

# Підвищення стійкості відновлення зображень в умовах впливу шумових завад з Гаусовою формою розподілу випадкових величин в безпілотних системах автомобільної техніки військового призначення

## Increasing the stability of image recovery under the influence of noise interference with the Gaussian form of the distribution of random variables in unmanned systems of military-grade automotive equipment

**Денис Котов**

**Corresponding author:** доктор філософії, доцент, e-mail: zvyagel.zt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6775-5593

**Віктор Клименко**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, e-mail: viktorklymenko1971@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8073-4404

**Олександр Бондаренко**

ад'юнкт, e-mail: oleksandrbondarenko95@ukr.net, ORCID: 0009-0001-8751-0374

**Ілона Бурдейна**

e-mail: temikd1984@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5170-3235

**Denys Kotov**

**Corresponding author:** Doctor of Philosophy, associate professor, e-mail: zvyagel.zt@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6775-5593

**Victor Klymenko**

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

**Oleksandr Bondarenko**

PhD student, e-mail: oleksandrbondarenko95@ukr.net, ORCID: 0009-0001-8751-0374

**Ilona Burdeina**

e-mail: temikd1984@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5170-3235

Військова академія, м. Одеса, Україна

Military Academy, Odesa, Ukraine

**Received:** December 06, 2024 | **Revised:** February 22, 2025 | **Accepted:** February 28, 2025

**DOI:** 10.33445/sds.2025.15.1.10

**Мета роботи:** обґрунтування аналітичного підходу до моделювання процесу тестування класу інформаційно-керуючих систем з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії в умовах впливу дестабілізуючих факторів.

**Метод дослідження:** метод статистичного моделювання інверсного відновлення цифрового інформаційного вихідного процесу зі збуреною оцінкою матрицею імпульсного відгуку системи.

**Результати дослідження:** в роботі представлено результати моделювання процесу тестування класу інформаційно-керуючих систем з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії та підвищення стійкості функціонування таких систем в умовах дестабілізуючих факторів, що дозволяє відновити вхідний процес, коли дестабілізуючі фактори мають Гаусову форму розподілу випадкових величин.

**Теоретична цінність дослідження:** удосконалення структури моделюючого комплексу процесу реставрації дискретних зображень в безпілотних системах автомобільної техніки військового призначення.

**Тип статті:** теоретична (розрахунково-аналітичний).

**Purpose:** 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 destabilizing factors.

**Method:** method of statistical modeling of the inverse restoration of the digital information output process with a disturbed evaluation matrix of the system's impulse response.

**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 and increasing the stability of the functioning of such systems under conditions of destabilizing factors, which allows them to restore the input process when the destabilizing factors have a Gaussian distribution of random variables.

**Theoretical implications:** are improvement of the structure of the modeling complex of the process of restoration of discrete images in unmanned systems of military vehicle equipment.

**Papertype:** theoretical (computational and analytical).

**Ключові слова:** автомобільна техніка військового призначення, імітаційне моделювання, дестабілізуючі фактори, адаптивна інформаційно-керуюча система, завадостійкість.

**Key words:** military-grade automotive equipment, simulation modeling, destabilizing factors, adaptive information and control system, immunity to interference.

## **Вступ**

В наш час існуючі методи двомірної фільтрації унеможливають об'єднання максимально можливої якості відновлення інформаційних процесів та незначні обчислювальні затрати. Крім того, в силу самої ідеї фільтрації, їх застосування ефективно лише у випадку значного перевищення потужності сигналу (зображення, інформаційного процесу тощо) над потужністю шумових завад. Тому, в умовах прийому сигналу зображення на фоні шумових завад значної інтенсивності, такі методи можуть розглядатися тільки як засіб вторинної обробки. Збільшення швидкості та кількості інформації, що передається у сучасних інформаційно-керуючих системах безпілотних засобів приводить до високої динаміки змінення “завадо-сигнальної” обстановки та непередбачуваності параметрів завад, що актуалізує процес відновлення інформаційних процесів в умовах впливу дестабілізуючих факторів (в умовах апріорної невизначеності, коли невідомі кількість джерел шумових завад, їх розташування у просторі та інтенсивність). Таким чином, актуальною науковою задачею є підвищення стійкості функціонування адаптивної інформаційно-керуючої системи безпілотного засобу в умовах впливу шумових завад, як зовнішнього походження, так і внутрісистемної невизначеності, шляхом удосконалення існуючих методів, математичних моделей та алгоритмів тестування інформаційно-керуючої системи.

## **Методологія дослідження**

Вирішення наукової задачі підвищення стійкості функціонування інформаційно-керуючих систем розглядається у роботах [1, 2], у яких проведено аналіз існуючих технологій розробки та реалізації систем керування транспортним засобом на основі автоматизації їх функціональних можливостей. Дестабілізуючі фактори, які є у реальних системах формування зображень, є основними факторами зниження якості при відновленні інформаційних процесів відомими методами [2]. Наявність випадкових збурень в оціночній матриці оператора реставрації призводить до поганої обумовленості оціночної матриці та не дозволяє проводити якісну реставрацію дискретних зображень інверсними методами [3]. Випадковий характер цих факторів потребує адекватного їх подання у статистичному експерименті, який передбачає формування їх моделей із заданими статистичними моментами. В роботах [4, 5, 6, 7] проведено дослідження асимптотичної оптимальності адаптивних систем з альтернативними еталонами, один з яких властивий класу радіоструктур з адаптивною антенною решіткою, а інший – з адаптивним компенсатором перешкод, за допомогою некласифікованої навчальної вибірки. Проте, питання конфліктної взаємодії безпілотного засобу з об'єктами зовнішнього середовища в інформаційно-керуючій системі та якісного відновлення процесів в ній у працях [1-7] повністю не вирішене.

