

Тестування інформаційно-керуючої системи з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії на основі методу прямого моделювання із зовнішнім еталоном

Testing of the information control system with multi-sensory channels of information interaction based on the method of direct modeling with an external reference

Денис Котов^A

Corresponding author: ад'юнкт, e-mail: zvyagel.zt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6775-5593

Denys Kotov^A

Corresponding author: PhD student, e-mail: zvyagel.zt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6775-5593

Віктор Клименко^A

к. тех. н., старший науковий співробітник, e-mail: viktorklymenko1971@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8073-4404

Viktor Klymenko^A

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: viktorklymenko1971@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8073-4404

^A Військова академія м. Одеса, Україна

^A Military Academy, Odesa, Ukraine

Received: August 2, 2023 | Revised: August 19, 2023 | Accepted: August 31, 2023

DOI: 10.33445/sds.2023.13.4.5

Мета роботи: полягає в обґрунтуванні аналітичного підходу до моделювання процесу тестування класу інформаційно-керуючих систем з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії в умовах впливу негаусових завад.

Метод дослідження: основним методом дослідження є метод прямого моделювання на основі теореми ортогональності для випадку сумісної системи із зовнішнім еталоном.

Результати дослідження: в роботі представлено результати моделювання процесу тестування класу інформаційно-керуючих систем з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії в умовах впливу негаусових завад для випадку сумісної системи із зовнішнім еталоном на основі синтезованих аналітичних виразів.

Теоретична цінність: основними результатами дослідження за тематикою статті є: синтез аналітичної моделі процесу тестування класу інформаційно-керуючих систем з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії в умовах впливу негаусових завад.

Тип статті: теоретична (розрахунково-аналітичний).

Purpose: the purpose of the article is to substantiate the analytical approach to modeling the process of testing a class of information-control systems with multi-sensory channels of information interaction under the influence of non-Gaussian disturbances.

Method: the main research method is the method of direct modeling based on the orthogonality theorem for the case of a compatible system with an external standard.

Findings: the paper presents the results of modeling the process of testing a class of information-control systems with multi-sensory channels of information interaction under the influence of non-Gaussian interference for the case of a compatible system with an external standard based on synthesized analytical expressions.

Theoretical implications: the main results of the research on the topic of the article are: synthesis of an analytical model of the process of testing a class of information-control systems with multi-sensory channels of information interaction under the influence of non-Gaussian disturbances.

Paper type: theoretical (computational and analytical).

Ключові слова: інформаційна система, негаусова завада, тестування системи, адаптація, аналітичне моделювання.

Key words: information system, non-Gaussian interference, system testing, adaptation, analytical modeling.

1. Вступ

Розвиток сучасних зразків автомобільної техніки характеризується високим рівнем автоматизації процесів моніторингу стану систем та механізмів автомобіля, умов його руху та визначення стану водія. Впровадження таких систем у першу чергу направлене на підвищення безпеки автомобіля як механічного транспортного засобу, що приймає участь у дорожньому русі та є об'єктом небезпеки. Наявність систем, що автоматизують функції водія, забезпечують підвищення безпекового рівня у керуванні автомобілем у пілотному його режимі шляхом надання водію більшого об'єму інформації для прийняття управлінського рішення.

У відповідності зі стандартом [1], впровадження таких систем відповідає різним рівням автоматизації автомобіля. Як правило, ці системи відносяться до типу систем Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), призначені для надання допомоги водію у керуванні транспортним засобом. Системи допомоги водію ADAS можливо віднести до інформаційно-керуючих систем (ІКС), в яких управлінське рішення залишається за водієм. Але для випадку безпілотного режиму руху автомобіля, ІКС типу ADAS потребують удосконалення в частині забезпечення їх стійкого функціонування в умовах впливів дестабілізуючих факторів.

2. Теоретичні основи дослідження

У наш час у світі розроблено і широко використовуються робототехнічні системи (РС) у різних сферах життєдіяльності. Роботизація замінила людей на небезпечних, для життя та здоров'я, сферах та у важких умовах праці.

Розглянемо деяку активну робототехнічну систему, що містить інформаційні пристрої та системи (ІПС) і яка взаємодіє із зовнішнім середовищем (Рис.1).

Інтелектуальні здібності в таких РС визначаються керуючою та інформаційно-вимірною підсистемами, а виконавчі та комунікативні здібності реалізуються під системами зв'язку та керування [2].

Відмінними рисами РС є їх універсальність, здатність до навчання та адаптації в процесі сприйняття вхідної інформації та вплив на навколишнє середовище (за допомогою виконавчих механізмів), а також багатоцільове призначення, пов'язане з автоматизацією фізичної та інтелектуальної діяльності оператора [2]. Залежно від розвиненості сенсорної системи та системи управління РС діляться на чотири покоління [1-3].

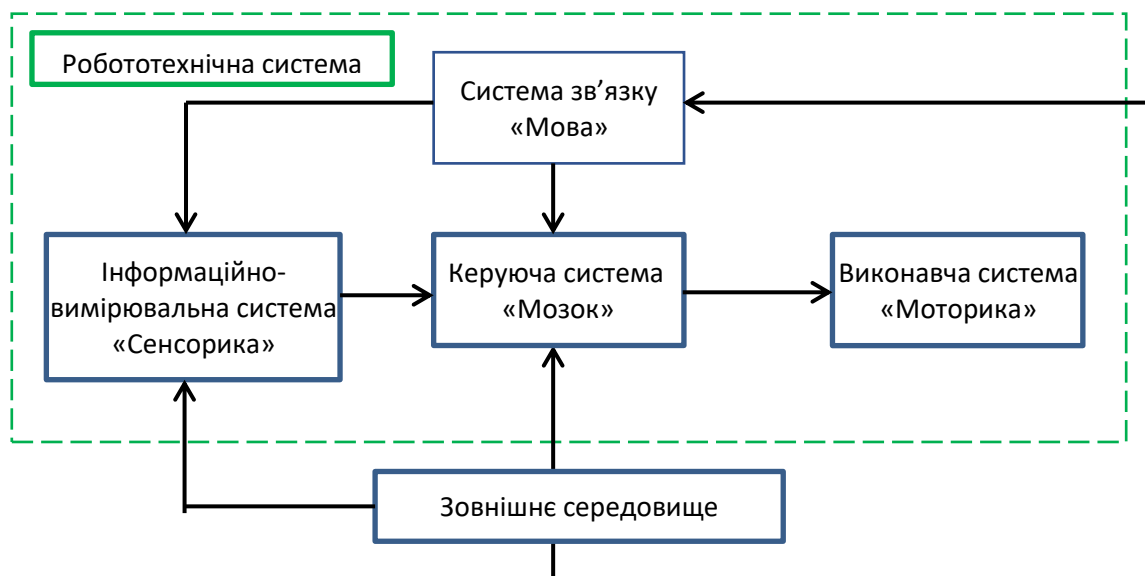


Рисунок 1 – Узагальнена структурно-функціональна схема робототехнічної системи, що взаємодіє з навколишнім середовищем

Припустимо, що ця активна робототехнічна система має апіорну інформацію про середовище та в процесі функціонування отримує поточну інформацію як про зовнішнє середовище, так і про власний стан. Метою активної робототехнічної системи є прийняття рішень, пов'язаних із перетворенням чи аналізом інформації щодо навколишнього середовища. Найчастіше інформація буває неповною, тому робототехнічна система функціонує за умов невизначеності. У зв'язку з цим під адаптацією розумітимемо здатність активної робототехнічної системи досягати заданих цілей в умовах невизначеності на основі

використання поточної інформації про власний стан та стан середовища з об'єктами, При цьому можуть змінюватися параметри робототехнічної системи, її структура та алгоритм функціонування [4].

