

УДК 621:681.65

В.В. Скачков¹, д.т.н., проф.,**В.В. Чепкій**¹, к.т.н., доц.,**О.М. Єфимчиков**¹, к.т.н., доц.,**О.Д. Єльчанінов**², к.т.н., доц.,**В.Ф. Тімков**³, к.т.н., доц.¹ Військова академія (м. Одеса), Україна² Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, Україна³ Апарат РНБО України, Головний ситуаційний центр України, м. Київ, Україна

СИНТЕЗ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ СТАНУ АДАПТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Запропоновано ступінь невизначеності стану адаптивної інформаційно-вимірювальної системи наземного робототехнічного комплексу чисельно оцінювати середньою кількістю інформації на її виході, використовуючи модифіковану метрику Шеннона. На основі ентропійного підходу синтезовано інтегральний показник інформаційної ефективності системи, що досліджується, отримані загальна і часткова аналітичні форми його представлення. Оцінено втрати інформації в інформаційно-вимірювальній системі робототехнічного комплексу за умови впливу зовнішніх збурень і розширення спектру внутрішньосистемних збурювань, включаючи й багатопараметричний вектор адаптивного управління.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, наземний робототехнічний комплекс, ентропійний підхід, інтегральний показник, зовнішні та внутрішньосистемні збурення, невизначеність.

Постановка проблеми. Аналіз останніх досягнень і публікацій

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) є невід'ємною структурною складовою будь-якого наземного робототехнічного комплексу [1]. У загальному випадку така система являє собою сукупність функціонально об'єднаних апаратно-програмних засобів, призначених для отримання поточної інформації про власний стан робототехнічного комплексу та стан зовнішнього середовища з подальшим перетворенням цієї інформації у сигнали керування. Ефективність функціонування наземного робототехнічного комплексу (НРК) у цілому в значній мірі залежить від якості його інформаційно-вимірювальної системи.

В процесі оцінювання якості стану інформаційно-вимірювальних систем наземних робототехнічних комплексів виникає необхідність рішення багатокритеріальних (векторних) оптимізаційних задач. При цьому найбільш складними є багатокритеріальні задачі, що вирішуються в умовах ситуаційної (априорної) невизначеності та відносяться до класу некоректних задач у визначенні Адамара-Тихонова [2]. В таких задачах незначні варіації спостережуваних реалізацій вибірок $u_i(t)$, де $i=1,2,\dots,N$, призводять до непередбачених результатів їх рішення.

Ситуаційна невизначеність оцінки стану ІВС обумовлена впливом незапланованих дестабілізуючих факторів середовища її перебування – зовнішня невизначеність, а також існуванням різноманітних ресурсних обмежень – внутрішньосистемна невизначеність [3, 4]. Властиві будь-якій реальній системі незаплановані дестабілізуючі фактори та непереборні ресурсні обмеження на фізичному рівні проявляються у вигляді випадкових зовнішніх і внутрішньосистемних збурень. За такої детермінації ступінь ситуаційної невизначеності стану інформаційно-вимірювальної системи НРК буде різним в будь-які моменти часу.

Об'єктивне оцінювання оптимальності інформаційно-вимірювальної системи здійснюється на основі показника, який інтегрує в собі сукупність властивостей і ознак, що визначають придатність даної системи задовольняти вимоги щодо свого призначення [5]. Вибір інтегрального показника передбачає формування тим чи іншим способом критерію оцінки якості стану

досліджуваної системи. Згідно основних положень теорії системного аналізу [3, 5], інтегральний або глобальний (узагальнений) показник стану і критерій оцінки якості будь-якої технічної системи повинен бути функцією всіх найважливіших характеристик системи, у фізичному сенсі конструктивним і простим, відображувати якість виконання системою поставлених завдань. Суперечливість вимог та умов формування інтегрального показника оцінки якості такої системи ускладнюється тим, що для більшості реальних процесів характерним є безперервність зміни параметрів, які визначають критерії її оптимальності. У подібних ситуаціях простір стратегій прийняття рішень стає нескінченним, що обмежує застосування методів приведення векторної оптимізації до скалярної та введення глобального показника якості [6].

Зазначені обставини суттєво ускладнюють проблему інтегральної оцінки стану інформаційно-вимірювальної системи НРК та унеможливають формалізацію критеріального показника якості системи з множиною параметрів і часткових критеріїв. Крім того, глобальний показник якості ІВС у вигляді суми часткових показників з відповідними ваговими коефіцієнтами може бути неслухним, оскільки недолік одного часткового показника може компенсуватись перевагами іншого [5].

