

DOI: 10.18372/2310-5461.49.15288

УДК 004.4:006.015.5:519.652

**І. Е. Райчев**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0003-4058-1236  
e-mail: raichev.ie@gmail.com;

**С. В. Федченко**  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-36-69  
e-mail: specigmeth@gmail.com;

**О. Г. Харченко**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0002-5868-3938  
e-mail: kharchenko.nau@gmail.com;

**А. С. Савченко**, канд. техн. наук, доц.  
Національний авіаційний університет  
orcid.org/0000-0001-8205-8852  
e-mail: alina@inet.ua

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### Вступ

Сьогодні суттєво зростає тенденція об'єктивного оцінювання відповідності кожної програмної системи (ПС), яка розробляється, вимогам до якості. Особливої важливості задача атестаційних випробувань і підсумкового оцінювання властивостей якості набуває для критичних ПС, які широко використовуються в космонавтиці, авіації, енергетиці, медицині, для моніторингу довкілля та в інших галузях і безпосередньо пов'язані з безпекою життєдіяльності об'єкта контролю. Характерною особливістю таких систем є високі вимоги до безпеки, функціональної правильності, точності та ефективності. Тому для множини класів систем критичного призначення нині актуальною стає задача формування методів виконання перевірки ПС на відповідність вимогам якості в межах предметної області (ПрО) їх функціонування та аналіз ризиків і небезпек, пов'язаних з експлуатацією.

Дослідимо клас програмного забезпечення автоматизованих систем контролю (ПЗ АСК) літальних апаратів (ЛА), які є типовими системами критичного призначення, і тому потребують проходження атестації на відповідність вимогам якості. Важливою компонентою цих систем є ПЗ, якість якого суттєво впливає на експлуатаційні характеристики АСК.

Перевірку відповідності вимогам можна виконати шляхом оцінювання досягнутого загального рівня якості ПЗ АСК, враховуючи те, що рівень якості кожного показника, який входить до сучасної уніфікованої моделі якості системи або ПЗ [1], має досягати визначеного наперед у вимогах до ПС мінімально припустимого значення.

### Постановка проблеми та її актуальність

Польотна інформація, яка включає траєкторні параметри, а також інформацію про функціонування систем ЛА і дії екіпажа по його керуванню, широко використовується для контролю стану ЛА і виявлення помилок у діях екіпажа. Ця інформація обробляється по алгоритмах контролю на борті ЛА чи наземними системами після його посадки [2]. Обробка інформації, записаної бортовими реєстраторами, є актуальною задачею, яка дозволяє забезпечувати безпеку польотів. У документах ІСАО високо оцінюється інформація бортових реєстраторів і рекомендується впроваджувати обробку польотної інформації з метою запобігання авіаційних подій, вивчення дій екіпажа й поліпшення технічного обслуговування ЛА. В Україні використання польотної інформації всіма експлуатантами ЛА є обов'язковим. ПЗ класу автоматизованих систем контролю вирішує такі загальні задачі [3]:

- відтворення контрольованої параметричної інформації (візуалізація параметрів польоту ЛА);
  - контроль виходів параметрів об'єкта контролю за обмеження (допусковий контроль);
  - контроль якості функціонування об'єкта;
  - фільтрація параметричної інформації.
- Залежно від призначення ПЗ АСК ці задачі можуть вирішуватися як у режимі реального

часу, так і після функціонування об'єкта наземними системами обробки польотної інформації (параметричної цифрової інформації датчиків). Тому ПЗ систем цього класу складається з підсистеми відтворення параметричної інформації, підсистеми допускового контролю, підсистеми контролю якості функціонування об'єкта контролю (в нашому випадку — ЛА) та підсистеми фільтрації (рис. 1).

