

УДК 681.518

**В.В. Скачков<sup>1</sup>, д.т.н., проф.****О.М. Єфимчиков<sup>1</sup>, к.т.н., доц.****О.В. Ткачук<sup>1</sup>****В.І. Павлович<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Військова академія (м. Одеса), Україна*<sup>2</sup>*Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса, Україна*

## **КРИТЕРІАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ АДАПТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ ВНУТРІШНЬОСИСТЕМНИХ ЗБУРЕНЬ**

*Виходячи з основних постулатів теорії збурень запропоновано аналітичний підхід до оцінювання якості адаптації інформаційно-виміральної системи до зовнішнього середовища в умовах внутрішньосистемних збурень шляхом обчислювання критеріальних показників. Такими показниками обрано відношення критеріальних функціоналів, що визначаються усередненням миттєвих значень функцій якості адаптації системи з врахуванням внутрішньосистемних збурень. Для ілюстрації можливостей розробленого підходу наведені результати кількісного оцінювання якості адаптації  $N$ -мірної інформаційно-виміральної системи, параметричний вектор якої задовольняє рівнянню Вінера.*

**Ключові слова:** *критеріальні показники, адаптація, інформаційно-виміральною системою, внутрішньосистемні збурення, критеріальний функціонал.*

### **Постановка проблеми. Аналіз останніх досягнень і публікацій**

Реальні інформаційно-виміральною системи (ІВС), як правило, функціонують в умовах апріорної інформаційної невизначеності стосовно стану самих систем і середовища їх існування. У таких умовах для вирішення інформаційно-виміральною задач застосовуються адаптивні методи, що дає можливість приймати відповідні рішення на основі використання лише поточних результатів вимірювань, компенсуючи таким чином апріорну невизначеність.

Основні теоретичні принципи адаптації, а також методи синтезу оптимальних інформаційно-виміральною систем, призначених для роботи в умовах невизначеності й недостатності апріорної інформації широко освітлені в роботах [1-4]. Питання теорії і практики адаптивних систем, алгоритми їх функціонування і різні напрямки адаптивної обробки інформації, включаючи синтез різноманітних адаптивних фільтрів, розглянуті у роботах [5, 6].

У класичному поданні адаптивне поведіння фізичного об'єкта стимулює зовнішнє середовище й тому до стимулів адаптації ІВС відносять зовнішні стохастичні перешкоди з апріорно невідомими розподілами або параметрами цих розподілів. Однак, поряд з перешкодами, які діють на систему ззовні, у самій системі також присутні випадкові збурення, які породжують внутрішньосистемну невизначеність. Джерела внутрішньосистемних збурень завжди існують у будь-якій реальній ІВС. Безумовно, до класу внутрішньосистемних збурень відноситься внутрішній шум системи. Внутрішній шум, як реальне поняття внутрішньосистемної перешкоди, завжди враховується у відомих методах синтезу адаптивних систем і визначає їх потенційні можливості. Однак, загальноприйняте обмеження всього класу внутрішньосистемних збурень поняттям «внутрішній шум» звужує проблему адаптації через ігнорування внутрішньосистемної невизначеності, породжуваної присутністю у системі шумів квантування і дискретизації, обчислювального шуму, а також різноманітних факторів, що декорелюють результати вимірювань. При впливі на інформаційно-виміральною систему «пофарбованого» шуму відомі алгоритми параметричної

адаптації можуть виявитися настільки чутливими до рівня внутрішньосистемних збурень, що їх практичне застосування буде недоцільним. Це найбільше імовірно, коли кореляційна матриця спостережень має погану обумовленість і великий дефект [7].

Розроблені на сьогодні методи оцінки впливу внутрішньосистемних збурень на ефективність адаптивної обробки сигналів мають частковий характер і обмежені дослідженням фізичної сутності явищ. У відомій постановці проблема синтезу оптимальної ІВС розглядається без врахування внутрішньосистемних процесів, що збурюють. Це приводить до неадекватності математичної моделі тим реальним умовам, у яких передбачається функціонування системи. В результаті, практичні можливості інформаційно-вимірювальної системи не відповідають необхідному критерію оптимальності й виявляються значно нижче потенційних. Відсутність єдиного методологічного підходу до проблеми адаптації в умовах внутрішньосистемної невизначеності не дозволяє надати будь-які конструктивні рекомендації до практичної розробки ІВС, інваріантних до присутності внутрішньосистемних збурень. Тому, цілком очевидно, що становитися актуальною задача визначення спеціальних критеріальних показників оцінювання якості адаптації інформаційно-вимірювальної системи до зовнішніх перешкод в умовах , внутрішньосистемних збурень.

