

АНОТАЦІЯ

Дячук Р.Л. Розробка та дослідження інформаційної системи генерування високоентропійної послідовності випадкових чисел. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026.

Дисертаційна робота присвячена створенню та дослідженню інформаційної системи для генерування високоентропійної послідовності випадкових чисел (ПВЧ) на основі сучасних технологій та методів програмної інженерії, а також використання фотоелектричних явищ в якості джерела ентропії. Створена інформаційна система і її програмне забезпечення побудована на основі технології екстракції хаосу з стохастичних фізичних явищ, а саме – інтенсивності пікселів зображення з веб-камери, або цифрової відеокамери, фото- та темного струму фотодіода з високою квантовою ефективністю. Отримані послідовності випадкових чисел також можуть оброблятися за допомогою клітинних автоматів, що суттєво збільшує рівень хаотичності випадкової послідовності. Створені генератори випадкових послідовностей, на відміну від існуючих, є простими, доступними, високопродуктивними, здатними до гнучкого налаштування. Інформаційна система загалом містить аналітичний інтелектуальний модуль спрощеної статистичної оцінки послідовності випадкових чисел, згенерованих вбудованими в неї генераторів, відрізняється високим рівнем криптостійкості, сприяє ефективному шифруванню та кодуванню для мінімізації кіберзагроз.

Проведено порівняльне дослідження статистичних і робочих характеристик аналогічних відомих генераторів ПВЧ, яке показало перевагу створеної інформаційної системи за рядом показників. А саме: за швидкістю генерації послідовності випадкових чисел, високим рівнем недетермінованої ентропії, гнучким налаштуванням, відкритим дизайном та швидкою пост

обробкою. Створена інформаційна система має базові внутрішні перевірки, здатна регулювати співвідношення якості та швидкості вихідного потоку та ефективну пост обробку за допомогою клітинних автоматів. Окрім того новостворена система має відкритість апаратури та програмного забезпечення Open-hardware та open-source (GPLv3) в тому числі для застосування у нейронних мережах.

Також, для роботи з крипто-примітивами на основі клітинних автоматів створено бібліотеку на мові програмування Java. Запропоновано і експериментально доведено високу якість, що генерується клітинними автоматами хаотичного типу (правила 30, 90, 105). Оптимізовано високу продуктивності і низьку ресурсоемності функціоналу на клітинних автоматах. Забезпечено неперервну генерацію послідовності випадкових чисел заданої продуктивності та якості.

Результати роботи є підґрунтям для подальших теоретичних і практичних наукових розробок із досліджень проблематики теорії генерації ПВЧ.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та чотирьох додатків. У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання, предмет, об'єкт та методи дослідження, вказано наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, подано та проаналізовано зв'язок роботи з науковими темами. Зазначено особистий внесок здобувача, а також наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів дисертації. Описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

Перший розділ містить ключові відомості з теорії генерації високоентропійних ПВЧ, а також відомості про апаратні генератори ПВЧ в системах інформаційної безпеки, зокрема у криптобезпеці та крипто-кодуванні. Розглянуто різні підходи до джерела ентропії та програмно-конструкторського оточення. Проаналізовано їх значення у системах на основі криптокодових та шифрувальних конструкцій та показані сильні сторони і вузькі місця з точки зору

ціни, складності, надійності, довіри, продуктивності, керованості, моніторингу і ліцензування. Розглянуто теоретичні основи оцінювання випадковості та ентропії, а також проведено порівняльний аналіз сучасних найбільш відомих генераторів ПВЧ в системах криптобезпеки.

Обґрунтовано доцільність дослідження фото-електричних явищ (ФЕЯ) та квантових як джерела ентропії для генерації ПВЧ. Така конструкція дозволить частково зменшити недоліки, які притаманні системам, що вже існують.

На основі проведеного дослідження сформовані завдання дослідження.