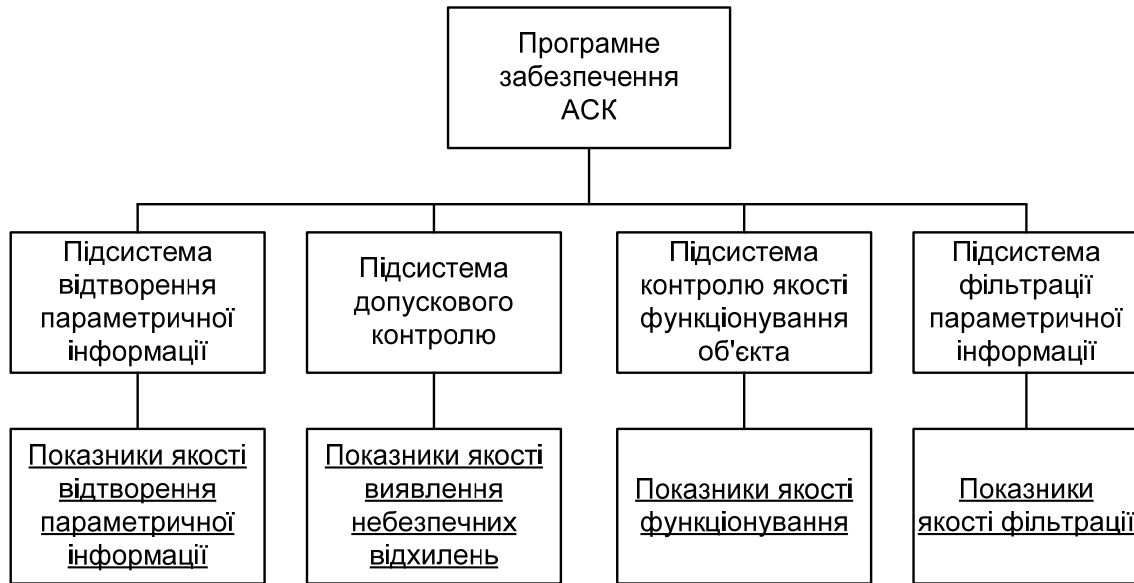


Рис. 1. Склад підсистем і класифікація показників якості ПЗ АСК

Програмне забезпечення автоматизованих систем контролю польотів складається із сотень програмних модулів, що взаємодіють у процесі вирішення цільової задачі, якою є обробка параметричної інформації, з метою прийняття діагностичних і управляючих рішень про стан ЛА, як об'єкта контролю, та якість його функціонування, причому такі рішення необхідно приймати з високою достовірністю. Тому фактичні значення показників якості підсистем ПЗ АСК мають відповідати нормативним вимогам [2].

Однією з головних є задача відтворення польотної інформації, яка полягає в графічному представленні зміни аналогових параметрів і разових команд у часі. Підсистема відтворення параметричної інформації присутня у будь-якій АСК. Вона забезпечує автоматизовану обробку копії польоту з наступною видачею графічної і табличної інформації параметрів польоту, а також візуалізацію траєкторії польоту літака, на зовнішні пристрої (дисплеї, термінали, принтери тощо).

Основною проблемою, що постає перед ПЗ АСК, є вирішення задач допускового контролю. Відповідна підсистема повинна забезпечувати реалізацію алгоритмів контролю, встановлених

для кожного типу ЛА. Підсистема характеризується ухваленням рішення про перебування ЛА в деякому стані. Для цього обчислюється складний предикат і встановлюється (або ні) настання події контролю. Істотною проблемою для підсистеми допускового контролю, є визначення вірогідності настання подій контролю й підтвердження факту перебування погрішності оцінки в межах допуску [2; 3; 4].

Задача контролю якості виконання польоту полягає в здійсненні контролю за виконанням екіпажами ЛА режимів і правил льотної експлуатації з необхідним рівнем достовірності, що реалізує відповідна підсистема контролю якості функціонування об'єкта.

Підсистема фільтрації виконує задачі аналізу параметричної інформації польоту, видалення викидів, викривлень, шумів, що присутні в ній, та наближення ділянок спотвореної інформації бортових приладів і датчиків ЛА до достовірних значень з метою подальшої обробки цієї інформації іншими підсистемами. Жодна з підсистем АСК не може коректно виконувати свої функції без попередньої якісної фільтрації параметричної інформації цією компонентою ПЗ АСК. Крім того, для забезпечення зручності виконання експертної оцінки, необхідно

ефективно виконувати задачу фільтрації польотної інформації в реальному часі, тобто в процесі її оброблення. Звідси випливає, що особливо необхідно досягти високого рівня якості функціонування саме для підсистеми фільтрації.

Наслідки низької якості ПЗ АСК та помилкові результати роботи базових підсистем, що оцінюють стан об'єкта контролю (рис. 1), можуть привести до катастрофічних наслідків [5]. Дійсно, навіть якщо мова йде про наземні системи оброблення польотної інформації, то у випадку невірної оцінки якості пілотування і роботи агрегатів та обладнання ЛА, існують ризики дозволити подальші польоти непідготовленому екіпажу чи борту ЛА, який має дефекти устаткування. Ці фактори можуть спричинити авіаційний інцидент або катастрофу, що безпосередньо впливає на безпеку життя людей.

Тому проблема підвищення безпеки функціонування об'єктів, контрольованих за допомогою АСК, є завжди актуальною [3; 4; 5]. Одним із шляхів досягнення цієї мети є забезпечення необхідного рівня якості [6] підсистем ПЗ АСК, що особливо важливо під час експлуатації систем даного класу, як систем критичного призначення. Наукова проблема полягає в забезпеченні повноти і адекватності моделі якості ПЗ підсистеми фільтрації вимогам до неї та конструктивності і достовірності методів оцінювання уніфікованих характеристик та властивостей якості, що входять до моделі.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У працях [3; 4; 5] піддана аналізу і підтверджена актуальність та важливість вирішення проблеми оцінювання якості підсистем АСК та створена технологія оцінювання якості ПЗ контролю польотів, як систем критичного призначення. Побудована технологія заснована на використанні створеної на базі стандартів [7; 8; 9] сертифікаційної моделі якості, яку можна застосувати для випробувань ПЗ АСК. У цих працях виконана розробка методів і засобів оцінювання атрибутів якості компонентів ПЗ контролю польотів, а також оцінювання інтегрального рівня якості ПЗ [6]. Однак проблема оцінювання якості фільтрації параметричної інформації польоту детально не розглядалася, а також не було створено технологію оцінювання якості для підсистеми фільтрації.