В контексті подолання окреслених проблем актуалізується ідея інтерпретації ситуаційної невизначеності стану інформаційно-вимірювальної системи НРК у вигляді інформаційної моделі в модифікованому метричному поданні Шеннона [7–10]. За такого подання практичного значення набуває процедура застосування ентропійного підходу в задачах синтезу інтегрального показника якості. Останній, відображаючи ступень задоволення вимог до часткових показників якості, надає можливість оцінювати втрати інформації про якісний стан досліджуваної системи з довільною параметричною розмірністю, а отже, володіє ознаками глобального критеріального показника [9].

Постановка завдання та його розв'язання

Мета дослідження полягає в застосуванні ентропійного підходу до синтезу інтегрального показника якості інформаційно-вимірювальної системи наземного робототехнічного комплексу та оцінювання її стану в умовах ситуаційної невизначеності.

В широкому сенсі, інформаційна модель стану інформаційно-вимірювальної системи НРК в умовах зовнішніх і внутрішньосистемних збурень характеризується величинами апріорної та апостеріорної ентропії Шеннона $H^{(*)}$ до та після оцінювання N -мірного процесу $\mathbf{U}^T = [u_1(t), \dots, u(t), \dots, u_N(t)]$, який містить доступну інформацію про стан системи. Їхня різниця показує середню кількість інформації на виході досліджуваної системи. Представляючи узагальнений критерій невизначеності стану будь-якої технічної системи, ентропія являє собою дійсну функцію, яка залежить від щільності ймовірності $p(\mathbf{U})$. Серед сукупності відомих функцій розподілу $p(\mathbf{U})$, які мають однакову дисперсію σ^2 , максимальною ентропією володіє розподіл Гауса [3, 9].

За цією логікою глобальним показником якості ІВС може служити модифікована ентропійна метрика Шеннона, за якої середня кількість отриманої інформації про стан системи, що досліджується, фактично визначається величиною знятої невизначеності [4, 8, 9]:

$$I[f(\mathbf{V}), f(\mathbf{U})] = H[f(\mathbf{U})] - H[f(\mathbf{U})/f(\mathbf{V})], \quad (1)$$

де $f(\mathbf{U})$ і $f(\mathbf{V})$ – результати обробки за алгоритмом $f^{(*)}$ компонентів, відповідно, вхідного векторного процесу \mathbf{U} , (так званого вектору стану системи) та векторного процесу \mathbf{V} , який містить корисну (істину) інформацію про стан системи;

$H[f(\mathbf{U})]$ – апріорна (безумовна) ентропія та $H[f(\mathbf{U})/f(\mathbf{V})]$ – апостеріорна (умовна) ентропія.

Згідно інформаційної моделі, стан інформаційно-вимірювальної системи НРК та середовища її перебування характеризується сукупністю корисних процесів і процесів зовнішніх збурень, яка задана гауссівським M -мірним вектором $\mathbf{X}(M,1)$ з нульовим середнім $E(\mathbf{X})$ і кореляційною матрицею

$\mathbf{Q}_X = E(\mathbf{X}\mathbf{X}^T) = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_i^2, \dots, \sigma_M^2)$. Тут $E(*)$ – операція статистичного усереднення; σ_i^2 – дисперсія i -го скалярного випадкового процесу $x_i(t) \in \mathbf{X}$, $i \in \overline{1, M}$; τ – індекс операції транспонування.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Синтез інтегрального показника якості стану системи. У векторно-матричній формі процес на вході інформаційно-вимірювальної системи НРК описується лінійним перетворенням вектора $\mathbf{X}(M, 1)$ в N -мірний вектор

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

де $\mathbf{K} = \mathbf{K}(N, M)$ – прямокутна (N, M) – мірна матриця, яка визначає трансформацію вектора \mathbf{X} на N незалежних входів системи; $\mathbf{n} = \mathbf{n}(N, 1)$ – внутрішньосистемні збурення, які представлені $(N \times 1)$ – мірним гауссівським вектор-стовпцем с нульовим середнім $E(\mathbf{n})$, взаємно-кореляційною матрицею $E(\mathbf{X}\mathbf{n}^T) = \mathbf{0}(M, N)$ та кореляційною матрицею $\mathbf{A}_n = E(\mathbf{n}\mathbf{n}^T) = \sigma_0^2 \mathbf{I}(N, N)$. Тут $\mathbf{I}(*)$ – одинична і $\mathbf{0}(*)$ – нульова матриці; σ_0^2 – дисперсія внутрішньосистемних збурень.