У **другому розділі** дисертаційного дослідження описано дослідження інтенсивності пікселів зображення з веб-камери, або цифрової відеокамери, фото- та темного струму фотодіода з високою квантовою ефективністю як природних джерел для генерації послідовності випадкових чисел. Показано, що послідовність випадкових чисел, згенерована на основі інтенсивності пікселів зображення відеокамери має непередбачуваний характер і продуктивність від 85 Мбіт/сек до 288 Мбіт/сек, в залежності роздільної здатності відеокамери. Але, така послідовність випадкових чисел не відповідає вимогам стандартів NIST. Послідовність випадкових чисел, згенерована на основі фотоструму фотодіода з високою квантовою ефективністю є непередбачуваною, а її продуктивність досягає 2 Мбіт/сек. Такі послідовності випадкових чисел, частково відповідають тестам NIST. Послідовності випадкових чисел, створені за допомогою генератора на основі темного струму фотодіода, має абсолютно непередбачуваний характер і продуктивність до 980 Мбіт/сек, яка може бути збільшена при застосування високочастотної апаратної частини. Такий генератор може використовуватись для заправки (вектора ініціалізації) гібридних генераторів випадкових послідовностей.

Проведено дослідження гібридного генератора послідовностей випадкових чисел, який поєднує у собі генератор на основі відео, або веб-камери і клітинних автоматів. Таке поєднання вирішує питання по швидкодії, надійності, контрольованості, відповідності статистичним вимогам та вимогам

до безпеки і стабільності пост-обробки. Також програмна частина гібридного генератора відкриває теоретично необмежені можливості по масштабованості та паралелізації процесу генерації, а також машинного навчання за допомогою нейронної мережи.

Третій розділ присвячено створенню інформаційної системи генерування послідовності випадкових чисел на основі усіх трьох генераторів із обробкою отриманих послідовності випадкових чисел за допомогою клітинних автоматів. Таке об'єднання повністю вирішуватиме питання про непередбачуваність, хаотичність, криптостійкість та ізольованість згенерованих послідовностей. Інтерфейс інформаційної системи дозволяє керувати параметрами генерації числових послідовностей, а саме: обирати джерело послідовностей випадкових чисел (база даних, файл, на основі відео-, або веб-камери, фото- та темного струму фотодіода з високою квантовою ефективністю, гібридного з обробкою числових послідовностей за допомогою клітинних автоматів); обирати між різними діапазонами значень (біти 0-1, стандартний діапазон 1-256, або користувацький діапазон); регулювати баланс між швидкістю генерації та рівнем безпеки, який забезпечує згенерована послідовність випадкових чисел, зберігати її та аналізувати.

Продуктивність інформаційної системи лежить у межах 0,980 - 288 Мбіт/с і може бути суттєво збільшена при використанні високочастотної апаратної частини. Також система передбачає можливість масштабувати всю програмну частину генератора, або ж розпаралелити процес обробки «сирої» числової послідовності всередині блоку програмної частини. Що, на прикладі послідовності випадкових чисел, згенерованої на основі відео-зображення, або веб-камери, дозволило підвищити продуктивність у 4 рази.

У четвертому розділі висвітлено результати застосування розробленої інформаційної системи при формування вхідного вектора для хеш-функції, для стеганографічних систем із підвищеними вимогами до прихованості та стійкості,

а також для формування криптографічних ключів із високим рівнем ентропії та криптостійкості. Результати роботи, а саме удосконалений алгоритм створення хеш-функції, стеганографічні алгоритми та алгоритми генерації криптографічних ключів за допомогою розробленої інформаційної системи генерації послідовностей випадкових чисел, впроваджені та використовується у ТДВ ЗАВОД «Кварц», Kaskad Developers Group та компанії «Datawiz» для підвищення криптостійкості програмного забезпечення.

У **висновках** підсумовано основні результати дисертаційного дослідження.

У **додатках** подано наукові публікації, в яких відображено основні наукові результати роботи, відомості про апробацію результатів дисертації, акти та довідки про впровадження результатів роботи, лістинг частини коду програми.