З метою обробки інформації цифрових сигналів, що описують стан об'єкта, як динамічної системи, та подальшої інтерпретації цієї інформації, як правило, обираються та

використовуються відповідні фільтри [10]. Визнано, що на сьогодні лідером цифрової фільтрації параметричної інформації (особливо навігаційних і траєкторних параметрів) в авіації, космонавтиці та інших галузях є сімейство фільтрів, заснованих на працях Калмана [11; 12; 13; 14]. У зв'язку з цим для підвищення якості фільтрації необхідно конструктивно і достовірно вирішити задачу визначення найкращого програмного компонента, який реалізує один з таких фільтрів і має найвищі показники якості.

Взагалі, результати корекції елементів вектора стану, який фільтрується, зазвичай перевіряються знаходженням оцінки математичного очікування  $\mu_e$  та дисперсії  $s_e^2$ . На підставі цих оцінок знаходяться коефіцієнти варіації, обчислюється співвідношення сигнал/шум, а також будуються різні критерії перевірки якості оцінювання. Однак, вочевидь, такий результат можна приймати лише умовно, як деяку гіпотезу, яка вимагає перевірки [15]. До того ж, на практиці такі операції є трудомісткими і особливо неефективні для застосування в системах реального часу [16].

Крім того, відомі методи оцінювання якості ПЗ фільтрації використовують різну аксіоматику та різні критерії для вибору множини показників якості, котрі є емпіричними і взагалі не визначені в стандартах. У них, також, не обґрунтовується вибір метрик та мір [6]. Тому в разі використання цифрових фільтрів з метою обробки масиву векторів стану об'єкта контролю по кожному параметру, що спостерігаються і контролюються ПЗ, набагато доцільніше використовувати уніфіковану оцінку, яка базується на обов'язковому визначенні базових характеристик оцінюваних методів фільтрації. Формалізовано таку оцінку можна отримати на основі моделі якості [1], яку застосуємо для оцінювання якості фільтрації. На основі такого підходу та відповідно до проведених випробувань і отриманих результатів, можна обґрунтовано обрати найбільш підходящий метод фільтрації.

#### Мета статті

Метою статті є побудова методів та засобів адекватного порівняння рівня якості компонентів ПЗ АСК, що використовуються для вирішення або обчислення задач одного типу, в даному випадку — множини програмних компонентів, які реалізують цифрові фільтри. Для комплексної оцінки якості такого ПЗ необхідно створити уніфікований базис специфікації вимог до якості та оцінювання якості, тобто побудувати модель, що заснована на множині уніфікованих характеристик якості із застосуванням обґрунтованого вибору метрик та мір [1; 2; 3; 4; 6].

На основі створеної моделі якості можна виконувати уніфіковану оцінку якості компонентів ПЗ, що реалізують відомі методи фільтрації, та визначати і обирати найкращі згідно рівня якості реалізації цифрові фільтри із множини запропонованих або конкуруючих.

### Викладення основного матеріалу

Як вихідні дані для випробувань якості фільтрації візьмемо цифровий сигнал  $z(x)$ , що складається з ряду значень вихідної функції  $u(x)$ , які взяті з різним інтервалом і штучно внесеними перекрученнями та спотвореннями:

$$z(x) = C(u(x)) + S,$$

де  $C(u(x))$  — вплив дії загрублення точності значень вихідної функції внаслідок оцифрування (в тому числі функції оцифрування аналогових параметрів стану об'єкта);  $S$  — випадкові відхилення (шум).

Для порівняння і отримання оцінок на основі моделі якості пропонується використати адаптивні фільтр Калмана [17] та  $\alpha\beta$ -фільтр [18], оскільки вони є найбільш часто використовувані на практиці під час вирішення задач фільтрації й оцінювання траєкторних і навігаційних параметрів літальних апаратів. Оскільки у загальному випадку динаміка контрольованого об'єкта і керуючі впливи, які застосовуються до нього, невідомі, для фільтра Калмана повинні бути встановлені похибка вимірювань  $R$  і підібраний параметр шуму  $Q$ , а для  $\alpha\beta$ -фільтра необхідно визначити коефіцієнти  $A$  і  $B$ . Вихідний код функцій, що реалізують обидва фільтра на мові програмування C, наведено нижче.

```
// Фільтр Калмана
float fQ = m_fQ, fR = m_fR;
float fK, fX0, fP0, fState =
g_pvi[0].fY, fCovariance = 0.1f;
g_pvi->fK = g_pvi->fY;
for (DWORD dwPoint = 1; dwPoint <
g_dwPointsIn; dwPoint++)
{
    fX0 = fState;
    fP0 = fCovariance + fQ;
    fK = fP0 / (fP0 + fR);
    fState = fX0 + fK *
(g_pvi[dwPoint].fY - fX0);
    fCovariance = (1.0f - fK) *
fP0;
    g_pvi[dwPoint].fK = fState;
}

//  $\alpha\beta$ -фільтр
float fAlpha = m_fAlpha, fBeta =
m_fBeta;
```

```
float fDT = 100.0f;
float fXK, fVK, fRK;
g_pvi->fA = g_pvi->fY;
float fXK_1 = g_pvi->fY, fVK_1 =
0;
for (DWORD dwPoint = 1; dwPoint <
g_dwPointsIn; dwPoint++)
{
    fRK = g_pvi[dwPoint].fY -
g_pvi[dwPoint - 1].fA;
    fXK = fXK_1 + (fVK_1 * fDT);
    fVK = fVK_1;
    fXK += fAlpha * fRK;
    fVK += (fBeta * fRK) / fDT;
    g_pvi[dwPoint].fA = fXK_1 =
fXK;
    fVK_1 = fVK;
}
```

Тут на кожному такті циклів виконується розрахунок подальшого відфільтрованого значення, при цьому результат і вихідні значення зберігаються в масиві  $g\_pvi$ , а коефіцієнти  $m\_fQ$ ,  $m\_fR$ ,  $m\_fAlpha$ , та  $m\_fBeta$  мають бути визначені заздалегідь.

