

*Д.О. ОСТАПЕЦЬ, А.О. ОПРЯТНИЙ***АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЕНТРОПІЇ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ НА БАЗІ МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

Розглянуто основні існуючі датчики мобільних пристроїв як джерела ентропії для апаратних генераторів випадкових чисел. Сформульовано вимоги до датчиків, які мають використовуватися як джерела ентропії апаратних генераторів випадкових чисел на базі мобільних пристроїв. Проведено порівняльний аналіз датчиків мобільних пристроїв. Для подальшого використання при розробці апаратних генераторів випадкових чисел вибрано датчики акселерометра, гіроскопа і магнітометра.

1. Вступ

Через велику розповсюдженість мобільних пристроїв (смартфонів, планшетів та інших подібних засобів під керуванням мобільних операційних систем) використання їхніх елементів як джерел ентропії для реалізації генераторів випадкових чисел (ГВЧ) є перспективною задачею. Сучасні мобільні пристрої оснащені широкою номенклатурою датчиків, що можуть бути використані як джерела ентропії. З іншого боку, наявність безпроводних інтерфейсів у вказаних пристроях, дозволить використовувати дані з їхніх датчиків для генерування випадкових чисел, наприклад, на стаціонарному персональному комп'ютері. Такий підхід дозволить знизити вартість генератора, в порівнянні з відомими апаратними рішеннями.

Сучасні інформаційні технології широко використовують випадкові послідовності чисел в різних галузях науки та техніки. За допомогою випадкових чисел реалізується велика кількість задач, таких як тестування алгоритмів і систем, імітаційне моделювання, задачі чисельного аналізу, захисту інформації, криптографії та багато інших. При цьому дуже важливо використовувати якісні ГВЧ, оскільки від цього залежить якість одержуваних результатів.

Розрізняють апаратні ГВЧ (true random number generators – TRNG) та алгоритмічні (програмні, табличні) генератори псевдовипадкових чисел (ГПВЧ, pseudorandom number generators – PRNG) [1]. Багато відомих алгоритмічних ГПВЧ не здатні забезпечити необхідні характеристики випадковості та непередбачуваності генерованих послідовностей чисел. В свою чергу, апаратні ГВЧ мають вищу вартість та, як правило, нижчу швидкодію за рахунок необхідності перетворення аналогової інформації в цифрову. В апаратних ГВЧ важливо використовувати якісне джерело шуму (ентропії) [1]. Джерело ентропії – це фізичне джерело інформації, вихід якого або здається випадковим, або стає таким після застосування певного процесу фільтрації/дистиляції [2].

Як джерело ентропії ГВЧ пропонується використовувати датчики, якими оснащені сучасні мобільні пристрої. Датчики – це пристрої, які використовуються в мобільних пристроях для розпізнавання різних параметрів навколишнього середовища [3]. Серед великої номенклатури наявних датчиків для реалізації ГВЧ можуть бути застосовані ті, що мають достатньо велику чутливість (датчик має видавати «шум» без будь-яких маніпуляцій з мобільним пристроєм). Крім того, кількість даних, отримуваних за одне звернення до датчика, має істотне значення для підвищення швидкості генерування. Таким чином, виникає необхідність проведення порівняльного аналізу датчиків, які можуть бути застосовані як джерела ентропії в апаратних ГВЧ.

2. Аналіз літературних джерел та визначення проблеми дослідження

В сучасних мобільних пристроях доступно достатньо багато вбудованих датчиків, які виконують різні допоміжні функції. В основному такі датчики використовуються для проведення оцінки дій користувача та стану середовища, але, за певних умов, можуть слугувати джерелами ентропії. Наприклад, в [4] зазначено, що ГВЧ, який використовує датчики сучасного мобільного пристрою, здатний створювати високоякісні послідовності випадкових бітів. Разом з тим, датчики, подібні до датчиків мобільних пристроїв, також використовуються в пристроях Інтернету речей (Internet of Things – IoT), безпілотних апаратах (дронах) тощо.