Залежно від рівня автоматизації та сукупності функцій керування автомобілем ускладнюється сам процес формування та обробки первинної інформації про навколишнє середовище і, безпосередньо, про автомобіль як технічний пристрій, щоб розробити варіанти його поведінки в безпілотному режимі роботи (руху) [4].

Таким чином, для вирішення проблеми автономного керування, починаючи з третього-четвертого рівнів автоматизації, ключовим завданням є створення ІКС, модулі якої мали б можливість реалізації алгоритмів (моделей) багатосенсорного інформаційного масиву із заданим ступенем якості при апріорній невизначеності щодо структури вхідного інформаційного масиву, який апріорі є випадковим [4-5].

Функціонально такого типу ІКС повинні мати можливість реалізації стійкого процесу формування та фільтрації інформаційних процесів незалежно від моделі корисного сигналу та моделей шумових завад [4-5].

Таким чином структурно та функціонально інформаційно-керуюча система автомобіля починаючи з четвертого рівня автоматизації повинна забезпечувати вирішення ряду підзадач: прийняття (реєстрацію) первинної інформації – вхідного інформаційного процесу від підсистеми різносенсорних датчиків, формування моделі ситуації (зображення об'єкта) на основі вхідного інформаційного процесу з прийнятним рівнем якості, пошук та класифікацію об'єктів середовища функціонування, визначення цих об'єктів в робочій зоні, визначення орієнтації об'єктів у просторі та вимірювання їх характерних параметрів.

Тому в контексті постановки мети дослідження системного значення набуває питання формалізації предметної області функціонування роботизованого автомобіля, інформаційна система якого являє собою інформаційно-керуючою системою з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії, яка функціонує в умовах впливу дестабілізуючих факторів (рис. 2).

Система формалізації передбачає визначення процесної моделі спостережень та застосування мови просторово-часового опису умов виконання операції $w \in W$, стану об'єкта роботизації та впливу на нього зовнішніх і внутрішніх збурень. Прийнятий в процесній моделі підхід виходить з вибраного критерію ефективності J_G або заданої цільової функції в наступній інформаційно-ймовірнісній інтерпретації вихідних даних. Зокрема:

– сукупність апріорно невідомих параметрів процесу технологічної взаємодії різносенсорної системи роботизованого автомобіля з електромагнітними джерелами інформації середовища експлуатації представляється m -мірним вектором $X = X_{m \times 1}$. В прив'язці до реальної ситуації припускається існування зовнішніх перешкод $\eta(t)$ і носія інформаційних параметрів, так званого корисного сигналу $S(t)$, які описуються k -мірним вектором $\eta = \eta_{k \times 1}$ з $m_\eta = M(\eta) = 0$ і $A_\eta = M(\eta \eta^m)$ та k -мірним вектором $S = S_{k \times 1}$ з $m_S = M(S)$ і $A_S = M(SS^m)$, відповідно;

– результат спостереження процесу взаємодії різносенсорної системи незалежних датчиків D_X об'єкта роботизації з сукупністю вхідних реалізацій X описується за правилами векторно-матричних перетворень:

$$U = D_X(S + \eta) + n, \quad (1)$$

де $D_X = D_{X(m \times k)}$ – матриця передаточних функцій системи різносенсорних датчиків;
 $n = n_{m \times 1}$ – m -мірний вектор внутрішніх шумів системи датчиків (незалежних помилок вимірювання), який має нульове математичне сподівання $m_n = M(n) = 0$ та одиничну матрицю кореляції $A_n = M(nn^T) = I$;

– передбачається, що вектори корисного сигналу S , зовнішніх перешкод η та внутрішніх шумів системи n некорельовані між собою, тобто: $M[\eta n^m] = 0$; $M[S n^m] = 0$; $M[S^m \eta] = 0$, де $0 = 0_{k \times m}$ – прямокутна нульова $(k \times m)$ -мірна матриця.

