

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-61-67

УДК 004.93

**Олександр Полярус<sup>1</sup>, Євгеній Чепусенко<sup>2</sup>, Аліна Бабаєва<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри метрології та безпеки життєдіяльності  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)

E-mail: [poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Researcher ID: [AAH-1197-2020](https://orcid.org/0000-0002-8023-5189), SCOPUS Author ID: [14024556800](https://orcid.org/0000-0002-8023-5189)

<sup>2</sup>аспірант кафедри метрології та безпеки життєдіяльності

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)

Email: [yevhenii.chepusenko@gmail.com](mailto:yevhenii.chepusenko@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0439-3310>

Web of Science ID: [HPE-7829-2023](https://orcid.org/0000-0002-0439-3310)

<sup>3</sup>студентка

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Харків, Україна)

E-mail: [babaeva19112002@gmail.com](mailto:babaeva19112002@gmail.com)

### ОЦІНКА ОСОБЛИВОСТЕЙ БАГАТОВИМІРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ЇХНІХ ВІЗУАЛЬНИХ ОБРАЗІВ

*Проведено аналіз можливостей візуального контролю багатовимірних випадкових процесів, реалізації яких обробляються у вимірювальних інформаційних системах на технічно складних об'єктах. Уперше запропоновано метод візуального виявлення стрибків параметрів реалізації одного чи декількох випадкових процесів. Корисність методу продемонстрована на прикладі обробки багатовимірних експериментальних даних, яким ставилися у відповідність узагальнені візуальні образи. Функціонування цього методу перевірена також для крайніх випадків оброблення білого шуму й детермінованого процесу.*

**Ключові слова:** багатовимірний випадковий процес; візуалізація; візуальний контроль; візуальний образ; стрибки параметрів.

Рис.: 5. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** На багатьох складних технічних об'єктах одночасно вимірюються багато параметрів, які змінюються з часом. Реалізації цих процесів створюють багатовимірний випадковий процес (БВП). Прийняття рішення щодо стану об'єкта на основі знань про цей процес є операцією, що найчастіше виконується в комп'ютеризованих вимірювальних інформаційних системах, які іноді обладнані елементами штучного інтелекту. Незважаючи на широке впровадження інформаційних технологій у системи діагностики, актуальним залишається візуальний контроль процесів, які характеризують об'єкт, особливо коли кількість таких процесів є великою.

**Постановка проблеми.** Простою візуалізацією може бути фотографія предмета, картина художника-реаліста. Прикладами узагальненої візуалізації є дорожні знаки, символи (букви), що створюють слова, символи (ноти) як елементи музичних акордів, творів, символізм в мистецтві. У математиці алгебра, функціональний аналіз, топологія, тригонометрія тощо також є своєрідними прикладами узагальненої візуалізації. Нарешті, в техніці поширена візуалізація з допомогою, наприклад, спектрів, гістограм, графіків. Застосування візуалізації до багатовимірних випадкових процесів є складним завданням, оскільки традиційні методи, зокрема, графіки є непридатними: людина не зможе за короткий час проаналізувати десятки або сотні графіків, які розміщені окремо чи суміщені на одному аркуші. Отже, виникає проблема візуалізації багатовимірних випадкових процесів, що описують поведінку в часі однорідних чи різнорідних фізичних величин. Візуалізація передбачає постановку у відповідність багатьом випадковим процесам одного двовимірного візуального образу, вид якого буде щось означати для прийняття рішення людиною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На цей час розроблено багато методів обробки багатовимірних даних [1] з використанням методів data mining [2], які є ефективними в прикладних задачах. Візуалізація активно почала розвиватись десятки років тому, зокрема,