В [5] проаналізовано дані, отримані з датчиків руху та інших різних типів датчиків, які знаходяться на більшості плат, що використовуються для вузлів IoT. Аналіз виконується за трьома сценаріями (нормальний, динамічний і насичення), залежно від специфіки кожного датчика. Для оцінки рівня ентропії, автори використали методологію NIST. Беручи до уваги те, що дані є упередженими, вони використали методологію оцінки, яка використовується для незалежно та однаково розподілених джерел ентропії з використанням чотирьох оцінок (частотний тест, тест на зіткнення, частковий збір і тест на стиснення), ентропію Шеннона та мінімальну ентропію. Значення вихідної ентропії вважалося мінімальним із значень ентропії, отриманих від оцінювачів. У результаті аналізу було виявлено, що ентропія Шеннона та мінімальна ентропія навіть у п'ять разів вищі, ніж отримані іншими оцінювачами. Це може пояснити відмінності в значеннях ентропії, про які повідомляють інші автори. Хоча аналіз ентропії, проведений у цьому дослідженні, найближчий до методології NIST, кілька аспектів можуть впливати на правильність результатів. У цьому дослідженні було використано чотири оцінки порівняно з остаточною версією рекомендацій NIST, де використовуються десять оцінок. Кількість даних, зібраних для кожного експерименту, неоднакова, і це впливає на розрахункові значення ентропії. У деяких випадках з різних причин автори не могли зібрати достатню кількість даних, необхідних для хорошої оцінки ентропії.

Можливість реалізації ГВЧ з використанням даних, отриманих з акселерометра, досліджено в роботі [6]. Крім того, автори представили рішення з використанням RFID-мітки, реалізоване на пристрої з обмеженими ресурсами. Автори продемонстрували, що акселерометр генерує ентропію, навіть тоді, коли він використовується в стаціонарному режимі, і що він стійкий до різноманітних змін навколишнього середовища та агресивних маніпуляцій. Рівень ентропії розраховується для різних типів рухів, рівнів шуму, частот дискретизації, температур і навіть резонансної частоти датчика. Результати дослідження привели до висновку, що найнижчий рівень ентропії досягається, коли датчик знаходиться в стаціонарному стані.

Авторами [7] продемонстровано, що тип вимірювань освітлення навколишнього середовища та сенсорні пристрої є джерелами випадковості, особливо що стосується молодших бітів, витягнутих із виміряних даних. Отримані результати показали, що найбільші значення ентропії мали місце при використанні датчиків температури та світла. Крім того, у випадку, коли датчики були запечатані в чорному ящику, виявлено, що ентропія залежить від електронних пристроїв, за допомогою яких проводяться вимірювання. Експерименти показали високі значення ентропії на малих серіях вимірювань при використанні високоінерційних датчиків, таких як датчики температури та освітлення.

В [8] запропоновано ГВЧ, спеціально розроблений для безпілотних літальних апаратів, із вихідним кодом, отриманим на основі датчика даних, який використовується для польоту, – гіроскопа. Автори використовували лише біти з ентропією як вихідні дані

для алгоритму ГВЧ. Для цього було визначено положення бітів, які генерують ентропію, в залежності від стану дрону: «нерухомий» або «політ». Автори також порівнювали класичні ГВЧ, що використовуються для дронів, із запропонованим рішенням.

Крім того, у [8], розглянуто ГВЧ на основі датчика барометра. Для отримання випадкових чисел також використовуються біти з ентропією.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що відомі спроби використання окремих датчиків мобільних пристроїв для реалізації ГВЧ. При цьому авторами не вирішувалася проблема вибору конкретного типу або декількох типів датчиків з усієї їх множини, застосування яких є найефективнішим.

Як видно з наведених даних, існує проблема вибору датчиків мобільних пристроїв для побудови та реалізації ГВЧ на їх основі.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка рекомендацій з вибору датчиків мобільних пристроїв для використання як джерела ентропії в апаратних ГВЧ на основі порівняльного аналізу їхніх основних характеристик та аналізу якості отриманих випадкових чисел. Результати дослідження можуть бути використані при реалізації засобів генерування випадкових чисел.

Відповідно до мети дослідження, поставлено такі задачі:

- огляд існуючих датчиків мобільних пристроїв;
- формування вимог до датчиків, які мають використовуватися як джерела ентропії ГВЧ;
- проведення порівняльного аналізу характеристик датчиків мобільних пристроїв;
- оцінка якості отриманих випадкових чисел та надання рекомендацій щодо використання датчиків як джерела ентропії ГВЧ.

4. Матеріали і методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес генерування випадкових чисел з використанням датчиків мобільних пристроїв як джерела ентропії.

Головною гіпотезою даного дослідження є те, що різні датчики мобільних пристроїв при використанні їх як джерела ентропії можуть продемонструвати різну ефективність процесу генерування випадкових чисел та якість отриманих випадкових чисел.