### Формулювання мети роботи

Метою роботи є розробка методологічного підходу до оцінювання якості адаптивної інформаційно-вимірювальної системи, згідно якого єдиною мірою її ефективності обирається критеріальний функціонал, котрий за своїм визначенням об'єднує параметри корисних сигналів, зовнішніх і внутрішньосистемних перешкод.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Відповідно до відомих методів декомпозиції складних систем у будь-якої адаптивної ІВС за структурною та функціональною ознаками можна виділити основні типові компоненти, тобто підсистеми та взаємозв'язки між ними [3, 6]:

– підсистему спостереження, процес функціонування якої описується векторно-матричним рівнянням

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{S}, \mathbf{N}, t), \quad (1)$$

де  $f(*)$  – оператор, який визначає перетворення змінних системи та характеризує взаємодію системи з зовнішнім середовищем;

$\mathbf{Y}$  – вектор, що відображує результат реакції системи на зовнішні збурення  $\mathbf{N}$  та корисний сигнал  $\mathbf{S}$ ;

– підсистему еталонів, яка формує бажану реакцію адаптивної системи  $\mathbf{S}_0$  на дії векторного сигналу  $\mathbf{Y}$ . Звичайно, така реакція являє собою опорне значення критерію якості, яке задається або обчислюється за результатами процесів спостереження;

– підсистему помилки, на виході якої спостерігається сигнал неузгодженості (сигнал помилки)  $\mathbf{E} = \mathbf{S}_0 - \hat{\mathbf{S}}$  оцінки корисних сигналів  $\hat{\mathbf{S}}$  з сигналами еталону  $\mathbf{S}_0$ . Сигнал помилки подається на відповідний вхід підсистеми адаптації для корегування її параметрів та характеристик;

– підсистему адаптації, в якій шляхом застосування операцій корегування та перетворення сигналів помилки  $\mathbf{E}$  та спостереження  $\mathbf{Y}$  формується оцінки  $\hat{\mathbf{S}}$ . Алгоритм адаптивного корегування  $\hat{\mathbf{S}}$  має наступний вигляд

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}(\mathbf{Y}, \mathbf{E}). \quad (2)$$

Узагальнена схема адаптивної системи та взаємозв'язки між її підсистемами на основі

процедурного розподілення функцій згідно (1) і (2) наведено на рис.1. Представлене розподілення адаптивної системи на підсистеми носить нестандартний характер, оскільки об'єкт управління в структурі не фігурує в явному вигляді, а сигнал помилка  $\mathbf{E}$  має більш узагальнений вигляд, ніж звичайна помилка прогнозування. Разом з тим, дана структура дозволяє зосередити увагу на особливості подання внутрішньосистемних перешкод, котрі присутні в кожній з підсистем адаптивної системи.

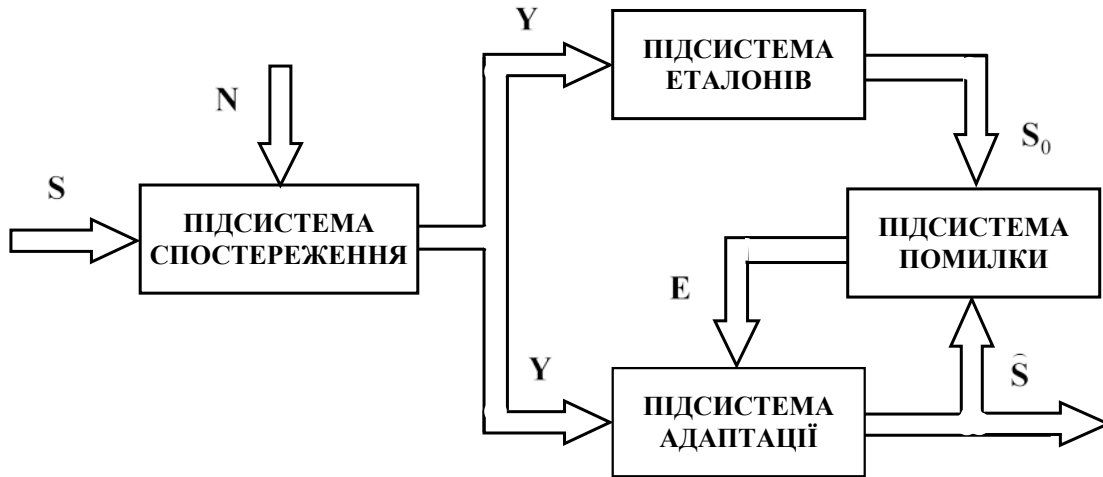


Рис.1 – Взаємозв’язок між компонентами адаптивної системи

Поставимо у відповідність до ситуації  $(\mathbf{Y}, \mathbf{E})$  вихідні дані інформаційно-вимірювальної задачі  $\Psi \sim \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{E})$ , які формулюються за результатами обчислювальних операцій на виходах підсистем спостереження та помилки (рис. 1). Перепишемо вираз для алгоритму адаптивного корегування (2)

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}(\Psi), \quad (3)$$

де  $\mathbf{W}(\ast)$  – оператор класу багатомірних перетворень, що зв’язують рішення алгоритму  $\hat{\mathbf{S}}$  з ситуацією  $(\mathbf{X}, \mathbf{E})$ .