Об'єднавши гауссівські процеси \mathbf{X} та \mathbf{n} в розширений вектор \mathbf{Z} , розміру $\mathbf{Z}^T = \mathbf{Z}^T(1, M + N) = [\mathbf{X}(1, M) \quad \mathbf{n}(1, N)]$, представимо векторно-матричну комбінацію (2) таким чином: $\mathbf{U} = \mathbf{G}\mathbf{Z}$. Тут матриця перетворення $\mathbf{G} = \mathbf{G}(N, M + N)$ вектору \mathbf{Z} дорівнює $\mathbf{G} = [\mathbf{K}(N, M) \quad \mathbf{I}(N, N)]$. За визначенням характеристична функція гауссівського процесу \mathbf{Z} з нульовим середнім $E(\mathbf{Z})$ і матрицею \mathbf{Q}_Z має вигляд:

$$\Phi_Z(\boldsymbol{\mu}) = E[\exp(j\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{Z})] = \exp(-0,5\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{Q}_Z \boldsymbol{\mu}), \quad (3)$$

де $\boldsymbol{\mu}$ – векторний параметр функції.

Звідси, характеристична функція вектора \mathbf{U} в рівнянні (2) приймає вигляд: $\Phi_U(\boldsymbol{\mu}) = E[\exp(j\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{U})] = E[\exp(j\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{G}\mathbf{Z})]$. Виконавши відповідне перетворення, отримаємо аналітичний вираз

$$\Phi_U(\boldsymbol{\mu}) = \Phi_Z(\mathbf{G}^T \boldsymbol{\mu}) = \exp(-0,5\boldsymbol{\mu}^T \mathbf{G}\mathbf{Q}_Z \mathbf{G}^T \boldsymbol{\mu}). \quad (4)$$

Згідно (4) лінійна комбінація вихідних гауссівських векторних процесів на N -мірному вході параметричної системи (2) буде мати гауссів розподіл с нульовим середнім та кореляційною матрицею спостереження

$$\mathbf{A} = \mathbf{G}\mathbf{Q}_Z \mathbf{G}^T = \mathbf{K}\mathbf{Q}_X \mathbf{K}^T + \sigma_0^2 \mathbf{I}. \quad (5)$$

Виходячи з конкретизації вихідних складових вектора \mathbf{X} і структури матриці трансформації \mathbf{K} , кореляційна матриця (5) може бути представлена сумою матриць корисного інформаційного процесу \mathbf{A}_V , зовнішніх збурень \mathbf{A}_J та внутрішньосистемних збурень $\mathbf{A}_n = \sigma_0^2 \mathbf{I}$, тобто:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_J + \mathbf{A}_n. \quad (6)$$

Рішення багатокритеріальної задачі припускає таке перетворення вектора спостережень $f(\mathbf{U})$, під час якого досягається екстремум заданого критерію оптимальності $J[f(\mathbf{U})]$. Для широкого класу інформаційних задач перетворення $f(\mathbf{U})$ реалізується за схемою вагового підсумовування [3, 5]:

$$f(\mathbf{U}) = \mathbf{W}^T \mathbf{U} = U_\Sigma, \quad (7)$$

де \mathbf{W} – багатопараметричний вектор управління, який формується в інформаційно-вимірювальній системі за результатами спостереження N -мірного процесу \mathbf{U} .

В цьому випадку характеристична функція випадкового процесу $U_{\Sigma} = f(\mathbf{U})$ на виході N -мірної системи буде пов'язана з деяким скалярним аргументом β наступною залежністю:

$$\Phi_{\Sigma}(\beta) = E\{\exp[j\beta f(\mathbf{U})]\} = E\{\exp(j\beta \mathbf{W}^T \mathbf{U})\}. \quad (8)$$

Позначивши $\alpha = \beta \mathbf{W}$, можна представити залежність (8) у вигляді $\Phi_{\Sigma}(\beta) = \Phi_U(\alpha)$. З визначення характеристичної функції гауссівського процесу \mathbf{U} , витікає, що $\Phi_U(\alpha) = \exp(-0,5 \alpha^T \mathbf{A} \alpha)$. Звідси $\Phi_{\Sigma}(\beta \mathbf{W}) = \exp(-0,5 \beta^2 \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W})$.

Враховуючи, що дисперсія скалярного випадкового процесу на виході багатопараметричної системи дорівнює $\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\Sigma}^2(\mathbf{W}) = \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W}$, характеристичну функцію (8) вихідного процесу U_{Σ} можна представити таким чином:

$$\Phi_{\Sigma}(\beta) = \exp(-0,5 \beta^2 \sigma_{\Sigma}^2). \quad (9)$$

Узагальнюючи проведені міркування, можна зробити висновок про те, що за гіпотези гауссівського розподілу векторного процесу \mathbf{U} на виході досліджуваної системи також спостерігається гауссівський скалярний процес U_{Σ} з нульовим середнім, дисперсією $\sigma_{\Sigma}^2 = E[f^2(\mathbf{U})] = \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W}$ та функцією розділу $p(U_{\Sigma}) = (\sqrt{2\pi}\sigma_{\Sigma})^{-1} \exp(-0,5 U_{\Sigma}^2 / \sigma_{\Sigma}^2)$. Останнє є необхідною і достатньою умовою потенційної ентропійної міри випадкового процесу U_{Σ} на виході даної N -мірної системи:

$$H(U_{\Sigma}) = H[f(\mathbf{U})] = - \int_{-\infty}^{\infty} p(U_{\Sigma}) \lg[p(U_{\Sigma})] dU_{\Sigma} = 0,51 \lg(2\pi e \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W}). \quad (10)$$