За останні роки створено ряд міжнародних стандартів, які регламентують технології, процеси і продукти життєвого циклу ПЗ. Особливо вагомий внесок, що складається з новітніх стандартів, відбувся у процес стандартизації в інженерії якості програмних систем. Використання цих базових стандартів може послужити основою для побудови моделі якості підсистеми фільтрації автоматизованих систем контролю, однак потрібна адаптація деяких положень стандартів відповідно до принципів особливостей предметної області застосування АСК.

У наш час базисом, що регламентує показники якості ПС, є фундаментальний міжнародний стандарт ISO/IEC 25010 [1], який є розвитком стандарту [7]. У відповідності до стандарту [1] модель якості ПЗ складається з характеристик, підхарактеристик і атрибутів, кожний з яких вимірюється за допомогою використання зовнішніх і/або внутрішніх метрик. Результатом вимірювання будь-якого атрибуту (властивості ПЗ) за допомогою відповідної метрики є міра (показник) його якості.

Основною загальною вимогою до ПС реального часу є здатність забезпечувати заданий рівень коректного виконання базових функцій за певний проміжок часу [16]. Тому для підсистеми фільтрації цифрового сигналу вирішальними будуть характеристики функціональної придатності (підхарактеристика точність), ефективності

виконання (підхарактеристика швидкодія) та зручності використання (підхарактеристика придатність до роботи) [1]. Менш значимою є характеристика надійності (підхарактеристика відмовостійкість), яку, для спрощення, можна не враховувати, прийнявши вхідні дані й зовнішні впливи такими, що однаково не викликають порушень функціонування. Крім того, надійність забезпечується наявністю в моделі якості властивості точність (характеристика функціональна придатність) [1]. Високий рівень точності забезпечить належний рівень надійності та якості підсистеми фільтрації, підсистеми відтворення параметричної інформації (візуалізації параметрів польоту ЛА, в тому числі — траєкторних параметрів) і підсистеми допускового контролю. Включення ж до моделі якості підсистеми фільтрації характеристик захищеності, сумісності, супроводжуваності та мобільності в даному випадку недоцільне.

Пріоритетне практичне значення для забезпечення якості мають зовнішні атрибути, які безпосередньо вимірюються й оцінюються кінцевим користувачем. У загальному випадку в процесі обчислення рівня якості цих атрибутів використовуються метрики стандарту [19], але, зважаючи на специфіку Про контролю польотів, будемо використовувати власні метрики, однойменні відповідним атрибутам. Такі метрики будуть відображати принципові характеристичні властивості функціонування об'єкта, як динамічної системи. Слід відзначити, однак, що опис введених власних метрик виконаний за єдиною схемою, рекомендованою в стандартах [8; 9]. Це зроблено, в тому числі, також і для забезпечення врахування в моделі якості внутрішніх властивостей, оскільки, при певних умовах, вони теж можуть мати істотний вплив на загальний рівень якості ПС. Приступаючи до визначення метрик, зауважимо, що функціональні атрибути представляють результат роботи ПС в межах Про функціонування, що є найвагомим фактором.

Для ПЗ, що реалізує фільтр цифрового сигналу, таким зовнішнім атрибутом якості є точність, причому метрику атрибута оцінювання точності можна спрощено представити у вигляді середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  відфільтрованих значень  $u_f(x)$  від вихідних значень функції  $u(x)$  для  $n$  елементів кожного вектора стану об'єкта, що фільтрується:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_f(x_i) - u(x_i))^2}.$$

Характеристика ефективності пов'язана з визначенням об'єму витрат ресурсів,

необхідних для швидкодії виконання операцій підсистеми фільтрації. В цьому випадку атрибутом є час  $T$  розрахунку значення  $u_f(x)$ , а також можуть бути прийняті до уваги обсяг необхідної для цього оперативної пам'яті і витрати на ініціалізацію підсистеми. Внутрішніми атрибутами ефективності (швидкодія) є оцінка складності  $\Theta$  виконуваного алгоритму [20] і кількість задіяних при цьому операторів  $N$ .

Практичність підсистеми фільтрації обумовлена, в першу чергу, залученням характеристики зручності використання з підхарактеристикою придатність до роботи. Взагалі, для коректної роботи фільтрів необхідно визначити коефіцієнти, що є додатковою турботою як для користувачів, так і для розробників ПЗ. Тому в якості зовнішньої або внутрішньої метрики для вимірювання цього атрибуту можна взяти кількість коефіцієнтів  $X$ , яку достатньо задати для налаштування і коректного функціонування підсистеми на основі кожного з оцінюваних фільтрів.