Погоджуючись з тлумаченням (3), як алгоритм адаптивної обробки просторово-часових сигналів, пропонується оцінити його ефективність за допомогою критеріального функціоналу  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$ . Останній визначається усередненням миттєвих значень функції якості  $\xi\{\mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi)\}$

$$J\{\mathbf{W}(\Psi)\} = \int \xi\{\mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi)\} dF(\mathbf{X}), \quad (4)$$

за умови вихідних даних

$$\Psi = \int \Psi(\mathbf{X}, \mathbf{E}) dF(\mathbf{X}), \quad (5)$$

де  $F(\mathbf{X})$  – функція розподілу випадкового процесу  $\mathbf{X}$ , що спостерігається зі щільністю  $p(\mathbf{X})$ :  $dF(\mathbf{X}) = p(\mathbf{X}) d\mathbf{X}$ .

Зрозуміло, що оптимальному алгоритму обробки просторово-часових сигналів  $\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$  відповідає екстремум критеріального функціонала (4)

$$J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\} = \text{extr}_{\mathbf{W}(\Psi) \in \Pi} J\{\mathbf{W}(\Psi)\}. \quad (6)$$

Практично в усіх можливих ситуаціях вихідні дані (5), що необхідні для рішення вимірювально-інформаційної задачі за критерієм (4), піддані впливу перешкод, джерела яких присутні в кожній з розглянутих підсистем адаптивної інформаційно-вимірювальної системи (рис. 1).

Як відомо [6], дослідження властивостей будь-якої ІВС, що адаптується до зовнішніх перешкод в умовах внутрішньосистемних збурень, припускає вибір загального підходу до оцінки впливу збурень

подібного класу на міру ефективності системи, обумовлену її критеріальним функціоналом. На підставі теорії збурень лінійної алгебри [7-9], визначимо загальний підхід до оцінки впливу внутрішньосистемних перешкод на функціональні можливості ІВС. Позначивши оцінки вихідних даних, що знаходяться під впливом випадкових внутрішньосистемних перешкод, через  $\hat{\Psi}$ , а результат їхньої обробки за алгоритмом  $\mathbf{W}(\ast)$  через  $\tilde{\mathbf{S}}$ , запишемо

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{W}(\hat{\Psi}) = \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi), \quad (7)$$

де  $\Delta\Psi$  – випадкові внутрішньосистемні збурення вихідних даних.

Розрахований за формулою (7) сигнал помилки рішення характеризується елементом  $\Delta\Psi = \hat{\Psi} - \Psi$ , який прийнято називати еквівалентним збурюванням [3, 6-9]. Якщо формулу (7) переформатувати

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{W}(\Psi + \Delta\Psi), \quad (8)$$

то еквівалентним збурюванням  $\Delta\Psi$  можна апроксимувати внутрішньосистемну перешкоду, яка адитивно збурює вихідні дані, сформовані в адаптивній системі для рішення інформаційно-виміральної задачі за алгоритмом  $\mathbf{W}(\ast)$ . Дослідження залежності критеріального показника адаптивної ІВС від рівня внутрішньосистемних збурень припускає введення на безлічі вихідних даних  $\Psi$  метрики, що підходить для оцінювання величини  $\Delta\Psi$ .

Критеріальний функціонал адаптивної ІВС, у якій присутні внутрішньосистемні збурювання  $\Delta\Psi$ , відрізняючись від (4) аргументом, має вигляд

$$J \{ \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) \} = \int \int \int \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) \} p(\Psi, \Delta\Psi) d\mathbf{X} d(\Delta\Psi). \quad (9)$$

Відсутність статистичного зв'язку між випадковими сигналами спостережень  $\mathbf{X}$  та внутрішньосистемних збурень  $\Delta\Psi$  дозволяє переписати математичне представлення критеріального функціоналу (3.9) у наступній формі

$$J \{ \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) \} = \int \int \xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) \} p(\mathbf{X}) p(\Delta\Psi) d\mathbf{X} d(\Delta\Psi). \quad (10)$$

Вихідні дані  $\Psi$  для інформаційно-виміральної задачі, що вирішується в багатомірній адаптивній ІВС, можна представити у векторно-матричній формі (1). Разом з тим, за формального підходу до розробки методики дослідження впливу внутрішньосистемних збурень на ефективність адаптивної ІВС, можна дещо абстрагуватися від будь-якої специфіки представлення вихідних даних та правил виконання векторно-матричних операцій над ними. Така абстракція не обмежує узагальненого підходу, оскільки легко усувається при розгляді конкретного алгоритму обробки інформаційних даних, оптимального згідно заданого критерію.