Теоретичне значення. Результати теоретичних досліджень, а саме методологію екстракції хаосу з таких стохастичних фізичних явищ як інтенсивність пікселів з зображення веб-камери, фото- та темновий струм фотодіода, а також методологія використання клітинних автоматів для забезпечення високої якості хаотичності та оптимізація високої продуктивності і низької ресурсоемності функціоналу можуть застосовуватись для досліджень у галузі програмної інженерії, а також у навчальних курсах кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (та інших ЗВО), пов'язаних з криптозахистом, методичних розробках, навчальних посібниках, які застосовуються в освітньому процесі і науково-дослідної роботи студентів та аспірантів.

Практичне значення. Розроблені у дисертаційній роботі інформаційна система для генерації послідовностей випадкових чисел може в подальшому використовуватися для практичної реалізації. Запропоновані підходи до генерації вхідного вектора хеш-функцій із використанням клітинних автоматів та послідовностей випадкових чисел, стеганографічні алгоритми та алгоритми

генерації криптографічних ключів, використовуються у компанії ТДВ ЗАВОД «Кварц», Kaskad Developers Group та компанії «Datawiz» – для розробки власного програмного забезпечення підвищеної криптостійкості.

Ключові слова: програмне забезпечення, випадкові числа, джерела ентропії, хаотична система, кібербезпека, крипто-кодування, інформаційна система, шифрування, генератор, відеокамера, зображення, фотодіод, квантова ефективність, хеш-функція, нейромережа.

ABSTRACT

Diachuk R. Information System for Generating a High-Entropy Random Number Sequence. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the Specialty 121 – “Software Engineering” – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2026.

The proceeding is devoted to the development and investigation of an information system for generating high-entropy random number sequences (RNS) based on modern technologies and software engineering methods, as well as to the use of photoelectric phenomena as entropy sources. The developed information system and its software are based on the technology of chaos extraction from stochastic physical phenomena, namely the intensity of image pixels obtained from a webcam or digital video camera, as well as the photo-current and dark current of a photodiode with high quantum efficiency. The resulting random number sequences can additionally be processed using cellular automata, which significantly increases the level of chaoticity of the generated sequences. The developed random sequence generators, in contrast to existing solutions, are characterized by simplicity, accessibility, high performance, and flexible configurability. The information system incorporates an analytical intelligent module for simplified statistical evaluation of random sequences generated by its built-in generators. It demonstrates a high level of cryptographic strength, facilitates effective encryption and encoding, and contributes to minimizing cybersecurity threats.

A comparative study of statistical and operational characteristics of known random number generators has been held, demonstrating the advantages of the proposed information system across several indicators. In particular, these include higher generation speed, a high level of non-deterministic entropy, flexible configuration, open design, and efficient post-processing. The developed system also includes basic internal validation mechanisms and provides the capability to regulate the balance between output quality and generation speed of the output stream and efficient post-processing using cellular automata. Furthermore, the newly developed system is characterized by open hardware and open-source software (GPLv3), including its applicability in neural network systems.

In addition, a Java-based library has been developed for working with cryptographic primitives based on cellular automata. A high quality of sequences generated by chaotic cellular automata (Rules 30, 90, and 105) has been proposed and experimentally validated. The functionality of cellular automata has been optimized to ensure high performance and low computational resource consumption. Continuous generation of random number sequences with specified performance and quality parameters has been achieved.

The results of this work provide a foundation for further theoretical and applied research in the field of random number generation theory.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references, and four appendices. The **introduction** substantiates the relevance of the research topic, formulates the aim, objectives, subject, object, and research methods, and highlights the scientific novelty as well as the theoretical and practical significance of the obtained results. It also presents and analyzes the relationship of the work with ongoing research topics. The personal contribution of the author is specified, along with information on the approbation and publications of the main dissertation results. The structure and scope of the dissertation are provided.

The first section contains key information on the theory of high-entropy random number generation, as well as an overview of hardware random number generators in

information security systems, particularly in cryptographic security and cryptographic encoding. Various approaches to entropy sources and software–hardware environments were investigated. Their role in systems based on cryptographic coding and encryption schemes is analyzed, highlighting strengths and limitations in terms of cost, complexity, reliability, trust, performance, controllability, monitoring, and licensing. The theoretical foundations of randomness and entropy evaluation were investigated, and a comparative analysis of the most well-known modern random number generators used in cryptographic security systems has been held.