Таким чином, структурно та функціонально інформаційно-керуюча система автомобіля починаючи з четвертого рівня автоматизації повинна забезпечувати вирішення ряду підзадач: сприйняття (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, як безпілотної системи, інформаційна система якого являє собою адаптивну інформаційно-керуючу систему з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії, яка функціонує в умовах впливу дестабілізуючих факторів [8]. Система формалізації предметної області передбачає визначення процесної моделі спостережень та застосування мови просторово-часового опису умов виконання операції

$w \in W$ , стану об'єкта роботизації  $\mathcal{E}$  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 [8]:

сукупність апріорно невідомих параметрів процесу технологічної взаємодії автомобіля з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії 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  $A_\eta = M(\eta \eta^T)$  та  $k$ -мірним вектором  $S = S_{k \times 1}$  з  $m_S = M(S)$  і  $A_S = M(SS^T)$ , відповідно;

результат спостереження процесу взаємодії різносенсорної системи незалежних датчиків  $D_X$  об'єкта роботизації  $\Xi$  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 очікування  $m_n = M(n) = 0$  та одиничну матрицю кореляції  $A_n = M(nn^T) = I$ ;

передбачається, що вектори корисного сигналу  $S$ , зовнішніх перешкод  $\eta$  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.

Зазначена інформаційно-ймовірнісна інтерпретація моделі даних враховує власну надлишковість модельного варіанту безпілотного засобу та надмірність середовища його експлуатації. Інформаційна надлишковість вводиться в результат спостереження  $U$  таким чином, щоб оцінка параметрів  $\tilde{S}$  невідомого вектора  $S$  задовольняла критерію оптимальності в евклідовій метриці, зокрема, мінімуму середньоквадратичній похибки наближення [8]:

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

де  $\|\bullet\|$  – норма вектора, 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 [8]:

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

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).

Структура статистичної (імітаційної) моделі інформаційно-керуючої системи з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії.

У загальному випадку процес відновлення вхідного інформаційного масиву методом інверсної фільтрації може мати вигляд [8]:

$$\hat{X}(x, y) = W(x, y) * Y(x, y) \quad (4)$$

- де  $\hat{X}(x, y)$  – оцінка носія інформаційних параметрів так званого корисного сигналу  $S(t)$ , еталонного тесту в (1), що сформована за алгоритмом (3);
- $W(x, y)$  – інверсний оператор відновлення, який характеризується матричною передавальною характеристикою системи  $W_X = W_{X(k \times m)}$  об'єднання результатів спостереження  $U$ , оптимальною за критерієм (2) з урахуванням внутрісистемних факторів дестабілізації  $\Delta W$ ;
- $*$  – символ згортки;
- $Y(x, y)$  – вихідний процес, який являє собою результат обробки вхідного (тестового) процесу  $X(x, y)$ , що формується за схемою представленою на рис. 1а, у відповідності з виразом (5):

$$Y(x, y) = H(x, y) * X(x, y) + n(x, y) \quad , \quad (5)$$

- де  $n(x, y)$  – адитивна шумова складова, яка ілюструє внутрішні шуми системи  $H(x, y)$ , що формує випадковий процес  $Y(x, y)$ , а система  $H(x, y)$  являє собою матрицю передаточних функцій системи різносенсорних датчиків  $D_X$  у виразі (1);

Якість вихідного випадкового процесу  $Y(x, y)$  буде залежати від передавальної характеристики системи  $H(x, y)$ , адитивної шумової складової  $n(x, y)$  та внутрішньо-системних збурень, що об'єктивно присутні в інформаційних системах [8, 9].

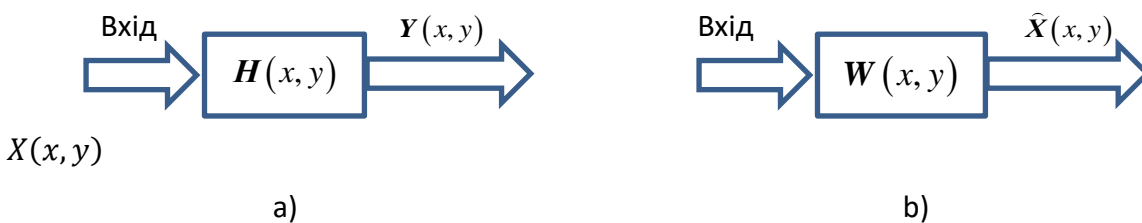


Рисунок 1 – Схема фільтрації вхідних процесів в залежності від умов впливу дестабілізуючих факторів

Для випадку ідеальної системи формування вихідного випадкового процесу  $Y(x, y)$  результат буде максимально близьким до вхідного процесу  $X(x, y)$  [10].

В такому випадку вплив апріорної невизначеності щодо передавальної характеристики системи  $H(x, y)$  та дестабілізуючих факторів буде мінімальним і якість отриманого вихідного процесу для ситуації сумісної системи буде достатньою для вироблення управлінського рішення [8]. Тобто співвідношення сигнал/завада+шум буде більшим за одиницю.

У випадку недостатньої якості отриманого вихідного процесу  $\vec{Y}(x, y)$  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  $Y(x, y)$  можна інтерпретувати моделлю виду (1) а його оцінку моделлю (3) рис. 3 в роботі [8].

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

$$\hat{X} = WY = WHX + Wn = QX + Wn \quad (6)$$

Що відповідає моделі оцінки результатів фільтрації в (3) рис. 3 в роботі [8] 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  $\eta$ , внутрісистемних факторів дестабілізації  $\Delta W$  та фактору внутрішніх шумів  $n$ .

В такому випадку результат фільтрація за схемою (рис. 1b) в умовах внутрішньо-системних збурень параметричної матриці буде мати вид (7):

$$\tilde{X} = [W + DW]HX + [W + DW]n \quad (7)$$

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

$$\varepsilon \triangleq X - \tilde{X} = X - (W + \Delta W)HX - (W + \Delta W)n = [I - (W + \Delta W)H]X - (W + \Delta W)n \quad (8)$$

Подання процесу інверсного відновлення інформаційних процесів у прийнятному для імітаційного моделювання на ПЕОМ вигляді передбачає формування масивів початкових даних та обчислення дискретної згортки матриці передаточних функцій системи різносенсорних датчиків  $D_X$  у виразі (3.1) та інверсного оператора перетворення вектору спостережень у виразі (1.3) з матричною передавальною характеристикою системи  $W_X = W_{X(k \times m)}$  об'єднання результатів спостереження  $U$ , оптимальною за критерієм (1.2) з урахуванням внутрісистемних факторів дестабілізації  $\Delta W$  за схемою 1b на фоні стохастичних процесів  $\eta$  та  $n$ .

