

УДК 004.8:519.22

АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ СТРУКТУРИ БАГАТОВИМІРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА НЕПОВНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Кашкевич С.О.¹, Дехтяренко А.Т.¹, Брановицька І.В.¹, Голего Н.М.¹

¹Національний університет «Київський авіаційний інститут»

Анотація: У роботі проаналізовано просторово-часову структуру багатовимірних інформаційних процесів за умов неповних спостережень. Актуальність дослідження зумовлена тим, що в реальних інформаційних системах значення окремих параметрів можуть бути відсутніми, надходити нерегулярно або формуватися з різною часовою дискретністю, що ускладнює встановлення взаємозв'язків між компонентами процесу та знижує інформативність традиційних методів аналізу.

Метою роботи є аналіз просторово-часових залежностей багатовимірного процесу з урахуванням неповноти вихідних даних. Для формалізації процесу використано матричне представлення станів, бінарну матрицю доступності спостережень та векторне подання компонентів. Неповнота даних визначалася через частку відсутніх елементів, а оцінювання взаємозв'язків виконувалося лише за спільно доступними спостереженнями.

Для аналізу часових залежностей сформовано лагові коваріаційні матриці, виконано їх нормування та побудовано узагальнену блочну матрицю просторово-часової структури. Домінантні закономірності визначалися за спектральним розкладанням цієї матриці та аналізом власних значень і власних векторів.

Для перевірки працездатності запропонованого математичного апарату проведено імітаційне моделювання у середовищі Python із використанням бібліотек NumPy та Matplotlib. У межах експерименту сформовано просторово розподілені часові реалізації багатовимірного процесу, введено випадкові та локально згруповані пропуски, а також додано випадкову похибку малої інтенсивності. Отримані результати показали, що за неповних спостережень у доступних фрагментах зберігається узгодженість між сусідніми просторовими реалізаціями, що дозволяє оцінювати лагові залежності та виділяти характерні структурні компоненти процесу.

Запропонований підхід може бути використаний для аналізу багатовимірних даних у системах моніторингу, діагностики та підтримки прийняття рішень, де спостереження надходять нерівномірно або містять пропуски.

Ключові слова: багатовимірний інформаційний процес, просторово-часова структура, неповні спостереження, часові залежності, коваріаційна матриця, спектральний аналіз, моделювання.

ANALYSIS OF THE SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF MULTIDIMENSIONAL INFORMATION PROCESSES UNDER INCOMPLETE OBSERVATIONS

S. Kashkevych¹, A. Dekhtiarenko¹, I. Branovytska¹, N. Holeho¹

¹National University "Kyiv Aviation Institute"

Abstract: The paper investigates the spatiotemporal structure of multidimensional information processes under incomplete observations. The relevance of the study is determined by the fact that in real information systems some parameter values may be missing, arrive irregularly, or be formed with different temporal discretization, which complicates the identification of relationships between process components and reduces the informativeness of conventional analysis methods.

The aim of the study is to analyse spatiotemporal dependencies of a multidimensional process while explicitly taking into account the incompleteness of the source data. A matrix representation of process states, a binary observation-availability matrix, and a vector representation of the components were used to formalize the process.

Data incompleteness was quantified through the proportion of missing elements, while relationships were estimated only from jointly available observations. Lagged covariance matrices were formed to analyse temporal dependencies, followed by their normalization and construction of a generalized block matrix describing the spatiotemporal structure. Dominant regularities were identified by spectral decomposition of this matrix and by analysing its eigenvalues and eigenvectors.

To verify the applicability of the proposed mathematical apparatus, simulation modelling was carried out in Python using the NumPy and Matplotlib libraries. The experiment generated spatially distributed time realizations of a multidimensional process, introduced both random and locally grouped missing observations, and added low-intensity random noise. The obtained results showed that, despite incomplete observations, consistency between neighbouring spatial realizations was preserved in the available data fragments. This made it possible to estimate lagged dependencies and identify characteristic structural components of the process. The proposed approach can be applied to multidimensional data analysis in monitoring, diagnostic, and decision-support systems where observations are irregular, partially unavailable, or contain missing values.

The developed representation provides a basis for further assessment of structural changes, anomaly detection, and investigation of the influence of different missing-data patterns and noise levels on the stability of spatiotemporal relationships.