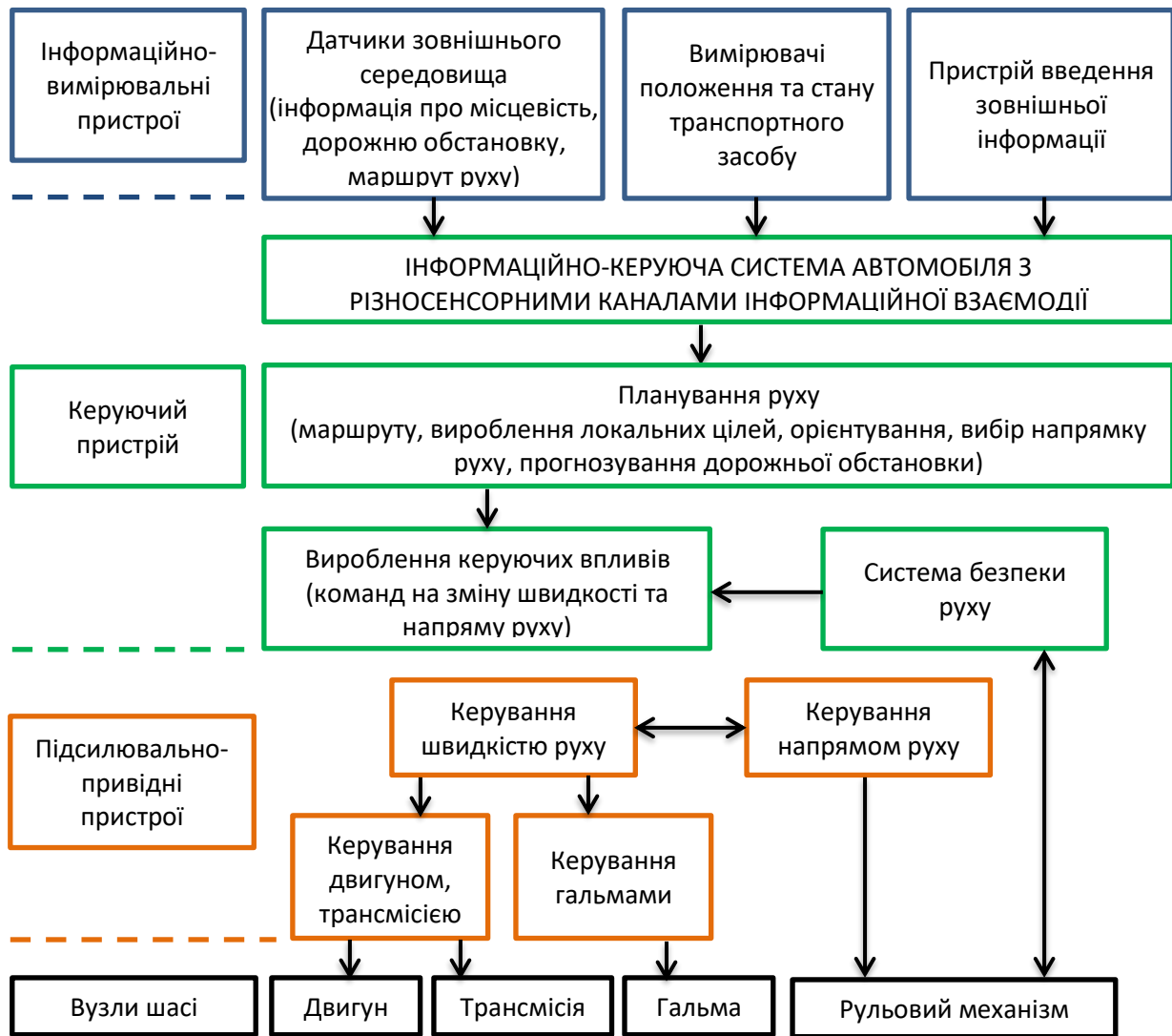


Рисунок 2 – Приклад функціональної схеми інформаційної системи РА

Зазначена інформаційно-ймовірнісна інтерпретація моделі даних враховує власну надлишковість модельного варіанту роботизованого автомобіля та надмірність середовища його експлуатації. Інформаційна надлишковість вводиться в результат спостереження U таким чином, щоб оцінка параметрів \tilde{S} невідомого вектору S задовольняла критерію оптимальності в евклідовій метриці, зокрема, мінімуму середньоквадратичній похибки наближення:

$$\varepsilon = M \left\{ \|S - \tilde{S}\|^2 \right\} = \min, \quad (2)$$

де $\|\bullet\|$ – норма вектору, що описує параметри корисного сигналу.

Оцінка параметрів \tilde{S} знаходиться у класі лінійних перетворень шляхом об'єднання (комплексування) результатів спостереження U на виході системи незалежних різносенсорних датчиків за наступним алгоритмом

$$\tilde{S} = F_D^{-1}(U) = F_D^{-1}[F(X)] = W_X U, \quad (3)$$

де $F_D^{-1}(\bullet)$ – оператор перетворення вектору спостережень U ;
 $W_X = W_{X(k \times m)}$ – матрична передавальна характеристика системи об'єднання результатів спостереження U , яка оптимальна за критерієм (2).

Схематична інтерпретація алгоритмів (1) і (3) в узагальненому вигляді наведена на рис. 5.

Узагальненість даної схеми полягає у тому, що в ній, поряд із зовнішніми факторами η , відображуються і внутрісистемні фактори дестабілізації ΔW , які в алгоритмах (1) і (3) на даний момент відсутні.

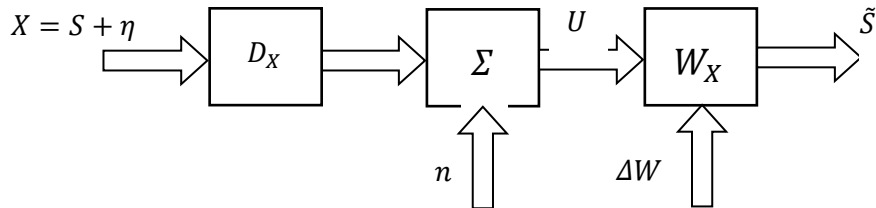


Рисунок 3 – Схема формування оцінки параметрів корисного сигналу

Визначення передавальної характеристики системи W_X базується на умові ортогональності вектору результату спостереження U та вектору незалежних похибок вимірювання $E = S - \tilde{S}$:

$$M \left\{ \begin{bmatrix} S_{k \times 1} - \tilde{S}_{k \times 1} \\ U_{1 \times m}^m \end{bmatrix} \right\} = 0_{k \times m}, \quad (4)$$

Підставляючи до (4) значення оцінки (3), отримуємо систему рівнянь для визначення оптимальної передавальної характеристики W_X :

$$M \{ [S - \tilde{S}] U^m \} = W_X M \{ U U^m \}. \quad (5)$$

Рішення зазначеної системи рівнянь являє собою класичну обернену задачу, за результатами розв'язання якої визначається передавальна характеристика системи об'єднання різносенсорних інформаційних каналів, зокрема:

$$W_{X(k \times m)} = \alpha_{k \times m} A_{m \times m}^{-1}, \quad (6)$$

де $A_{m \times m} = M \{ U_{m \times 1} U_{1 \times m}^m \}$ – кореляційна матриця процесу спостереження;
 $\alpha_{k \times m}$ – прямокутна матриця еталонних векторів у вигляді

$$\alpha_{k \times m} = \begin{pmatrix} \alpha_{1, (1 \times m)}^m \\ \alpha_{2, (1 \times m)}^m \\ \vdots \\ \alpha_{k, (1 \times m)}^m \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Підставивши вираз (6) до (3), отримаємо значення лінійної незміщеної оцінки вектору корисного сигналу:

$$\tilde{S} = \tilde{S}_{k \times 1} = \alpha_{k \times m} A_{m \times m}^{-1} U_{m \times 1}, \tag{8}$$

з мінімальною похибкою вимірювання $E_{\min} = S - \tilde{S} = S - \alpha A^{-1} U$.

Кореляційна матриця похибки вимірювання E з урахуванням раніше визначених статистичних моментів має наступний вигляд

$$M(EE^m) = A_S - \alpha A^{-1} \alpha^m. \tag{9}$$

Слід кореляційної матриці $tr\{M(EE^m)\}$ виражає найменше з можливих значень середньоквадратичної похибки: $\varepsilon = tr\{M(EE^m)\}$.

Модельний варіант об'єднання за алгоритмом (9) різносенсорних каналів інформаційної системи роботизованого автомобіля в умовах апіорної невизначеності середовища його перебування, представлено на рис. 3.

Відображуючи оптимальну структуру об'єднання даних, модельний варіант алгоритму об'єднання (рис. 4) передбачає операцію «відбілювання» $A_{m \times m}^{-1}$ зашумлених реалізацій на виході системи датчиків $U_{m \times 1}$ та операцію порівняння отриманого результату з вектором еталонів $\alpha_{m \times k}$ (апіорних образів). За наслідками виконання цих операцій формується оптимальна оцінка $\tilde{S}_{k \times 1}$ вектору стану зовнішнього середовища. Оптимальність оцінки вектору $\tilde{S}_{k \times 1}$ проаналізуємо у відповідності до трьох ситуацій:

- перша ситуація – кількість вимірювань m (датчиків інформації) менше кількості вимірювальних параметрів k , тобто $m < k$;
- друга ситуація – кількість вимірювань m (датчиків інформації) більше кількості вимірювальних параметрів k , тобто $m > k$;
- третя ситуація – кількості вимірювань m (датчиків інформації) і дорівнює кількості вимірювальних параметрів k , тобто $m = k$.