Огляд існуючих датчиків проводився для пристроїв під керуванням мобільних операційних систем сімейства Android та iOS, таких як смартфони та планшети.

Основні датчики мобільних пристроїв, які можна використати для генерації випадкових чисел, наведено на рис. 1.

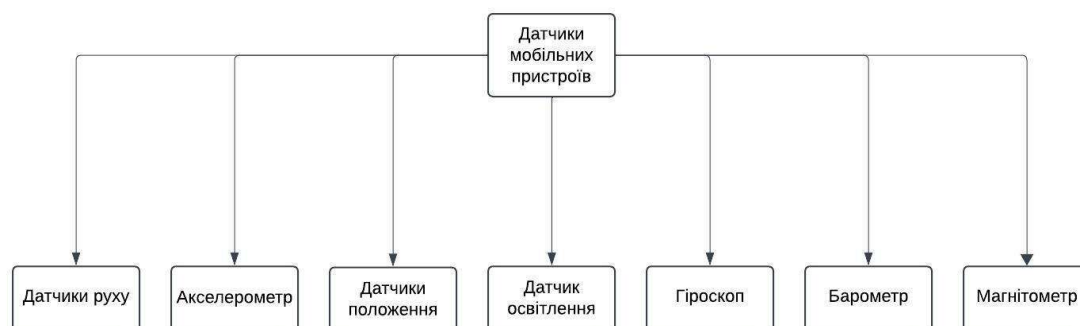


Рис. 1. Основні датчики, доступні у мобільних пристроях

Датчики руху – це датчики які використовуються для моніторингу руху пристрою. Дані рухи можуть бути такими: нахил, струс, обертання або коливання [9]. Смартфони

ідентифікують свою орієнтацію за допомогою акселерометра. Датчики руху, присутні в акселерометрі, можуть використовуватися для виявлення землетрусів або в медичних пристроях.

Акселерометр – це прилад, що вимірює силу реакції, яка індукована прискоренням або гравітацією [9]. У мобільних пристроях акселерометри здебільшого використовуються для керування орієнтацією зображення на екрані (книжковою чи альбомною). Ще одним способом застосування акселерометра може бути виконання мобільним пристроєм деяких функцій при зміні орієнтації у просторі (струшування, удар, поворот дисплею та деякі інші).

Мобільний пристрій, як правило, має два датчики, що дозволяють визначати його фізичне положення, – датчик магнітометра, комбінований з датчиком акселерометра [10].

Виробники мобільних пристроїв зазвичай використовують датчик положення, щоб з'ясувати, коли пристрій тримається близько до обличчя користувача, наприклад, під час розмови. Ці датчики корисні для визначення фізичного положення пристрою. Наприклад, можна використовувати геомагнітний датчик в поєднанні з акселерометром для визначення положення пристрою відносно північного магнітного полюса [11].

Датчик освітлення – це датчик, який регулює рівень яскравості екрана [12]. Він доступний як в дешевих, так і в дорогих мобільних пристроях. Якщо перевести пристрій у режим автоматичної яскравості, то яскравість екрана автоматично підвищуватиметься пропорційно збільшенню яскравості світла, що падає на екран пристрою. Коли ж пристрій залишиться в темряві, яскравість екрану буде мінімальною, тобто в залежності від інтенсивності світла, цей датчик керує яскравістю екрану.

Датчик гіроскопа відповідає за вимірювання швидкості обертання навколо вісі пристрою [9]. Однією з найкращих реалізацій гіроскопа є можливість плавного обертання та виконання кількох команд в іграх за допомогою 3D-рухів.

Датчик барометра використовується для визначення тиску навколишнього середовища [12]. Наприклад, програма здоров'я на смартфонах також використовує ці датчики. При підйомі сходами або переході відносно землі з одного рівня на інший кожна зміна положення точно визначається датчиком барометра, а дані надсилаються на GPS.

Магнітометр – це датчик, який вимірює магнітне поле [10]. Існує два типи магнітометрів: стаціонарні, які використовуються для вимірювання у фіксованих точках, і мобільні, які використовуються в програмах, де потрібне виявлення руху. Беручи до уваги цей аспект, можна зрозуміти, чому датчики з достатньо високою чутливістю можуть генерувати ентропію.

