


**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**  
Факультет комп'ютерних наук та кібернетики  
Кафедра системного аналізу та теорії прийняття рішень

**Кваліфікаційна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
за спеціальністю 124 Системний аналіз  
на тему:  
СИМУЛЯЦІЯ ПОШИРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНОЇ  
ДИФУЗІЄЮ АГРЕГАЦІЇ**

Виконав студент 4-го курсу  
Стародумов Сергій Олександрович


  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник:  
професор, доктор фіз.-мат. наук  
Івохін Євген Вікторович

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Роботу розглянуто й допущено до захисту  
на засіданні кафедри системного аналізу  
та теорії прийняття рішень  
« 07 » \_\_\_\_\_ 06 \_\_\_\_\_ 2022 р.,  
протокол № 10

Завідувач кафедри  
проф. докт. ф.-м н.  
О.Г. Наконечний

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2022

## Зміст

Зміст.....	2
Вступ.....	3
Розділ 1. Поняття обмеженої дифузіїю агрегації. ....	6
1.1 Агрегація обмежена дифузіїю ..... 6	6
1.2 Моделювання DLA ..... 6	6
1.3 DLA в 3D просторі ..... 7	7
1.4 Поверхня DLA ..... 8	8
1.5 Клітинне подання дифузійного процесу..... 10	10
1.6 Найпростіший алгоритм моделювання DLA..... 12	12
Розділ 2. Комп'ютерні мережі та DLA.....	17
2.1 Моделювання росту локальної комп'ютерної мережі. .... 17	17
2.2 Моделювання децентралізованої системи обміну інформації. .... 20	20
2.3 Створення децентралізованої системи обміну інформацією на основі DLA. .... 21	21
2.4 Адресація у мережах створених за основі DLA..... 23	23
2.5 Маршрутизація у мережах створених за основі DLA. .... 23	23
2.6 Мережі на основі DLA у сьогоденні. .... 25	25
Висновки .....	26
Джерела .....	27
Додатки.....	28

## Вступ

На сьогоднішній день, ступінь впливу інформації на сучасний світ не можливо недооцінювати. Можливо по різному трактувати поняття «інформації». Серед найбільш актуальних використовуються визначення типу «інформація – це наявні відомості», «інформація – це інструкція» та «інформація – це оператор». Розмаїття визначень означає, що загальноприйнятого поняття немає, а сутність поняття залежить від специфіки галузі дослідження.

Інформаційні потоки є процесами, що генерують інформацію, яка розрахована на конкретного споживача, має, як правило, чітко задану предметну чи цільову спрямованість, що визначається сферою інтересів людини. При цьому ступінь сприйняття (впливу) інформації формується на основі рівнів запам'ятовування конкретно обраного варіанта кількох можливих та рівноправних.

При цьому слід зазначити, що в інформаційних процесах часто підкреслюється наявність хаотичного шару. Він утворюється, коли у процесі, що у певному упорядкованому режимі, виникає хаотичний режим, який потім знову змінюється упорядкованим режимом, але відмінним від вихідного і містить більше інформації. Наявність перемішуючого шару — необхідна умова розвитку інформаційного впливу, тому має місце у всіх процесах виникнення цінної інформації.

З іншого боку, кількість інформації, що отримується, істотно перевищує наші споживчі можливості. Різні варіанти ідей та думок повинні конкурувати за обмежену увагу споживача, враховуючи складні зміни у споживчому середовищі. І, як наслідок, особливий інтерес набувають методи, що досліджують і використовують моделі динаміки для опису процесів розповсюдження інформації.

В цій роботі ми зупинимось на розповсюдженні інформації в хаотичних системах та способах поширення інформації у них.

**Актуальність роботи та підстави для її виконання:** методи розповсюдження інформації у сучасному світі потребують все більше ресурсів зі зростанням всесвітнього трафіку. А як наслідок, виникає попит на нові методи швидкого поширення інформації.

**Мета й завдання роботи:** запропонувати модель поширення інформації за допомогою обмеженою дифузиею агрегації. Визначити основні теоретичні принципи роботи даної моделі.

**Відповідно для досягнення цієї мети поставлені задачі:**

- Сформулювати принципи побудови систем за допомогою обмеженої дифузиею агрегації
- Запропонувати підхід передачі інформації в таких системах

**Можливі сфери застосування:**

- Комп'ютерні мережі

## **Розділ 1. Поняття обмеженої дифузії агрегації.**

### **1.1 Агрегація обмежена дифузіїєю**

Агрегація, обмежена дифузіїєю (DLA), вперше описана Томасом Уїттеном і Леонардом Сендером в їхній видатній статті 1981 Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon [1] - це процес злипання частинок матерії (агрегації) при їх хаотичному русі (дифузії) що обмежує силу. Згодом такі частинки злипаються, утворюючи характерні фрактальні структури, що в'ються, які називають броунівськими деревами.

Для ілюстрації процесу уявіть, що у вас є кілька тенісних м'ячів, покритих особливим чарівним клеєм, який приклеюється тільки до себе, тобто ці м'ячі міцно з'єднуються один з одним, але не прикріплюються до підлоги, стін або інших об'єктів. Покладемо один м'яч на підлогу невеликої кімнати і почнемо випадково вкидати туди інші тенісні м'ячі, не цілячись кудись конкретно.

Рано чи пізно деякі з цих м'ячів зіштовхнуться або з першим м'ячем, або з іншими вкинутими м'ячами та почнуть утворювати міцні кластери. При вкиданні додаткових м'ячів ці кластери зростають і створюють складні кушові структури.