у [3] розроблені методи проєктування багатовимірних даних на двомірні площини. Для створення в мозку людини послідовності двомірних зображень складної абстрактної структури об'єкта запропоновано її огляд з усіх боків. Основні проблеми та завдання візуалізації великих даних сформульовані у [4]. У [5] проведено огляд методів подання багатомірних даних у вигляді піктографії, і головний серед цих методів використовує обличчя Чернова, які названі в честь відомого американського професора Германа Чернова. Аналітичні методи аналізу великих даних почали використовуватись не тільки для візуалізації, але і для Інтернету речей [6]. Перед проведенням візуалізації та для її спрощення розмірність даних може бути зменшена [7]. У [8] для спільного використання кількісних та категоріальних змінних запропоновано використовувати узагальнений матричний метод, який пізніше був удосконалений у [9] з метою впровадження інтерактивних підходів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Основним недоліком наявних методів візуалізації є те, що їх важко застосувати для БВП, що описують важливі для технічного об'єкту параметри. Вид часових залежностей цих параметрів може випадково змінюватись і це повинно бути зареєстровано у відповідному візуальному образі. Нами в [10] запропоновано метод, що задовольняє зазначеним вимогам. Корисність методу продемонстрована на прикладі обробки багатовимірних експериментальних даних, яким ставилися у відповідність узагальнені візуальні образи. Функціонування цього методу не перевірена для крайніх випадків випадкових процесів: білого шуму й детермінованого процесу. Не обґрунтований повною мірою підхід до виявлення різких випадкових змін у поведінці одного з випадкових процесів.

**Метою статті** є перевірка ефективності нового методу візуалізації реалізацій багатовимірних випадкових процесів для крайніх випадків і розробка пропозицій щодо виявлення стрибків параметрів одного чи декількох процесів.

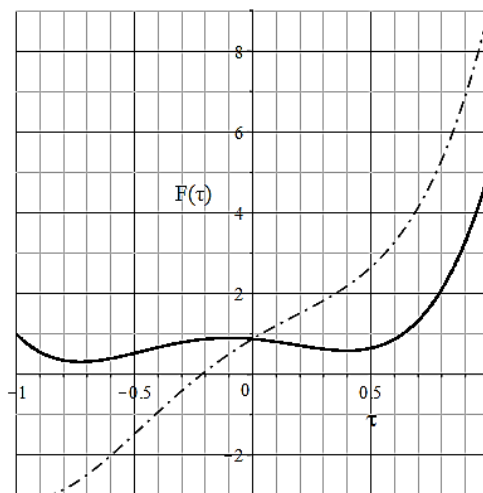
**Виклад основного матеріалу.** Сутність запропонованого методу візуалізації вимірювальної інформації, що міститься в багатовимірних даних, описана в [10]. Реалізація кожного випадкового процесу нормується для усунення залежності від розмірності фізичної величини і дискретизується в часі. Отже, маємо  $n$  реалізацій нормованих випадкових процесів і  $m$  нормованих значень кожного процесу, тобто матрицю розмірністю  $n \times m$ . У дискретний момент часу  $k$  нормоване числове значення  $i$ -го вимірюваного параметра в  $i$ -тому процесі становить  $a_{ik}$ . Для цього моменту часу всім реалізаціям БВП ставиться у відповідність узагальнена функція

$$\rho_k(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} a_{ik} l_i(\tau), \quad (1)$$

де  $\tau$  є деяким узагальненим безрозмірним параметром, а  $l_i(\tau)$  – довільна ортогональна функція  $i$ -го порядку, яка в [10] і в цій статті є функцію Лежандра. Сукупність функцій  $\rho_k(\tau)$  для всіх  $k = 1, 2, \dots, m$  створює візуальний узагальнений образ  $\rho(\tau)$  всіх реалізацій багатовимірних випадкових процесів, що отриманий в окремий період часу. Для іншого періоду цей образ може змінитись. Нормальному режиму функціонування технічного об'єкта відповідає деякий стандартний візуальний образ, який може осереднюватись за багато періодів. При аномальному режимі візуальний образ буде відрізнитись від стандартного. Таким чином, по виду цього образу, мабуть, буде можливо проводити візуальну діагностику технічного об'єкта або знаходити аномалії в отриманих даних. Для реалізації такої ідеї необхідно провести низку попередніх досліджень. У цій статті проведемо аналіз візуалізації БВП для окремих крайніх випадків.