Розробка імітаційних моделей стохастичних процесів  $\eta$ ,  $n$  та  $\Delta W$ , передбачає звернення до незалежних датчиків випадкових чисел.

Імітаційне моделювання процесу інверсного відновлення вихідного інформаційного процесу було проведено на фоні  $N$ -мірної шумової вибірки. При цьому, якість інверсного відновлення вихідного процесу, представленого моделлю (4) може оцінюватися виразом:

$$\hat{M}(\hat{X}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{X}(i) \quad (9)$$

де  $\hat{X}(i)$  – відновлений цифровий інформаційний процес  $i$  – вибірки;

$N$  – розмірність вибірки;

$M$  – символ усереднення;

$i$  – номер вибірки,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

У класичній постановці задача інверсного відновлення дискретних інформаційних процесів в умовах дестабілізуючих факторів обмежена необхідністю визначення тестових вхідних процесів [11-13].

Як відомо, необхідні статистичні закони розподілу випадкових процесів формуються в результаті відповідного перетворення випадкової послідовності  $A(i)$ , розподіл якої  $p\{A(i)\}$  рівномірний на інтервалі  $0 \div 1$ :

$$p\{A(i)\} = \begin{cases} 1; & A(i) \in [0,1]; \\ 0; & A(i) \notin [0,1]. \end{cases} \quad (10)$$

В даному випадку функція щільності розподілу дестабілізуючих факторів  $\Delta W = [\Delta w_{ij}]$  в інверсному операторі відновлення має вигляд:

$$p(\Delta w_{ij}) = \begin{cases} (2a)^{-1} \text{ при } |\Delta w_{ij}| \leq a; \\ 0 \text{ при } |\Delta w_{ij}| > a \end{cases} \quad (11)$$

Апроксимація розподілу дестабілізуючих факторів  $\Delta W$  в інверсному операторі відновлення рівномірним законом розподілу випадкових дискретних величин є найбільш

коректним їх поданням [14], оскільки ентропія системи обробки інформаційних процесів у цьому випадку буде максимальною [15]. Тоді пошук розв'язання задачі інверсного відновлення вихідних дискретних інформаційних процесів відбувається в умовах апіорної невизначеності.

Тому для імітаційного моделювання стохастичних процесів із заданими дисперсіями  $\sigma_n^2$ ,  $\sigma_\eta^2$  та  $\sigma_W^2$  в системі відновлення (4) необхідно сформулювати випадкові послідовності  $n(i)$ ,  $\eta(i)$ ,  $\Delta W(i)$  з рівномірним розподілом значень випадкових величин у цих послідовностях, генерування яких проводиться незалежними датчиками. Внутрішній шум  $n(i)$ , зовнішні завади  $\eta(i)$  та рівномірні на інтервалі  $\{-a, \dots, a\}$  внутрісистемні дестабілізуючі фактори  $\Delta W(i)$  оператора відновлення можна сформулювати шляхом звернення до датчиків випадкових чисел з рівномірним законом розподілу на інтервалі  $\overline{0,1}$  за наступними алгоритмами:

$$n(i) = S_1 \cdot [2A(i) - 1], \quad (12)$$

$$\Delta W = [\Delta w_{mn}(i)] = S_2 [2B(i) - 1], \quad (13)$$

$$\eta = S_3 [2D(i) - 1] \quad (14)$$

де  $\{A(i)\} \in \overline{0,1}$ ,  $\{B(i)\} \in \overline{0,1}$  та  $\{D(i)\} \in \overline{0,1}$  – результати звернення до незалежних датчиків випадкових чисел.

Позначимо випадкові збурення  $\Delta W$ ,  $n$  та  $\eta$  через змінну  $X(i) \in [0,1]$ . У цьому випадку формування випадкової послідовності  $X(i) \in [0,1]$  у заданому діапазоні проводиться за виразом:

$$X[i] = b(2C(i) - 1), \quad (15)$$

тут  $C(i) \in [0,1]$ . Випадковий процес має нульове математичне сподівання, а його дисперсія дорівнює:

$$\sigma_X^2 = \int_0^1 b^2 \cdot [2C(i) - 1]^2 p(C) dC = \frac{b^2}{3}. \quad (16)$$

Для випадку формування рівномірного закону розподілу випадкової величини на заданому інтервалі з нульовим математичним сподіванням щільність розподілу  $p(C)$  перетворюється на  $p(X)$  як показано на рис. 2.

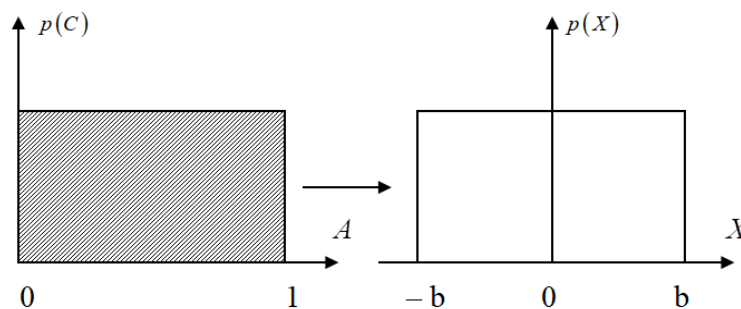


Рисунок 2 – Функціональне перетворення щільності випадкового процесу  $C$  на заданому інтервалі  $[-b;b]$

Звідси коефіцієнти  $S_1$ ,  $S_2$  та  $S_3$  (13-14) визначають необхідні дисперсії моделюємих процесів і дорівнюють:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot \sigma_n \quad (17)$$

$$S_2 = \frac{1}{N} \sqrt{3} \cdot \sigma_W \cdot \|W\| \quad (18)$$

$$S_3 = \sqrt{3} \cdot \sigma_\eta \quad (19)$$



Умови (17-19) дозволяють сформулювати рівномірні закони розподілу випадкових величин  $\Delta W$ ,  $n$  та  $\eta$  із заданою дисперсією, рівною (16), та нульовим математичним сподіванням. Із збільшенням числа спостережень ( $i$ ) випадкової величини  $X(i)$  сформований за виразом (13) процес має кореляційну матрицю діагонального виду (рис. 3).