Дослідження зазначених ситуацій проводяться на основі відносної оцінки середньоквадратичної похибки параметрів вектору $S_{k \times 1}$:

$$\tilde{\varepsilon}_{\min} = \frac{tr\{M(EE^T)\}}{\|S\|^2} = \frac{M\{\|S - \tilde{S}\|^2\}}{\|S\|^2}. \tag{10}$$

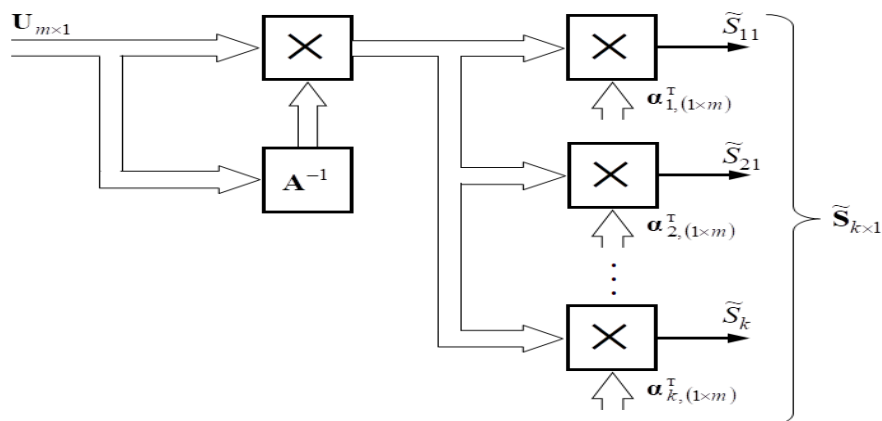


Рисунок 4 – Схема оптимальної системи об'єднання різносенсорних каналів РА

Для першої ситуації, коли надлишковість системи датчиків відсутня $m < k$, оцінка середньоквадратичної похибки визначається за формулою:

$$\tilde{\varepsilon}(m < k)(k - m) \frac{1}{q_S} \operatorname{tr} \left[D_{X(m \times k)} D_{X(k \times m)}^m \right]_{\min}^{-1}, \quad (11)$$

де q_S – співвідношення сигнал/шум в інформаційному каналі.

За альтернативної ситуації, коли має місце надлишковість системи датчиків $m > k$, оцінка середньоквадратичної похибки набуває такого значення

$$\tilde{\varepsilon}(m > k) \frac{1}{q_S} \operatorname{tr} \left[D_{X(k \times m)}^m D_{X(m \times k)} \right]_{\min}^{-1}. \quad (12)$$

Для ситуації $m = k$ оцінка середньоквадратичної похибки складає

$$\tilde{\varepsilon}(m = k) \frac{1}{q_S} \operatorname{tr} \left[D_{X(m \times m)}^{-1} D_{X(m \times m)}^{-1} \right] \frac{1}{q_S} \left\| D_{X(m \times m)}^{-1} \right\|_{\min}^2. \quad (13)$$

Виконавши ряд стандартних перетворень і трансформацій з (11) – (13), отримуємо систему рівнянь для ситуаційного аналізу оцінки середньоквадратичної похибки в умовах впливу дестабілізуючих факторів зовнішнього і внутрісистемного походження. Зокрема:

$$\tilde{\varepsilon}(m < k)(k - m) \frac{q_\eta}{q_S} \operatorname{tr} \left[D_{X(m \times k)} D_{X(k \times m)}^m \right]_{W_X}^{-1^2} (m, k) | (m < k)_{\min}, \quad (14)$$

$$\tilde{\varepsilon}(m > k) \frac{q_\eta}{q_S} \operatorname{tr} \left[D_{X(k \times m)}^m D_{X(m \times k)} \right]_{W_X}^{-1^2} (m, k) | (m > k)_{\min}, \quad (15)$$

$$\tilde{\varepsilon}(m = k) \frac{q_\eta}{q_S} \left\| D_{X(m \times m)}^{-1} \right\|_{W_X}^{2^2} (m, k) | (m = k)_{\min}, \quad (16)$$

- де q_η – перевищення потужності перешкоди зовнішнього середовища над рівнем потужності внутрішніх шумів системи датчиків;
 $\sigma_{W_X}^2$ – відносний рівень дестабілізуючих внутрісистемних збурень;
 $f(m, k)$ – функція чутливості системи інформаційних датчиків до дестабілізуючих внутрісистемних збурень за умов $(m < k)$, $(m > k)$ або $(m = k)$.

3. Постановка проблеми

Дослідження проблематики завдань стійкого функціонування інформаційно-керуючих систем із різносенсорними каналами інформаційної взаємодії, як підкласу інформаційних систем які функціонують в умовах впливу дестабілізуючих факторів, лежить в площині удосконалення існуючих і синтезу нових методів та алгоритмів якісної фільтрації інформаційних процесів на тлі широкого спектру моделей завод.

Існуючі моделі та алгоритми фільтрації інформаційних процесів в інформаційно-керуючих системах, як правило, базуються на рішеннях задач з гаусовою формою моделей завод. При цьому, ефективність роботи таких систем по критерію співвідношення

сигнал/завада+шум, де модель завади має негаусову форму, а в моделі шуму адитивно об'єднані внутрішній шум та внутрішньосистемні збурення є не ефективною.

Тому дослідження підходів, на основі методів теорії лінійної алгебри, щодо синтезу аналітичних моделей обробки (фільтрації) інформаційних процесів в інформаційно-керуючих системах з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії є актуальним науковим завданням, в сенсі розробки методів тестування такого класу систем в умовах впливу негаусових завад на етапі їх синтезу.

4. Результати

Для перевірки викладених теоретичних положень розглянемо варіант узагальненої задачі фільтрації інформаційних процесів в умовах внутрішньо системних збурень (внутрішньо-системної невизначеності) що циркулюють в інформаційно-керуючій системі роботизованого автомобіля з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії

Тут $X(m, 1)$ – вхідний (тестовий) процес, що об'єднує в собі апіорну інформацію про навколишнє середовище з об'єктами, яка поступає в інформаційно-керуючу систему по різносенсорним каналам інформаційної взаємодії та об'єднується в єдиний інформаційний вхідний процес за схемою представленою на рис. 4.

На рисунку 5 схематично представлено процедури фільтрації вхідних процесів в залежності від умов впливу дестабілізуючих факторів.

Тут вихідний процес $Y(n, 1)$, який являє собою результат обробки вхідного (тестового) процесу $X(m, 1)$, формується за схемою представленою на рис. 5а, у відповідності з виразом (17)

$$Y(n, 1) = H(n, m)X(m, 1) + n(n, 1) \quad (17)$$

де $n(n, 1)$ – адитивна шумова складова, яка ілюструє внутрішні шуми системи $H(n, m)$, що формує випадковий процес $Y(n, 1)$.



Рисунок 5 – Схеми фільтрації вхідних процесів в залежності від умов впливу дестабілізуючих факторів.

Якість вихідного випадкового процесу $Y(n, 1)$ буде залежати від передавальної характеристики системи $H(n, m)$, адитивної шумової складової $n(n, 1)$ та внутрішньо-системних збурень, що об'єктивно присутні в інформаційних системах [6-10].

Для випадку ідеальної системи формування вихідного випадкового процесу $Y(n, 1)$ результат буде максимально близьким до вхідного процесу $X(m, 1)$ [7].

В такому випадку вплив апіорної невизначеності щодо передавальної характеристики системи $H(n, m)$ та дестабілізуючих факторів буде мінімальним і якість отриманого вихідного процесу за критерієм (10) для ситуації сумісної системи за виразом (16) буде достатньою для вироблення управлінського рішення. Тобто співвідношення сигнал/завада+шум буде більшим за одиницю.