Тепер уявіть, що ми повторимо цей експеримент у набагато більшій будівлі, наприклад, на заводському складі, і розкидаємо багато тисяч липких тенісних м'ячів. З часом ми побачимо, як набувають форми великі кластери м'ячів, схожі на показані фотографії (додаток 1) (додаток 2).

### **1.2 Моделювання DLA**

Комп'ютерне моделювання DLA є одним з основних засобів вивчення цієї моделі. Для цього існує кілька методів. Моделювання можна проводити на

решітці будь-якої бажаної геометрії з розміром вбудовування (це було зроблено до 8 вимірів) [2] або моделювання може бути зроблено більше за зразком стандартного моделювання молекулярної динаміки.

Найпоширеніший спосіб моделювання — почати з білого зображення, за винятком одного чорного пікселя в центрі. Нові точки вводяться на кордонах і випадковим чином (наближення броунівського руху) рухаються, поки вони не наближаться достатньо близько, щоб приклеїтися до існуючого чорного пікселя. Типовий приклад (додаток 3). Якщо точка під час свого випадкового блукання наближається до краю зображення, існують дві стратегії. Точка або відскакує від краю, або зображення тороїдно пов'язане (точка, що відходить від лівого краю, входить праворуч, точка, що відходить від правого краю, входить зліва, аналогічно для верхнього і нижнього краю). Загалом нові точки можна розсаджувати в будь-якому місці в області зображення, а не тільки навколо кордону без істотної візуальної різниці [3].

Іншою геометрією атрактора є лінія (додаток 4). У цьому випадку нижній ряд пікселів спочатку чорний, а нові точки входять зверху. Зображення зазвичай горизонтально кругле, тобто точки, що рухаються вліво, з'являються праворуч і навпаки.

Ще одна геометрія - коробковий атрактор (додаток 5), нові точки входять в інтер'єр (скажімо, центр зображення). Форми генеруються досить грубим методом, який навряд чи є найефективнішим. Загальноприйнятим заходом ефективності є запуск нових частинок у певному діапазоні поточної структури та відмова від них, якщо вони рухаються за межі іншого діапазону.

### **1.3 DLA в 3D просторі**

Розширення агрегації, обмеженої дифузією, до 3 вимірів є відносно простим, але є деякі важливі відмінності та параметри, недоступні в 2 вимірах. У 2 вимірах звичайною практикою є вирощування структур на дискретній сітці, а саме простір піксельного зображення, яке в кінцевому підсумку сформує зображення DLA. Важливим аспектом використаного тут алгоритму є формування DLA не на сітці кінцевої роздільної здатності в 3-вимірному, а скоріше на континуумі. Частина прилягає до існуючої структури, якщо вона знаходиться на певній мінімальній відстані від будь-якої частини існуючої структури. Процес дотримання існуючої структури DLA включає розширення гілки від найближчої позиції існуючої структури до нової позиції частинки. Мінімальна відстань до того, як частинка прилипне, стає зручною змінною, яка визначає, наскільки рідким або товстим стане DLA. У двовимірному DLA це часто контролюється шляхом введення ймовірності зчеплення (липкості), це також можна реалізувати в 3 вимірах із приблизно таким же ефектом.

Можна керувати формою DLA, змінюючи просторовий розподіл, при якому частинки випадковим чином потрапляють у навколишнє середовище. Класичний двовимірний DLA вводить частинки у випадкових положеннях кола з радіусом, який трохи більше, ніж межі існуючої структури. Це призводить до структур, які мають тенденцію до рівномірного зростання; еквівалент у 3 вимірах зображений (додаток 5), де нові частинки вводяться в моделювання випадковим чином на поверхні сфери. Спрямоване зростання, як показано на малюнку 2, досягається шляхом введення частинок уздовж однієї осі.

## 1.4 Поверхня DLA

Перше запитання, яке виникає при перегляді усіх картинок з DLA – це питання, чому кластер має таку шорстку поверхню. Якщо розглядати скупчення як берегову лінію, то є дуже глибокі «фіорди». Чому вони не заповнюються? Є

два способи зрозуміти це: якщо ми почнемо з шорсткої поверхні скупчення, ми бачимо, що фіорди екрановані, а скупчення залишається шорстким. Крім того, якщо ми починаємо з гладкої поверхні і компактного об'єкта без бродів, нестабільність зростання робить поверхню шорсткістю.

В основному, причина того, що броди не заповнюються в скупченні, полягає в тому, що випадкові частинки, які приходять ззовні, вдаряються в одну з гілок, перш ніж вони можуть зайти дуже глибоко всередину бродів. Ситуація була б зовсім іншою, якби ходунки рухалися по прямій, тоді кластер був би менш шорстким. Це проста ідея, але це означає, що у великомасштабній структурі кластера DLA переважають нелокальні ефекти. Будь-яке наближення, яке нехтує цією ознакою, не спрацює, і це робить формулювання аналітичної теорії дуже складним.

Тепер ми повернемося до питання і запитано, як кластер стає дуже грубим? Ми могли б припустити, що плавний контур, наприклад диск, продовжуватиме плавно рости і ніколи не потраплятиме в пастку бродів. Однак це не так: легко перевірити, що будь-яка початкова умова скоро забувається в зростанні. Якщо ми починаємо з гладкої форми, вона відразу стає грубою через нестабільність росту обмеженого дифузіїєю (додаток 6) [5].