Keywords: multidimensional information process, spatiotemporal structure, incomplete observations, temporal dependencies, covariance matrix, spectral analysis, simulation modelling.

1 ВСТУП

Сучасні інформаційні та організаційно-технічні системи характеризуються значною кількістю взаємопов'язаних параметрів, які змінюються у часі та формуються в різних просторових положеннях. Аналіз таких процесів потребує врахування не лише значень окремих показників, але й характеру їх взаємодії, часової динаміки та структурних залежностей. Особливої актуальності ця задача набуває в умовах неповноти вихідної інформації, коли частина спостережень втрачається, надходить нерегулярно або стає недоступною в окремі моменти часу.

Одним із традиційних напрямів аналізу стану складних об'єктів є використання даних поточного моніторингу.

У роботі [1] було показано значення інформації про фактичний стан системи для прийняття рішень, де результати моніторингу використовуються як основа для оцінювання поточного стану та подальших дій. У роботі [2] розглянуто методи вібраційного моніторингу та обробки сигналів для оцінювання стану структур, зокрема методи отримання, візуалізації й аналізу вимірюваних даних. Водночас зазначені підходи переважно орієнтовані на аналіз окремих сигналів або сукупності вимірювань і не повною мірою враховують одночасну просторову, часову та міжкомпонентну структуру даних за наявності пропусків.

Тому актуальним є дослідження просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів з урахуванням неповноти спостережень. Такий підхід має забезпечувати формалізацію доступності окремих компонентів, оцінювання взаємних і лагових залежностей тільки за фактично наявними даними та виділення домінантних структурних закономірностей процесу.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботі [3] розглянуто математичне забезпечення систем підтримки прийняття рішень, зокрема формалізацію задач обробки складної інформації та оцінювання станів систем. Подальший розвиток методів структурного аналізу даних представлено у [4], де для виявлення аномалій використано графове вкладення сигналів, що дозволяє враховувати взаємозв'язки між окремими компонентами.

У [5] запропоновано комбінований біоінспірований алгоритм пошуку рішень для складних багатопараметричних задач. Питання впливу шумів і спотворень на інформаційні процеси досліджувалися у [6], а в [7] розглянуто кореляцію подій та управління інцидентами на основі встановлення структурних взаємозв'язків між інформаційними подіями.

Методи інтелектуального аналізу багатовимірних даних та виявлення нетипових станів розглянуто у [8–12]. У [8] досліджено застосування моделей машинного навчання для виявлення аномальних операцій, у [9] запропоновано методологічний підхід до оцінювання стану складних організаційно-технічних систем, а в [10] систематизовано сучасні методи виявлення аномалій.

Незважаючи на розвиток зазначених підходів, недостатньо дослідженим залишається питання аналізу просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень. Зокрема, потребує подальшої формалізації одночасне врахування міжкомпонентних залежностей, часових зсувів та нерівномірної доступності окремих елементів даних.

Відомі підходи до аналізу багатовимірних часових рядів за наявності пропусків переважно передбачають попереднє відновлення відсутніх значень або оцінювання статистичних характеристик за доступною частиною вибірки. При цьому недостатньо враховується, що для різних пар компонентів і різних часових лагів кількість фактично

доступних спільних спостережень може істотно відрізнятися. Це зумовлює необхідність формування просторово-часового представлення, у якому структура залежностей визначається без попередньої імпутації даних та окремо для кожної пари компонентів з урахуванням її фактичної доступності.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціллю дослідження є аналіз просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень шляхом формалізації взаємозв'язків між компонентами, оцінювання часових залежностей та визначення особливостей збереження структурних закономірностей за наявності пропущених даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні підходу до аналізу просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень. На відміну від підходів, у яких пропущені значення попередньо відновлюються або статистичні залежності оцінюються для єдиної доступної підвибірки, запропонований підхід передбачає формування для кожного часового лагу окремої матриці доступності пар спостережень та оцінювання кожного елемента лагової залежності лише за відповідною множиною фактично наявних пар. Подальше об'єднання таких залежностей у єдину блочну матрицю забезпечує спільне представлення міжкомпонентних і часових зв'язків без внесення штучно відновлених значень.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів було розглянуто сукупність взаємопов'язаних параметрів, значення яких змінювалися у часі та характеризували стан системи в окремих просторових положеннях. Вхідні дані подавалися у вигляді багатовимірної послідовності спостережень, для якої враховувалися статистичні залежності між компонентами та їх зміна у часі. Особливістю досліджуваних даних була наявність неповних спостережень, за яких частина компонентів у певні моменти часу була відсутня. Для їх формалізації було введено матрицю доступності даних, а аналіз просторово-часових залежностей проводився лише за фактично наявними спостереженнями з подальшим оцінюванням структури багатовимірної процесу.