У випадку недостатньої якості отриманого вихідного процесу $\vec{Y}(n, 1)$ виникає необхідність фільтрації такого сигналу. Така необхідність виникає і у випадку впливу

дестабілізуючих факторів в процесі передачі сформованого вихідного інформаційного процесу на пункт приймання для подальшого прийняття управлінського рішення оператором

В цьому випадку вихідний процес $Y(n, 1)$ можна інтерпретувати моделлю виду (1) а його оцінку моделлю (3) за схемою на рис. 3.

Отже, для нашого варіанту узагальненої задачі результат фільтрації процесу: $X(m, 1)$: буде мати вид:

$$\begin{aligned}\hat{X}(m, 1) &= W(m, n)Y(n, 1) = \\ &= W(m, n)H(n, m)X(m, 1) + W(m, n)n(n, 1) = \\ &= Q(m, m)X(m, 1) + W(m, n)n(n, 1)\end{aligned}\quad (18)$$

Що відповідає моделі оцінки результатів фільтрації в (3) за схемою на рис.3 без врахування внутрісистемних дестабілізуючих факторів.

Але реальні умови фільтрації вхідного процесу далекі від ідеальних умов, тому необхідно проводити фільтрацію з врахуванням впливу всіх дестабілізуючих факторів: впливу зовнішніх факторів η , внутрісистемних факторів дестабілізації ΔW та фактору внутрішніх шумів n .

В такому випадку результат фільтрація за схемою (рис.5,б) в умовах внутрішньо-системних збурень параметричної матриці буде мати вид (19):

$$\begin{aligned}\tilde{X}(m, 1) &= [W(m, n) + \Delta W(m, n)]H(n, m)X(m, 1) + \\ &+ [W(m, n) + \Delta W(m, n)]n(n, 1)\end{aligned}\quad (19)$$

При цьому оцінка якості фільтрації буде проводитися через визначення помилки фільтрації в умовах внутрішньої невизначеності за виразом

$$\begin{aligned}\varepsilon \triangleq X - \tilde{X} &= X - (W + \Delta W)HX - (W + \Delta W)n = \\ &= [I - (W + \Delta W)H]X - (W + \Delta W)n\end{aligned}\quad (20)$$

Випадкові процеси ΔW , n мають наступні статистичні властивості ΔW :

Статистичні властивості ΔW :

1. $\overline{\Delta W(m, n)} = O(m, n)$;
2. $\overline{\Delta W^T(n, m)\Delta W(m, n)} = \sigma_w^2 I(n, n)$;

Статистичні властивості \vec{n} :

1. $\overline{n(n, 1)} = O(n, 1)$; $\overline{n^T(1, n)n(n, 1)} = \|n(n, 1)\|^2 = P_{\text{ш}}$;
2. $\frac{\overline{n(n, 1)n^T(1, n)}}{\|n(1, n)\|^2} = I(n, n)$ – "білий" шум

Зауважимо, що вектори корисного сигналу, зовнішніх перешкод та внутрішніх шумів системи некорельовані між собою, тобто статистичні зв'язки між процесами ΔW , X та n відсутні. Як зазначається в (6, 7) рішення задачі (19) залежить від узгодженості розмірності системи формування вихідного процесу $Y(n, 1)$ (схема рис. 5,а) або системи фільтрації (схема рис. 5, б) з розмірністю вхідного випадкового процесу $X(m, 1)$. Іншими словами на рішення буде впливати визначеність системи в сенсі її узгодженості по розмірності з вхідним випадковим процесом.

Отже, подальше дослідження можливих ситуацій щодо визначеності інформаційно-керуючої системи проводяться на основі відносної оцінки (21) середньоквадратичної похибки параметрів вектору корисного сигналу.

$$\begin{aligned} \|\varepsilon\|^2 &= \overline{X^T [I - H^T (W^T + \Delta W^T)] [I - (W + \Delta W)H] X} + \overline{n^T (W^T + \Delta W^T) (W + \Delta W) n} = \\ &= \overline{X^T [I - H^T W^T - WH + H^T (W^T W + \Delta W^T \Delta W) H] X} + \\ &+ \overline{n^T (W^T W + \Delta W^T \Delta W) n} = \overline{X^T (I - H^T W^T - WH + H^T W^T W H) X} + \overline{n^T W^T W n} + \\ &+ \overline{X^T H^T (\Delta W^T \Delta W) H X} + \overline{n^T (\Delta W^T \Delta W) n}; \end{aligned} \quad (21)$$

В результаті застосування процедури усереднення квадратичних форм для складових у виразі (21) отримуємо наступні результати:

1. $\overline{n^T W^T W n} = \text{tr} (W^T W \overline{nn^T}) = P_w \|W\|^2;$
2. $\overline{n^T \Delta W^T \Delta W n} \text{tr} (\overline{\Delta W^T W nn^T}) = P_w \|\Delta W\|^2;$
3. $\overline{X^T H^T \Delta W^T \Delta W H X} = \text{tr} (H^T \overline{\Delta W^T \Delta W H X X^T}).$
- 4.

Отже, з врахуванням вище викладеного, необхідно зазначити, що система, яка досліджується в першому варіанті (схема рис. 5, а), тобто

$$Y(n, 1) = H(n, m)X(m, 1) + n(n, 1)$$

або система в другому варіанті (схема рис. 5, б), тобто

$$\hat{X}(m, 1) = W(m, n)Y(n, 1)$$

можуть мати три ситуації щодо визначеності (11,12)

1. Недовизначена система: $n < m; \text{rank} H(n, m) = n.$

У цьому випадку матриця $W(m, n)$ буде рівна:

$$W(m, n) \triangleq H^T(m, n)[H(n, m)H^T(m, n)]^{-1}.$$

Тут відносна оцінка (21) середньоквадратичної похибки параметрів вектору корисного сигналу буде мати вид:

$$\|\varepsilon\|^2 = P_w \text{tr} A^{-1}(m, m) + \sigma_H^2 \{ (n - m) \|A^{-1}(m, m)\|^2 P_w + \text{tr} A^{-1}(m, m) [P_w \text{tr} A^{-1}(m, m) + \|X(m, 1)\|^2] \}; \quad (22)$$

де $A(m, m) = H^T(m, n)H(n, m)$

2. Перевизначена система: $n > m; \text{rank} H(n, m) = m$

У цьому випадку матриця $W(m, n)$ буде рівна:

$$W(m, n) = [H^T(m, n)H(n, m)]^{-1} H^T(m, n).$$

Тут відносна оцінка (21) середньоквадратичної похибки параметрів вектору корисного сигналу буде мати вид:

$$\begin{aligned} \|\varepsilon\|^2 &= \|X(m, 1)\|^2 - \|\hat{X}(m, 1)\|^2 + P_w \text{tr} A^{-1}(n, n) + \\ &+ \sigma_H^2 \{ (m - n) [P_w \|A^{-1}(n, n)\|^2 + \|A^{-1}(n, n)H(n, m)X(m, 1)\|^2] + \\ &+ \text{tr} A^{-1}(n, n) [P_w \text{tr} A^{-1}(n, n) + \|\hat{X}(m, 1)\|^2] \}; \end{aligned} \quad (23)$$

де $A(n, n) = H(n, m)H^T(m, n).$

3. Визначена система: $m = n \rightarrow$

У цьому випадку формули $A(n, n) = H(n, m)H^T(m, n)$ та $A(m, m) = H^T(m, n)H(n, m)$ сходяться до вигляду $H^T = H$, а відносна оцінка (21) середньоквадратичної похибки параметрів вектору корисного сигналу буде мати вид:

$$\|\varepsilon\|^2 = P_w \|H^{-1}\|^2 + \sigma_H^2 \|H^{-1}\|^2 [P_w \|H^{-1}\|^2 + \|X\|^2]; \quad (24)$$

За виразом (24) було проведено статистичне моделювання в середовищі Matlab процесу обробки ряду вхідних процесів у формі кольорових зображень різної розмірності та роздільної здатності для випадку сумісної системи за схемою рис.5,б .