Припускаючи, що рівняння (3) диференціюється по параметру  $\Psi$ , пропонується провести його розкладання окіл  $\Delta\Psi$  зазначеного параметра. Обмежуючись приростом першого порядку малості, отримуємо рівняння

$$\mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) = \mathbf{W}(\Psi + \Delta\Psi) = \mathbf{W}(\Psi) + \frac{\partial \mathbf{W}(\Psi)}{\partial \Psi} \cdot \Delta\Psi. \quad (11)$$

Підставивши значення (11) в рівняння критеріального функціоналу (10), маємо такий результат:

$$J \{ \mathbf{W}(\Psi, \Delta\Psi) \} = \int \int \xi \{ \mathbf{Y}, \mathbf{W}(\Psi) + \Delta \mathbf{W}(\Delta\Psi) \} p(\mathbf{X}) p(\Delta\Psi) d\mathbf{X} d(\Delta\Psi), \quad (12)$$

де  $\Delta \mathbf{W}(\Delta\Psi)$  – зсування аргументу критеріального функціоналу під впливом внутрішньосистемних збурень, яке дорівнює

$$\Delta \mathbf{W}(\Delta \Psi) = \frac{\partial \mathbf{W}(\Psi)}{\partial \Psi} \cdot \Delta \Psi. \quad (13)$$

З врахуванням того, що функція  $\xi \{*\}$  в рівнянні (12) має безперервні похідні по параметру  $\mathbf{W}(\Psi)$ , її формальне розкладання в межах аргументу  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$  приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi) + \Delta \mathbf{W}(\Delta \Psi) \} = & \xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi) \} + \frac{\partial \varphi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi) \}}{\partial \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)} \cdot \Delta \mathbf{W}(\Delta \Psi) + \\ & + \Delta \mathbf{W}^T(\Delta \Psi) \frac{\partial^2 \xi \{ \mathbf{Y}, \mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi) \}}{\partial \mathbf{W}_{\text{опт}}^2(\Psi)} \cdot \Delta \mathbf{W}(\Delta \Psi), \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$  – оператор, який позначає результат оптимальної обробки сигналу.

Після підстановки варіації (13) у вираз (14) маємо результат:

$$\xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) + \Delta \mathbf{W}(\Delta \Psi) \} = \xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} + \xi_1 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} \Delta \Psi + \xi_2 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} \Delta \Psi^2, \quad (15)$$

$$\text{де } \xi_1 \{ \mathbf{Y}, \mathbf{W}(\Psi) \} = \frac{\partial \varphi \{ \mathbf{Y}, \mathbf{W}(\Psi) \}}{\partial \mathbf{W}(\Psi)} \cdot \frac{\partial \mathbf{W}(\Psi)}{\partial \Psi}, \quad \xi_2 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \}}{\partial \mathbf{W}^2(\Psi)} \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{W}(\Psi)}{\partial \Psi} \right)^2.$$

В зв'язку з незалежністю процесів  $\Delta \Psi$  і  $\mathbf{X}$  результат інтегрування виразу (15) відповідно до критеріального функціоналу (10) приймає вид:

$$\begin{aligned} J \{ \mathbf{W}(\Psi, \Delta \Psi) \} = & \int \xi \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \times \int p(\Delta \Psi) d(\Delta \Psi) + \\ & + \int \xi_1 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \times \int \Delta \Psi p(\Delta \Psi) d(\Delta \Psi) + \\ & + \int \xi_2 \{ \mathbf{Y}, \mathbf{W}(\Psi) \} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \times \int \Delta \Psi^2 p(\Delta \Psi) d(\Delta \Psi). \end{aligned} \quad (16)$$

Враховуючи, що в аналітичному запису (16)  $\int p(\Delta \Psi) d(\Delta \Psi) = 1$ , та, позначивши результати інтегрування залежностей  $\xi_1 \{*\}$  і  $\xi_2 \{*\}$ , можна записати результат обробки вхідних даних в умовах внутрішньосистемних збурень

$$\begin{aligned} S_1 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} &= \int \xi_1 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X}; \\ S_2 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} &= \int \xi_2 \{ \mathbf{X}, \mathbf{W}(\Psi) \} p(\mathbf{X}) d\mathbf{X}. \end{aligned} \quad (17)$$