Подання багатовимірної процесу. Стан інформаційного процесу в момент часу t було представлено матрицею:

$$X_t = \begin{bmatrix} x_{11}(t) & \cdots & x_{1p}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1}(t) & \cdots & x_{Np}(t) \end{bmatrix}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (1)$$

де N – кількість просторових положень; p – кількість параметрів; T – кількість часових відліків (1).

Формалізація неповних спостережень. Для визначення доступності окремих значень було сформовано бінарну матрицю:

$$M_t = \begin{bmatrix} m_{11}(t) & \cdots & m_{1p}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{N1}(t) & \cdots & m_{Np}(t) \end{bmatrix}, \quad m_{ij}(t) \in \{0,1\}. \quad (2)$$

Значення m_{ij} відповідало наявному спостереженню, а $m_{ij} = 0$ – відсутньому (2).

Модель формування спостережуваних даних. З урахуванням неповноти та випадкових похибок спостережувані дані визначалися як:

$$Y_t = M_t \odot X_t + E_t, \quad (3)$$

де Y_t – матриця доступних спостережень; E_t – матриця випадкових похибок; $\odot$ – поелементний добуток (3).

Ступінь неповноти даних визначався відношенням кількості відсутніх елементів до загальної кількості потенційних спостережень:

$$\rho = 1 - \frac{1}{NTp} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^p m_{ij}(t). \quad (4)$$

При $\rho = 0$ спостереження були повними, а збільшення ρ характеризувало зростання частки відсутніх даних (4).

Перехід до векторного представлення. Для спільного аналізу всіх компонентів матрицю стану було перетворено у багатовимірний вектор:

$$z_t = \text{vec}(X_t), \quad z_t \in \mathbb{R}^{Np}. \quad (5)$$

Такий формальний опис дозволив оцінювати взаємні залежності одночасно між просторовими положеннями та різними компонентами процесу (5).

Визначення доступності пар спостережень. Для кожного часового зміщення τ було визначено кількість спільно доступних спостережень:

$$N_\tau = \sum_{t=\tau+1}^T m_t m_{t-\tau}^T, \quad m_t = \text{vec}(M_t). \quad (6)$$

Матриця N_τ визначала, яка кількість пар значень фактично могла бути використана для оцінювання залежності між відповідними компонентами (6).

Принциповою особливістю такого представлення є те, що множина спостережень, яка використовується для оцінювання залежності, формується окремо для кожної пари компонентів та кожного значення τ . Тому оцінювання просторово-часової структури не потребує формування єдиної повної вибірки або попереднього заміщення відсутніх значень.

Просторово-часові залежності оцінювалися за спільно доступними спостереженнями:

$$\hat{C}_\tau = \left[\sum_{t=\tau+1}^T r_t r_{t-\tau}^T \right] \oslash N_\tau, \quad r_t = m_t \odot (y_t - \hat{\mu}). \quad (7)$$

Тут $y_t = \text{vec}(Y_t)$, $\hat{\mu}$ – оцінка середнього значення, а $\oslash$ – поелементне ділення. Таким чином, відсутні значення безпосередньо не включалися до оцінювання коваріацій (7).

Таким чином, елементи матриці просторово-часових залежностей формуються за різними множинами доступних пар спостережень, визначеними матрицею N_τ .

Це відрізняє запропоноване представлення від стандартного оцінювання коваріаційної структури за попередньо сформованою повною вибіркою та дозволяє безпосередньо враховувати нерівномірність пропусків між компонентами процесу.