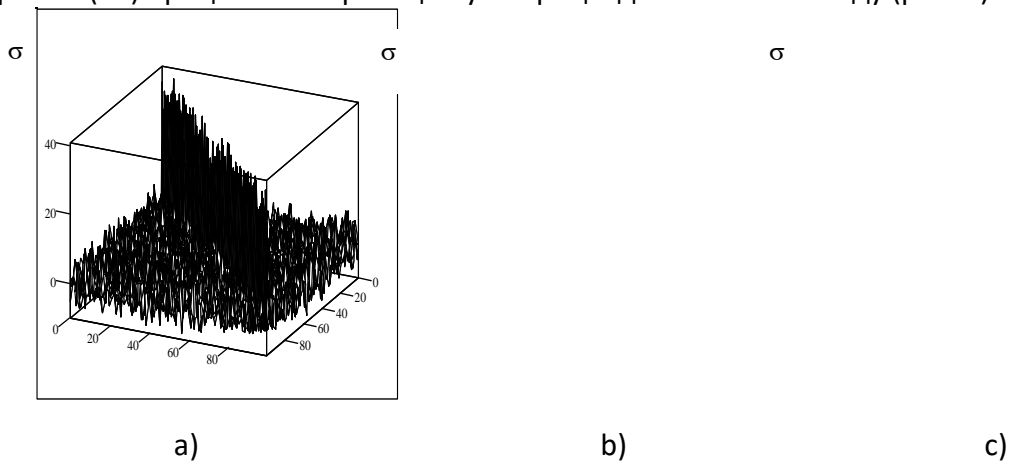


Рисунок 3 – Кореляційна матриця  $M\{\Delta W \Delta W^T\}$  випадкових збурень  $\Delta W$ :  $M[\Delta w_{ij}^2] = 0,33$ .

$$M\{\Delta W \Delta W^T\} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta W(i) \Delta W^T(i)$$

При  $S_2 = 1$  (16) значення діагональних елементів матриці  $M\{\Delta W \Delta W^T\}$  розмірності  $N = 100$  наближаються до заданої дисперсії випадкового процесу  $\Delta W$ :  $M\{\Delta W \Delta W^T\} = N \cdot \sigma_W^2 \cdot I = 33$ , де  $\sigma_W^2 = \frac{S_2^2}{3}$ .

На рис. 4 приведена кореляційна матриця  $M\{\Delta W \Delta W^T\}$  для  $\sigma_W = 10^{-6}$  при а)  $i=1$ ; б)  $i=10$ ; в)  $i=100$ .

$\sigma$   $\sigma$

а)  $i = 1$

$\sigma$   $\sigma$

б)  $i = 10$

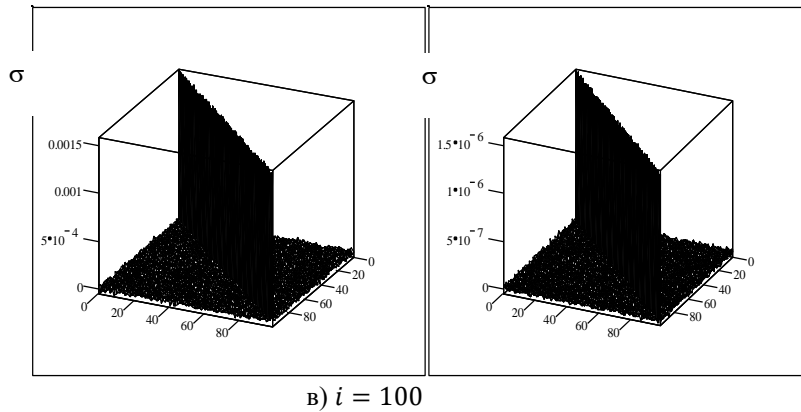


Рисунок 4 – Кореляційна матриця  $M\{\Delta W \Delta W^T\}$  випадкових збурень  $\Delta W$  рівномірного закону із заданою дисперсією а)  $i=1$ , б)  $i=10$ , в)  $i=100$ .

Загальна структура моделюючого комплексу процесу реставрації дискретних зображень, що містить модель формування зображення, модель інверсного оператора реставрації, модель внутрішнього шуму і модель випадкових збурень, наведена на рис. 5.