The feasibility of investigating photoelectric phenomena (PhEPh), as well as quantum phenomena, as entropy sources for random number generation has been substantiated. Such an approach makes it possible to partially decrease the shortcomings inherent in existing systems. Based on the research carried out, the set of main tasks have been formulated.

The second chapter of the dissertation presents an experimental study of pixel intensity from webcam or digital video camera images, as well as the photo-current and dark current of a high-quantum-efficiency photodiode, as natural entropy sources for generating random number sequences. It is demonstrated that sequences generated from video camera pixel intensity exhibit an unpredictable nature and achieve throughput ranging from 85 Mbit/s to 288 Mbit/s, depending on camera resolution. However, such sequences do not fully comply with National Institute of Standards and Technology (NIST) standards. Sequences generated from the photo-current of a high-quantum-efficiency photodiode are also unpredictable, with performance reaching up to 2 Mbit/s. These sequences partially satisfy NIST statistical tests. Random number sequences produced by a generator based on the photodiode dark current exhibit a completely unpredictable nature and achieve performance up to 980 Kbit/s, which can be further increased through the use of high-frequency hardware components. Such a generator can be effectively used for seeding (initialization vector generation) in hybrid random number generators. A hybrid random number generator combining a video/webcam-based generator with cellular automata has also been investigated. This

combination addresses key challenges related to performance, reliability, controllability, compliance with statistical requirements, and security, as well as ensuring stable post-processing. Furthermore, the software component of the hybrid generator provides theoretically unlimited performance due to scalability and parallelization of the generation process, as well as the application of machine learning using neural networks.

The third chapter is devoted to the development of an information system for generating random number sequences based on all three generators, with post-processing of the obtained sequences using cellular automata. Such integration comprehensively addresses the issues of unpredictability, chaoticity, cryptographic strength, and isolation of the generated sequences. The interface of the information system enables control over generation parameters, including: selection of the random number source (database, file, video or webcam-based source, photodiode photocurrent and dark current with high quantum efficiency, or a hybrid generator with cellular automata-based post-processing); selection of value ranges (binary range 0–1, standard range 1–256, or a user-defined range); adjustment of the balance between generation rate (performance) and security level of the produced sequence; as well as storage and analysis of the generated data. The performance of the information system ranges from 0.980 to 288 Mbit/s and can be significantly increased through the use of high-frequency hardware components. The system also supports scalability of the entire software component of the generator, as well as parallelization of the processing of “raw” numerical sequences within the software module. For instance, in the case of sequences generated from video imagery or a webcam, this approach enabled a fourfold increase in performance.

The fourth chapter presents the results of applying the developed information system for forming input vectors for hash functions, for steganographic systems with enhanced requirements for concealment and robustness, and for generating cryptographic keys with a high level of entropy and cryptographic strength. The results of the study, including an improved hash function construction algorithm,

steganographic algorithms, and cryptographic key generation algorithms based on the developed information system, demonstrate the generation of random number sequences have been implemented and are being used at a plant Kvarts, Kaskad Developers Group, and Datawiz to enhance the cryptographic strength of software systems.

The **Conclusions** summarize the main results of the dissertation research.

The **Appendices** include scientific publications reflecting the principal research findings, information on the approbation of the dissertation results, certificates and reports on the implementation of the research outcomes, and listings of parts of the program code.

Theoretical significance. The results of the theoretical research — namely, the methodology for extracting chaos from stochastic physical phenomena such as webcam image pixel intensity, photodiode photo-current and dark current, as well as the methodology for applying cellular automata to ensure a high level of chaoticity while optimizing performance and minimizing resource consumption—can be applied in further research within the field of software engineering. They may also be utilized in academic courses of the Department of Software Engineering at Yurii Fedkovych Chernivtsi National University (and other higher education institutions), particularly in areas related to cryptographic protection, as well as in methodological materials and teaching manuals used in the educational process and research activities of students and postgraduate researchers.

Practical significance. The information system for generating random number sequences developed in this dissertation can be further employed for practical implementation. The proposed approaches to generating input vectors for hash functions using cellular automata and random number sequences, as well as the developed steganographic algorithms and cryptographic key generation algorithms, are being utilized at ZAVOD Kvarts, Kaskad Developers Group, and Datawiz for the development of proprietary software systems with enhanced cryptographic strength.

