

**ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ**  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
**КАФЕДРА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ І ТЕХНОЛОГІЙ**  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи  
**магістра**  
(освітній рівень)

на тему: «Моделювання та дослідження еволюції цифрових дерев у клітинних автоматах із динамічними правилами»

Виконав: студент 6 курсу, групи 6ПР1  
спеціальності  
121 - «Інженерія програмного забезпечення»  
(шифр і назва спеціальності)

Ніконов Владислав Вадимович  
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., професор Жарікова М.В.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Херсонський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет, відділення	Інформаційних технологій та дизайну
Кафедра	Програмних засобів і технологій
Освітній рівень	магістр
Спеціальність	121 – Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

Програмних засобів і технологій

к.т.н. доцент Огнева О.Є.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ніконову Владиславу Вадимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи «Моделювання та дослідження еволюції цифрових дерев у клітинних автоматах із динамічними правилами»

керівник роботи д.т.н., професор Жарікова М.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від 15 вересня 2025 р. №416-с

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025

3. Вихідні дані до роботи аналіз, проектування та реалізація розроблювального продукту

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Огляд теоретичних основ; постановка задачі та вимог; формалізація моделі; проектування архітектури та алгоритмів; експериментальні результати; інструкція користувача; результати та висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним значенням обов'язкових креслень)

Подано 28 рисунків

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв



7. Дата видачі завдання 15.09.2025

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітки
1	Одержання теми роботи	15.09.2025	Виконано
2	Підбір літератури та інших матеріалів	16.09.2025 - 22.09.2025	Виконано
3	Аналіз предметної області, постановка задачі	23.09.2025 - 30.09.2025	Виконано
4	Формалізація моделі	01.10.2025 - 07.10.2025	Виконано
5	Проектування архітектури симуляції та алгоритмів кроку	08.10.2025 - 15.10.2025	Виконано
6	Реалізація базового ядра симуляції	16.10.2025 - 27.10.2025	Виконано
7	Візуалізація та режим взаємодії користувача	28.10.2025 - 03.11.2025	Виконано
8	Підготовка інструкції користувача та ілюстрацій	04.11.2025 - 07.11.2025	Виконано
9	Тестування та виправлення помилок	08.11.2025 - 18.11.2025	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	19.11.2025 - 27.11.2025	Виконано
11	Захист кваліфікаційної роботи		Виконано

Студент

\_\_\_\_\_ )  
(підпис)

Ніконов В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ )  
(підпис)

Жарікова М.В.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить 79 сторінки, 5 розділів, 1 додаток, 32 зображення, 17 джерел.

Мета роботи – створення дискретної моделі еволюції цифрових дерев у клітинному автоматі без явної функції пристосованості.

Об'єкт дослідження – ріст і еволюція деревоподібних структур у клітинному автоматі.

Предмет дослідження – локальні правила, енергетична схема, мутації та відбір і їх вплив на морфологію.

Метод проектування – формалізація та обчислювальне моделювання (порівняння з L-системами, Eden/DLA).

Результат роботи – специфікація моделі, опис алгоритмів і сценаріїв, аналіз експериментальних даних, інструкція користувача.

Ключові слова – клітинні автомати, цифрові дерева, еволюція, геном енергетична модель мутації L-системи Eden, DLA.

## АНОТАЦІЯ

Робота присвячена моделюванню еволюції цифрових дерев у клітинних автоматах із динамічними правилами та ресурсними обмеженнями без явної функції пристосованості. Сформульовано мету й підхід до аналізу зв'язку між локальними правилами та глобальною морфологією деревоподібних структур.

Перший розділ подає теоретичні засади: ідею еволюції в дискретних моделях, поняття та класи клітинних автоматів, місце цифрових дерев, а також порівняння з альтернативами (L-системи, моделі Eden/DLA).