Замінивши в (10) кореляційну матрицю \mathbf{A} сумою матриць (6), отримаємо:

$$H(U_{\Sigma}) = 0,51 \lg[\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_V + \mathbf{A}_J + \mathbf{A}_n) \mathbf{W}] + C, \quad (11)$$

де $C = 0,51 \lg(2\pi e)$ – постійний коефіцієнт.

З рівняння (11) випливає, що ентропія інформаційного процесу на виході будь-якої технічної системи залежить від величини вектора управління \mathbf{W} . Виходячи з припущення про ергодичність і незалежність процесів, що спостерігаються, а також з огляду на перетворення (7) і його проєкцію на площину корисних процесів $f(\mathbf{V}) = \mathbf{W}^T \mathbf{V} = V_{\Sigma}$, вираз (1) для системи, що розглядається, можна переписати таким чином:

$$I(V_{\Sigma}, U_{\Sigma}) = H(U_{\Sigma}) - H(U_{\Sigma} | V_{\Sigma}), \quad (12)$$

де $H(U_{\Sigma} | V_{\Sigma})$ – апостеріорна ентропія вихідного процесу інформаційно-вимірювальної системи НРК, яка дорівнює ентропії внутрішньосистемних збурень:

$$H(U_{\Sigma} | V_{\Sigma}) = 0,51 \lg[\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_J + \mathbf{A}_n) \mathbf{W}] + C. \quad (13)$$

Замінивши у виразі (12) зменшуване і від'ємник їхніми значеннями (11) і (13) та здійснивши ряд перетворень, визначаємо середню кількість інформаційної розбіжності між корисним процесом V_{Σ} і процесом U_{Σ} на виході системи:

$$I(V_{\Sigma}, U_{\Sigma}) = 0,5 \lg \left\{ \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W} \left[\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_J + \mathbf{A}_n) \mathbf{W} \right]^{-1} \right\}. \quad (14)$$

За умови (6) аналітичний вираз (14) зводиться до вигляду:

$$I(V_{\Sigma}, U_{\Sigma}) = 0,51 \lg \left\{ 1 + \mathbf{W}^T \mathbf{A}_V \mathbf{W} \left[\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_J + \mathbf{A}_n) \mathbf{W} \right]^{-1} \right\}, \quad (15)$$

де $\mathbf{W}^T \mathbf{A}_V \mathbf{W} [\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_n) \mathbf{W}]^{-1}$ – відносний параметр ступеня перевищення корисного інформаційного процесу над процесами зовнішніх та внутрішньосистемних збурень на виході ІВС.

Приведений до рівня внутрішньосистемних збурень аналітичний вираз (15) приймає остаточний вигляд:

$$I(V_\Sigma, U_\Sigma) = 0,5 \lg \left\{ 1 + \xi_V(\mathbf{W}) \left[1 + \xi_j(\mathbf{W}) \right]^{-1} \right\}, \quad (16)$$

де $\xi_V(\mathbf{W})$ та $\xi_j(\mathbf{W})$ – відносні параметри, що визначають, відповідно, ступень перевищення значення корисного процесу і зовнішніх збурень над процесами внутрішньосистемних збурень на виході інформаційно-вимірювальної системи НРК.

Аналітичний виразу (16) дозволяє визначити теоретичну межу інтегральної оцінки середньої кількості інформації, як показника поточного стану будь-якої технічної системи з довільною параметричною розмірністю, за умови, що внутрішньосистемний процес з фіксованим значенням дисперсії володіє найбільшою ентропією. Останнє адекватно максимальній втраті інформації на виході даної системи. Саме тому, за своїми змістовними ознаками синтезований показник $I(V_\Sigma, U_\Sigma)$ відповідає всім основним вимогам до глобального (узагальненого) показника критерію оцінювання якості стану інформаційно-вимірювальної системи НРК [4, 8].