Для спрощення аналізу спочатку вважаємо, що всі реалізації БВП є постійними в часі, але одна з них на деякому невеликому інтервалі часі змінюється стрибком у вигляді гаусоїди з деякою дисперсією. Щоб розрізнити візуальний образ  $\rho(\tau)$  для реальної ситуації від образу для модельної ситуації (крайній випадок), позначимо модельний образ

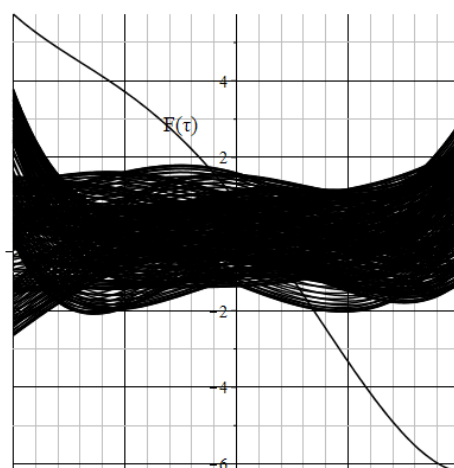
як  $F(\tau)$ . На рис. 1 наведена залежність  $F(\tau)$  для описаного випадку (суцільна лінія) і за наявності в одній (будь-якій) з реалізацій стрибка, амплітуда якого в п'ять разів перевищує постійне значення цієї реалізації (штрих-пунктирна лінія).



*Рис. 1. Візуальний образ у випадку, коли всі значення реалізацій випадкових процесів не змінюються з часом (суцільна лінія), а значення однієї з реалізацій процесу в один момент часу збільшується в 5 разів стрибком (штрих-пунктирна лінія)*

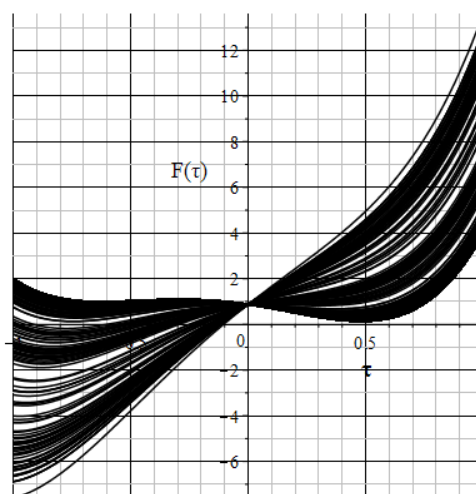
З рисунку 1 випливає, що для вибраної моделі наявність стрибка в одній з реалізацій БВП легко фіксується по візуальному образу. Якщо встановити поріг різниці між стандартним візуальним образом (суцільна лінія) та реальним (штрих-пунктирна лінія) при деякому значенні  $\tau$ , то перевищення порогу буде свідчити про виявлення стрибка з деякою ймовірністю, яку можна визначити за відомими методиками. Стрибки у двох і більше реалізаціях не змінюють поведінку візуального образу.

У другій модельній ситуації всі реалізації БВП змінюються за гармонічним законом, а одна з реалізацій містить стрибок, який легко виділяється у візуальному образі (рис. 2).



*Рис. 2. Візуальний образ для випадку, коли всі значення реалізацій БВП змінюються з часом за гармонічним законом із різними періодами, а в один момент часу значення однієї з реалізацій одного з випадкових процесів змінюються стрибком, що в 10 разів перевищує середнє значення*

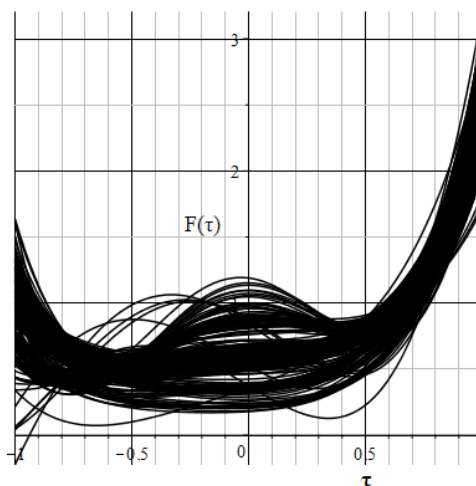
У третій модельній ситуації, як і в першій, значення реалізацій БВП не змінюються з часом, але одна реалізація має низьку кореляцію, тобто є близькою до білого шуму. Візуальний образ у цьому випадку має дуже характерні ознаки (рис. 3).