Нормування просторово-часових залежностей. Для усунення впливу різних масштабів компонентів було сформовано нормовану матрицю залежностей:

$$R_\tau = D^{-1/2} \hat{C}_\tau D^{-1/2}, \quad D = \text{diag}(\hat{C}_0). \quad (8)$$

Матриця R_τ характеризувала силу взаємозв'язку між компонентами багатовимірного процесу при часовому зміщенні τ (8).

Формування сукупної просторово-часової структури. Отримані матриці було об'єднано у блочне представлення:

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} R_0 & R_1^T & \cdots & R_L^T \\ R_1 & R_0 & \cdots & R_{L-1}^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_L & R_{L-1} & \cdots & R_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де L – максимальний часовий лаг. Матриця R узагальнювала одночасно миттєві та часово зміщені зв'язки між компонентами процесу (9).

Виділення домінантної структури. Для визначення основних просторово-часових закономірностей було виконано спектральне розкладання:

$$R = Q\Lambda Q^T, \quad \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_K). \quad (10)$$

Власні вектори матриці Q визначали характерні просторово-часові структури процесу, а власні значення λ_K – їх внесок у загальну варіативність даних (10).

Для кількісного оцінювання ступеня збереження просторово-часової структури за неповних спостережень використано коефіцієнт структурної відповідності, що характеризує відхилення узагальненої матриці, отриманої при заданому рівні неповноти, від матриці, сформованої за повною вибіркою:

$$S(\rho) = \left(1 + \frac{\|R^{(\rho)} - R^{(0)}\|_F}{\|R^{(0)}\|_F} \right)^{-1}, \quad (11)$$

де $R^{(\rho)}$ – узагальнена матриця просторово-часових залежностей за ступеня неповноти ρ ; $R^{(0)}$ – відповідна матриця для повної вибірки; F – норма Фробеніуса. Значення $S(\rho)$, близькі до одиниці, відповідають високому ступеню збереження структури, а його зменшення характеризує зростання відхилення від еталонного випадку.

Таким чином, сформований математичний апарат забезпечив урахування багатовимірності, часових залежностей і неповноти вихідних спостережень.

Отримане спектральне представлення дало змогу виділити домінантні компоненти просторово-часової структури та кількісно оцінити ступінь її збереження за різного рівня неповноти даних.

Для перевірки працездатності запропонованого математичного апарату було проведено імітаційне моделювання просторово-часової структури багатовимірного інформаційного процесу за неповних спостережень.

Моделювання виконувалося в середовищі Python із використанням бібліотек NumPy та Matplotlib.

В межах експерименту було сформовано $N=11$ просторово розподілених реалізацій $x_i(t)$ на часовому інтервалі $t \in [0; 20]$ із кількістю відліків $T = 220$.

Кожна реалізація містила спільну часову складову та просторово залежний фазовий зсув, що забезпечувало формування узгодженої просторово-часової структури.

Для дослідження впливу неповноти спостережень розглядалися значення $\rho = 0; 0,10; 0,22; 0,30; 0,40$, де $\rho = 0$ відповідало повній вибірці.

Для кожного ненульового значення ρ формувалися випадкові та локально згруповані пропуски, загальна кількість яких відповідала заданому ступеню неповноти. Для зменшення впливу конкретного розташування пропусків для кожного значення ρ виконувалося 30 незалежних реалізацій маски доступності. До модельованих значень додавалася випадкова похибка з середньоквадратичним відхиленням $\sigma = 0,025$.

На рис. 1 як характерний приклад наведено одну з реалізацій процесу для $\rho = 0,22$.