Спираючись на логіку проведених міркувань, можна відобразити залежність критеріального функціонала адаптивної ІВС (10) від статистичних моментів внутрішньосистемних збурень

$$J \{ \mathbf{W}(\Psi, \Delta \Psi) \} = J \{ \mathbf{W}(\Psi) \} + S_1 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} \cdot M(\Delta \Psi) + S_2 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} \cdot D(\Delta \Psi), \quad (18)$$

де  $M(\Delta \Psi) = \int \Delta \Psi p(\Delta \mathbf{X}) d(\Delta \Psi)$  і  $D(\Delta \Psi) = \int [\Delta \Psi - M(\Delta \Psi)]^2 p(\Delta \Psi) d(\Delta \Psi)$  – перший та другий статистичні моменти внутрішньосистемних збурень;

$S_1 \{ \mathbf{W}(\Psi) \}$  і  $S_2 \{ \mathbf{W}(\Psi) \}$  – функції, що визначають чутливість адаптивної ІВС.

Позначимо зсування критеріального функціонала  $J \{ \mathbf{W}(\Psi) \}$  під впливом статистичних моментів внутрішньосистемних збурень як функціонали:

$$\begin{aligned} J_1 \{ M(\Delta \Psi) \} &= S_1 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} M(\Delta \Psi), \\ J_2 \{ D(\Delta \Psi) \} &= S_2 \{ \mathbf{W}(\Psi) \} D(\Delta \Psi). \end{aligned} \quad (19)$$

та представимо рівняння (10) в остаточній формі:

$$J\{\mathbf{W}(\Psi, D\Psi)\} = J\{\mathbf{W}(\Psi)\} + J_1\{M(\Delta\Psi)\} + J_2\{D(\Delta\Psi)\}, \quad (20)$$

де  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$  – критеріальна функція системи за відсутності внутрішньосистемних збурень, яка визначається формулою (4).

Таким чином, міра ефективності інформаційно-вимірювальної системи, що адаптується до зовнішніх перешкод в умовах внутрішньосистемних збурень, визначається загальним критеріальним функціоналом (20). Останній відрізняється від своєї часткової форми (4), яка справедлива для умов відсутності в системі внутрішньосистемної невизначеності.

Позначивши різницю між значеннями критеріїв

$$\varepsilon(\Delta\Psi) = J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, D\Psi)\} - J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\}, \quad (21)$$

проведемо формальний аналіз ситуацій:

- якщо  $\varepsilon(\Delta\Psi) < 0$ , то  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\} = \min_{\mathbf{W}(\Psi) \in \Pi} J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$ ;
- якщо  $\varepsilon(\Delta\Psi) > 0$ , то  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\} = \max_{\mathbf{W}(\Psi) \in \Pi} J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$ .

Результати аналізу показують, що в умовах внутрішньосистемної невизначеності  $\Delta\Psi \neq 0$ , різниця  $\varepsilon(\Delta\Psi) \neq 0$ , тому унімодальна критеріальна функція  $J\{\mathbf{W}(\Psi, D\Psi)\}$  ніколи не досягне свого екстремального значення, навіть за умови виконання в системі відповідних процедур, передбачених оптимальним алгоритмом обробки інформаційних даних  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$ .

Зазначені обставини вказують на характерні проблеми, що виникають при оцінці ефективності адаптивних ІВС, зокрема:

- проблеми, що пов'язані з відмінністю реакції фізичної адаптивної ІВС від реакції гіпотетичної «ідеальної» системи, спроектованої з врахуванням того ж критерію, але при повнім знанні системи, або при значно меншому рівні невизначеності;
- проблема стійкості реальної адаптивної ІВС системи та відхилення її характеристик від характеристик гіпотетичної «ідеальної» системи. Тут поняття «стійкість» визначається такими асимптотичними властивостями системи, як обмеженість або збіжність при наявності невизначеності, яка не враховується в явному вигляді адаптивним механізмом.

**Результати дослідження проблеми визначення критеріального функціонала адаптивної інформаційно-вимірювальної системи дозволяють зробити ряд додаткових зауважень:**

- роботи в області адаптивних систем, як правило, пов'язані з забезпеченням задовільної відповідності між характеристиками підсистеми адаптації та прийнятої еталонної моделі, за умови відсутності в самій адаптивній системі внутрішньої невизначеності;
- в ході адаптивного управління основна увага приділяється розробці теорії збіжності (стійкості) з метою продемонструвати здатність системи перебороти апріорну невизначеність тільки відносно стану зовнішнього середовища [3-5]. Завдяки цьому особливого значення набувають питання асимптотичної оптимальності, абсолютної стійкості адаптивної ІВС та абсолютної коректності її математичної моделі;
- введення в адаптивну інформаційно-вимірювальну систему внутрішньосистемних збурень приводить до того, що властивості абсолютної стійкості (або коректності моделі) не виконуються. Відповідно, розробка алгоритмів адаптації, які інваріантні до невизначеності внутрішнього стану системи, повинна проводитися в локальному контексті. Останнє дозволить продемонструвати ефективність адаптації ІВС реальних умов.