Ця нестабільність була виявлена в металургії Муллінсом і Секеркою [6]. Припустимо, що у нас є щільність  $u(r, t)$  частинок, в дифузії, вони рухаються, поки не досягнуть зростаючого кластера, де вони осідають. Тоді маємо:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n} \propto v_n \quad (2)$$

Тобто,  $u$  має належати рівнянню дифузії;  $v$  - константа дифузії. Нормальна швидкість росту ( $v_n$ ) межі розділу, пропорційна потоку на поверхню  $\frac{\partial u}{\partial n}$ . Корисно оцінити розмір члена  $\frac{\partial u}{\partial t}$ , зауваживши, що якщо  $v$  є типова швидкість росту,  $v$ , то  $\frac{\partial u}{\partial t} \propto \frac{v \partial u}{\partial x}$  тобто  $|\nabla^2 u| \approx \left(\frac{v}{D}\right) \left|\frac{\partial u}{\partial n}\right|$ . У випадку DLA ми запускаємо по одній частинці, так що швидкість стає нульовою. Отже, рівняння (1) зводиться до рівняння Лапласа,

$$\nabla^2 u = 0 \quad (3)$$

На додаток до цих умов нам потрібна гранична умова для  $u$ . Для DLA це чисте поглинання на поверхні. У термінах матаналізу:

$$u_s = 0 \quad (4)$$

Гранична умова на  $u$  далеко від кластера залежить від розмірності. У розмірах більше двох ми можемо взяти  $u \rightarrow u_{inf}$ . Однак у  $d = 2$  ми повинні узагальнити це. Прийmemo умову, що:  $u(r) \rightarrow \log(r)$ .

Рівняння (1) - (4) не просто описують гладку поверхню, яка просувається в часі. Насправді, якщо ми починаємо з плоскої поверхні, вона просувається в часі (з  $v \propto t^{\frac{1}{2}}$ ). У DLA на поверхні утворюються нерівності через дробовий шум при надходженні частинок. Вони ростуть в результаті нестабільності. Поширення та взаємодія породжує фрактал, але деталі цього процесу все ще залишаються неясними.

## 1.5 Клітинне подання дифузійного процесу

Процеси дифузії описуються таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація, яка бере участь у моделюванні;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $t$  – час;  $x, y$  – просторові координати.

Розглянемо квадратну область розміром  $N \times N$  вузлів, у центрі якої знаходиться зародок. Горизонтальну та вертикальну відстані між вузлами позначимо  $h$ :  $x = ih$ ,  $y = jh$  ( $i, j$  – цілі числа). Надалі зручно вважати  $h = 1$ . Крок за часом  $\nabla t$  теж задається одиничним:  $\nabla t = lt$ ,  $l = 1$ ,  $t$  – цілі числа.

У рівнянні дифузії (1) величина  $\nabla C$  у вузлі  $(i, j)$  дорівнює різниці середнього значення концентрації у сусідніх вузлах  $\langle C_{(i,j)} \rangle$ , і концентрації у самому вузлі:

$$\nabla^2 C \approx \frac{\langle C_{(i,j)} \rangle - C_{i,j}}{h^2} \quad (2)$$

Середнє значення можна обчислювати по-різному. Наведемо загальну формулу:

$$\begin{aligned} \langle C_{(i,j)} \rangle = & (C_{i+1,j} + C_{i-1,j} + C_{i,j+1} + C_{i,j-1} \\ & + w(C_{i+1,j+1} + C_{i+1,j-1} + C_{i-1,j+1} + C_{i-1,j-1})) / (4 + 4w) \end{aligned}$$

Коефіцієнт  $0 \leq w \leq 1$  враховує вплив діагональних сусідів.  $w = 1/4$ . Тоді (2) набуває вигляду:

$$\nabla^2 C \approx \frac{\langle C_{(i,j)} \rangle - C_{i,j}}{(4 + 4w)(1 + 2w)h^2}$$

Тобто у першому наближенні, використовуючи явну різницеву схему, нове значення концентрації після кожного часового кроку обчислюється згідно з формулою:

$$\hat{C}_{i,j} = C_{i,j} + Dt \nabla^2 C$$

Ця схема є стійкою за

$$\frac{Dt}{h^2} \leq \frac{1}{4}$$

Перейдемо до дендритного росту. Розглянемо стан кожного вузла  $n$ .  $n = 0$  відповідає стану, коли частка не приєдналася до початкового зародка, а  $n = 1$  відповідає приєднанню і утворенню нової структури. Тоді для того, щоб вузол був об'єднаний у структуру, необхідно, щоб він знаходився на межі, тобто мав хоча б одного сусіда з  $n = 1$ .

## 1.6 Найпростіший алгоритм моделювання DLA

Обмежимося розглядом найпростішого класичного варіанта DLA – моделі частинка-кластер. У ній кластер, що зростає, завжди нерухомий у просторі, а частинки, які приєднуються до нього, переміщуються в просторі випадковими траєкторіями незалежно одна від одної до моменту “зіткнення” з кластером, після чого вони стають частиною кластера.

Розглянемо цю задачу детальніше. Як зародок майбутнього кластера виступає частинка, яку можна ототожнити з сервером мережі, до якої у подальшому приєднуюватимуться інші частинки споживачі. Частинки запускаються по одній з довільної випадково вибраної точки на колі заданого радіуса  $r_0$ , побудованого навколо центрального зародка, більшого, ніж радіус кластера  $r_{\max}$ , та слідує своїми траєкторіями доти, доки не зіштовхуються із агрегатом.