Другий розділ формує специфікацію моделі: ґратка та межі, подання геному  $16 \times 4$  як локальних переходів, енергетична схема «світло-витрати», життєвий цикл клітин і особин, умови мутацій та відбору, сценарії ініціалізації й перезапуску, критерії спостереження та фіксації зразків (історія, обрані).

Третій розділ описує архітектурну організацію симулятора: компоненти, їх взаємодію та потоки даних для обчислення, візуалізації, керування перебігом і збереження результатів. Четвертий розділ містить інструкцію користувача: запуск, керування, індикатори інтерфейсу, роботу зі списками та форматами файлів.

Четвертий розділ містить експериментальне дослідження: опис набору історії та методики відбору домінанта, аналіз часових рядів маси/енергії/віку з ковзними середніми та розсіюванням, порівняння фенотипів за етапами еволюції

П'ятий розділ містить інструкцію користувача: порядок запуску, позначки інтерфейсу, засоби керування, режим вибору й попереднього перегляду, роботу зі списками «Історія» та «Обрані» та формати збереження даних.

## ABSTRACT

The work is devoted to modelling the evolution of digital trees in cellular automata with dynamic rules and resource constraints, without an explicit fitness function. The goal and the approach to analyzing the relationship between local rules and the global morphology of tree-like structures are formulated.

The first chapter presents the theoretical foundations: the idea of evolution in discrete models, the concepts and classes of cellular automata, the place of digital trees among them, as well as a comparison with alternative formalisms (L-systems, Eden/DLA models).

The second chapter defines the model specification: the lattice and boundary conditions, the representation of a  $16 \times 4$  genome as local transition rules, a “light–cost” energy scheme, the life cycle of cells and individuals, the conditions for mutation and selection, initialization and restart scenarios, and the criteria for observation and recording of samples (History, Favorites).

The third chapter describes the architectural organization of the simulator: its components, their interactions and data flows for computation, visualization, run-time control, and result storage. The fourth chapter contains the user manual: startup procedure, controls, interface indicators, working with lists and file formats.

The fourth chapter reports the experimental study conducted with the simulator. It describes how the history dataset is collected and how the dominant individual is selected for analysis, then examines the dynamics of key metrics (mass, energy, and age) using time-series plots with moving averages and dispersion measures. Finally, it compares representative phenotypes across successive evolutionary stages to highlight how changes in local transition rules manifest as distinct global tree morphologies.

The fifth chapter contains the user manual: the order of startup, interface labels, control tools, selection and preview mode, working with the “History” and “Favorites” lists, and data saving formats.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	12
Вступ.....	13
Розділ 1. Теоретичні основи клітинних автоматів та цифрових дерев.....	16
1.1. Ідея еволюції в обчислювальних моделях.....	16
1.2. Клітинні автомати.....	18
1.3. Види клітинних автоматів.....	20
1.3.1. За вимірністю.....	20
1.3.2. За типом оновлення.....	22
1.3.3. За детермінованістю.....	22
1.3.4. За однорідністю правил.....	23
1.3.5. За локальною схемою.....	24
1.4. Цифрові дерева як різновид моделей на ґратці.....	24
1.5. Альтернативні підходи.....	25
1.5.1. L-системи (граматики росту).....	25
1.5.2. Модель Eden.....	27
1.5.3. DLA (дифузійно обмежена агрегація).....	28
1.6. Висновки до розділу.....	29
Розділ 2. Постановка задачі та формальна модель.....	30
2.1. Простір і стани.....	30
2.1.1. Дискретна ґратка та час.....	30
2.1.2. Функціональні вимоги.....	30