*Рис. 3. Візуальний образ у випадку, коли всі значення реалізацій БВП не змінюються з часом (суцільна лінія), а реалізація одного з випадкових процесів є білим шумом амплітудою 50 % від максимального значення*

Для корельованих процесів візуальний образ звужується по вертикалі. Отже, існує фізична основа розпізнавання хаотичних процесів, що можуть входити до БВП.

У реальній (не модельній) ситуації візуальний образ є складнішим. На рисунку 4 він отриманий з експериментальних даних, що описані в [10].



*Рис. 4. Візуальний образ для випадку, коли всі реалізації БВП отримані з експериментальних даних*

Стрибки значень реалізацій БВП, якщо вони відбуваються в реальних умовах нестаціонарних випадкових процесів, не завжди чітко виділяються. Залежність виду візуального образу від амплітуди стрибка отримати не просто. Потрібний інший підхід, що створить умови для якісного візуального аналізу і дасть можливість розробити метрологічні вимоги до точності вимірювань параметрів процесів.

Для відмови від аналізу складних візуальних образів будемо оцінювати не узагальнену функцію  $F(\tau)$ , а різницю  $\chi(\tau) = F_1(\tau) - F_2(\tau)$  узагальнених функцій  $F_1(\tau)$  без стрибка амплітуди та  $F_2(\tau)$  зі стрибком або стрибками амплітудних значень реалізацій БВП (рис. 5).

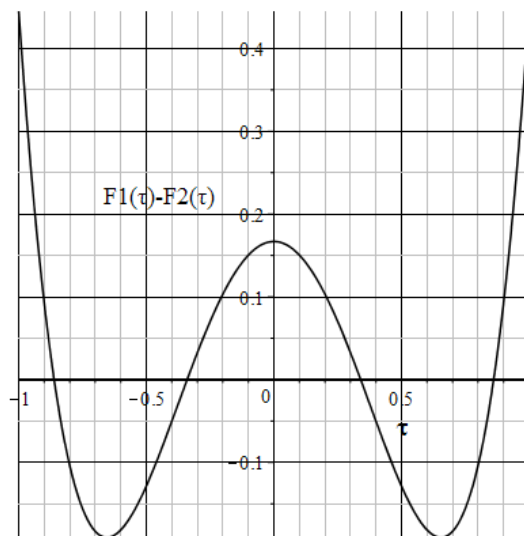


Рис. 5. Різниця узагальнених функцій: узагальненої функції для експериментальних даних без стрибків і функції, коли в одному з процесів в один із моментів часу з'явився стрибок амплітуди з 0,1548 до 0,6

Аналогічний вид мають рисунки, що отримані при різних амплітудах стрибків будь-якої з реалізацій випадкового процесу, тільки змінюються цифрові дані на осі ординат. Залежність  $\chi(\tau = const)$  від відносної амплітуди стрибка є лінійною. Як бачимо, при виборі порогу  $\chi$  завжди можна оцінити візуально амплітуду стрибка й перерахувати її в реальне значення вибраної реалізації БВП, а потім порівняти її з вимогами ДСТУ.

Отже, існують передумови для візуального виявлення стрибків значень реалізацій БВП. Визначення номеру випадкового процесу, в якому з'явився стрибок, може здійснюватися не оператором, а алгоритмами оброблення вимірних сигналів, наприклад, такими, які розроблені в [11]. Задача оператора – сигналізувати про порушення в роботі об'єкта. Описаний метод виявлення стрибків параметрів сигналів був продемонстрований для випадку відомих функцій  $F_1(\tau)$  та  $F_2(\tau)$ . В реальній ситуації вони наперед не відомі. Тоді, як було зазначено, треба отримати осереднену функцію  $\rho(\tau)$ , яка буде аналогом функції  $F_1(\tau)$ . Функція  $F_2(\tau)$  буде описувати візуальний образ БВП для реальної ситуації і далі потрібно проводити розпізнавання візуального образу  $\chi(\tau)$  для оцінки можливості виявлення стрибка в одній чи декількох реалізаціях БВП. Ця задача виходить за межі дослідження, що встановлені в статті.