Якщо в процесі свого руху частинка віддаляється від центра кластера на відстань, що перевищує  $3r_0$ , то ця частинка вилучається, і запускається наступна. У моделі DLA, де частинки випадково блукають, здійснюючи унітарні кроки протягом дискретного проміжку часу, існує стандартний метод, який дає змогу частинкам поза початковим колом здійснювати довгі випадкові кроки завдовжки  $r_{\text{ext}}$ , якщо ці кроки не приведуть частинку всередину початкового кола (додаток

7). Адекватний вибір – це  $r_{\text{ext}} = \max(r - r_{\text{max}} - d, 1)$ , де  $r$  – відстань від блукаючої частинки до початкової, і було використано мале допустиме відхилення  $d = 5$ . Крім того, броунівське блукання у великих порожніх областях у внутрішній частині, яка обмежує кластер ( $r < r_{\text{max}}$ ), займає дуже багато комп'ютерного часу, особливо для великих агрегатів. Болл і Брейді [7] запропонували стратегію, яка дає змогу частинкам усередині початкового кола здійснювати великий крок довжини  $r_{\text{int}}$ , якщо вони не перетинаються у будь-якій частині агрегата (додаток 8). Аналогічні процедури були використані в інших роботах [8–10].

Змоделюємо алгоритм програми: Створення нової точки. Блукання точки. Приєднання точки до кластера. Результатом алгоритму блукання є координати точки на периметрі кластера. Відбувається збільшення кластера на одну точку у вказаних координатах, збільшується і периметр кластера.

Проектні рішення:

1. Частинки, що формують кластер, представимо класом Point.
2. Кластер представлений контейнером з Point.
3. Периметр у жоден спосіб не фіксується і не задається (для економії пам'яті). Для перевірки потрапляння блукаючої частинки на периметр реалізована функція FindPerimeter в класі Cluster.
4. Ймовірність переміщення частинки в одному із восьми напрямів – 1/8. Реалізація випадкового блукання здійснена на основі генератора випадкових чисел за допомогою модуля <random>.
5. На кожному кроці частинка перевіряється на належність до периметра кластера. Якщо частинка знаходиться на периметрі, то вона стає частиною кластера – додається в кінець списку. Пошуковий механізм для визначення того, коли і де блукаюча частинка зіткнеться з агрегатом, являє собою основний часовий крок у процесі моделювання. Просторові

координати частинки, що належить кластеру, зберігаються в одновимірному масиві як послідовності агрегації. Отже, перевірка цього масиву здійснюється на кожному кроці моделювання. Для оптимізації пошукового механізму здійснюється перевірка списку у зворотному порядку, в якому частинки були додані у кластер, оскільки для зовнішніх частинок більше шансів для агрегації, ніж для внутрішніх.

- б. Для оптимізації часу росту кластера частинка здійснює крок більшої величини за більшої відстані цієї частинки до кластера. Під таке рішення приведені функції ToCluster і SetStep, відповідно функція розрахунку відстані (найкоротшої) від цього місцезнаходження цієї точки до кластера і задання кроку залежно від цієї відстані. Правильний алгоритм для визначення довжини внутрішніх кроків  $r_{int}$  має вирішальне значення для ефективності роботи програми. Для того, щоб виконати це завдання, ми задаємо квадратну область зі стороною  $L$ , зосереджену навколо початкового зародкового сіда, яка обмежує увесь агрегат. Ця область повинна бути доволі великою для того, щоб гарантувати, що агрегат не перевищує її межі. Тоді область ділиться на грубозернисту сітку з клітинками розміром  $2r_{int} \times 2r_{int}$  (додаток 8). Кожна клітинка сітки асоціюється з елементом  $K \times K$  квадратної матриці  $A$ , де  $K=L/(2r_{int})$ , яка має значення 1, якщо клітинка або одна з її найближчих чи наступних за найближчими сусідами містить частку агрегата, або 0 – в іншому випадку. Клітинки зафарбовані сірим кольором ( $A_{ij}=1$ ) ті, в яких випадкове блукання може перетнути кластер після кроку завдовжки  $r_{int}$ , оскільки вони є частиною або суміжні з кластером. Отже, великі кроки, починаючи з сірих клітинок, заборонені.

При DLA окремі частинки після кількох випадкових блукань осідають на кластері, породжуючи випадкові фрактали, які моделюють дендритний ріст

комп'ютерної мережі. Для них характерна деревоподібна структура з багаточисленними фьордами на багатьох розмірних масштабах. Причина утворення подібних структур при ДОА полягає у тому, що блукаюча частинка осідає, як правило, поблизу виступу фрактала, а не в глибині фьорда. Ймовірність проникнення у глибокий фьорд надзвичайно мала.