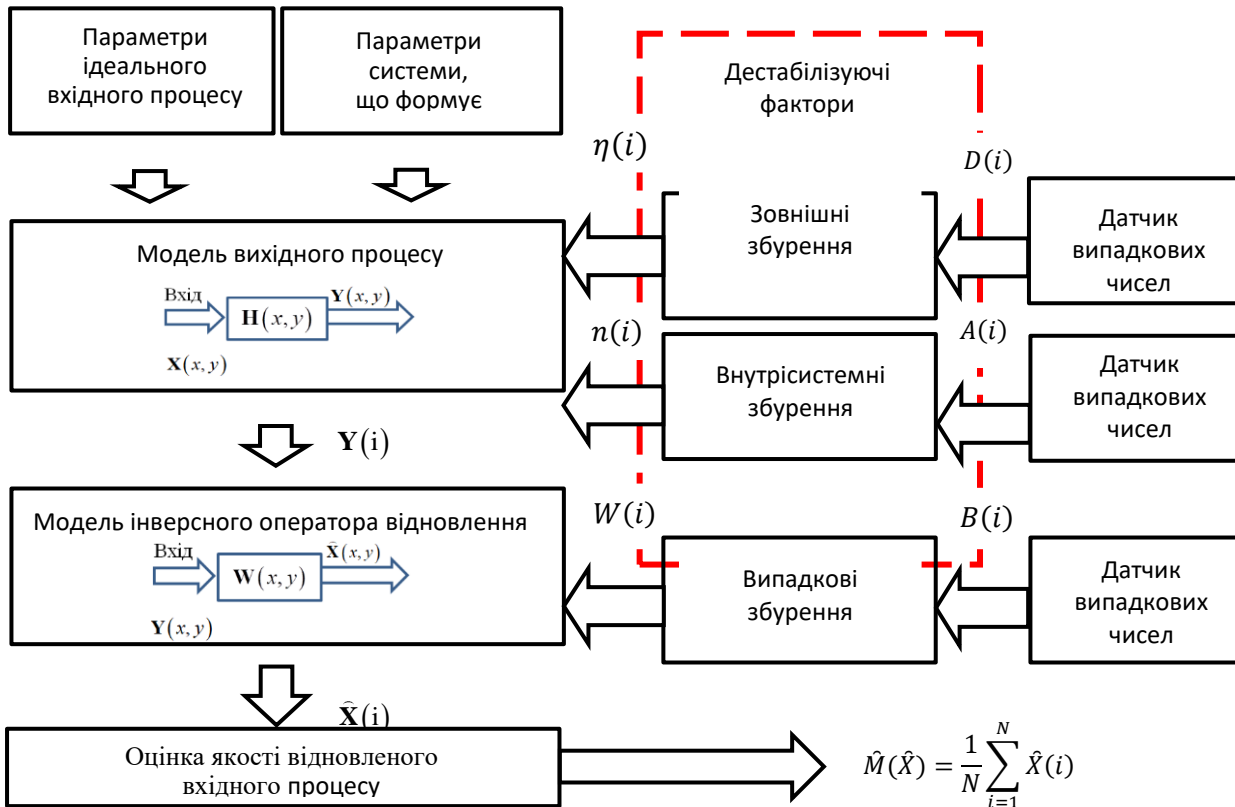


Рисунок 5 – Структура моделюючого комплексу

Дестабілізуючі фактори, які є у реальних системах формування зображень, є основними факторами зниження якості при відновленні інформаційних процесів відомими методами [9]. Випадковий характер цих факторів потребує адекватного їх подання у статистичному експерименті, який передбачає формування їх моделей із заданими статистичними моментами.



Статистична модель інверсного відновлення цифрового інформаційного вихідного процесу зі збуреною оцінною матрицею імпульсного відгуку системи (рис.1 b) проводилося за виразом:

$$\hat{X} = W^{-1}(m)WX \quad (20)$$

тут  $W^{-1}(m)$  – інверсний оператор відновлення цифрового інформаційного вихідного процесу, в якому оціночна матриця імпульсного відгуку системи  $W(m)$  є оцінкою матриці імпульсного відгуку ідеальної системи, форма якої залежить від кількості усереднень.

Формування статистичної оцінної матриці імпульсного відгуку системи  $W(m)$  за тестовим випадковим вектором  $X_0(i)$ , що являє собою модель так званого корисного сигналу  $S(i)$  еталонного тесту в (1) проводилося за виразом

$$W(m) = \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i) \right) \cdot \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i) \right)^{-1} \cdot W \quad (21)$$

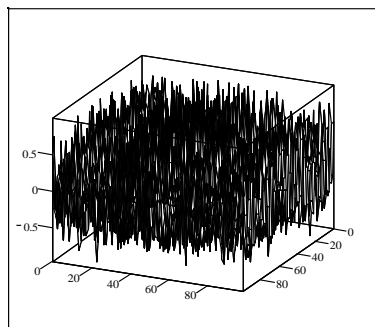
де  $i$  – реалізація випадкового процесу;

$X_0$  – вектор-стовпець моделі шумового тестового інформаційного процесу (так званого корисного сигналу), розмірність якого співвідноситься з розмірністю матриці оператора інверсного відновлення.

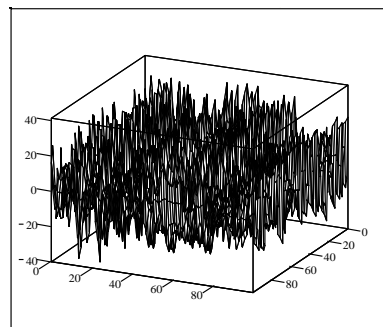
Виходячи з основних положень теорії лінійної алгебри, запишемо

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i) \right) \cdot \left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i) \right)^{-1} = \lim_{m \rightarrow \infty} (I(m)) \rightarrow I. \quad (22)$$

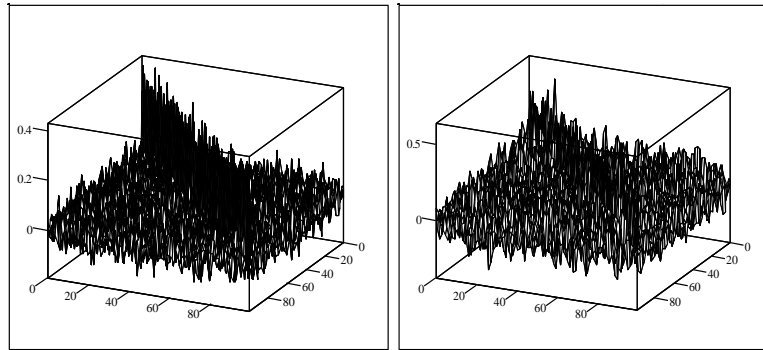
Форма інверсного оператора реставрації  $W^{-1}(m)$  (21) залежить від кількості усереднень статистичного моменту  $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i)$ . На рис. 6 наведено результати моделювання процесу формування оцінки кореляційної матриці тестового сигналу  $\hat{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_0(i)X_0^T(i)$  (a, c, e, g) та відповідний цій оцінці вид матриці оператора інверсного відновлення (b, d, f, h):



а) Кореляційна матриця тестового сигналу  $(X(i)X^T(i))$  при  $m=1$ ;