На рис. 6 представлено результат моделювання процесу відновлення вихідного випадкового інформаційного процесу $Y(n, 1)$ (рис. 6 б, 7 б, 8 б), який являє собою результат впливу дестабілізуючих факторів на вхідний тестовий сигнал $X(m, 1)$ представлений на рис (рис. 6 а, 7 а) і сформований за схемою на рис. 5.а.

Вплив дестабілізуючих факторів моделювався завадами з різною щільністю розподілу ймовірностей (рис. 6 г, 7 г, 8 г) та різною структурою просторового спектру при однаковому рівні потужності завад (рис. 6 д, 7 д, 8 д) за виразом (25):

$$\text{Noise} = (\text{Sgrt}(3)) \cdot P \cdot (2 \cdot \text{randn}(5, L) - \text{ones}(5, L)) + pdd \cdot P \cdot \text{randn}(5, L) \quad (25)$$

де pdd – коефіцієнт зміни щільності розподілу ймовірностей, L – розмірність вхідного процесу

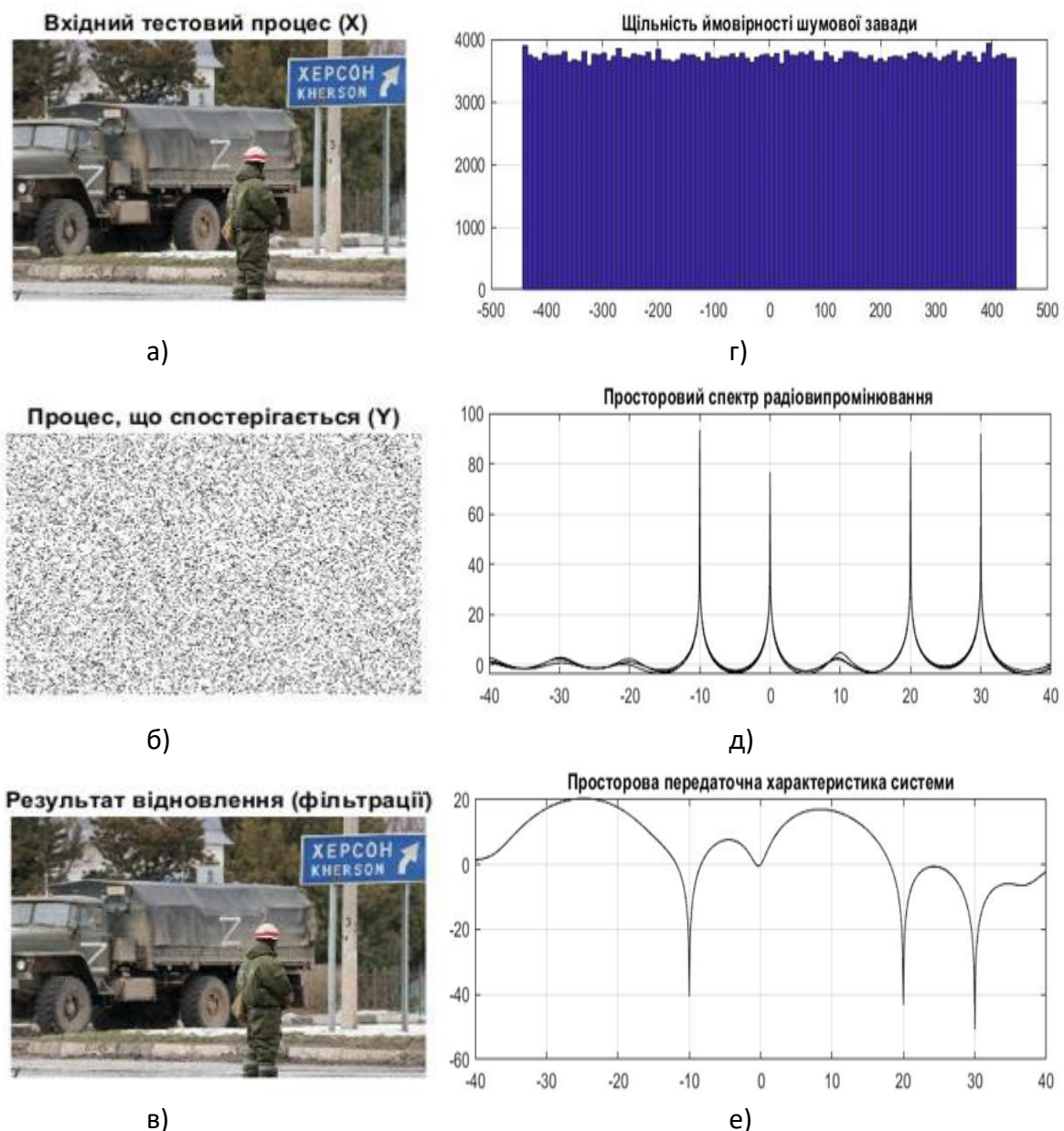


Рисунок 6 – Результати моделювання процесу відновлення зображення в умовах шумів (щільність розподілу ймовірностей з коефіцієнтом $pdd = 0$)