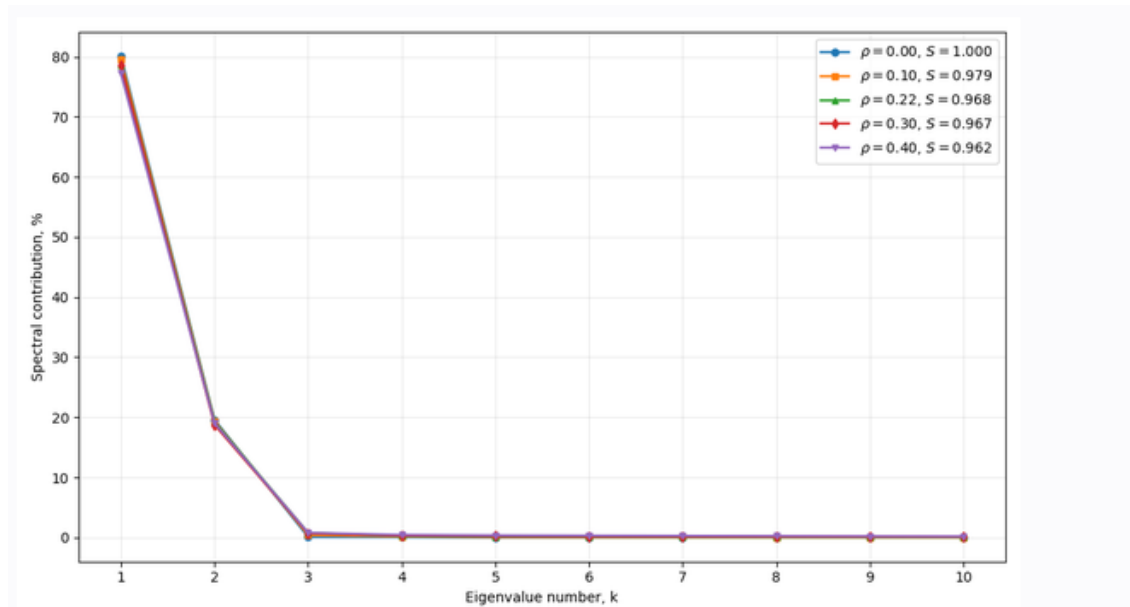


Рис. 1. Нормований спектр власних значень узагальненої матриці просторово-часової структури за різного ступеня неповноти спостережень

Для фіксації умов імітаційного експерименту було сформовано набір основних параметрів моделювання, що визначали розмірність просторово-часового процесу, тривалість спостереження та рівень неповноти вихідних даних. Значення параметрів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри моделювання просторово-часового процесу

Параметр	Позначення	Значення
Кількість просторових положень	N	11
Кількість часових відліків	T	220
Часовий інтервал	t	[0;20]
Частка випадкових пропусків	ρ	0; 0,10; 0,22; 0,30; 0,40
Амплітуда випадкової похибки	σ	0,025
Кількість локальних областей пропусків	n_g	2
Максимальний часовий лаг	L	3
Кількість реалізацій для кожного ρ	n_r	30

Наведені параметри забезпечували формування достатньо щільної просторово-часової структури та одночасно створювали суттєву неповноту спостережень. Поєднання випадкових і локально згрупованих пропусків дозволило відтворити ситуацію, за якої окремі компоненти процесу були доступні нерівномірно у часі, що відповідало умовам, закладеним у математичній моделі.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати показали, що запропонований підхід дозволяє виявляти та кількісно характеризувати просторово-часові залежності багатовимірного інформаційного процесу навіть за наявності неповних спостережень.

Використання матриці доступності забезпечило виключення відсутніх значень із процедур оцінювання, а лагові коваріаційні матриці дали змогу врахувати взаємозв'язки між компонентами у різні моменти часу.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що за помірної частки пропущених даних основні закономірності просторово-часової структури зберігалися, тоді як збільшення неповноти призводило до поступового порушення узгодженості між окремими реалізаціями процесу.

Додатково слід зазначити, що сформоване представлення просторово-часових залежностей може бути використане як основа для подальшого виявлення структурних змін, аномальних станів і порушень узгодженості між окремими компонентами багатовимірного процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування в інформаційних системах моніторингу, де дані надходять нерівномірно, містять пропуски або формуються з декількох взаємопов'язаних джерел. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінювання стійкості сформованої просторово-часової структури за різних рівнів шуму, частки відсутніх спостережень і характеру розподілу пропусків.

6 ВИСНОВКИ

Удосконалено підхід до аналізу просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень, відмінною особливістю якого є формування лагових статистичних залежностей окремо для кожної пари компонентів за множиною фактично доступних спільних спостережень без попереднього відновлення пропущених значень. На цій основі сформовано узагальнену блочну матрицю, що поєднує міжкомпонентні та часові залежності процесу та використовується для виділення його домінантних структурних компонентів.