Keywords: software, random numbers, entropy sources, chaotic system, cybersecurity, cryptographic encoding, information system, encryption, generator, video camera, image, photodiode, quantum efficiency, hash function, neural network.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Scopus:

1. Diachuk R., Dmytrashchuk K., Mazurets A., Prokhorov H., Yanushevskiy S. Photosensitive matrix as a source of entropy. *Proceedings of SPIE*. 13813, Seventeenth International Conference on Correlation Optics. 2025. 138132C. ISSN:0277-786X (Scopus) DOI: 10.1117/12.3092587 (Внесок авторів: Diachuk R. – програмна реалізація збору та обробки даних, експериментальні дослідження ентропійних характеристик, аналіз результатів, підготовка початкового варіанту статті; Dmytrashchuk K. – апаратна реалізація та налаштування фоточутливої матриці, збір експериментальних даних; Mazurets A. – аналіз літературних джерел, статистична обробка результатів; Prokhorov H. – методологія дослідження, формалізація моделі джерела ентропії; Yanushevskiy S. – концептуалізація, наукове керівництво, рецензування та редагування рукопису.)

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

2. Diachuk R., Dobrovolsky Y., Hanzhelo D., Prokhorov H., Trembach D. Research the Level of Chaotic and Reliability in Webcam-generated Random Number Sequences, *Security of infocommunication systems and Internet of things*. 2024. Vol. 2, №. 1. P. 01004. DOI: 10.31861/sisiot2024.1.01004 (Внесок авторів: Dobrovolsky Y. – концептуалізація; Prokhorov H. – методологія та дослідження, Diachuk R. – програмна розробка, та експерименти; Hanzhelo

D. – статистичні дослідження; Trembach D. – концептуалізація та написання).

3. Добровольський, Ю., Дячук, Р. Дослідження зворотного струму фотодіода для генерації надійної випадкової послідовності чисел. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Том 357, № 5.1. С. 126-132. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-357-15 (Внесок авторів: *Добровольський Ю. – концептуалізація, методологія, аналіз результатів, редагування; Дячук Р. – аналіз джерел, програмна розробка, дослідження результатів та написання).*
4. Prokhorov H., Hanzhelo M., Diachuk R., Yanushevskiy S. Investigation of statistical characteristics of random number sequences generated by a webcam using cellular automata functionality and NIST patterns. *Security of infocommunication systems and Internet of things.* 2025. Vol 3, № 1. P. 01007. DOI: 10.31861/sisiot2025.1.01007 (Внесок авторів: *Prokhorov H. – концептуалізація, дослідження, нагляд; Hanzhelo M., Diachuk R. – програмне забезпечення, ресурси, підготовка початкового варіанту рукопису, візуалізація, валідація; Yanushevskiy S. – методологія, концептуалізація, рецензування та редагування рукопису, нагляд, дослідження).*
5. Добровольський Ю., Дячук Р. Дослідження генерації випадкової послідовності чисел на основі темного струму фотодіода при різних температурах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2025. Том 36 (75), № 4. Частина 2. С. 119-126. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.4.2/16 (Внесок авторів: *Добровольський Ю. – концептуалізація, методологія, написання; Дячук Р. – аналіз джерел, програмна розробка, аналіз результатів та редагування).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Дячук Р.Л., Павлюченко О.С., Прохоров П.А., Прохоров Г.В., Добровольський Ю.Г. Клітинні автомати як генератори Хаосу в криптографічних алгоритмах. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки : матеріали XI міжнар.*