Для обчислення ймовірності прикріплення частинки до кластера відмітимо, що частинка, будучи квадратом, може мати з кластером одну, дві або три спільні вершини. На таблиці нижче зображений кластер із трьох частин – клітинок з координатами (1;1), (1;2), (2;1), зафарбованими в темний колір. Блукаюча частинка може приєднатися до цього кластера, потрапивши в одну із 12 білих клітинок. Кількість однокрокових шляхів, якими частинка може потрапити в білу клітинку, записана всередині клітинки. Кутові клітинки мають один зв'язок з кластером, серединні – два зв'язки, фьорд – 208 три зв'язки. Оскільки усього існує 42 однокрокових маршрути, що ведуть в білі клітинки ззовні, то ймовірність  $p_k$  того, що частинка потрапить у білу клітинку з  $k$  зв'язками:

$$P_1 = 23/42 = 0.5476$$

$$P_2 = 12/42 = 0.4286$$

$$P_3 = 1/42 = 0.0238$$

5	3	4	
3		1	4
3			3
5	3	3	5

Ми бачимо, що з'єднатися з кластером всередині фьорда у частинки мало шансів. Це означає, що під час реального моделювання всередині фьорда концентрація

частинок менша, оскільки більшість з них уже приєднались до кластера. У межах виступів концентрація висока, оскільки поки що мало частинок з цієї околиці приєдналось до дендрита. Структура фрактального кластера, змодельованого за цією методикою (додаток 9).

## Розділ 2. Комп'ютерні мережі та DLA

### 2.1 Моделювання росту локальної комп'ютерної мережі.

Локальні комп'ютерні мережі є об'єктами графових структур і тому для їхнього дослідження можуть бути застосовані методи теорії графів.

Згідно з проведеними дослідженнями слід відмітити, що локальні мережі у процесі розвитку та еволюції в часі проходять етапи становлення від класичного випадкового графа до безмасштабних мереж. Тому для імітаційного моделювання вибраний принцип випадкового приєднання вузлів, як для класичного випадкового графа.

Під час моделювання росту комп'ютерних мереж ми використали аналогії моделювання росту дендритних дерев нейронів.

Мережа розглядається як упорядкована множина сегментів, кожен з яких закінчується точкою розгалуження чи кінцем мережі. Вона характеризується низкою числових характеристик: довжинами сегментів, кутами між сегментами та різними ступенями приєднання вузлів мережі  $P(k)$ . Вершинами мережі є сервери, світчі та користувачі, загальну кількість яких позначимо  $N$ ;  $N(k)$  – це кількість вершин із заданими ступенями  $k$ .

Ймовірність реалізації цього ступеня  $k$  визначимо діленням  $N(k)$  на загальну кількість вершин:  $P_0(k) = N(k)/N$ . Якщо знехтувати внеском користувачів, то  $N$  позначатиме вже загальну кількість серверів і світчів і  $P(k) = N(k)/N$ .

Початковою точкою  $O$  мережі вважається сервер, якому приписується  $z$  зв'язків, які визначають напрями  $l_0^{(z)}$  зростання мережі. До складу мережі входять два типи часток – світчі, кількість яких дорівнює  $n$ , та споживачі. Кожному із  $n$  світчів у випадковий спосіб приписується різна кількість  $k$  зв'язків, яка

визначається кількістю портів світча та змінюється дискретно, набуваючи значень: 5, 8, 16, як найпоширеніших під час проектування локальних мереж.

У модель закладаються:

1) розподіл величини кута  $j$  між початковим напрямом першого кроку  $l_0$  та напрямом наступного кроку моделювання;

2) імовірність розгалуження світча  $P(k)$ .

Вздовж променя  $l_0$  робиться корок  $OA$  певної довжини, точка  $A$  з імовірністю  $\epsilon$  початком наступного кроку (який відкладається від напрямку попереднього кроку  $OA$  під випадковим кутом  $j^{(k)}$  відповідно до розподілу кута), і з імовірністю  $1-P(k)$  – не  $\epsilon$  початком наступного кроку, тобто  $\epsilon$  кінцем сегмента.

Під час програмування здійснюється вибірка для реальних комп'ютерних мереж ймовірностей приєднання світчів.

На основі розроблених алгоритмів реалізована програма, результатом роботи якої  $\epsilon$  зображення динаміки росту локальної комп'ютерної мережі, виявлені та проаналізовані особливості роботи запропонованого алгоритму.

Програма допускає корегування форми, розміру, орієнтування у просторі мережі, а також кількості споживачів, які утворюють простір моделювання. Користувачу програми доступні функції запуску процесу моделювання, його зупинки у довільний момент часу, програма автоматично генерує зображення та поновлює його після кожного кроку моделювання.

Розроблений програмний продукт дає змогу спостерігати за процесом росту мережі на різних стадіях, що дає можливість відслідковувати зміни в структурі не тільки в часі, але і в просторі.

За допомогою імітаційного моделювання досліджувався вплив початкових умов – напрямів розгалуження мережі, кількості вузлів-світчів з різними ступенями приєднання споживачів на ріст локальної мережі. Для того, щоб дослідити, як впливає деякий параметр на структуру графа, спочатку був змодельований ріст за деякого набору параметрів. Пізніше параметри з цього набору змінювались окремо. Результати комп'ютерного експерименту (додаток 10).

Розроблена імітаційна модель дає змогу отримати зображення мережі для різних початкових умов, динамічно візуалізувати процес її структуризації та відслідковувати його у довільний момент часу.

Отримані в експериментальний спосіб (за допомогою комп'ютерної симуляції) імовірнісні моделі локальної комп'ютерної мережі для різних значень її числових характеристик (додаток 10). А саме для моделі 1:  $z = 2$ ,  $n = 14$ , для моделі 2:  $z = 3$ ,  $n = 20$ , для моделі 3:  $z = 7$ ,  $n = 30$ .