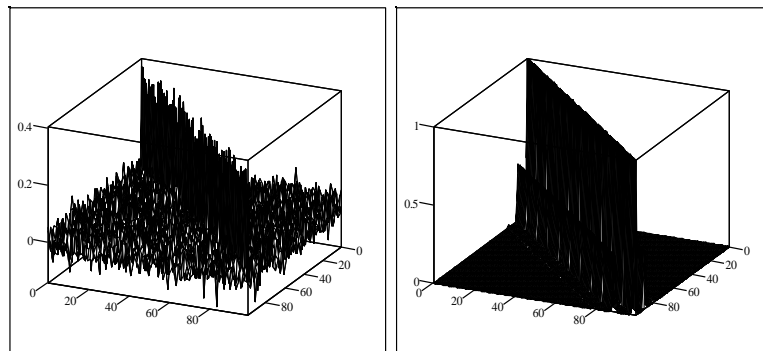


б) Оціночна матриця  $\hat{W}$  при  $m=1$ ;



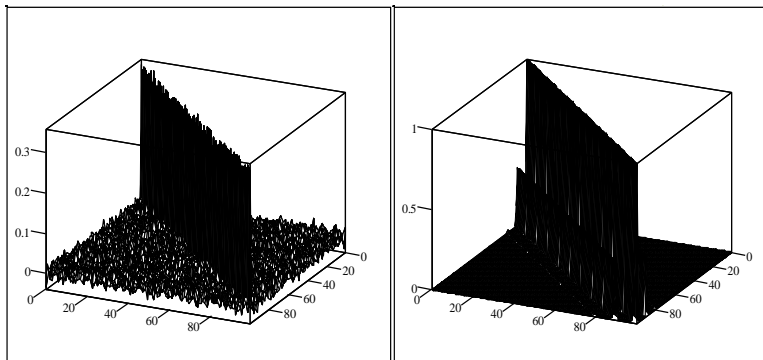
с) Кореляційна матриця тестового сигналу  $(X(i)X^T(i))$  при  $m=50$ ;

д) Оціночна матриця  $\hat{W}$  при  $m=50$ ;



е) Кореляційна матриця тестового сигналу  $(X(i)X^T(i))$  при  $m=100$ ;

ф) Оціночна матриця  $\hat{W}$  при  $m=100$ ;



г) Кореляційна матриця тестового сигналу  $(X(i)X^T(i))$  при  $m=1000$ ;

г) Оціночна матриця  $\hat{W}$  при  $m=1000$ ;

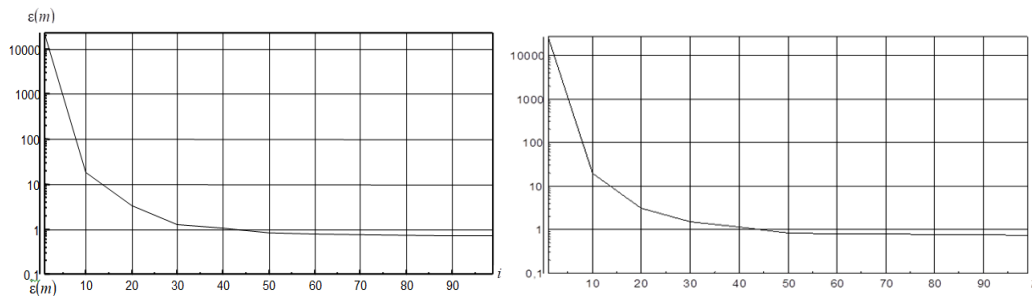
Рисунок 6 – Кореляційна матриця тестового сигналу  $(X(i)X^T(i))$  та оціночної матриці

$$\hat{W} = \hat{R}\hat{R}^{-1}W.$$

$$\hat{W} = \hat{R}\hat{R}^{-1}W \quad (23)$$

Результати на рис. 6 ілюструють, що збільшення числа усереднень кореляційної матриці тестового шумоподібного сигналу  $\hat{R}$  призводить до поліпшення її діагоналізації, що є наслідком поліпшення обумовленості матриці, при цьому зростає кількість власних значень матриці  $\hat{R}$ , відмінних від нуля, процедура інверсії оціночної матриці стає стійкішою. На рис. 7 наведено експериментальну залежність відносної похибки оцінки матриці оператора деформації  $W$  розмірності  $N = 100$  кількості спостережень  $m$ , побудована за виразом виду:

$$\varepsilon(m) = \frac{\|W - \hat{W}(m)\|^2}{\|W\|^2}. \quad (24)$$



a)  $\sigma_W^2 = 0,33$

b)  $\sigma_W^2 = 10^{-3}$

Рисунок 7 – Залежність  $\varepsilon(m)$  від  $m$ – числа усереднень кореляційної матриці тестового сигналу

Як видно із рис. 7 збільшення числа спостережень тестового сигналу супроводжується зменшенням відносної дисперсії  $\varepsilon(m)$  до нуля. Причому коли матриця  $W$  має повний ранг  $r(W) = m = 100$ , помилка  $\varepsilon(m)$  практично дорівнює 0. Так, при повному ранзі матриці  $\hat{R}(m)$  відновлення цифрового інформаційного вихідного процесу  $\hat{X} = \hat{R}(m)\hat{R}^{-1}(m) \cdot W \cdot H \cdot X$  близька до ідеальної.

### Результати

З урахуванням вище викладеного на основі виразу 20 було проведено статистичне моделювання у середовищі MATLAB процесу обробки вхідного інформаційного процесу у формі кольорового зображення розмірності 630x354 з роздільною здатністю 96 пікселів на дюйм. Моделювання проводилося для випадку, коли вплив дестабілізуючих факторів апроксимувався гаусовою формою розподілу щільності ймовірностей шумів.