Для проведення експериментів розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє отримувати дані з датчиків мобільного пристрою та передавати їх на комп'ютер, на якому, в свою чергу, на їх основі формуються послідовності випадкових чисел. Розроблене програмне забезпечення використовувалося на комп'ютері MacBook Pro M3 та смартфоні iPhone 14. Використаний програмно-технічний комплекс має клієнт-серверну архітектуру. Обмін між елементами комплексу здійснюється мережею WiFi за протоколом TCP. Крім того, розроблено протокол обміну між клієнтською і серверною частинами, який передбачає запит на встановлення режиму генерації і запит на генерацію випадкового числа, а також можливі відповіді на вказані запити. Результати генерування послідовностей випадкових чисел в різних режимах зберігаються в файли для подальшого аналізу.

5. Результати дослідження

Під час проведення порівняльного аналізу було висунуто припущення, за яким датчики, що вимірюють характеристики навколишнього середовища з використанням

властивостей мобільності та знання про місце перебування (магнітне поле наближення, географічні координати тощо), є найкращими для застосування як джерела ентропії в ГВЧ.

При виборі джерела ентропії для розробки ГВЧ на базі мобільного пристрою, на думку авторів, потрібно врахувати такі вимоги:

- чутливість датчика;
- наявність датчика у більшості мобільних пристроїв;
- швидкість оцифровування даних;
- кількість отриманих бітів за одне вимірювання.

Порівняння характеристик основних датчиків мобільних пристроїв як джерел ентропії наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння датчиків мобільних пристроїв як джерел ентропії

Назва датчика	Тип отримуваної інформації	Кількість бітів на одне вимірювання	Доступність в пристроях	Відносна чутливість датчика
Акселерометр	Прискорення в трьох координатах (x, y, z)	16-32 для кожної координати	+	Висока
Датчик освітлення	Інтенсивність освітлення (люкс)	8-16	+	Середня
Гіроскоп	Кутові швидкості в трьох координатах (x, y, z)	16-32 для кожної координати	+	Висока
Барометр	Атмосферний тиск (бар)	16-32	Не в усіх пристроях	Низька
Магнітометр	Магнітне поле в трьох координатах (x, y, z)	16-32 для кожної координати	+	Середня

Акселерометр, гіроскоп та магнітометр наявні майже у всіх сучасних мобільних пристроях, є досить чутливими, а також дають можливість отримання найбільшої кількості бітів тому, що фіксують зміни у трьох координатах. Разом з тим, датчик освітлення та барометр фіксують лише одне значення. Тому саме датчики акселерометра, гіроскопа та магнітометра було обрано як джерела ентропії для ГВЧ.

За допомогою акселерометра, гіроскопа та магнітометра можна вимірювати значення у трьох координатах (x, y, z). Таким чином, для генерації послідовностей бітів авторами були розглянуті можливості використання таких операцій над молодшими бітами величин x, y, z: конкатенація, сумування, додавання за модулем 2 (XOR). Для кожної з вказаних операцій використано 1, 2, 4, 8, 16 та 32 біти. Мобільний пристрій перебував в нерухомому стані.

В результаті аналізу якості отриманих послідовностей для реалізації ГВЧ запропоновано використовувати операцію XOR 4 молодших бітів для акселерометра, операції XOR 16 молодших бітів для гіроскопа та операції XOR 8 молодших бітів для магнітометра.

Для перевірки якості ГВЧ з використанням вибраних датчиків, згенеровано 2000 чисел по модулю 1024 в таких режимах:

- Режим 1. Генерація випадкових чисел за допомогою акселерометра;
- Режим 2. Генерація випадкових чисел за допомогою гіроскопа;
- Режим 3. Генерація випадкових чисел за допомогою магнітометра;

- Режим 4. Генерація псевдовипадкових чисел за алгоритмом BBS із випадковим зерном, згенерованим за допомогою акселерометра;
- Режим 5. Генерація псевдовипадкових чисел за алгоритмом BBS із випадковим зерном, згенерованим за допомогою гіроскопа;
- Режим 6. Генерація псевдовипадкових чисел за алгоритмом BBS із випадковим зерном, згенерованим за допомогою магнітометра.

Вказані послідовності чисел перевірялися за допомогою кейсу тестів NIST [2] (див. табл. 2). Тестування проводилося з застосуванням 10 тестів з 15 можливих. Через невідповідність вимогам тестів щодо довжини не застосовувалися тести Overlapping Template Matching Test, Maurer's «Universal Statistical» Test, Linear Complexity Test, Random Excursions Test, Random Excursions Variant Test (позначені в табл. 2 сірим кольором). Номери режимів в табл. 2 відповідають вказаним вище; символ «+» в комірці таблиці відповідає проходженню тесту.