Із наведених зображень зрозуміло, що за  $z = 2$  вітки мережі спрямовуються від сервера у двох протилежних напрямках, за  $z = 3$  мережа структурується у вигляді трикутника, а за  $z = 5$  і більше розростається зіркою, до світчів якої у ймовірнісний спосіб приєднується різна кількість користувачів. За достатньо великих значень  $z$  та поступового збільшення кількості світчів  $n$  спостерігається розростання мережі у чітку ієрархічну структуру та її кластеризація.

За досягнення граничного значення кількості споживачів, за якого зростає кількість колізій і падає пропускна здатність мережі, слід здійснити за допомогою числового моделювання перехід від моделі “частинка-кластер” до складнішої моделі “кластер-кластер”. Програма моделювання відтворює топологію мережі, містить інформацію про кількість вузлів, конфігурацію зв'язків, дає можливість

підмінити процес у реальному масштабі часу на прискорений у темпі роботи програми, що може бути використаним для прогнозування зростання системи.

## **2.2 Моделювання децентралізованої системи обміну інформації.**

У сьогоднішньому світі найбільшою системою обміну інформацією є Інтернет. І хоча сам по собі Інтернет проектувався та розроблявся як децентралізована система, в ході його еволюції деякі рішення виявились не вірними з точки зору проектування. Одним з мінусів можна відмітити централізованість даної системи на рівні користувачів. Так наприклад 2 користувача які знаходяться в одному місті, будуть користуватися Інтернетом через один і той самий сервер. Це можливо гарно відстежити за допомогою такої програми як traceroute.

Ще одна проблема яка притаманна сучасному Інтернету є NAT (network address translation). Завдяки якій рядовий користувач сам по собі не може бути сервером. І хоча IPv6 почав вирішувати цю проблему, неможливість замінити все обладнання водночас, не дає змоги вирішити цю проблему.

IPv4 невідмінну від IPv6 кодує адреса 32 бітами, що дорівнює  $2^{32}$  варіантів адрес, а це в свою чергу дуже мало для сучасного світу. Причина полягає в тому, що коли проектували Інтернет вважали що ним будуть користуватись тільки військові та наукові заклади.

Використовуючи DLA можливо спробувати прибрати деякі проблеми притаманні сучасному Інтернету, або зменшити їх.

На сьогоднішній день майже кожен девайс який має вихід у Інтернет має в собі підтримку родини стандартів IEEE 802.11 та IEEE 802.15. Цим можна скористатись для побудови деякої мережі на основі DLA. Кожен такий пристрій

можна розглядати як окрему частинку яка рухається. І яка може з'єднатись з іншим пристроєм у тому разі якщо вона наблизиться до нього на достатню відстань.

Сучасні протоколи сімейства IEEE 802.11, зокрема 802.11ax, більш відомий як WiFi6 та відповідно IEEE 802.15, більш відомий як Bluetooth, дозволяють працювати на дистанціях до 100 метрів, чого цілком достатньо щоб об'єднати усі пристрої у, наприклад, у густонаселеному районі.

Уявімо тепер, що кожен пристрій у густозаселеному районі підключений до інших пристроїв, та при цьому кожен пристрій має вільний доступ до Інтернету. Тепер користувачі які використовують спільну інформацію з Інтернету можуть не робити одні і ті ж запити до мережі, а попросити цю інформацію у своїй мережі, якщо така інформація вже є.

Як приклад, у день в одному районі переважна більшість учнів, яка ходить в одну й ту саму школу, має одні і ті ж лекції, усі роблять дуже багато запитів головної сторінки Google, ввечері багато людей може дивитись один і то й же футбольний матч по онлайн телебаченню.

Якщо розглянути ідеальні умови для таких ситуацій, то замість того щоб «ганяти» трафік між всіма користувачами та сервером який транслює інформацію, можна щоб один або декілька користувачів просто поділились цією інформацією. А це може допомогти знизити навантаження на саму мережу, та збільшити її загальну пропускну здатність, або зменшити споживання електроенергії. Що є дуже актуальним у сучасному світі.

### **2.3 Створення децентралізованої системи обміну інформацією на основі DLA.**

Загалом побудова мережі DLA може виглядати як побудова невеликих кластерів в точках скупчень девайсів (додаток 11). Але пристроям ще притаманно змінювати своє місцеположення, а тому наш прототип DLA повинен не тільки об'єднувати точки у кластера, а ще й вміти від'єднувати їх, бо пристрої можуть вимикатись, або віддалятись від свого кластеру.

Створення такого кластеру, може запроваджувати один девайс, критерієм створення такої мережі для нього може бути велика кількість вільних девайсів навколо.

Відразу виникає проблема: що якщо густота таких девайсів дозволяє зробити дуже велику мережу? Можна уявити деяку малоповерхову забудову у центрі міста, де людних міст. Якщо дана мережа буде занадто велика, це зробить маршрутизацію в ній досить складною. А якщо потрібно буде обмінюватись інформацією між девайсами, шлях між якими лежить через весь кластер, ця схема може не виправдовувати себе з точки зору енергоефективності, та загального навантаження на весь кластер.

Таким чином можна ввести деякі обмеження на розмір кластеру, наприклад максимальної кількості користувачів, або довжину найдовшого найкоротшого шляху між девайсами у кластері.

Далі відповідно після побудови кластерів на найнижчому рівні, можна почати розглядати увесь кластер як окремий девайс, та повторювати дану операцію знову і знову. Як результат отримаємо деяку ієрархічну структуру (додаток 12).