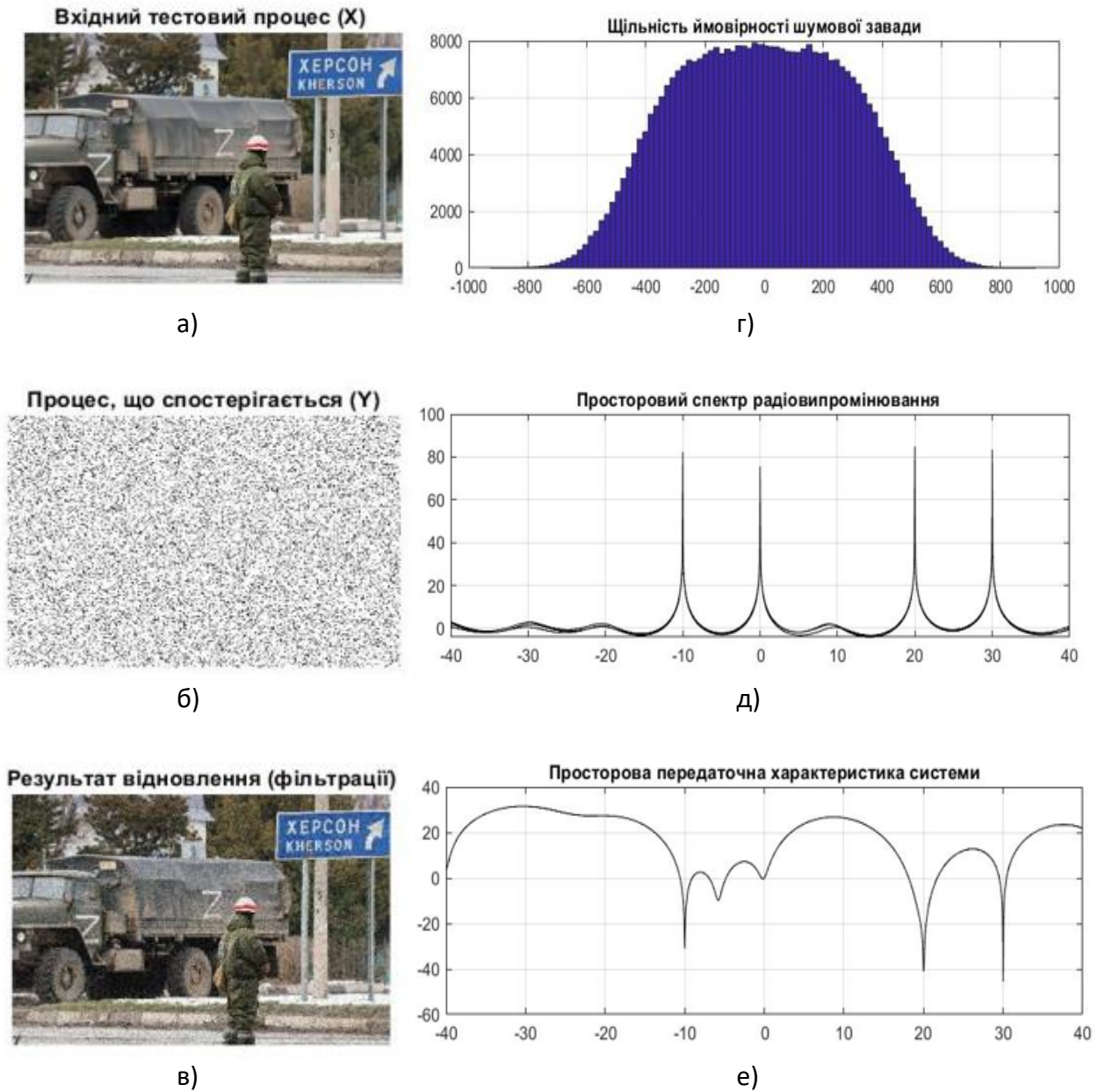
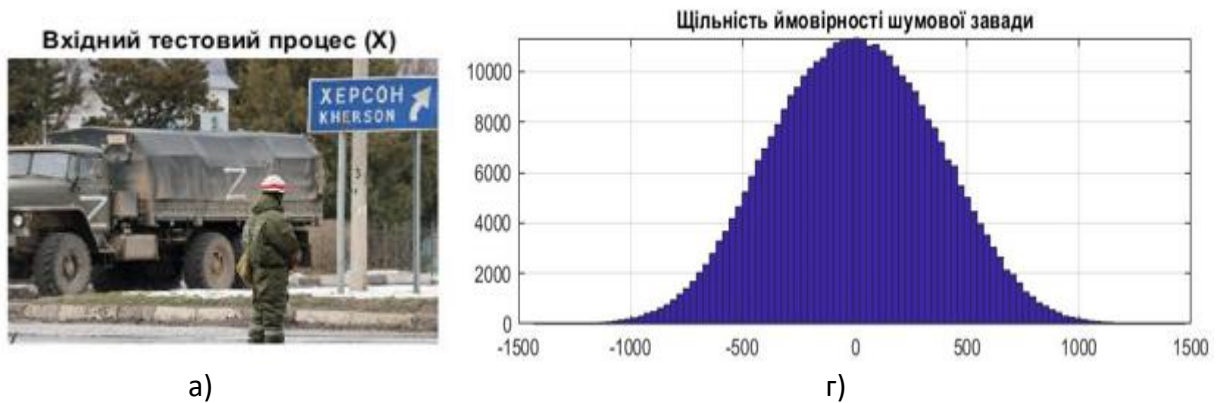


Рисунок 7 – Результати моделювання процесу відновлення зображення в умовах шумів (щільність розподілу ймовірностей з коефіцієнтом $pdd = 0,5$)



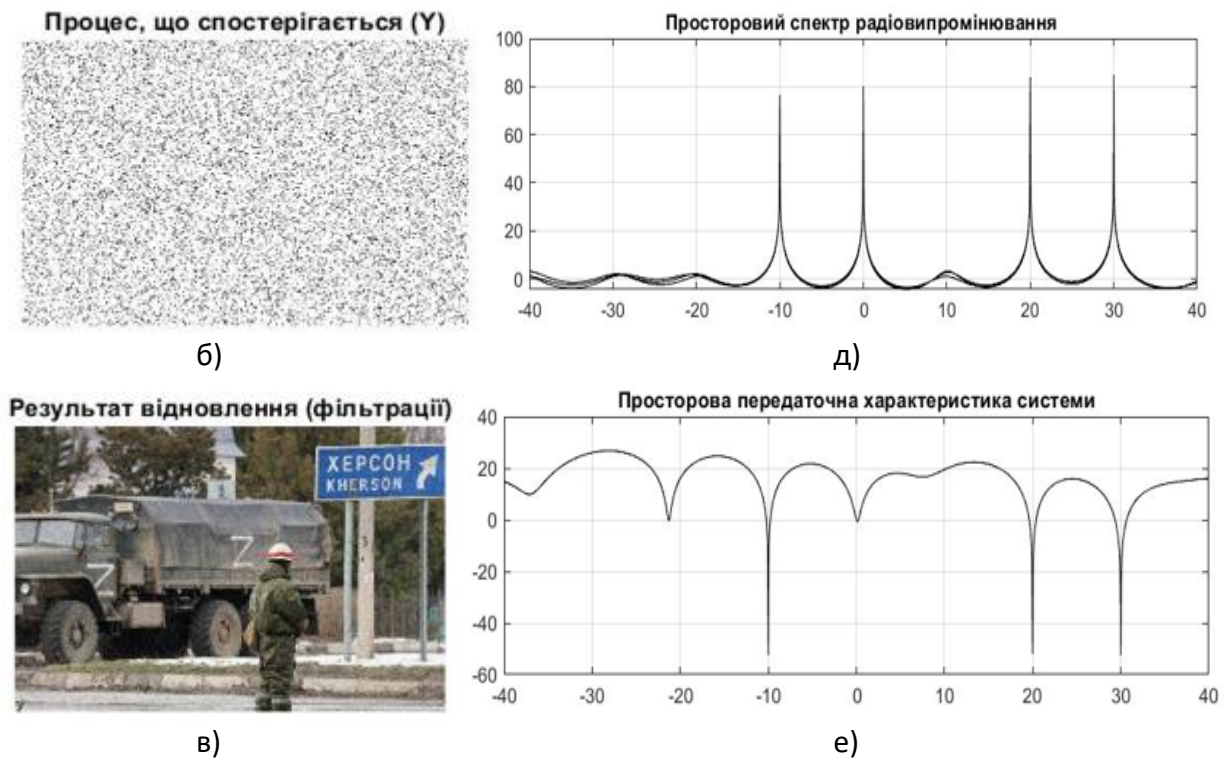


Рисунок 8 – Результати моделювання процесу відновлення зображення в умовах шумів (щільність розподілу ймовірностей з коефіцієнтом $p_{dd} = 1$)

Як видно з рисунків 6е, 7е, 8е передавальна характеристика системи фільтрації W в умовах внутрішньосистемної невизначеності (внутрісистемних факторів дестабілізації) ΔW адаптивно налаштовується на корисний (тестовий) сигнал в просторовому спектрі радіовипромінювання як для варіанту гаусовської завади так і для негаусовських завад з довільною щільністю розподілу ймовірностей.