Розуміючи під адаптацією збіжність або пристосування параметрів інформаційно-вимірювальної

системи до оптимальних величин за результатами навчання, процес адаптації іноді розглядають з позиції локальної інваріантності системи до змін зовнішньої ситуації [2, 3]. Ігнорування питання ступеню інваріантності алгоритмів адаптації ІВС до умов зовнішнього середовища та непереборних внутрішньосистемних перешкод, породжує невизначеність внутрішнього стану самої системи. За такої логіки актуалізується питанням механізму досягнення локальної інваріантності параметрів ІВС щодо присутності непереборних внутрішньосистемних збурень.

Якість адаптивних алгоритмів при необмеженому збільшенні розмірів навчальних вибірок визначається збіжністю їх до відповідних оптимальних алгоритмів з повною апріорною інформацією. У детермінованій ситуації оптимальним представляється узгоджений алгоритм обробки випадкових процесів, що спостерігаються на вході адаптивної ІВС [2, 4, 6]. Узгоджений алгоритм  $\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)$  є окремим випадком оптимального  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$ , за умови, що селекція інформаційно-вимірювального процесу здійснюється винятково для моделі стаціонарного «білого» шуму. В цьому випадку у системі відсутня невизначеність, котра породжена впливом, як зовнішніх «пофарбованих» шумів, так і присутністю внутрішньосистемних перешкод, за винятком внутрішнього шуму. Результат узгодженої обробки сигналів процесу спостережень за алгоритмом  $\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)$  дозволяє робити висновки про потенційні можливості адаптивної ІВС.

Як відомо, результат адаптації інформаційно-вимірювальної системи до умов зовнішнього середовища, що відповідає моделі «пофарбованого» шуму, оцінюється величиною критерію  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\}$ . Він перевершує результат узгодженої обробки сигналів  $J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}$ . Крім того, як слідує з (18), у межах реальних можливостей результат реакції ІВС на дії зовнішніх перешкод залежить від статистичних моментів внутрішньосистемних збурень  $\Delta\Psi$  та визначається величиною змішеного критерію  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)\} \neq J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\}$ , яка відповідає збуреному оптимальному алгоритму  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)$ .

Таким чином, чутливість адаптивної ІВС системи до впливу зовнішніх перешкод та присутності внутрішньосистемних збурень можна оцінити порівнявши між собою величини критеріальних показників  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)\}$  та  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)\}$ . Процедура порівняння припускає ведення деякого відносного показника  $\delta(\Psi, \Delta\Psi)$ , який дозволяє судити про інваріантність адаптивної системи відносно зовнішніх перешкод та внутрішньосистемних збурень.

Для того, щоб визначити показник якості адаптивної ІВС до зовнішніх та внутрішньосистемних перешкод, прийmemo до уваги, що критеріальна функція системи  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$ , яка адаптується по алгоритму  $\mathbf{W}(\Psi)$ , може бути обмежена знизу або зверху. Ця обставина накладає особливість на визначення відносного показника якості адаптації  $\delta(\Psi, \Delta\Psi)$ , що передбачається.

Коли критеріальна функція інформаційно-вимірювальної системи  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$  обмежена знизу на множині алгоритмів класу **III**, то результат узгодженої обробки спостережуваних процесів  $J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}$  згідно алгоритму  $\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)$  можна прийняти в якості її нижньої грані

$$\inf_{\mathbf{W}(\Psi) \in \text{III}} J\{\mathbf{W}(\Psi)\} = J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}. \quad (22)$$

За таких обставин показник якості адаптивної до зовнішніх перешкод і внутрішньосистемних збурень ІВС, визначається наступним чином:

$$\delta(\Psi, \Delta\Psi) = J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\} / J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)\} \in [0, 1]. \quad (23)$$

Слід зазначити, що оптимальний алгоритм адаптації  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)$  відноситься до класу алгоритмів, що мінімізують критерій  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$  у сталому режимі. Показник (23) дозволяє оцінити

якість ІВС, які адаптуються за критеріями мінімуму середньоквадратичної похибки фільтрації процесу, мінімум дисперсії шуму на виході системи та мінімум середнього ризику.