За допомогою цих принципів була змодельована побудова мережі на основі DLA (додаток 14).

## 2.4 Адресація у мережах створених за основі DLA.

Адресація у даних кластерах може виконуватись за допомогою вже існуючих MAC адрес, та відповідно MAC адресації. Але це справедливо лише для кластерів найнижчого рівня.

Що до адресації на рівні міжкластерної, то тут вже виникає проблема через непостійність самого кластера, пристроїв у ньому та незнанням де саме утвориться новий кластер. А отже виконувати адресацію так як це відбувається у сучасних комп'ютерних мережах, а саме за допомогою IP адрес, неможливо.

Натомість, можливо запровадити механізм коли кожен кластер точно знає список своїх девайсів. Якщо повернутись до попередньої частини, то тепер ще очевидніше, що невелика кількість пристроїв у кластері є важливим критерієм.

Тепер варто розглянути адресацію між самими кластерами, для того щоб мати змогу між ними адресуватись потрібно, щоб вони мали унікальні імена, благо ця унікальність може бути забезпечена MAC пристрою який ініціював створення кластеру, так як унікальність його MAC гарантована.

Але, що якщо цей самий пристрій ініціював створення кластеру в одному місці, потім переїхав в інше місце і там зробив те ж саме. У даній мережі виникнуть кластери з однаковими адресами. Рішення цієї проблеми може бути досить простим, додавати до адресу кластеру time мітку ініціації його створення. На виході ми будемо мати адресу розміром  $2^{48+64}$  ( $2^{48}$  – діапазон MAC адрес,  $2^{64}$  unix time 64). Що не так багато для сучасної техніки.

## 2.5 Маршрутизація у мережах створених за основі DLA.

У комп'ютерних мережах використовується велика кількість алгоритмів маршрутизації. Заливка – це простий алгоритм передачі пакетів по всіх шляхах. Більшість алгоритмів визначають найкоротший шлях та адаптуються до змін топології мережі. Основними алгоритмами є маршрутизація векторами відстаней та маршрутизація з урахуванням стану ліній. У більшості наявних мереж застосовується один із цих алгоритмів. До інших важливих методів маршрутизації відносяться використання ієрархії у великих мережах, маршрутизація для мобільних хостів, широкомовлення, багатоадресна маршрутизація та довільна маршрутизація. Мережі схильні до навантажень, що призводять до збільшення затримки та втрати пакетів. Розробники мереж намагаються запобігти перевантаженню різноманітними способами, що включають створення мереж з достатньою пропускну здатністю, вибір не перевантажених маршрутів, тимчасову заборону вхідного трафіку, відправлення повідомлення джерелу з проханням уповільнити передачу трафіку та скидання навантаження [11].

На таких же принципах може базуватись маршрутизація в мережах побудованих за допомогою DLA. Також треба зазначити що для маршрутизації між різними кластерами потрібно щоб кожен кластер володів інформацією про самого себе (список девайсів які знаходяться у цьому кластері), щоб була можливість маршрутизації між кластерами. Оскільки сам по собі кластер не має єдиного центра, потрібно щоб один з пристроїв обробляв цю інформацію. Ці центри обробки інформації можна поступово змінювати, для того щоб балансувати навантаження на пристрої і не перезавантажувати пристрої.

Ще одна проблема яка може виникнути при маршрутизації (додаток 13), коли шлях між кластерами проходить через один, або просто невелику кількість девайсів. Для усунення такого роду проблем можна використовувати різні підходи. Один з таких: забороняти зв'язування кластерів якщо для цього буде

використовуватись лише один девайс, або забороняти цей маршрут коли девайс достатньо навантажений. До речі ті ж самі методи використовуються при маршрутизації в Інтернеті.

## **2.6 Мережі на основі DLA у сьогодні.**

Чи допустимі такі мережі у сьогодні? На даний момент у містах дійсно велика кількість девайсів які підтримують необхідні протоколи. Для цього можливо просто зайти до списку доступних WIFI та Bluetooth пристроїв на своєму смартфоні. Більша проблема полягає у реалізації даної мережі, адже для успішної її роботи потрібно щоб якомога більше пристроїв підтримували данні алгоритми. Ще одна проблема – це те що деякі пристрої в цій системі можуть мати автономне електроживлення (акумулятор), що може дещо обмежувати використання цього пристрою у даних мережах, але час іде, з'являються нові покоління акумуляторів, які дозволяють працювати автономно дуже довго. А ось що до WIFI пристроїв або ноутбуків які живляться від електромережі, це не є проблемою, адже типовий WIFI у кожній квартирі 95% часу не працює на повній потужності.

Отже інтеграція у глобальну мережу такого виду взаємодії не буде представляти собою надскладну задачу.

## Висновки

Методи, описані в цій роботі, забезпечують основу для ефективного моделювання зростання DLA. Структури DLA, сформовані за допомогою описаного алгоритму, виглядають як кореневі структури і, таким чином, можуть бути використані для формування моделей для ряду програм комп'ютерної графіки.

У роботі здійснено імітаційне моделювання процесу росту комп'ютерної мережі у вигляді дендритів. Це пов'язано зі схожістю як у структурному рості, так і в математичному ймовірнісному описі механізмів еволюції складних мереж та росту дендритних кристалів. Розроблена модель, яка дає змогу отримати зображення локальної мережі для різних початкових умов росту, динамічно візуалізувати процес та відслідковувати його у довільний момент часу. Розглянута оригінальна концепція моделювання процесів утворення та росту фрактальних кластерів комп'ютерної мережі за алгоритмом обмеженої дифузії агрегації та росту дендритних дерев нейронів. Отримані результати порівнюються із реальними показниками та характеристиками комп'ютерних мереж.