- наук.-практ. конф., м. Чернівці, 10–13 лист. 2022 р. Черн. нац. ун-т ім. Ю Федьковича, Чернівці, 2022. – С. 44-46. (*Внесок авторів: Дячук Р.Л. – концептуалізація, програмна реалізація моделі, експериментальні дослідження, написання рукопису; Павлюченко О.С. – аналіз літератури, дослідження параметрів клітинних автоматів; Прохоров П.А., Прохоров Г.В. – методологія, формалізація моделі, валідація результатів; Добровольський Ю.Г. – наукове керівництво, узагальнення результатів, редагування*).
7. Prokhorov G., Dobrovolsky Y., Dyachuk R. Hash-Function Algorithms Balanced on Reliability and Data Processing Speed. IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory, 15-16 December, 2022, Kyiv, UKRAINE. P.111-114. (Scopus). DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024181 (*Внесок авторів: Prokhorov G. – концептуалізація, методологія, постановка задачі; Dobrovolsky Y. – аналіз надійності, редагування, наукове керівництво; Dyachuk R. – програмна реалізація алгоритмів, експериментальні дослідження швидкодії, візуалізація результатів, підготовка початкового варіанту статті*).
 8. Дячук Р.Л., Добровольський Ю.Г. Алгоритм хеш-функції з підвищеною криптостійкістю. Покращення лавинного ефекту. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнар. наук.-практ. конф., MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023. Харків: НТУ «ХП». С. 1113. (*Внесок авторів: Дячук Р.Л. – розробка алгоритму, програмна реалізація, експериментальна перевірка лавинного ефекту, написання рукопису; Добровольський Ю.Г. – концептуалізація, аналіз криптостійкості, редагування, наукове керівництво*).
 9. Дячук Р.Л., Комісарчук В.В., Прохоров П.А., Прохоров Г.В., Добровольський Ю.Г. Вдосконалення функції стискання хеш-функції з застосуванням клітинних автоматів. Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф., м. Чернівці, 10–12 лист. 2023.

- Чернівці: Черн. нац. ун-т, 2023. - С. 82-83. (Внесок авторів: Дячук Р.Л. – програмна модифікація функції стискування, експериментальні дослідження; Комісарчук В.В. – аналіз літератури, підготовка теоретичного обґрунтування; Прохоров П.А., Прохоров Г.В. – методологія, математичне моделювання, валідація; Добровольський Ю.Г. – концептуалізація, узагальнення результатів, редагування).
10. Добровольський Ю.Г., Прохоров Г.В., Янушевський С.В., Прохоров П.А., Дячук Р.Л., Трембач Д. В. Оцінка надійності програмного забезпечення з точки зору його довговічності. Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф., м. Чернівці, 01–03 лист. 2024. Чернівці: Черн. нац. ун-т, С. 36-37. (Внесок авторів: Добровольський Ю.Г. – концептуалізація, методологія оцінювання, редагування; Прохоров Г.В. – математична модель довговічності, аналіз результатів; Янушевський С.В. – статистична обробка даних, валідація; Прохоров П.А. – аналіз показників надійності; Дячук Р.Л. – програмна реалізація моделі, експериментальні дослідження, візуалізація; Трембач Д.В. – збір даних, підготовка матеріалів).
11. Добровольський Ю.Г., Прохоров Г.В., Дячук Р.Л. Генерація послідовності випадкових чисел на основі темного струму фотодіода. Current trends in scientific research development. Proceedings of the 13th International scientific and practical conference. VoScience Publisher. Boston, USA. 2025. P. 65-67. (Внесок авторів: Добровольський Ю.Г. – концептуалізація, постановка задачі, редагування; Прохоров Г.В. – методологія експерименту, аналіз фізичних параметрів; Дячук Р.Л. – програмна обробка сигналу, реалізація генератора, статистичне тестування випадковості, написання рукопису).
12. Prokhorov G.V., Diachuk R.L., Hanzhelo M.G., Yanushevskiy S.V. New approaches to the design of a hybrid random sequence generator. Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in

infocommunication systems: Proceedings of Xth International Scientific-Practical Conference. Chernivtsi : Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2025. P. 134-136. (*Внесок авторів: Prokhorov G.V. – концептуалізація, методологія гібридної моделі; Diachuk R.L. – програмна реалізація генератора, експериментальні дослідження, візуалізація результатів, підготовка початкового варіанту статті; Hanzhelo M.G. – аналіз існуючих підходів, валідація; Yarushevskiy S.V. – рецензування та редагування, наукове керівництво*).