**Висновки.** У роботі вдосконалено метод візуалізації багатовимірних випадкових процесів і перевірена ефективність нового методу для різних спрощених модельних ситуацій. Ефективність оцінювалась на основі сприйняття візуальних образів багатомірних процесів людиною і виявилась високою, тобто такою, що не припускає подвійного тлумачення. Наукова новизна статті полягає в тому, що в ній розроблені нові обґрунтовані пропозиції щодо візуального виявлення стрибків параметрів одного чи декількох реалізацій випадкових процесів. Метод може використовуватись в різних галузях, де застосовуються багатоканальні вимірювальні інформаційні системи, в яких обробляються різномірні параметри реалізацій випадкових процесів, а візуальний контроль за прийнятими

сигналами є ускладненим. У подальшому необхідно провести широке коло досліджень з оцінки ефективності методу візуалізації багатовимірних процесів в різних практичних ситуаціях, набрати статистику і створити загальну теорію візуального виявлення аномалій у таких процесах.

### Список використаних джерел

1. Mansmann S. Multidimensional Data Modeling for Business Process Analysis / S. Mansmann, T. Neumuth, Marc H. Scholl // *ER 2007: 26th International Conference on Conceptual Modeling*, Auckland. – New Zealand, November 5-9, 2007.
2. Jean-Luc Starck. Handbook of Astronomical Data Analysis / Jean-Luc Starck, Fionn Murtagh // Elsevier, 2002. – 303 p.
3. Asimov D. The grand tour: A tool for viewing multidimensional data / D. Asimov // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. – 1985. – № 6 (1). – Pp. 128-143.
4. Zongben Xu. Exploring Big Data Analysis: Fundamental Scientific Problems / Xu Zongben, Shi Yong // *Ann. Data Sci.* – 2015. – № 2 (4). – Pp. 363-372. – DOI 10.1007/s 40745-015-006374.
5. Yau Nathan. Visualize This: The Flowing Data Guide to Design, Visualization, and Statistics / Yau Nathan // John Wiley & Sons. – 2011. – 384 c.
6. Big Data Analytics: Architecture, Oppottunities, and Open Research Challenges / Mohsen Marjani, Fariza Nasaruddin, Abdullah Gani, Ahmad Karim, Ibrahim Abaker Targio Hashen, Aisha Siddiqa and Ibrar Yaqoob // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 5247-5261.
7. Amy Genender-Feltheimer. Visualizing High Dimensional and Big Data. – Complex Adaptive Systems Conference with Theme: Cyber Physical Systems and Deep Learning / Amy Genender-Feltheimer // *CAS*. – 2018. – 5 November – 7 November 2018. – Chicago, Illinois, USA. – Pp. 112-121.
8. The Generalized Pairs Plot / John W. Emerson, Walton A. Green, Barret Schloerke, Jason Crowley, Dianne Cook, Heike Hofmann, Hadley Wickham // *Journal of Computational and Graphical Statistics*. – 2013. – Vol. 22(1). – Pp.79-91.
9. Jean-François Im. GPLOM: The Generalized Plot Matrix for Visualizing Multidimensional Multivariate Data / Jean-François Im, Michael J. McGuffin, Rock Leung // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2013. – № 19(12). – Pp. 2606-2614. – DOI: 10.1109/TVCG.2013.160.
10. Visualization method for multidimensional random processes / Poliarus O., Lebedynskiy A., Chepusenko Ye., Lyubymova N. // *Measuring equipment and metrology*. – 2023. – Vol. 84, No. 1. – Pp. 5-10.
11. Poliarus O.V. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters / O.V. Poliarus, Ye.O. Poliakov, L. Lindner // *The 44<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – Washington D. C., USA, October 21-23, 2018. – Pp. 3165-3170.