Для цього випадку оцінка результату відновлення проводилася за виразом:

$$\hat{X} = W \cdot Y,$$

де  $W$  – параметричний вектор системи, що досліджується, який сформований за виразом:

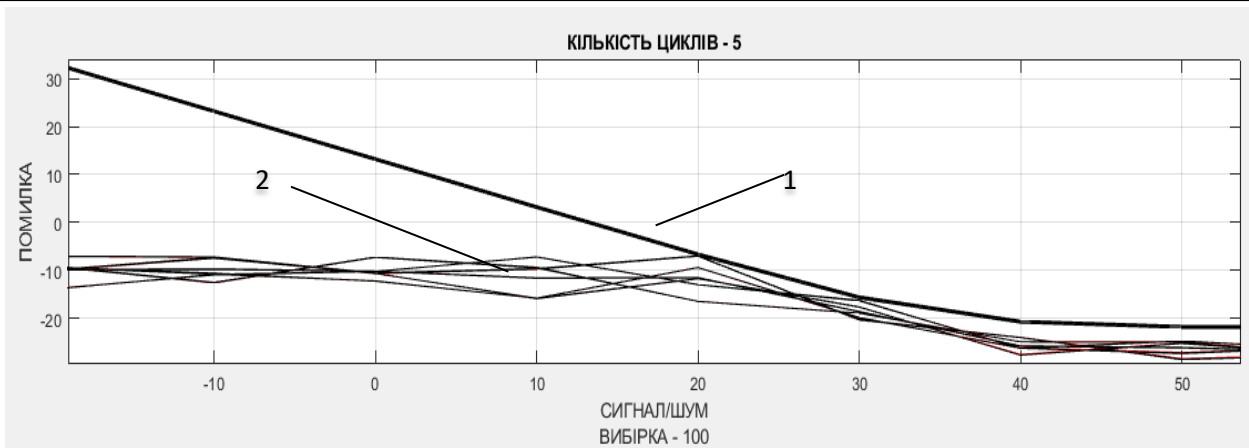
$$W = \frac{(Y \cdot Y^T)^{-1} X_0}{X_0^T \cdot (Y \cdot Y^T)^{-1} \cdot X_0},$$

Тут  $X_0$  тестовий, так званий корисний сигнал, а  $Y$  результат формування вихідного процесу на основі тестового  $X_0$  сигналу, адитивно зашумленого моделлю внутрішнього шуму та зовнішніх завад на основі гаусової форми розподілу щільності ймовірності випадкових величин за схемами рис. 1.

$$Y = X + \eta + n$$

де  $\eta$  – параметр, що враховує вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів у формі їх кількості, потужність та розташування у просторі;  
 $n$  – внутрішній шум системи.

За виразом (20) було побудовано серію експериментальних зображень у системі з оцінним гаусовим оператором деформації. Ця серія зображень представлена на рис. 8.



- а) 1 – зміна помилки відновлення на кожному кроці ітерації;  
2 – усереднена помилка у задачах



Рисунок 8 – Залежності якості формування вихідного процесу  $Y$  від рівня випадкових збурень  $\sigma_H^2$  для системи розмірності, де  $N = 10$ .

Результати моделювання, що представлені на рис.8 цілком узгоджуються із залежностями на рис. 7.

На рис. 8 а представлено залежності помилки відновлення вхідного інформаційного процесу  $Y$  (крива 1) від рівня середнього значення співвідношення корисного сигналу і шумів (зовнішні завади та внутрішній шум системи). Отриманий результат (на рис. 8 а) ілюструє адекватність запропонованого підходу до оцінки стійкості інформаційно-керуючої системи в умовах дестабілізуючих факторів гаусової форми (рис.8 с).

### Висновки

Аналіз наведених результатів показує, що наявність дестабілізуючих факторів в оціночній матриці оператора відновлення призводить до поганої обумовленості оціночної матриці і не дозволяє проводити якісне відновлення інверсними методами (рис. 3.8, б).

Запропонований підхід до підвищення стійкості функціонування ІКС в умовах дестабілізуючих факторів дозволяє відновити вхідний процес (рис. 8 с), коли дестабілізуючі фактори мають гаусову форму розподілу випадкових величин.

Якісна реставрація в даних умовах можлива лише з оціночною матрицею повного рангу, що є моделлю ідеальних умов формування оцінки оператора відновлення. Отримані результати повністю співвідносяться з аналітичними розрахунками, проведеними раніше.

## Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

## Список використаних джерел

1. Клименко В.В., Сухін О.В., Котов Д.О., Сердюк О.В. Аналіз джерел та причин виникнення дестабілізуючих факторів в інформаційно-керованій системі безпілотної автомобіля. *Системи озброєння і військова техніка: ХНУПС Харків*. 2019. №2 (58). С. 111-121. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.14>.
2. Клименко В.В., Котов Д.А., Петрик Ю.М., Коваль Ю.И., Марченко В.П. Проблема имитационного моделирования процессов функционирования многосенсорной информационно-управляющей ситемы автомобиля в условиях дестабилизирующих воздействий. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. 2021. Вип. 2(16). С. 181-190. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.181-190>.
3. Kotov, D. A generalized model of an adaptive information-control system of a car with multi-sensor channels of information interaction. *Applied Aspects of Information Technology*. 2021; Vol. 5, No. 1: 25-34. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.2>.
4. Chepkii, V., Skachkov, V., Yefimchikov, O., Nabok, V. & Yelchaninov, O. A technological approach to solving the problem of minimizing the impact of destabilizing factors on the operation of distributed structures of the ground robotic complex in the integrated project "OBJECT-SYSTEM" . *Collection of scientific works of the Military Academy (Odesa)*, 2019, Vol. 1, №11, 5-19. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2019.11.5-19>.
5. Skachkov, V., Chepkii, V., Yefimchikov, O., & Nabok, V. The problem of optimality of adaptive radio engineering systems in a situation with an unclassified training sample of observations". *Collection of scientific works of the Military Academy (Odesa)*, 2022, № 2 (18). 66–77. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2022.18.66-77>.
6. Skachkov, V., Chepkii, V., Yefimchikov, O., Nabok, V., & Yelchaninov, O. Asymptotic Optimality of Adaptive Systems with Alternative Standards in Unclassified Learning Situations . *Cybern Syst Anal*, 2023, Vol.59, 624–632. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00597-9>.
7. Khudov, H., Trofymov, I., Repilo, I., Makoveichuk, O., Tkachenko, V., Kotov, D., Gridina, V., Herda, M., Kryvosheiev, V., & Shvets, M. (2024). Devising a method for detecting an aerial object by radar with an additional channel of passive reception . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(9 (131), 28–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313161>.
8. Котов, Д., & Клименко, В. (2023). Тестування інформаційно-керуючої системи з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії на основі методу прямого моделювання із зовнішнім еталоном. *Social Development and Security*, 13(4), 48-62. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.4.5>.
9. Семененко О.М., Котов Д.О., Клименко В.В. Баранов С.М. Шляхи підвищення стійкості інформаційно-керуючої системи наземного роботизованого комплексу з різносенсорними каналами інформаційної взаємодії в умовах впливу дестабілізуючих факторів. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України – 2022. – №4 (103). С.163-176*.
10. 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.