Імітаційне моделювання підтвердило можливість виявлення структурних закономірностей за наявності випадкових і локально згрупованих пропусків. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу багатовимірних інформаційних процесів в умовах неповноти даних.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори заявляють про відсутність фінансових та нефінансових конфліктів інтересів, які могли б вплинути на проведення дослідження, інтерпретацію отриманих результатів або підготовку матеріалів статті.

Література

1. Tsang A. H. C. Condition-based maintenance: tools and decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 1995. Vol. 1, No. 3. P. 3–17.
<https://doi.org/10.1108/13552519510096350>
2. Goyal D., Pabla B. S. The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2016. Vol. 23. P. 585–594. <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9145-0>
3. Kashkevich S. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. 202. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>.
4. Mnasri Z., Bouwmans T. A novel method for anomaly detection using graph signal embedding: Application to anomalous sound detection. *Expert Systems with Applications*. 2026. Vol. 321. 132278. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.132278>.
5. Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., Kashkevich, S. (2024). Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 1 (4 (127)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>.
6. A. E. Qoussini, Y. I. Daradkeh, S. M. Al Tabib, S. Gnatyuk, T. Okhrimenko and V. Kinzeryavyy, "Improved Model of Quantum Deterministic Protocol Implementation in Channel with Noise," 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Metz, France, 2019, pp. 572-578, <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924287>.
7. S. O. Hnatyuk, R. Sh. Berdybayev, V. M. Sydorenko, O. K. Zhigarevych, & T. V. Smirnova, "Event correlation and cybersecurity incident management system at critical infrastructure facilities," *Cybersecurity: Education, Science, Technology*, 3(19), 176–196, 2023. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.176196>
8. M. Ikermane, M. Mohy-eddine, and Y. Rachidi, "Credit Card Fraud Detection: Comparing Random Forest and XGBoost Models with Explainable AI Interpretations," In *Innovative Technologies on Electrical Power Systems for Smart Cities Infrastructure*. ICESST 2024, 126–135. Aboudrar, I., Ilahi Bakhsh, F., Nayyar, A., Ouachtouk, I., Eds.; Sustainable Civil Infrastructures; Springer: Cham, Switzerland, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86705-7_12
9. B. A. Mohammed, I. Stanovska, S. Kashkevich, A. Lebedynskyi, Y. Vakulenko, N. Protas, O. Klyuchak, O. Lastivka, A. Semeniuk, and O. Kivshar, "Development of a methodological approach for assessing the condition of complex organizational and technical systems," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3(134)), 47–53, 2025. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326468>.
10. W. Hilal, S. A. Gadsden, and J. Yawney, "Fraud: A Review of Anomaly Detection Techniques and Recent Advances," *Expert Syst. Appl.* 193, 116429, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116429>
11. Yakymiak, S., Vdovytskyi, Y., Artabaiev, Y., Degtyareva, L., Vakulenko, Y., Nevhad, S., Andronov, V., Lazuta, R., Shapoval, P., & Artamonov, Y. (2023). Development of the solution search method using the population algorithm of global search optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 39–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281007>.
12. Yu. Chovnyuk, P. Cherednichenko, O. Ostapushchenko, I. Kravchenko (2026). Analysis of spatial-temporal chaotic dynamics of discrete-continuous systems with structural-evolutionary restructuring. *Mechanics and Mathematical Methods*. VIII (1). 95–107. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2026-8-1-95-107>.

References

1. Tsang A. H. C. Condition-based maintenance: tools and decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 1995. Vol. 1, No. 3. P. 3–17.
<https://doi.org/10.1108/13552519510096350>