Аналіз характеру практичних завдань, що пов'язані з оцінюванням якості стану ІВС, показує можливість використання сформованого критеріального показника в умовах, коли багатопараметричний вектор управління \mathbf{W} приймає одиничне значення $\mathbf{W} = \mathbf{I}(N, 1)$. В цьому випадку аналітичний виразу (16) набуває часткової форми:

$$I(V_\Sigma, U_\Sigma) = 0,5 \lg \left(1 + N \frac{\xi_V}{1 + \xi_j} \right). \quad (17)$$

Якщо оцінювання якості стану інформаційно-вимірювальної системи відбувається у контексті винерівського рішення задачі, то багатопараметричний вектор управління набуває такого вигляду: $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{r}$. Тут $\mathbf{r} = E(U_0 \mathbf{U})$ – вектор взаємної кореляції між скалярним процесом цільової функції (еталоном) U_0 та вектором стану системи \mathbf{U} . В цьому випадку формула критеріального показника якості стану досліджуваної системи (15) набуває іншого часткового вигляду [4]:

$$I(V_\Sigma, U_\Sigma) = 0,5 \lg \left[1 + \frac{\mathbf{r}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}_V \mathbf{A}^{-1} \mathbf{r}}{\mathbf{r}^T \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_n) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{r}} \right]. \quad (18)$$

За логікою практичної реалізації інтегральний показник якості (16) та аналітичні вирази його часткових форм (17) і (18) представляють функцію міри невизначеності стану інформаційно-вимірювальної системи НРК. Остання залежність від структурних характеристик системи, сукупності параметрів матриць, що відображують процеси істинного її стану \mathbf{A}_V , зовнішніх збурень \mathbf{A}_j та внутрішньосистемних збурень \mathbf{A}_n . За своїм змістом співвідношення (16) – (18) служать субстанцією математичної моделі, тобто формального образу статистичного опису процедури оцінювання інформаційного стану системи, що розглядається з максимальним ступенем наближення до реально існуючого середовища.

2. Оцінювання втрат інформації про стан досліджуваної системи з фіксованою розмірністю за умови впливу зовнішніх збурень. В апаратно-програмному аспекті моделювання виконано в середовищі комплексу MATLAB. Результати цього моделювання приведені на рис. 1.

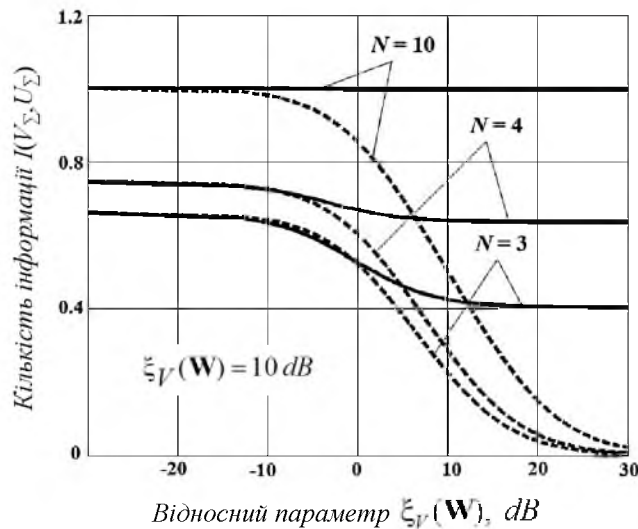


Рис. 1. Динаміка втрат інформації про якісний стан системи за умови впливу зовнішніх збурень

Представлені графічні зображення двох сімейств кривих відображують зміни кількості інформації на виході досліджуваної системи $I(V_\Sigma, U_\Sigma)$ в залежності від ступеню перевищення значення зовнішніх збурень над внутрішньосистемними збуреннями $\xi_J(\mathbf{W})$ на її вході, за умови фіксованого значення параметра $\xi_V(\mathbf{W}) = 10 dB$ та розмірності системи $N = 3; 4; 10$. Штриховими лініями позначені криві $I(V_\Sigma, U_\Sigma) = \varphi[\xi_J(\mathbf{W})]$, які згідно (17) ілюструють інформаційні втрати в системі за відсутності режиму адаптивного управління. Суцільними лініями позначені криві $I(V_\Sigma, U_\Sigma) = \psi[\xi_J(\mathbf{W})]$, які згідно (18) ілюструють інформаційні втрати за наявності режиму адаптивного управління.

Аналіз сімейства кривих (рис. 1) показують, що рівень інформаційних втрат суттєво зменшується за впровадження елементів адаптивного управління характеристиками інформаційно-вимірювальної системи, режим функціонування яких відповідає динаміці зовнішніх дестабілізуючих факторів. Досягти оптимального в деякому сенсі стану або поведінки інформаційно-вимірювальної системи НРК за апріорної невизначеності, тобто звести рівень цих втрат до мінімуму, можна шляхом збільшення розмірності системи N . Однак таке рішення призводить до надмірності системи ($N \gg M$) і до зростання дефекту кореляційної матриці спостережень \mathbf{A} .

Узагальнюючи сказане, слід відзначити, що подолання зовнішньосистемної невизначеності за рахунок реалізації потенційних можливостей впроваджених елементів адаптивного управління гарантується присутністю виключно непереборних внутрішньосистемних збурювань. Виходячи з такого припущення, нестійкі оцінки якісного стану інформаційно-вимірювальної системи НРК за іншими критеріями з розгляду виключаються [7, 11, 13, 22, 23]. У той же час, не заперечується чутливість отриманих критеріальних оцінок до рівня внутрішньосистемних збурювань багатопараметричного вектора управління \mathbf{W} системи.

