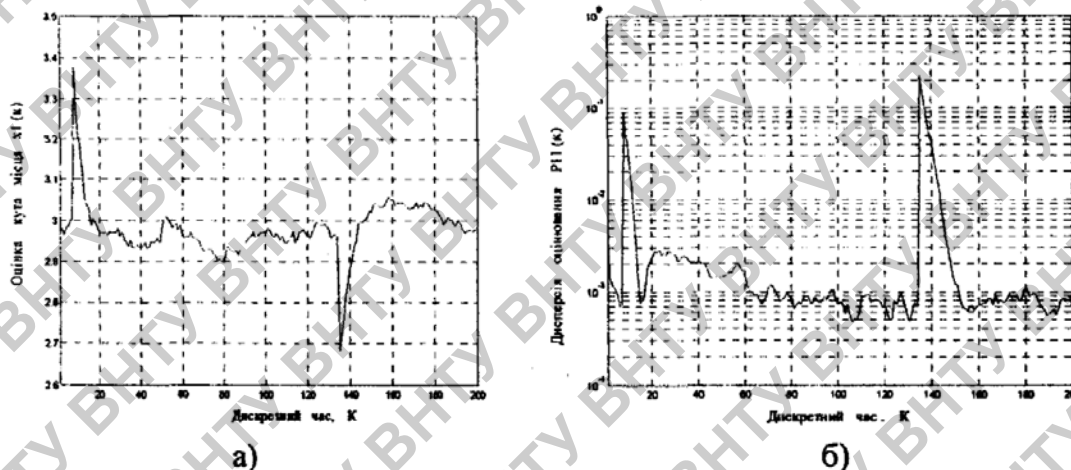


Рис.2. Поточні оцінки кута місця та їх точність за наявності збоїв у регістрах пам'яті, де зберігались оптимальні значення $K_1(k)$

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 $\sigma = P^{1/2}_0(k/k)$ – 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, наприклад, відповідного апаратного резервування, застосування мажоритарних схем та тощо. Результати розрахунків наведено у табл.1, де виділений прямокутник відповідає області допустимої точності оцінювання за умови появи збоїв заданої інтенсивності. 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 усталених значень.

Таблиця 1

Область допустимої точності оцінювання при заданій інтенсивності збоїв

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

Така властивість особливо характерна для результатів досліджень впливу збоїв у комірках пам'яті, де зберігаються значення коефіцієнтів передачі по швидкості $K_2(k)$, на точність оцінювання кута місця повітряного судна.

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 усталеному 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. Результати досліджень наведені на рис. 3-5 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.4) 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, про що свідчить плавний перехід у вибірковій дисперсії $P_{11}(k)$ до її нового значення на протязі 135 - 150 тактів (див. рис.5).

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 малоімовірна все ж повністю її ігнорувати не варто

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 уже розглянуто у даній роботі.

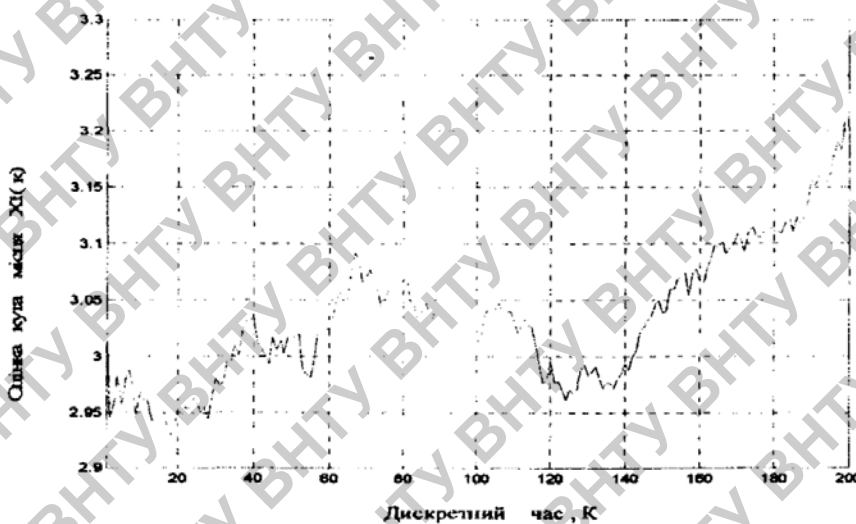


Рис.3. Поточні оцінки кута місця повітряного судна реалізовані за умови наявності збоїв у $K_2(k)$