2.1.3. Нефункціональні вимоги.....	31
2.1.4. Службові атрибути та доступність клітин.....	32
2.2. Геном 16 на 4 і локальне правило.....	32
2.2.1. Подання геному.....	32
2.2.2. Інтерпретація активного гена.....	33
2.2.3. Алгоритм кроку для бруньки.....	33
2.2.4. Розв'язання колізій.....	34
2.2.5. Семантика «порожніх» кодів 16...31.....	34
2.3. Ресурсна екологія та життєвий цикл.....	36
2.3.1. Поле «освітленості» та пропускання шарів.....	36
2.3.2. Накопичення енергії та витрати.....	36
2.3.3. Вік і завершення життєвого циклу.....	38
2.3.4. Розмноження насінням та стартова енергія.....	38
2.4. Ініціалізація, стохастика та відтворюваність.....	38
2.4.1. Початкові умови.....	38
2.4.2. Джерела випадковості.....	39
2.4.3. Керування генератором випадкових чисел.....	39
2.4.4. Протокол відтворюваності серій.....	40
2.5. Висновки до розділу.....	40
Розділ 3. Проектування системи моделювання еволюції цифрових дерев.....	42
3.1. Вимоги та середовище виконання.....	42
3.1.1. Функціональні вимоги.....	42
3.1.2. Якісні вимоги.....	43

3.1.3. Обмеження середовища.....	43
3.2. Структура проекту.....	44
3.2.1. Основні компоненти.....	44
3.2.2. Взаємодія компонентів.....	45
3.2.3. Потоки даних.....	46
3.3. Подання даних.....	46
3.3.1. Модель поля та індексація.....	46
3.3.2. Структура клітини.....	47
3.3.3. Модель особини.....	48
3.3.4. Параметри моделі.....	48
3.4. Алгоритми еволюції.....	49
3.4.1. Послідовність кроку.....	49
3.4.2. Розподіл ресурсів.....	50
3.4.3. Ріст і розгалуження.....	51
3.4.4. Обробка меж і конфліктів.....	52
3.4.5. Витрати та старіння.....	53
3.4.6. Розмноження і мутації.....	53
3.5. Ініціалізація та сценарії запусків.....	54
3.5.1. Початкові умови.....	54
3.5.2. Формування покоління.....	54
3.5.3. Перезапуск моделі.....	55
3.6. Інтерфейс і візуалізація.....	56
3.6.1. Відображення ґратки.....	56

3.6.2. Керування перебігом симуляції.....	57
3.6.3. Режим вибору та перегляд зразків.....	58
3.6.4. Відображення генома.....	58
3.7. Збереження та історія.....	59
3.7.1. Формати збереження результатів.....	59
3.7.2. Критерії відбору для історії.....	59
3.7.3. Операції збереження і завантаження.....	59
3.8. Висновки до розділу.....	60
Розділ 4. Експериментальне дослідження та аналіз еволюційної динаміки.....	61
4.1. Дані та умови.....	61
4.1.1. Параметри середовища.....	61
4.1.2. Набір даних.....	61
4.1.3. Метрики.....	62
4.1.4. Процедура аналізу.....	62
4.2. Описові результати.....	62
4.2.1. Загальна динаміка.....	62
4.2.2. Кількісні індикатори.....	65
4.2.3. Геномні патерни.....	65
4.2.4. Морфологічні спостереження.....	66
4.3. Інтерпретація та обговорення.....	66
4.4. Висновки до розділу.....	67
Розділ 5. Програмна реалізація моделі клітинного автомата для цифрових дерев	69
5.1. Інструкція для користувача.....	69

5.1.1. Запуск.....	69
5.1.2. Елементи екрана.....	69
5.1.3. Керування.....	71
5.1.4. Історія та обрані.....	73
5.1.5. Перезапуск популяції.....	74
5.1.6. Репродукованість.....	74
5.1.7. Файли збереження.....	74
5.2. Висновки до розділу.....	74
Висновок.....	76
Список використаних джерел.....	78
Додаток А.....	80

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КА (клітинні автомати) - дискретна модель із простором у вигляді ґратки клітин, де стани оновлюються за локальним правилом і використовуються для опису еволюції цифрових дерев.

L-системи (Lindenmayer-системи, граматики росту) - формальний апарат переписування рядків, що моделює ріст деревоподібних структур через послідовне застосування продукцій.