Таблиця 2

Результати тестування згенерованих послідовностей чисел

Назва тесту	Номер режиму генерування					
	1	2	3	4	5	6
Frequency (Monobit) Test	+	+	+	+	+	+
Frequency Test within a Block	+	+	+	+	+	+
Runs Test	+	+	+	+	+	+
Test for the Longest Run of Ones in a Block	+	+	+	+	+	+
Binary Matrix Rank Test	+	+	+	+	+	+
Discrete Fourier Transform (Spectral) Test	+	+	+	+	+	+
Non-overlapping Template Matching Test	+	+	+	+	+	+
Overlapping Template Matching Test						
Maurer's «Universal Statistical» Test						
Linear Complexity Test						
Serial Test	+	+	+	+	+	+
Approximate Entropy Test	+	+	+	+	+	+
Cumulative Sums (Cusum) Test	+	+	+	+	+	+
Random Excursions Test						
Random Excursions Variant Test						

Результати тестування (табл. 2) показали, що послідовності чисел, згенеровані в усіх шести вказаних режимах, мають ознаки випадковості (оскільки всі тести в усіх випадках пройдені).

6. Обговорення результатів дослідження

Проведене дослідження показало, що отримані послідовності чисел в усіх запропонованих режимах відповідають вимогам до випадкових послідовностей, відповідно до [2].

При цьому генерація псевдовипадкових чисел за алгоритмом BBS із випадковим зерном (режими 4-6) відбувається, принаймні, на три порядки швидше, ніж в інших режимах. Серед режимів з безпосереднім використанням датчиків (режими 1-3) найбільша швидкість генерування спостерігається в режимі генерування за допомогою гіроскопа (режим 2). Це пов'язано з тим, що в цьому режимі використовується порівняно більша кількість молодших бітів – 16, тобто за одну операцію можна отримати одразу 16 бітів випадкового числа.

Таким чином, в додатках, критичних до швидкості, рекомендується використовувати режими генерації псевдовипадкових чисел за алгоритмом BBS із випадковим зерном, згенерованим за допомогою акселерометра, гіроскопа або магнітометра. В разі необхідності застосовувати саме випадкові числа, рекомендується використовувати режим генерації за допомогою гіроскопа, як описано вище.

Надані рекомендації дозволяють значно скоротити час генерування випадкових чисел в порівнянні з описаними в доступних джерелах.

Як обмеження результатів можна зазначити те, що тестування отриманих послідовностей чисел проводилося з використанням не всіх можливих тестів з кейсу NIST [2] через вимоги до їхньої довжини.

Виходячи з цього, в подальшій перспективі потрібно провести дослідження якості отриманих на ГВЧ з використанням датчиків мобільних пристроїв послідовностей різної довжини, які задовольняють вимогам всіх зазначених вище тестів.

7. Висновки

В результаті дослідження сформовано рекомендації щодо вибору датчиків мобільних пристроїв для використання як джерела ентропії в апаратних ГВЧ на основі порівняльного аналізу їхніх основних характеристик та аналізу якості отриманих випадкових чисел.

Проведено огляд існуючих датчиків мобільних пристроїв, що можуть використовуватися як джерела ентропії (зокрема, датчик акселерометра, датчик положення, датчик освітлення, датчик гіроскопа, датчик барометра, датчик магнітометра).

Сформовано основні вимоги до датчиків, які мають використовуватися як джерела ентропії ГВЧ, серед яких чутливість датчика, наявність датчика у більшості мобільних пристроїв, кількість отриманих бітів за одне вимірювання.

Проведено порівняльний аналіз характеристик датчиків мобільних пристроїв, за результатами якого обрано датчики акселерометра, гіроскопа і магнітометра для подальшого використання як джерела ентропії в апаратному ГВЧ.

Виконано оцінку якості отриманих випадкових чисел з використанням датчиків мобільних пристроїв. Надано рекомендації щодо режимів використання вказаних датчиків як джерел ентропії ГВЧ.