3. Використання інтегрального показника для оцінювання інформаційних можливостей системи в умовах внутрішньосистемних збурень. Дослідження інформаційних можливостей досліджуваної системи в умовах розширення спектра внутрішньосистемних збурень пропонується

здійснювати варіаційно-параметричним методом [1–3, 6, 11]. Відхилення параметрів показника якості стану системи з елементами адаптивного управління від його оптимального значення пов'язано, перш за все, з випадковими варіаціями $\Delta\mathbf{W}$ параметричного вектора \mathbf{W} . Такі варіації найбільш адекватно відображають внутрісистемну невизначеність стану будь-якої технічної системи незалежно від особливостей конкретної фізичної проблеми. Аналітичним узагальненням внутрісистемної невизначеності стану інформаційно-вимірювальної системи НРК служить збурений параметричний вектор який має такий вигляд:

$$\hat{\mathbf{W}} = F(\Delta\mathbf{W}) = \mathbf{W} + \Delta\mathbf{W}, \quad (19)$$

де варіація $\Delta\mathbf{W} = \Delta\mathbf{W}(N,1)$ представляє випадковий вектор внутрішньосистемних збурень з розподілом $p(\Delta\mathbf{W})$, який характеризується нульовим середнім $E(\Delta\mathbf{W})$, відносною дисперсією $\sigma_W^2 = \|\Delta\mathbf{W}\|^2 / (N\|\mathbf{W}\|^2)$ і кореляційною матрицею $E(\Delta\mathbf{W}\Delta\mathbf{W}^T) = \sigma_W^2 \|\mathbf{W}\|^2 \cdot \mathbf{I}(N,N)$. Тут $\|\cdot\|$ – норма вектора.

З урахуванням прийнятих позначень дисперсія випадкового процесу U_Σ на виході системи в умовах внутрішньосистемної невизначеності дорівнює:

$$\hat{\sigma}_\Sigma^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} [F(\Delta\mathbf{W})]^T \mathbf{U} \mathbf{U}^T [F(\Delta\mathbf{W})] p(\mathbf{U}, \Delta\mathbf{W}) d\mathbf{U} d(\Delta\mathbf{W}), \quad (20)$$

де $p(\mathbf{U}, \Delta\mathbf{W})$ – спільна щільність ймовірності випадкових процесів \mathbf{U} і $\Delta\mathbf{W}$.

Проінтегруємо вираз (20), використовуючи введені позначення статистичних моментів вектора $\Delta\mathbf{W}$ і факторизоване уявлення $p(\mathbf{U}, \Delta\mathbf{W}) = p(\mathbf{U})p(\Delta\mathbf{W})$, що впливає з природної умови статистичної незалежності випадкових векторів \mathbf{U} та $\Delta\mathbf{W}$. В результаті операції інтегрування отримаємо:

$$\hat{\sigma}_\Sigma^2 = \mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W} + \sigma_W^2 \|\mathbf{W}\|^2 \cdot \text{tr} \mathbf{A}, \quad (21)$$

де $\text{tr} \mathbf{A}$ – слід матриці.

За умови незалежності векторних процесів, вираз (21) дозволяє визначити ентропію збурення (шуму) на виході інформаційно-вимірювальної системи НРК зі збуреним параметричним вектором (19) як апостеріорну ентропію:

$$H(\hat{U}_\Sigma / \hat{V}_\Sigma) = 0,51 \lg \left[\mathbf{W}^T (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_n + \sigma_W^2 \cdot \text{tr} \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}) \mathbf{W} \right] + C. \quad (22)$$

Різниця величин (22) і (13) показує, що за внутрішньосистемної невизначеності ентропія шуму на виході досліджуваної системи зі збуреним параметричним вектором адаптивного управління перевершує аналогічний показник якості незбуреної системи на величину

$$\Delta H = 0,51 \lg \left[1 + \sigma_W^2 \cdot \text{tr} \mathbf{A} \cdot \|\mathbf{W}\|^2 (\mathbf{W}^T \mathbf{A} \mathbf{W})^{-1} \right]. \quad (23)$$

З інформаційної точки зору це еквівалентно подачі на N -мірний вхід ІВС збуреного процесу у вигляді моделі білого шуму, рівень якого визначається дисперсією внутрішньосистемних збурень параметричного вектора системи σ_W^2 .