11. Скачков В.В., Клименко В.В. Дослідження інваріантності регуляризованих алгоритмів до випадкових варіацій вихідних даних зворотних задач, що розв'язуються у просторі Гільберта. 3-я конференція молодих вчених: зб. праць. Харків: ХНУРЕ. 2003. С. 36.
12. Сойер У.У. Прелюдія к математике: Пер. с англ. М.: Просвещение, 1972.191 с.
13. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М.: Наука, 1971.616 с.
14. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
15. Бакушинский А. Б. О построении регуляризирующего алгоритма при случайных помехах. ДАН СССР. 1969. Т.189, № 2. С. 231 – 233.

## References

1. Klymenko V.V., Sukhin O.V., Kotov D.O., Serdyuk O.V. (2019). Analiz dzherel ta prychnyn vynyknennya destabilizuyuchykh faktoriv v informatsiyno-kerovaniy systemi bezpilotnoho avtomobilya [Analysis of sources and causes of destabilizing factors in the information-controlled system of an unmanned vehicle]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika: KHNUPS Kharkiv*. 2019. №2 (58). С. 111-121. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.14>.
2. Klymenko V.V., Kotov D.A., Petryk YU.M., Koval' YU.Y., Marchenko V.P. (2021). Problema imitatsionnogo modelirovaniya protsessov funktsionirovaniya mnogosensornoy informatsionno-upravlyayushchey sitemy avtomobilya v usloviyakh destabiliziruyushchikh vozdeystviy [The problem of simulation modeling of the functioning processes of a multi-sensor information and control system of a car under conditions of destabilizing influences]. *Zbirnyk naukovykh prats' Viys'kovoyi akademiyi (m. Odesa)*. 2021. 2(16). С. 181-190. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.181-190>.
3. Kotov, D. A generalized model of an adaptive information-control system of a car with multi-sensor channels of information interaction. *Applied Aspects of Information Technology*. 2021; Vol. 5, No. 1: 25-34. <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.2>.
4. Chepkii, V., Skachkov, V., Yefimchikov, O., Nabok, V. & Yelchaninov, O. A technological approach to solving the problem of minimizing the impact of destabilizing factors on the operation of distributed structures of the ground robotic complex in the integrated project "OBJECT-SYSTEM" . *Collection of scientific works of the Military Academy (Odesa)*, 2019, Vol. 1, №11, 5-19. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2019.11.5-19>.
5. Skachkov, V., Chepkii, V., Yefimchikov, O., & Nabok, V. The problem of optimality of adaptive radio engineering systems in a situation with an unclassified training sample of observations" . *Collection of scientific works of the Military Academy (Odesa)*, 2022, № 2 (18). 66–77. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2022.18.66-77>.
6. Skachkov, V., Chepkii, V., Yefimchikov, O., Nabok, V., & Yelchaninov, O. Asymptotic Optimality of Adaptive Systems with Alternative Standards in Unclassified Learning Situations . *Cybern Syst Anal*, 2023, Vol.59, 624–632. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00597-9>.
7. Khudov, H., Trofymov, I., Repilo, I., Makoveichuk, O., Tkachenko, V., Kotov, D., Gridina, V., Herda, M., Kryvosheiev, V., & Shvets, M. (2024). Devising a method for detecting an aerial object by radar with an additional channel of passive reception . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(9 (131), 28–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313161>.
8. Kotov, D., & Klymenko, V. (2023). Testing of the information control system with multi-sensory channels of information interaction based on the method of direct modeling with an external reference. *Social Development and Security*, 13(4), 48-62. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.4.5>.
9. Semenenko O.M., Kotov D.O., Klymenko V.V. Baranov S.M. (2022). Shlyakhy pidvyshchennya stiykosti informatsiyno-keruyuchoyi systemy nazemnoho robotyzovanoho kompleksu z



- riznosensornymy kanalamy informatsiyanoi vzayemodiyi v umovakh vplyvu destabilizuyuchykh faktoriv [Ways to increase the stability of the information and control system of a ground robotic complex with multi-sensor information interaction channels under the influence of destabilizing factors]. *Collection of scientific works of the Central Scientific Research Institute of the Armed Forces of Ukraine*. – 2022. – №4 (103). 163-176.
10. Skachkov V.V. Razvitiye teorii i praktiki povysheniya kachestva adaptatsii informatsionnykh radiotekhnicheskikh sistem k vneshnim pomekham v usloviyakh vnutrisistemnykh vozmushcheniy: dis... d-ra tekhn. nauk: 05.12.17 Odessa. 2007. 442 P.
  11. Skachkov V.V., Klymenko V.V. Investigation of the invariance of regularizing algorithms to random variations of the initial data of inverse problems solved in Hilbert space. 3rd Conference of Young Scientists: Collection of Proceedings. Kharkiv: KhNURE. 2003. P. 36.
  12. Sawyer U.U. Prelude to mathematics: Trans. with English Moscow: Enlightenment, 1972.191 p.
  13. Soroko L.M. Basics of holography and coherent optics. Moscow: Science, 1971.616 p.
  14. Tikhonov A.N., Goncharskyi A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. Regularizing algorithms and a priori information. Moscow: Science, 1983. 200 p.
  15. Bakushinsky A. B. On the construction of a regularizing algorithm for random disturbances. DAN of the USSR. 1969. T.189, № 2. P. 231 – 233.