Перелік посилань:

1. Ostapets D., Dziuba V., Ivin P. (2024). Hardware random numbers generator based on microcontroller, MATEC Web of Conferences 390, 04002. doi: 10.1051/mateconf/202439004002
2. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-22r1a.pdf>.
3. Sensors Overview. URL: https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/sensors_overview.
4. Introduction to Randomness and Random Numbers. URL: <https://www.random.org/randomness/>.
5. Hennebert C., Hossayni H., Lauradoux C. (2013). Entropy harvesting from physical sensors, Sixth ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, 149–154. doi:10.1145/2462096.2462122
6. Voris J., Saxena N., Halevi T. (2011). Accelerometers and Randomness: Perfect Together, Fourth ACM Conference on Wireless Network Security, 115–126. doi: 10.1145/1998412.1998433
7. Pawlowski M. P., Jara A., Ogorzalek M., Jara A. J. (2015). Harvesting Entropy for Random Number Generation for Internet of Things Constrained Devices Using On-Board Sensors. doi: 10.3390/s151026838
8. Cho S.M., Hong E., Seo S.H. (2020). Random Number Generator Using Sensors for Drone. IEEE Access. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972958
9. Motion sensors. Android Developers. URL: https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/sensors_motion.
10. Position sensors. Android Developers. URL: https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/sensors_position.

11. Suci A., Lebu D., Marton K. (2011). Unpredictable Random Number Generator Based on Mobile Sensors. IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing. doi: 10.1109/ICCP.2011.6047913

12. Environment sensors. Android Developers. URL: https://developer.android.com/develop/sensors-and-location/sensors/sensors_environment.

Надійшла до редколегії 26.05.2025 р.

Остапєць Дєнис Олєксандрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ЕОМ УДУНТ, м. Дніпро, Україна, e-mail: oda.ua@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1778-7770> (науковий керівник здобувача вищої освіти Опрятного А.О.)

Опрятний Артур Олєксандрович, здобувач вищої освіти кафедри ЕОМ УДУНТ, м. Дніпро, Україна, e-mail: artur.opriatnyi@icloud.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7145-9677>

УДК 519.21:004.021

DOI: 10.30837/0135-1710.2025.185.070

В.В. КРАСНИКОВ, П.Е. СИТНИКОВА

АЛГОРИТМ ЗАВОЮВАННЯ ДЛЯ СТОХАСТИЧНОГО ЗАПОВНЕННЯ ДВОВИМІРНИХ ДИСКРЕТНИХ РЕШТОК ЗВ'ЯЗАНИМИ ОБЛАСТЯМИ

Запропоновано алгоритм завоювання, який дає змогу швидко заповнювати двовимірні поля неперетинними зв'язними областями заданих площ. Це робить можливим ефективну процедурну генерацію наборів даних. Роботу алгоритму продемонстровано на прикладі створення ігрового поля для модифікованої версії класичної задачі N-Queens. У підсумку набір даних генерується повністю процедурно, а ймовірність отримати дві ідентичні генерації прямує до нуля. Це відкриває можливість використовувати запропонований алгоритм у складніших системах, зокрема, для створення синтетичних зображень, ігрових рівнів або тестових вибірок.

Доведено ефективність розробленого алгоритму.

1. Вступ

При вирішенні багатьох сучасних прикладних задачах виникає потреба у процедурному заповненні двовимірних полів (матриць, решіток) зв'язними блоками різного розміру. Як очікувані результати таких задач можуть розглядатися тестові набори даних, процедурно згенеровані ігрові рівні, синтетичні набори для аугментації моделей машинного навчання, біомедичні мікроматриці тощо. Заповнення полів – це структурування простору, що створює універсальний інструмент для різних типів задач. В геоінформатиці й картографії це може бути генерація зон для карт – полігонів, кластерів, типів місцевості, при обробці зображень – сегментація зображень на зв'язні області. Задача має практичне або теоретичне застосування для багатьох галузей.

Для задоволення зазначених потреб зазвичай використовують алгоритми процедурної генерації та стохастичного моделювання, що поєднують різні підходи до отримання максимально різноманітних випадкових розподілів. Ці алгоритми відрізняються способом представлення даних і такими характеристиками, як трудомісткість та час виконання. Попри схожий напрям, кожен алгоритм формує власний тип результату, а вибір конкретного алгоритму залежить від вимог користувача й обмежень задачі.

Проблема вибору алгоритму процедурної генерації поля із заданими характеристиками є нетривіальною, оскільки жоден із наявних підходів не забезпечує гарантованої відповідності до цільових параметрів, таких як кількість зв'язаних блоків, їхні форми та просторове розташування. Це, у свою чергу, обумовлює потребу у додаткових дослідженнях, спрямованих на аналіз обмежень існуючих алгоритмів, розробку критеріїв порівняння та створення нових методів генерації, які б забезпечували