За умови, що критеріальна функція інформаційно-вимірювальної системи  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$  обмежена зверху на множині алгоритмів класу  $\mathbf{II}$ , результат узгодженої обробки процесів  $J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}$ , згідно алгоритму  $\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)$  представляє верхню грань критерію

$$\sup_{\mathbf{w}(\Psi) \in \mathbf{II}} J\{\mathbf{W}(\Psi)\} = J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}. \quad (24)$$

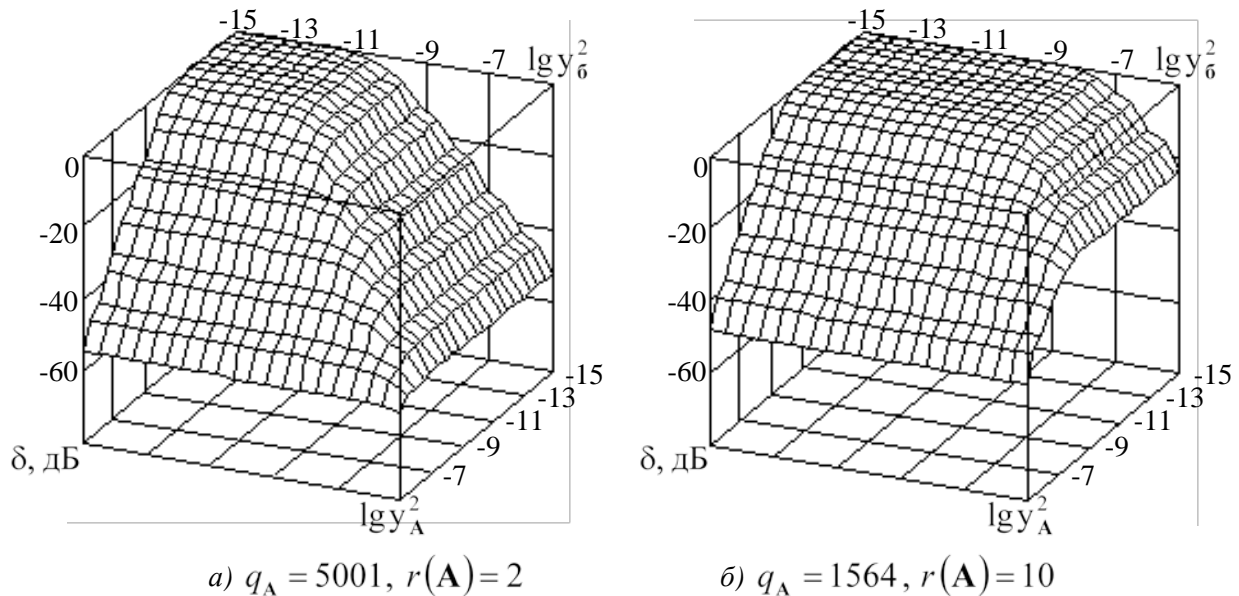
За таких обставин показник якості ІВС, що адаптується до зовнішніх перешкод в умовах внутрішньосистемних збурень, визначається іншим, відмінним від (23) способом:

$$\delta(\Psi, \Delta\Psi) = J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)\} / J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\} \in [0, 1], \quad (25)$$

де  $\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi)$  – оптимальний алгоритм адаптації системи, що максимізує критерій  $J\{\mathbf{W}(\Psi)\}$  у сталому режимі.

Показник (25) дозволяє оцінити якість інформаційно-вимірювальної системи, що адаптується за критерієм максимуму відношення сигнал-шум.

Як приклад оцінювання якості адаптації  $N$ -мірної ІВС в умовах внутрішньосистемної невизначеності за допомогою запропонованого критеріального показника (23) по результатах конкретизації функцій  $J\{\mathbf{W}_{\text{узгод}}(\Psi)\}$  та  $J\{\mathbf{W}_{\text{опт}}(\Psi, \Delta\Psi)\}$  аналітичним шляхом [10] були отримані залежності у вигляді графічних поверхонь, що наведені на рис.2.



**Рис.2 – Вплив внутрішньосистемних збурень на якість адаптації інформаційно-вимірювальної системи при  $N(\mathbf{A}) = 10, q_0 = 30$  дБ**

Дані поверхні відображують залежність цього показника від рівня внутрішньосистемних збурень лівої  $\sigma_A^2$  та правої  $\sigma_6^2$  частин матричного рівняння Вінера при фіксованих значеннях рангу  $r(\mathbf{A})$ , розмірності  $N(\mathbf{A})$  та числа обумовленості  $\gamma(\mathbf{A})$  ермітової кореляційної матриці вихідних даних  $\mathbf{A}$ .

Порівняльний аналіз наведених на рис.2 поверхонь показує, що в умовах внутрішньосистемних збурень збільшення числа обумовленості  $\gamma(\mathbf{A})$  в матриці вихідних даних  $\mathbf{A}$  веде до зниження ефективності системи з квадратичною критеріальною функцією мінімум на два порядки. Причому, середньоквадратичний критерій оптимальності є більш чутливим до рівня збурень  $\sigma_A^2$  кореляційної



матриці  $\mathbf{A}$ , ніж до збурень  $\sigma_6^2$  вектору вільних членів рівняння Вінера.