Кожна з мір наведених атрибутів отримується в результаті вимірювання по відповідних метриках для кожного фільтра. Отриману міру слід помножити на ваговий коефіцієнт  $w_i$ , який буде визначати ступінь пріоритету метрики порівняна з іншими, або приводити їх значення до сумірних величин, зважаючи на те, що отримані значення мір оцінюються за правилом: чим менше, тим краще. Обрані властивості якості та їх метрики представлені в таблиці.

На етапі визначення значень середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  необхідно проводити серію вимірювань, оскільки значення  $\sigma$  сильно залежать від введеного випадкового відхилення (шуму)  $S$ , а також від типу функції  $u(x)$ .

Для полінома  $u(x) = ax^2 + bx + c$  з випадковим відхиленням  $S = \pm 1$  і округленням  $C(u(x))$  до цілих, при проведенні 1000000 вимірювань, міри  $\sigma$  для фільтрів Калмана і  $\alpha\beta$ -фільтра складають відповідно 0,56 і 0,5 (рис. 2).

Для зручності подання в моделі якості, отримані значення можна привести до певного показника, наприклад до 1, за допомогою використання вагового коефіцієнта  $w_\sigma$  таким чином:

$$w_\sigma = \frac{1}{\sigma_{\min}} = \frac{1}{0,5}$$

Тоді оціночні значення мір в моделі становитимуть 1,12 і 1. Час  $T$  розрахунку значення  $u_f(x)$  залежить не тільки від внутрішньої реалізації і особливостей використовуваного фільтра, але ще й від властивостей операційного середовища і апаратної платформи, де функціонує підсистема.

Таблиця

## Характеристики, підхарактеристики, атрибути та метрики моделі якості підсистеми фільтрації

Характеристика, підхарактеристика, атрибути та метрики якості	Представлення	Величина	Тип вимірювання	Фільтр Калмана (міри)	αβ-фільтр (міри)
<b>Функціональна придатність, точність:</b>					
середньоквадратичне відхилення, $\sigma$	external	ordinal	indirect	1.12	1
<b>Ефективність виконання, швидкодія:</b>					
час розрахунку, $T$	external	absolute	indirect	1.6	1
оцінка складності алгоритму, $\Theta$	internal	nominal	direct	1	1
кількість мультиплікативних операторів, $N_m$	internal	absolute	direct	1	1.33
кількість адитивних операторів, $N_a$	internal	absolute	direct	1.25	1
кількість інших операторів, $N_o$	internal	absolute	direct	1	1.375
<b>Зручність використання, придатність до роботи:</b>					
кількість коефіцієнтів в алгоритмі фільтрації, $X$	external	absolute	direct	2	2

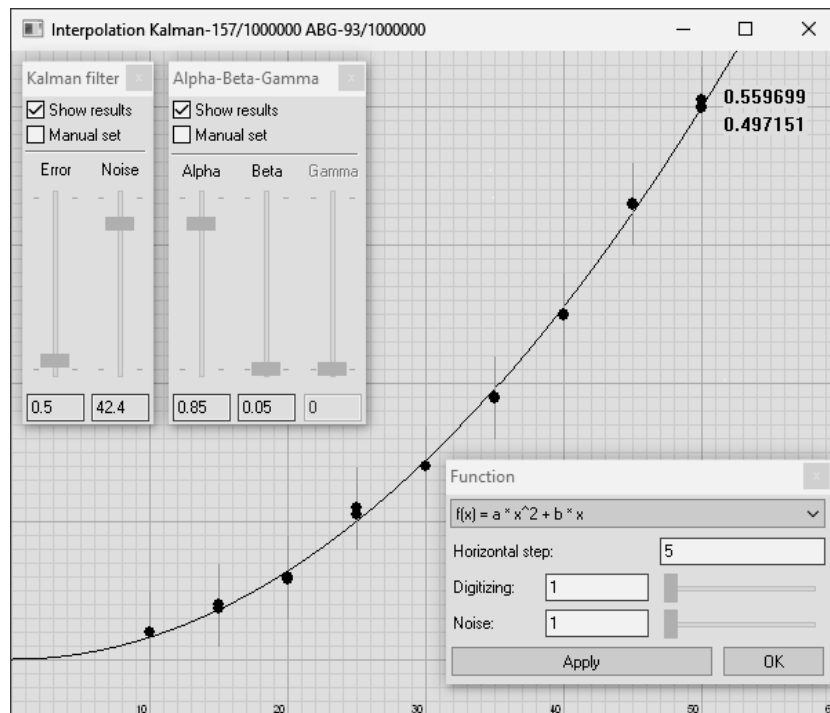


Рис. 2. Фільтрація спотвореного сигналу з заданими параметрами

Тому метрика часу  $T$  за класифікацією стандартів вважається непрямою і, наприклад, на процесорі Intel® Pentium® G630 час розрахунку  $u_f(x)$  для фільтра Калмана і αβ-фільтра 32-розрядних значень з плаваючою точкою становить відповідно 8 і 5 мікросекунд. Тому з урахуванням коефіцієнта  $w_T$ :

$$w_T = \frac{1}{5},$$

оціночні значення мір становитимуть відповідно 1,6 і 1. Обидва алгоритми реалізації фільтрів не містять вкладених циклів і викликів зовнішніх підпрограм, а їх обчислювальна складність  $\Theta(n)$  є лінійною.