Для вінеровського рішення кількість інформації на виході досліджуваної системи з елементами адаптивного управління та збудженим параметричним вектором (19) визначається таким виразом:

$$I(\hat{V}_\Sigma, \hat{U}_\Sigma) = H(\hat{U}_\Sigma) - H(\hat{U}_\Sigma / \hat{V}_\Sigma) = 0,51 \lg \left[1 + \frac{\mathbf{r}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A}_V \mathbf{A}^{-1} \mathbf{r}}{\mathbf{r}^T \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{A}_j + \mathbf{A}_n + \sigma_W^2 \text{tr} \mathbf{A} \cdot \mathbf{I}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{r}} \right]. \quad (24)$$

В аналітичному виразі (24) перевищення сліду кореляційної матриці спостережень над рівнем

дисперсії внутрішньосистемних збурень σ_0^2 становить $\text{tr}\mathbf{A}/\sigma_0^2 = N(\xi_V(\mathbf{W}) + \xi_j(\mathbf{W}) + 1)$. Величина цього перевищення визначає чутливість як самої ІВС, так й інтегрального показника якості її стану до рівня дисперсії внутрішньосистемних збурень, які визначені величинами σ_0^2 та σ_W^2 . Отже, за наявності внутрішньосистемних збурень зростання параметра зовнішньої перешкоди $\xi_j(\mathbf{W})$, коли $\xi_j(\mathbf{W}) \gg \xi_V(\mathbf{W})$ та $\sigma_W^2 = \text{const}$, призводить до зменшення кількості інформації $I(\hat{V}_\Sigma, \hat{U}_\Sigma)$. В теорії збурень [6, 17] це явище пояснюється підвищеною чутливістю ермітової матриці з поганою обумовленістю і великим дефектом до випадкових варіацій її елементів.

Кількість інформації на виході N -мірної інформаційно-вимірювальної системи НРК з елементами адаптивного управління і відносний параметр $\xi_j(\mathbf{W})$ в умовах внутрішньосистемних збурень параметричного вектора управління σ_W^2 пов'язані залежністю $I(\hat{V}_\Sigma, \hat{U}_\Sigma) = \gamma(\xi_j(\mathbf{W}))$. На рис. 2 представлено сімейства графічних кривих, які відображують дану залежність за фіксованих значень параметра $\xi_V(\mathbf{W}) = 10 \text{ dB}$, розмірності системи $N = 3; 4; 10$ та дисперсії внутрішньосистемних збурень параметричного вектора управління $\sigma_W^2 = 10^{-2}$. Сімейство кривих, що графічно позначені суцільною лінією, отримані за умови присутності внутрішньосистемних збурень параметричного вектора ($\sigma_W^2 \neq 0$), а штриховими лініями – за умови відсутності таких ($\sigma_W^2 = 0$).

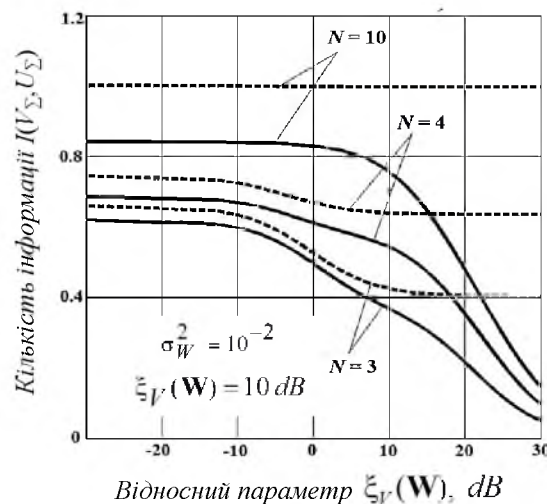


Рис. 2. Динаміка втрат інформації про стан системи за умови внутрішньосистемних збурень параметричного вектора управління

Результати порівняння динаміки графічних кривих на рис. 2 показує, що за незначного рівня зовнішніх збурень $\xi_j(\mathbf{W}) \leq -10 \text{ dB}$ кількість інформації на виході інформаційно-вимірювальної системи НРК з елементами адаптивного управління практично не змінюється, але при цьому спостерігаються інформаційні втрати відносно ситуації, коли $\sigma_W^2 = 0$. В умовах внутрішньосистемної невизначеності втрати інформації суттєво зростають, якщо $\xi_j(\mathbf{W}) \geq 10 \text{ dB}$, а також зі збільшенням розмірності системи. Потрібно також вказати на істотне зростання інформаційних втрат про якісний стан інформаційно-вимірювальної системи НРК за умови збільшення дисперсії внутрішньосистемних збурень параметричного вектора управління σ_W^2 . При цьому крутизна кривих, що позначені суцільною лінією на рис. 2, істотно зростає.