Практичне застосування показника  $\delta(\Psi, D\Psi)$  у формі (23) або (25) визначається конкретною специфікою задачі, яка розв'язується. Виражений через критеріальні функціонали узагальнений показник якості адаптації інформаційно-вимірювальної системи до зовнішніх перешкод за присутності внутрішньосистемних збурень визначає ступінь відповідності реальних та потенційних можливостей системи в рамках досліджуваного критерію оптимальності.

### Висновки

Запропонований в роботі аналітичний підхід до визначення критеріальних показників оцінювання якості адаптивної інформаційно-вимірювальної системи при вирішенні багатомірних оптимізаційних задач є результатом застосування узагальненого методу найменших квадратів для дослідження чутливості до рівня внутрішньосистемних збурень методів, заснованих на використанні квадратичної функції штрафів.

Представлені результати у повній мірі узгоджуються з основними положеннями обчислювальної математики, теорії матриць, теорії збурень та можуть бути застосовані для аналізу ефективності різних класів інформаційно-вимірювальних систем, які адаптуються до зовнішнього середовища в умовах внутрішньосистемних збурень.

Розглянутий вище підхід дозволяє в ході вирішення оптимізаційних задач обґрунтувати для різних методів оцінювання припустимий рівень внутрішньосистемних збурень, при якому зниження числових значень критеріальних показників адаптивної інформаційно-вимірювальної системи не виходить за встановлену межу.

### Список використаних джерел

1. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: в 4 т. / Г. Ван Трис; пер с англ. под ред. В. И. Тихонова. – М. : Сов. радио, 1972. – Т. 1. – 744 с.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: в 3 т. / Б. Р. Левин. – М. : Советское радио, 1976. – Т. 3. – 288 с.
3. Растринин Л. А. Адаптация сложных систем / Л. А. Растринин. – Рига : Зинатне, 1981. – 375 с.
4. Репин В. Г. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптация информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М. : Сов. радио, 1977. – 404 с.
5. Радиоэлектронные системы : основы построения и теория. Справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Д. И. Леховицкий [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
6. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
7. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения: пер. с англ. / Дж. Деммель. – М. : Мир, 2001. – 430 с.
8. Кошевой В. М. Оценивание корреляционных матриц / В. М. Кошевой // Радиотехника и электроника. – 1986. – №10. – С. 1964–1974.
9. Химич А. Н. Оценки возмущений для решения задачи наименьших квадратов / А. Н. Химич // Кибернетика и системный анализ. – 1996. – №3. – С. 142–145.
10. Скачков В. В. Исследование устойчивости адаптивной информационной системы с прямым формированием регуляризованного вектора управления / В. В. Скачков // Радиотехника. – 2003. – № 9. – С. 11–17.

**Рецензент:** Дем'янчук Б.О., д.т.н., доцент, Військова академія, Одеса

**КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА АДАПТИВНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ  
ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

В.В. Скачков, А.Н. Ефимчиков, Е.В. Ткачук, В.И. Павлович

*Исходя из основных постулатов теории возмущения предложен аналитический подход к оцениванию качества адаптации информационно-измерительной системы к внешней среде в условиях внутрисистемных возмущений путем вычисления критериальных показателей. Такими показателями выбрано отношение критериальных функционалов, которые определяются усреднением мгновенных значений функций качества адаптации системы с учетом внутрисистемных возмущений. Для иллюстрации возможностей разработанного подхода приведены результаты количественного оценивания качества адаптации  $N$ - мерной информационно-измерительной системы, параметрической вектор которой удовлетворяет уравнению Винера.*

**Ключевые слова:** критериальные показатели, адаптация, информационно-измерительная система, внутрисистемные возмущения, критериальный функционал.

**CRITERIA INDICATORS EVALUATING OF THE QUALITY OF ADAPTIVE INFORMATION-  
MEASURING SYSTEM IN THE CONDITIONS OF INTRASYSTEM PERTURBATIONS**

V. Skachkov, O. Yefymchykov, O. Tkachuk, V. Pavlovich

*Proceeding from the main postulates of perturbation theory analytical approach to the evaluation of the quality of adaptation of information-measuring system to the environment in the conditions of intrasystem perturbation by calculation criteria's indexes. Such indexes are choose as a relation of criterion functionals are determined by averaging the instantaneous values of functions of quality of the adaptation system with intrasystem perturbation. To illustrate the possibilities of the worked out approach presents the results of a quantitative evaluation of the quality of adaptation  $N$ - dimensional information-measuring system, parametric vector which satisfies to Winer's equation.*

**Keywords:** criterion indicators, adaptation, information-measuring system, intrasystem perturbations, criterion functional.