Однак, зважаючи на особливу важливість, цей атрибут завжди доцільно включати до моделі якості, а значення мір і коефіцієнти  $w_\Theta$  для обох фільтрів приймем рівними 1. У даній реалізації загальна кількість операторів  $N$ , в тому числі, кількість мультиплікативних  $N_m$ , адитивних  $N_a$  та всіх інших  $N_o$  операторів для фільтра Калмана рівні відповідно 16(3, 5, 8), а для  $\alpha\beta$ -фільтра — 19(4, 4, 11). Причому приведений алгоритм фільтра Калмана включає операцію ділення з плаваючою точкою зі змінними аргументами, що призводить до істотного збільшення часу розрахунку  $u_i(x_i)$ . Оскільки у загальному випадку характеристики апаратних платформ щодо продуктивності різних класів операторів невідомі, міри операторів  $N$  ( $N_m, N_a, N_o$ ) можна взяти рівними вихідним значенням, а вагові коефіцієнти  $w_N$  для них взяти відповідно до мінімальних значень у кожній парі, тобто:

$$w_{N_m} = \frac{1}{3}, \quad w_{N_a} = \frac{1}{4}, \quad w_{N_o} = \frac{1}{8}.$$

Нарешті відзначимо, що коефіцієнти  $R$  і  $Q$  для фільтра Калмана та  $A$  і  $B$  для  $\alpha\beta$ -фільтра, на практиці визначаються, виходячи з властивостей ПС і ПрО її застосування. Однак, така операція є досить трудомісткою, до того ж, для систем реального часу вона має виконуватися багаторазово для різних елементів вектора стану об'єкта контролю протягом усього спостережуваного інтервалу його функціонування. У моделі, як приклад, коефіцієнти визначаються підбором з дискретним кроком впритул до отримання найменшого середньоквадратичного відхилення, але з метою спрощення обчислення метрик  $X_i$  їх міру можна взяти  $X = 2$  для обох фільтрів з одиничними коефіцієнтами  $w_X = 1$ . Сукупна оцінка якості обох фільтрів для підсистеми фільтрації представлена у вигляді діаграми на рис. 3, де використані такі позначення: 1 — функціональність, 2 — ефективність, 3 — зручність використання, 4 — фільтр Калмана, 5 —  $\alpha\beta$ -фільтр (див. також таблицю).

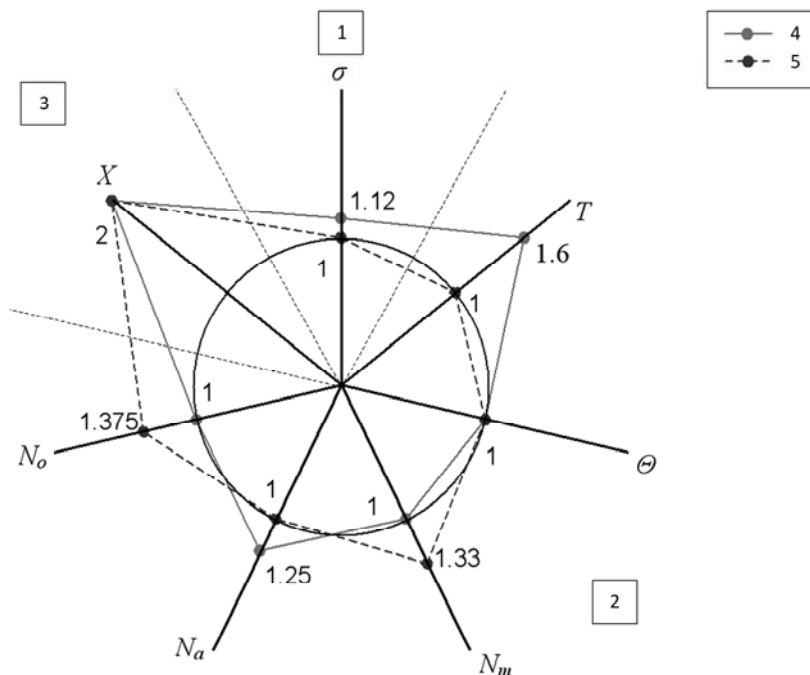


Рис. 3. Діаграма оцінювання якості ПЗ фільтрації

**Висновки**

Таким чином, незважаючи на більш громіздку внутрішню реалізацію алгоритму  $\alpha\beta$ -фільтра, в умовах випробувань підсистема на основі фільтра Калмана виявилася в 1,12 раз менше функціональною з точки зору точності та в 1,6 раз менш ефективною за швидкістю порівняно з підсистемою, де був задіяний  $\alpha\beta$ -фільтр. За характеристикою якості зручність використання зовнішні та внутрішні міри придатності до

роботи ПЗ в реальному часі обох випадках виявилися досить близькими.

Побудована модель якості адекватна вимогам до ПЗ фільтрації і містить сукупність обраних характеристик, критеріїв відповідності та метрик, що дає можливість отримати уніфікований метод оцінювання рівня якості для різних фільтрів сімейства Калмана, а також інших цифрових фільтрів та обрати найкращий фільтр для підсистеми фільтрації з декількох конкуруючих.