### References

1. Mansmann, S., Neumuth, T., & Marc H. Scholl. (November 5-9, 2007). Multidimensional Data Modeling for Business Process Analysis. *ER 2007: 26th International Conference on Conceptual Modeling*, Auckland, New Zealand.
2. Jean-Luc, Starck, & Fionn, Murtagh. (2002). Handbook of Astronomical Data Analysis. *Elsevier*.
3. Asimov, D. (1985). The grand tour: A tool for viewing multidimensional data. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 6(1), 128-143.
4. Zongben, Xu, & Yong, Shi. (2015). Exploring Big Data Analysis: Fundamental Scientific Problems. *Ann. Data Sci.*, 2(4), 363-372. doi:10.1007/s 40745-015-006374.
5. Yau Nathan. (2011). Visualize This: The Flowing Data Guide to Design, Visualization, and Statistics. *John Wiley & Sons*.
6. Mohsen, Marjani, Fariza, Nasaruddin, Abdullah, Gani, Ahmad, Karim, Ibrahim Abaker, Targio Hashen, Aisha, Siddiqa, & Ibrar, Yaqoob. Big Data Analytics: Architecture, Oppottunities, and Open Research Challenges // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 5247-5261.
7. Amy, Genender-Feltheimer. (5 November – 7 November 2018). Visualizing High Dimensional and Big Data. *Complex Adaptive Systems Conference with Theme: Cyber Physical Systems and Deep Learning*, *CAS* (pp. 112-121). Illinois, USA.

8. John W. Emerson, Walton A. Green, Barret Schloerke, Jason Crowley, Dianne Cook, Heike Hofmann, & Hadley Wickham. (2013). The Generalized Pairs Plot. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 22(1), 79-91.

9. Jean-François Im, Michael J. McGuffin, & Rock Leung. (2013). GPLOM: The Generalized Plot Matrix for Visualizing Multidimensional Multivariate Data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12), 2606-2614. doi:10.1109/TVCG.2013.160.

10. Poliarus, O., Lebedynskiy, A., Chepusenko, Ye., & Lyubymova, N. (2023). Visualization method for multidimensional random processes. *Measuring equipment and metrology*, 84(1), 5-10.

11. Poliarus, O.V., Poliakov, Ye.O., & Lindner, L. (October 21-23, 2018). Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. *The 44<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 3165-3170). Washington D. C.

Отримано 15.02.2023

UDC 004.93

### ***Oleksandr Poliarus, Yevhen Chepusenko, Alina Babayeva<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Doctor of Engineering Science, Professor of Metrology and Life Safety Department  
Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: [poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8023-5189>

Researcher ID: [AAH-1197-2020](https://orcid.org/0000-0002-8023-5189). SCOPUS Author ID: [14024556800](https://orcid.org/0000-0002-8023-5189)

<sup>2</sup>Graduate Student of the Department of Metrology and Life Safety  
Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: [yevhenii.chepusenko@gmail.com](mailto:yevhenii.chepusenko@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0439-3310>

Web of Science ID: [HPE-7829-2023](https://orcid.org/0000-0002-0439-3310)

<sup>3</sup>Student

Kharkiv National Automobile and Highway University (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: [babaeva19112002@gmail.com](mailto:babaeva19112002@gmail.com)

## **ESTIMATION OF MULTIDIMENSIONAL RANDOM PROCESSES FEATURES BASED ON THEIR VISUAL IMAGES**

Despite the wide implementation of information technologies in diagnostic systems, visual control of the processes that characterize the object state remains relevant, especially when the number of such processes is large. An analysis of the possibilities of visual control for multidimensional random processes, the realizations of which are processed in measurement information systems on complex technical objects, was carried out. For this, these processes are transformed into a visual image, that represented a set of curves on a plane, which are obtained for each discrete moment of time. Any curve is the sum of products of the realizations values for each random process at a specified discrete moment of time on the corresponding orthogonal function that depends on some generalized argument. Lagrangian functions are used in the article.

The purpose of the article is to check the effectiveness of a new method of visualizing realizations of a multidimensional random process for extreme cases and to develop proposals for detecting the parameters jumps of one or more processes.

For the first time, a method of visual detection of the parameters jumps of realizations for one or more random processes is proposed. The essence of the method is based on the subtraction of a visual image, that is, a set of functions in the absence of a jump of one or more process parameters from a similar image that concludes jumps of parameters. In practice, the first image should be a statistical average for the conditions of normal functioning of the technical object. After subtraction, a new visual image is created, which shows anomalies caused by jumps in process parameters. The usefulness of the method is demonstrated on the example of processing multidimensional experimental data, which were matched with generalized visual images. The functioning of this method is verified also for extreme cases of processing white noise and a deterministic process. The obtained visual images also reveal the features of the behavior of multidimensional random processes.

**Keywords:** multidimensional random process; visualization; visual control; visual image; parameter jumps.

Fig.: 5. References: 11.