Висновки

1. За інтерпретації ситуаційної невизначеності стану інформаційно-вимірювальної системи НРК у вигляді інформаційної моделі в модифікованому метричному поданні Шеннона та застосування ентропійного підходу синтезовані інтегральний показник її якості, а також загальна і часткова аналітичні форми його визначення. Останні, представляючи функцію міри невизначеності стану системи з довільною параметричною розмірністю, дозволяють оцінити:

– по-перше, теоретичну межу середньої кількості інформації на виході досліджуваної системи з довільною параметричною розмірністю;

– по-друге, максимальні втрати інформації на виході даної системи, за умови, що внутрішньо-системний процес з фіксованим значенням дисперсії володіє найбільшою ентропією.

2. Отримані результати ентропійного оцінювання ілюструють суттєве зменшення втрат інформації про стан інформаційно-вимірювальної системи НРК за умови впровадження адаптивного управління, яке за часом і простором узгоджено з динамікою зовнішніх дестабілізуючих факторів. Реалізація потенційних можливостей режиму адаптивного управління гарантується присутністю виключно непереборних внутрішньосистемних збурень.

3. Чутливість багатопараметричного вектора адаптивного управління до внутрішньосистемних збурень зростає в міру збільшення дефекту кореляційної матриці спостережень.

Список використаних джерел

1. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: учеб. пособие / С.А. Воротников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.

2. Грешилов А. А. Некорректные задачи цифровой обработки информации и сигналов / А.А. Грешилов. – М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.

3. Петров В.В. Информационная теория сложных систем, функционирующих в условиях неполной информации / В.В. Петров, В.М. Агеев, А.В. Запорожец [та ін.] // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. Том 13, – М. :ВИНИТИ, 1980 – С. 121–137.

4. Skachkov V. Entropy approach to the investigation of information capabilities of adaptive radio engineering system in conditions of intrasystem uncertainty / V.V. Skachkov, V.V. Chepkyi, H.D. Bratchenko, A.N. Efymchykov // *Radioelectronics and Communications Systems*. – June 2015, Volume 58, Issue 6, pp 241-249.

5. Чумаков Н.М. Оценка эффективности сложных технических устройств / Н.М. Чумаков, Е.И. Серебряный. – М. : Сов. радио, 1980. – 192 с.

6. Дулесов А.С. Свойства энтропии технической системы / А.С. Дулесов, М.Ю. Семенова, В.И. Хрусталева // *Фундаментальные исследования*. – 2011. – № 8. – С. 631–636.

7. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / Шеннон К. – М.: Ин. лит., 1963. – 827 с.

8. Манко Г.И. Информационный подход к оценке неопределенности управляющих воздействий / Г.И. Манко, И.Г. Каюн // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2008. – № 1. – С. 180–182.

9. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. / А. Дж Вильсон. – М. : Главная редакция физико-математической литературы издательства Наука, 1978. – 248 с.

10. Скачков В.В. Энтропийное оценивание влияния внутрисистемных возмущений на информационные возможности адаптивной радиотехнической системы / В.В. Скачков, В.В. Чепкий, А.Н. Ефимчиков, Г.Д. Братченко, В.И. Павлович // *Сборник научных трудов в 4-х томах. Том 4. Конференция Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии*. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2014. – С. 55–59.

СИНТЕЗ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СОСТОЯНИЯ АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В.В. Скачков, В.В. Чепкий, А.Н. Ефимчиков, А.Д. Ельчанинов, В.Ф. Тимков

Предложено степень неопределённости состояния адаптивной информационно-измерительной системы наземного робототехнического комплекса численно оценивать средним количеством информации на её выходе, используя модифицированную метрику Шеннона. На основе энтропийного подхода синтезирован интегральный показатель информационной эффективности исследуемой системы, получены общая и частная аналитические формы его представления. Оценены потери информации в информационно-измерительной системе робототехнического комплекса при условии воздействия внешних возмущений и расширения спектра внутрисистемных возмущений, включая и многопараметрический вектор адаптивного управления.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, наземный робототехнический комплекс, энтропийный подход, интегральный показатель, внешние и внутрисистемные возмущения, неопределённость.

SYNTHESIS OF INTEGRAL QUALITY INDICATOR TO THE STAN OF THE ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF THE GROUND ROBOTECNICAL COMPLEX

V. Skachkov, V. Chepkyi, O. Yefymchikov, O. Yelchaninov, V. Timkov

The degree of uncertainty in the state of the adaptive information-measuring system of the ground robotic complex is estimated numerically by the average amount of information at its output, using the modified Shannon metric. On the basis of the entropy approach, an integral indicator of the information efficiency of the system under study was synthesized, and a general and particular analytical forms of its representation were obtained. The loss of information in the information-measuring system of the robotic complex is estimated under the condition of external disturbances and the expansion of the spectrum of intrasystem disturbances, including the multiparametric vector of adaptive control.

Keywords: information-measuring system, ground robotic complex, entropy approach, integral indicator, external and intrasystem disturbances, uncertainty.