Дійсно, шляхом виконаного вище аналізу модель оцінювання якості фільтрів була дещо спрощена, але за аналогією її можна досить легко модифікувати, адаптувати і використати в інших споріднених областях застосування, особливо в ПрО, де функціонують критичні ПС, для яких стан об'єкта контролю оцінюється на основі параметричної інформації датчиків або вимірювальних приладів.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] ISO/IEC 25010. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software Quality models. 2011. 34 p. URL: <http://www.iso.org>; <http://www.iec.ch> (access date 12.09.2020)
- [2] ДСТУ 3275–95. Системи автоматизованого оброблення польотної інформації наземні. Загальні вимоги. [Чинний від 1996–07–01]. К. : Держстандарт України, 1996. 7 с.
- [3] Райчев І. Е., Харченко О. Г. Концепція побудови сертифікаційної моделі якості програмних систем. *Проблеми програмування*. 2006. №2-3. С. 275–281.
- [4] Райчев І. Е. Проблеми сертифікації програмного забезпечення автоматизованих систем контролю // *Вісник НАУ*. 2004. №1. С. 23–28.
- [5] Райчев І. Е., Харченко О. Г., Василенко В. А. Визначення вимог до програмних систем критичного призначення з використанням засобів доменного аналізу. *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр.* К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці. 2019. Вип. 87. С. 41–48.
- [6] Андон Ф. И., Коваль Г. И., Коротун Т. М. и др. Основы инженерии качества программных систем. К.: Академперіодика, 2007. 672 с.
- [7] ISO/IEC 9126-1. Software engineering — Product Quality — Part 1: Quality model, 2001. 26 p. URL: <http://www.iso.org> ; <http://www.iec.ch> (access date 16.10.2020)
- [8] ISO/IEC 9126-2. Software engineering — Product Quality. Part 2: External Metrics, 2003. 86 p. URL: <http://www.iso.org> ; <http://www.iec.ch> . (access date 16.10.2020)
- [9] ISO/IEC 9126-3. Software engineering — Product Quality.— Part 3: Internal Metrics, 2003. 66 p. URL: <http://www.iso.org>; <http://www.iec.ch> . (access date 16.10.2020)
- [10] Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 856 с.
- [11] Андрашитов Д. С., Костоглотов А. А., Лазаренко С. В. и др. Динамическая фильтрация методом объединенного принципа максимума. *Информация и космос*. 2018. №3. С. 70–74.
- [12] Лобатый А. А., Радкевич А. С. Пошаговая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации случайных сигналов. *Системный анализ и прикладная информатика*. 2019. №1. С. 35–40.
- [13] Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч.2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 180 с.
- [14] Зинова В. В. Синтез и исследование алгоритмов фильтрации, применяемых на этапе вторичной обработки радиолокационной информации. *Политехнический молодежный журнал*. 2018. №8. С. 1–13.
- [15] Коршунов Ю. М. Оценка качества работы цифровых фильтров на основе искусственно созданной имитационной модели сигнала и помехи. *Вестник РГРТУ*. 2010. №1. С. 7–11.
- [16] Мартин Дж. Программирование для вычислительных систем реального времени. М. : Мир, 1975. 360 с.
- [17] Браммер Л., Зифлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
- [18] Penoyer Robert H. The Alpha-Beta Filter. *C Users Journal*. R&D Publications Inc., Lawrence, KS United States. –July 1993. Pp. 73–87.
- [19] ISO/IEC 25023. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Measurement of system and software Product Quality. 2017. 45 p. URL: <http://www.iso.org> ; <http://www.iec.ch> . (access date 16.10.2020)
- [20] Марченков С. С., Матросов В. Л. Сложность алгоритмов и вычислений. *Итоги науки и техники: сб. научн. трудов*. М.: ВИНТИ, 1979. Т.16. С.103–149.

### Райчев І. Е., Федченко С. В., Харченко О. Г., Савченко А. С. ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ЦИФРОВОГО СИГНАЛУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ДЛЯ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Стаття присвячена розробленню методів і засобів уніфікованої оцінки якості програмного забезпечення фільтрації цифрового сигналу як параметричної інформації в реальному часі для систем критичного призначення. Був досліджений клас програмного забезпечення автоматизованих систем контролю польотів літальних апаратів, як типових представників систем критичного призначення, що потребують обов'язкового проходження атестації та сертифікації на відповідність початковим вимогам якості.



Програмні системи контролю вирішують загальні задачі відтворення контрольованої параметричної інформації (візуалізації параметрів польоту), контролю виходів параметрів об'єкта за обмеження (допускового контролю), контролю якості функціонування об'єкта та фільтрацію параметричної інформації. Особливо важливою, хоча і невеликою за обсягом, є підсистема фільтрації. Підсистема фільтрації виконує задачі аналізу параметричної інформації польоту, видалення викидів, викривлень, шумів та наближення ділянок спотвореної інформації датчиків до достовірних значень з метою подальшої обробки цієї інформації іншими підсистемами, які не можуть коректно виконувати свої функції без попередньої якісної фільтрації. В процесі аналізу виявлено, що для забезпечення зручності виконання експертної оцінки, необхідно якісно виконувати задачу фільтрації польотної інформації в реальному часі, тобто в процесі її оброблення.

Наслідки низької якості та помилкові результати роботи базових підсистем, що оцінюють стан об'єкта контролю, можуть привести до катастрофічних наслідків а тому проблема підвищення безпеки функціонування об'єктів, контрольованих за допомогою автоматизованих систем контролю є завжди актуальною. Одним із шляхів досягнення цієї мети є забезпечення необхідного рівня якості основних підсистем, що особливо важливо під час експлуатації систем критичного призначення.