2. Goyal D., Pabla B. S. The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. Archives of Computational Methods in Engineering. 2016. Vol. 23. P. 585–594. <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9145-0>
3. Kashkevich S. Decision support systems: mathematical support. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 2025. 202. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-13-9>.
4. Mnasri Z., Bouwmans T. A novel method for anomaly detection using graph signal embedding: Application to anomalous sound detection. Expert Systems with Applications. 2026. Vol. 321. 132278. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.132278>.
5. Tamer, K. A., Sova, O., Shaposhnikova, O., Yashchenok, V., Stanovska, I., Shostak, S., Rudenko, O., Petruk, S., Matsyi, O., Kashkevich, S. (2024). Development of a solution search method using a combined bio-inspired algorithm. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 1 (4 (127)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298205>.
6. A. E. Qoussini, Y. I. Daradkeh, S. M. Al Tabib, S. Gnatyuk, T. Okhrimenko and V. Kinzeryavyy, "Improved Model of Quantum Deterministic Protocol Implementation in Channel with Noise," 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Metz, France, 2019, pp. 572-578, <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924287>
7. S. O. Hnatyuk, R. Sh. Berdybayev, V. M. Sydorenko, O. K. Zhigarevych, & T. V. Smirnova, "Event correlation and cybersecurity incident management system at critical infrastructure facilities," Cybersecurity: Education, Science, Technology, 3(19), 176–196, 2023. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.176196>
8. M. Ikermane, M. Mohy-eddine, and Y. Rachidi, "Credit Card Fraud Detection: Comparing Random Forest and XGBoost Models with Explainable AI Interpretations," In Innovative Technologies on Electrical Power Systems for Smart Cities Infrastructure. ICESST 2024, 126–135. Aboudrar, I., Ilahi Bakhsh, F., Nayyar, A., Ouachtouk, I., Eds.; Sustainable Civil Infrastructures; Springer: Cham, Switzerland, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-86705-7_12
9. B. A. Mohammed, I. Stanovska, S. Kashkevich, A. Lebedynskyi, Y. Vakulenko, N. Protas, O. Klyuchak, O. Lastivka, A. Semeniuk, and O. Kivshar, "Development of a methodological approach for assessing the condition of complex organizational and technical systems," Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(3(134)), 47–53, 2025. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326468>.
10. W. Hilal, S. A. Gadsden, and J. Yawney, "Fraud: A Review of Anomaly Detection Techniques and Recent Advances," Expert Syst. Appl. 193, 116429, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116429>
11. Yakymiak, S., Vdovytskyi, Y., Artabaiev, Y., Degtyareva, L., Vakulenko, Y., Nevhad, S., Andronov, V., Lazuta, R., Shapoval, P., & Artamonov, Y. (2023). Development of the solution search method using the population algorithm of global search optimization. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, No. 4 (123), pp. 39–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281007>.
12. Yu. Chovnyuk, P. Cherednichenko, O. Ostapushchenko, I. Kravchenko (2026). Analysis of spatial-temporal chaotic dynamics of discrete-continuous systems with structural-evolutionary restructuring. Mechanics and Mathematical Methods. VIII (1). 95–107. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2026-8-1-95-107>.

Кашкевич Світлана Олександрівна

PhD., доцент

svitlana.kashkevych@npp.kai.edu.ua,

[ORCID: 0009-0007-2406-8535](https://orcid.org/0009-0007-2406-8535)

Національний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

Дехтяренко Артем Тарасович

Молодший науковий співробітник

dekhtiarenkoartem.99@gmail.com,

[ORCID: 0009-0007-8476-6132](https://orcid.org/0009-0007-8476-6132)

Національний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

Брановицька Ірина Василівна

Старший викладач

iryna.branovytska@npp.kai.edu.ua,

[ORCID: 0000-0001-6397-6164](https://orcid.org/0000-0001-6397-6164)

Національний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

Голего Наталія Миколаївна

Старший викладач

nataliia.holeho@npp.kai.edu.ua,

[ORCID: 0000-0002-6430-8659](https://orcid.org/0000-0002-6430-8659)

Національний університет «Київський авіаційний інститут»,
пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

Стаття надійшла до редакції 13.07.2026

Стаття прийнята до друку 13.09.2026

Дата публікації статті 30.09.2026

Для посилань:

Кашкевич С.О., Дехтяренко А.Т., Брановицька І.В., Голего Н.М. Аналіз просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень. Механіка та математичні методи, 2026. Т. VIII. № 2. С. 27–37.

For references:

S. Kashkevych, A. Dekhtiarenko, I. Branovytska, N. Holeho (2026). Analysis of the spatio-temporal structure of multidimensional information processes under incomplete observations. Mechanics and mathematical methods. VIII (2). 27–37.

[Аналіз просторово-часової структури багатовимірних інформаційних процесів за неповних спостережень](#)
© 2026 by [Кашкевич С.О., Дехтяренко А.Т., Брановицька І.В., Голего Н.М.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)