DLA (Diffusion-Limited Aggregation, дифузійно обмежена агрегація) - стохастична модель, у якій дифундуючі частинки прилипають до кластера, формуючи розгалужені дендритні структури.

2D (двовимірний) - позначення режиму відображення поля моделі у двовимірному графічному вікні симулятора.

ОС (операційна система) - системне програмне забезпечення (настільні операційні системи), у середовищі якого запускається симулятор цифрових дерев.

JSON (JavaScript Object Notation) - текстовий формат структурованого подання даних, який використовується для збереження службових файлів симуляції (наприклад, списків обраних зразків).

seed (seed генератора випадкових чисел) - початкове «зерно» генератора випадкових чисел, яке фіксується для забезпечення відтворюваності серій експериментів.

## ВСТУП

Швидке зростання можливостей комп'ютерного моделювання зробило дискретні симуляції зручним інструментом для вивчення самоорганізації та еволюційних процесів. У межах таких підходів клітинні автомати дають спосіб описувати складну поведінку через прості локальні правила й взаємодію із середовищем. Відомі методи мають обмеження: граматики росту (L-системи) здебільшого детерміновані та орієнтовані на синтез форми, тоді як стохастичні моделі на кшталт Eden/DLA відтворюють випадкове наростання з меншим урахуванням відбору та енергетичного балансу. Потреба полягає в аналізі підходу, де відбір виникає без явної функції пристосованості – як наслідок локальних правил, ресурсних обмежень і мутацій у «геномі». Такий підхід дозволяє простежити зв'язки між локальними переходами, глобальною морфологією та стійкістю популяцій на прикладі цифрових дерев у клітинних автоматах із динамічними правилами.

### **Актуальність теми**

Потрібна дискретна модель, де відбір виникає з локальних правил і ресурсних обмежень без явної функції пристосованості; L-системи та Eden/DLA охоплюють лише частини цієї задачі.

### **Об'єкт дослідження.**

Процес росту та еволюції цифрових дерев у клітинному автоматі.

### **Предмет дослідження.**

Локальні правила (геном  $16 \times 4$ ), енергетична схема, мутації й відбір та їх вплив на форму й життєздатність цифрових дерев.

### **Методи дослідження.**

Формалізація моделі; порівняльний огляд L-систем і Eden/DLA; комп'ютерне моделювання.

### **Мета і задачі дослідження.**

Сформуувати цілісну дискретну модель еволюції цифрових дерев у клітинному автоматі з динамічними правилами та ресурсними обмеженнями, у якій природний добір виникає без явної функції пристосованості.

### **До задач дослідження відноситься:**

1. Узагальнити підходи до моделювання росту (клітинні автомати, L-системи, Eden/DLA) та визначити вимоги до моделі;
2. Формалізувати структуру даних: ґратка, геном, стани клітин і життєвий цикл особини;
3. Описати алгоритми кроку: розподіл ресурсів, ріст і розгалуження, обробка меж і конфліктів, старіння, розмноження та мутації;
4. Визначити параметри середовища та сценарії запусків, умови ініціалізації й перезапуску;
5. Задати показники оцінювання морфології та життєздатності популяції і правила фіксації результатів (історія, добірки).

### **Основне завдання.**

Побудувати й описати узгоджену модель еволюції цифрових дерев у клітинному автоматі з динамічними правилами та ресурсною конкуренцією без явної фітнес-функції.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Узагальнено підхід до еволюції в клітинних автоматах без явної функції пристосованості; структуровано мінімальну специфікацію моделі (локальні правила, ресурсні обмеження, відбір, мутації) як цілісну схему; запропоновано процедуру фіксації та порівняння морфологій у часі.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Схема моделювання може слугувати навчальним стендом для демонстрації еволюційних процесів без явної функції пристосованості, а також джерелом даних для морфометричного аналізу та добору геномів у задачах процедурної генерації деревоподібних форм.