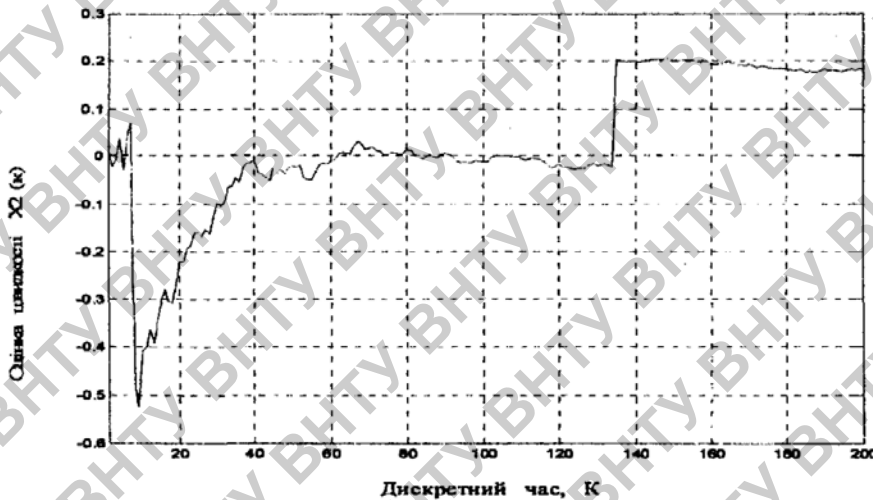


Рис. 4. Утворення зсуву у поточній оцінці швидкості зміни кута місця, обумовленого збоями у $K_2(k)$

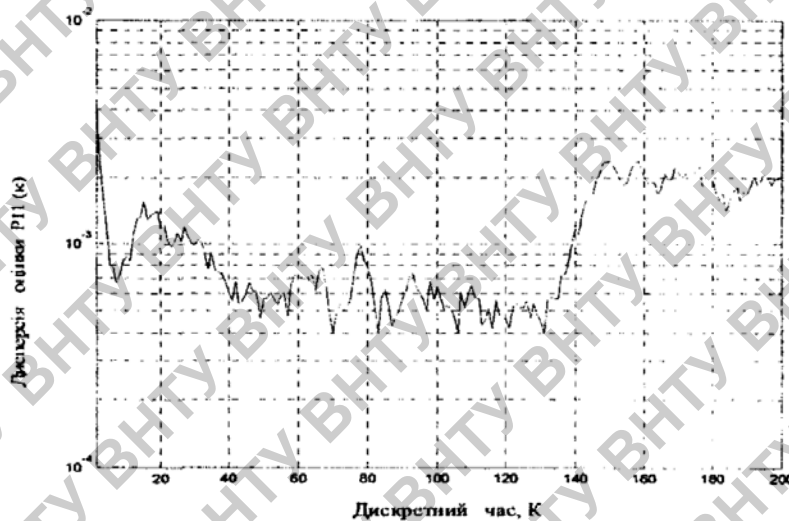


Рис.5. Втрата ефективності (оптимальної точності) оцінками кута місця повітряного судна при наявності збоїв у $K_2(k)$

Висновки

Підводячи підсумки результатів статистичного моделювання похибок оцінювання кута місця, 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 умови наявності збоїв у регістрах пам'яті, найбільш чутливі до збою коефіцієнта передачі $K_1(k)$.
2. За наявності збоїв у пам'яті організація поточних обчислень оцінок кута місця повітряного судна за укороченим варіантом 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. Радиозлектронное оборудование летательных аппаратов. Справочник. – М.: Транспорт, 1987. – 256с.
3. Сантиметровые системы посадки самолетов / В.М. Бенин, Е.И.Шолупов, 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 Б.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 // Вимірювальна 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.

УДК 621.382

Пиганов М. Н., Столбиков А. В.

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ОПТИМИЗОВАННЫХ