Результат фільтрації (відновлення) вихідного випадкового сигналу $Y(n, 1)$ за схемою зображеною на рис. 5б по вхідному тестовому сигналу, який надходив до системи фільтрації W з напрямку 0^0 просторового спектру радіовипромінювання (рис. 6 д), представлено на рис. 6 в, 7 в, 8 в.

5. Висновки

Таким чином, в даній статті розглянуто аналітичний підхід до моделювання процесу відновлення (фільтрації) вихідного випадкового сигналу $Y(n, 1)$ в умовах впливу дестабілізуючих факторів з різною щільністю розподілу ймовірностей.

Адекватність приведеного аналітичного апарату підтверджена результатами статистичного моделювання наведеного на рис. 6в, 7в, 8в за схемою рис. 5б.

6. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

7. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел**References**

1. SAE: SAE J3016-201806 – Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. Standard, SAE International, Pennsylvania (2018).
2. Skachkov, V.V., Chepkii, V.V., Yefymchykov, O.M. & Yelchaninov, O.D. (2023). Asymptotic Optimality of Adaptive Systems with Alternative Standards in Unclassified Learning Situations. *Cybern Syst Anal* 59, 624–632. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00597-9>
3. Kotov, D. (2022). A generalized model of an adaptive information-control system of a car with multi-sensor channels of information interaction. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022; Vol. 5 No.1. Odesa: ONPU, 25-34. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.2>
4. Визначення та дослідження основних напрямків забезпечення ефективності функціонування інформаційно-керуючих каналів тилового наземного роботизованого комплексу в умовах дестабілізуючих впливів: звіт про НДР (проміжний звіт) Шифр "Бар'єр" / Військова академія; кер. В.Скачков; викон.: В. Чепкій [та ін.]. Одеса, 2017. 134 с.
5. Чепкій В. В., Скачков В. В., Єфімчиков О. М., Єльчанінов О. Д. Концептуалізація предметної області моделі інтегральної конфігурації "наземний робототехнічний комплекс – надсистема – проблемне середовище експлуатації". Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). №2(10), 2018. – С. 5-17.
6. Клименко В.В., Сухін О.В., Котов Д.О., Сердюк О.В. Аналіз джерел та причин виникнення дестабілізуючих факторів в інформаційно-керованій системі безпілотного автомобіля. Системи озброєння і військова техніка: ХНУПС Харків – 2019. – №2 (58). С. 111-121.
1. SAE: SAE J3016-201806 – Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. Standard, SAE International, Pennsylvania (2018).
2. Skachkov, V.V., Chepkii, V.V., Yefymchykov, O.M. et al. (2023). Asymptotic Optimality of Adaptive Systems with Alternative Standards in Unclassified Learning Situations. *Cybern Syst Anal* 59, 624–632. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00597-9>
3. Kotov, D. (2022). A generalized model of an adaptive information-control system of a car with multi-sensor channels of information interaction. *Applied Aspects of Information Technology*. Vol. 5 No.1. Odesa: ONPU, 25–34. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.2>
4. Vyznachennia ta doslidzhennia osnovnykh napriamkiv zabezpechennia efektyvnosti funktsionuvannia informatsiino-keruiuchykh kanaliv tylovoho nazemnoho robotyzovanoho kompleksu v umovakh destabilizuiuchykh vplyviv: zvit pro NDR (promizhnyi zvit) [Determination and research of the main areas of ensuring the effectiveness of the information and control channels of the rear ground robotic complex in the conditions of destabilizing influences] Shyfr "Barrier" / Viiskova akademiia; ker. V.Skachkov; vykon.: V.Chepkii [ta in.]. Odesa, 2017. 134 s. (In Ukr.).
5. Chepkii, V.V., Skachkov, V.V., Yefymchykov, O.M. & Yelchaninov ,O.D. (2018). Kontseptualizatsiia predmetnoi oblasti modeli intehralnoi konfihuratsii "nazemnyi robototekhnichniy kompleks – nadsystema – problemne seredovishche ekspluatatsii" [Conceptualization of the subject area of the integral configuration model "ground robotic complex – supersystem – problematic operating environment"] *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoi akademii (m. Odesa)* №2(10). – P. 5-17 (In Ukr.).

- <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.14>
7. Скачков В.В. Развитие теории и практики повышения качества адаптации информационных радиотехнических систем к внешним помехам в условиях внутрисистемных возмущений: дис... д-ра техн. наук: 05.12.17 Одесса. 2007. – 442 с.
 8. Клименко В. В. Адаптивная регуляризованная реставрация дискретных изображений в системах обработки информации: дис. ... кан. тех. наук : 05.13.06. Одесса. 2004. 161 с.
 9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн.1. – 312 с.
 10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн.2. – 310 с.
 6. Klymenko, V.V., Sukhin, O.V., Kotov, D.O. & Serdiuk, O.V. (2019) Analiz dzherel ta prychnyn vynyknennia destabilizuiuchykh faktoriv v informatsiino-kerovanii systemi bezpilotnoho avtomobilia. [Analysis of sources and causes of destabilizing factors in the information-controlled system of an unmanned vehicle] *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika: KhNUPS Kharkiv* – №2 (58). p. 111-121. (In Ukr.). <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.14>
 7. Skachkov V.V. (2007) Razvytye teoryy y praktyky povisheniya kachestva adaptatsyy ynformatsyonnykh radyotekhnicheskyykh system k vneshnym pomekham v usloviakh vnutrysystemnykh vozmushchenyi [Development of the theory and practice of improving the quality of adaptation of information radio engineering systems to external interference under conditions of intrasystem disturbances] *Doctors'ka dysertatsiia [Doctoral dissertation]*. Odesa: OISV (In Rus.).
 8. Klymenko V. V. (2004) Adaptivnaia rehuliryzirovannaia restavratsiia dyskretnykh yzobrazhenyi v systemakh obrabotky ynformatsyy [Adaptive regularized restoration of discrete images in information processing systems] *Kandydats'ka dysertatsiia [Candidate's dissertation]*. Odesa: ONPU (In Rus.).
 9. Prett U. (1982). *Tsyfrovaia obrabotka izobrazhenyi [Digital Image Processing]* M.: Mir, Kn.1. (In Rus.).
 10. Prett U. (1982). *Tsyfrovaia obrabotka izobrazhenyi [Digital Image Processing]* Moscow: Mir, Kn.2. (In Rus.).