Відомі методи оцінювання якості програмного забезпечення фільтрації використовують різну аксіоматику та різні критерії в процесі вибору множини показників якості. В них, також, не обґрунтовується вибір метрик та мір. Тому для цифрових фільтрів, що обробляють масиви векторів стану об'єкта контролю по кожному параметру, слід використовувати уніфіковану оцінку з обов'язковим визначенням базових характеристик та атрибутів методів фільтрації, що порівнюються. Для цього пропонується застосувати формалізовану оцінку на основі моделі якості сучасного стандарту ISO/IEC 25010 з групи стандартів SQuaRE.

Наукова проблема, що досліджена та вирішена у статті, полягає в забезпеченні повноти і адекватності моделі якості програмного забезпечення підсистеми фільтрації вимогам до неї та конструктивності і достовірності методів оцінювання уніфікованих характеристик і властивостей якості, що входять до моделі.

Побудована модель якості адекватна вимогам до програмного забезпечення фільтрації і містить сукупність обраних характеристик, критеріїв відповідності та метрик, що дає можливість отримати уніфікований метод оцінювання рівня якості для різних фільтрів сімейства Калмана, а також інших цифрових фільтрів та обрати більш ефективний та точний фільтр для підсистеми фільтрації з декількох конкуруючих, що підвищує достовірність програмних систем контролю та безпеку функціонування літальних апаратів.

Створена в статті модель якості програмного забезпечення фільтрації була застосована для порівняння і отримання оцінок якості адаптивних фільтрів Калмана та  $\alpha$ -фільтра, які найбільш часто використовувалися на практиці для вирішення задач фільтрації траєкторних і навігаційних параметрів літальних апаратів.

Уніфіковану модель якості за аналогією можна досить легко модифікувати, адаптувати і використати для оцінювання рівня якості програмних компонентів фільтрації цифрового сигналу в інших споріднених областях, особливо в предметних областях, де функціонують критичні програмні системи, для яких стан об'єкта контролю оцінюється на основі параметричної інформації датчиків або вимірювальних приладів.

**Ключові слова:** оцінювання якості; модель якості фільтрації; критичні програмні системи.

**Raichev I., Fedchenko S., Kharchenko O., Savchenko A.**

## **EVALUATION OF QUALITY OF DIGITAL SIGNAL FILTRATION SOFTWARE IN REAL TIME FOR CRITICAL SYSTEMS**

*The article is devoted to the development of methods and means of unified evaluation of quality of digital signal filtering software in real time for critical systems. The software class of automated flight control systems of aircraft, as typical representatives of critical systems that require certification to meet initial quality requirements, was studied.*

*Software control systems solve the general problems of reproduction of controlled parametric information (visualization of flight parameters), monitoring of exits of object parameters under restriction (tolerance control), quality control of object functioning and filtering of parametric information. Especially important, although small in size, is the filtration subsystem. The filtering subsystem performs the tasks of analysis of parametric flight information, removal of emissions, distortions, noise and approximation of areas of distorted sensor information to reliable values in order to further process this information by other subsystems that can not properly perform their functions without prior quality filtering. In the process of analysis it was found that to ensure the convenience of expert assessment, it is necessary to qualitatively perform the task of filtering flight information in real time.*

*The consequences of low quality and erroneous results of the basic subsystems that assess the condition of the object of control can lead to catastrophic consequences, and therefore the problem of improving the safety of objects controlled by automated control systems is always relevant. One of the ways to achieve this goal is to ensure the required level of quality of the main subsystems, which is especially important during the operation of critical systems.*

*Besides known methods of an estimation of quality of the filtering software use different axiomatics and different criteria in the process of selecting a set of quality indicators. They also do not substantiate the choice of metrics and measures. Therefore, for digital filters that process arrays of state vectors of the object of monitoring for each parameter, you should use a unified estimate with the mandatory definition of the basic characteristics and attributes of*

*the filtering methods being compared. To do this, it is proposed to use a formalized assessment based on the quality model of the modern standard ISO/IEC 25010 from the group of standards SQuaRE.*

*The scientific problem investigated and solved in the article is to ensure the completeness and adequacy of the quality model of the filtering software subsystem to its requirements and the constructiveness and reliability of methods for evaluating the unified characteristics and quality properties included in the model.*

*The built quality model is adequate to the requirements of the filtering software and contains a set of selected characteristics, compliance criteria and metrics, which allows to obtain a unified method of quality assessment for different Kalman's filters and other digital filters and choose a more efficient and accurate filter for the filtering subsystem of several competitors, which increases the reliability of software monitoring systems and safety of aircraft.*

*The quality model of filtering software created in the article was used to compare and obtain quality estimates of adaptive Kalman filter and  $\alpha\beta$ -filter, which are most often used in practice to solve the problems of filtering trajectory and navigation parameters of aircraft.*

*Unified quality model by analogy can be easily modified, adapted and used to assess the quality of software components of digital signal filtering in other related areas, especially in subject areas where critical software systems operate, for which the state of the object is monitored based on parametric information sensors.*

**Keywords:** evaluation of quality; filtration quality model; critical software systems.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2021 р.

Прийнято до друку 01.03.2021 р.