Розглянута та запропонована модель мережі на основі DLA. Обґрунтована актуальність, та можливість реалізації даної мережі, показані основні принципи такої мережі.

## Джерела

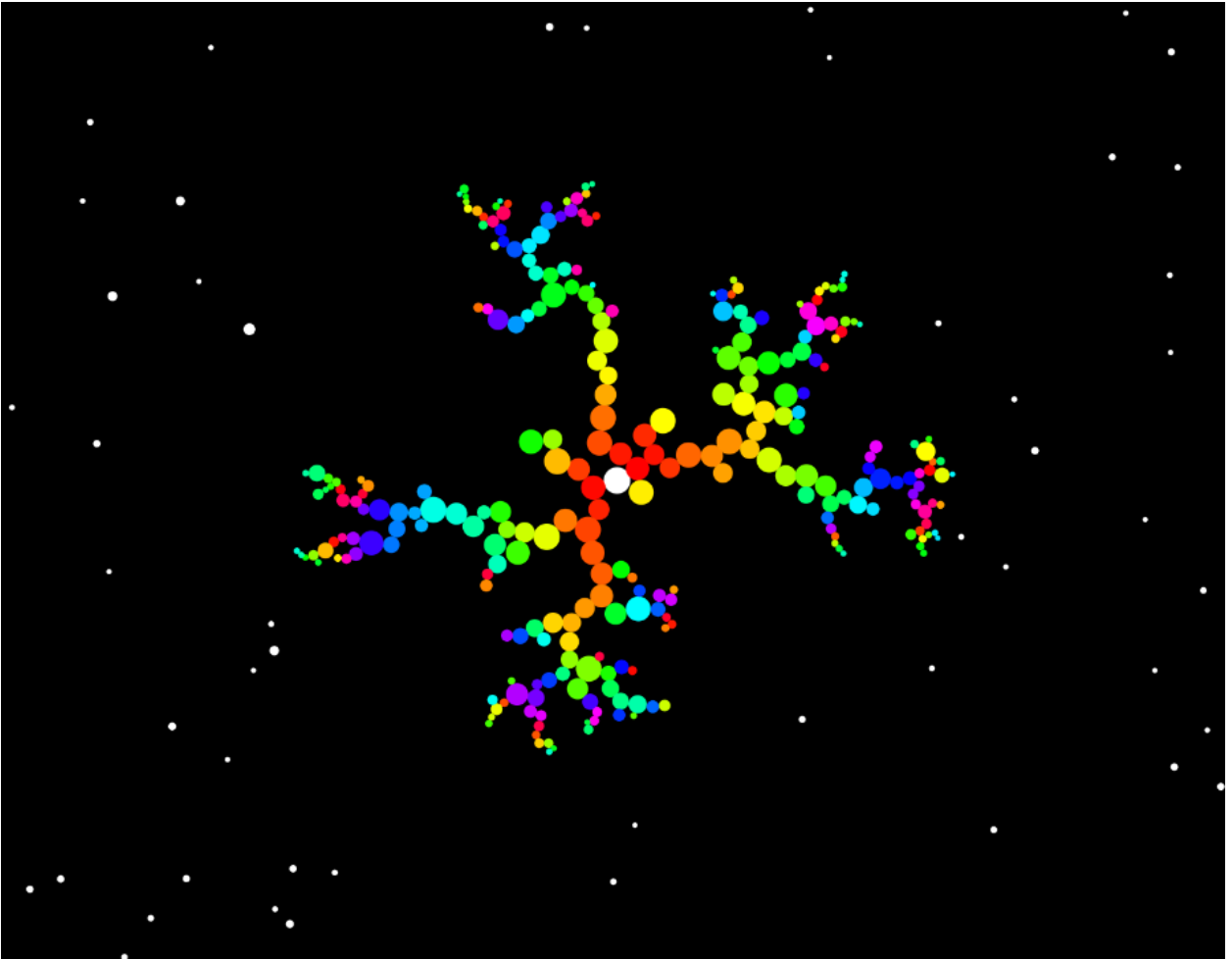
1. [http://ancient.hydro.nsc.ru/MPP\\_Speccourse/witten81.pdf](http://ancient.hydro.nsc.ru/MPP_Speccourse/witten81.pdf)
2. Ball, R.; Nauenberg, M.; Witten, T. A. (1984). "Diffusion-controlled aggregation in the continuum approximation". *Physical Review A*. **29** (4): 2017–2020.
3. <http://paulbourke.net/fractals/dla/>
4. <http://paulbourke.net/fractals/dla/dla3d.pdf>
5. Leonard M. Sander (2000): Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon?
6. Mullins, W.W., and Sekerka, R.F., 1963, *J. appl. Phys.*
7. R. C. Ball and R. M Brady, *J. Phys. A: Math. Gen.* 18, L809 (1985).
8. P. Meakin and T. Vicsek, *Phys. Rev. A* 32, 685 (1986).
9. S. G. Alves and S. C. Ferreira, *Phys. Rev. E* 73, 051401 (2006).
10. S. C. Ferreira, *Eur. Phys. J. B* 42, 263 (2004).
11. Andrew Tanenbaum *Computer Networks* 5th Edition

# Додатки

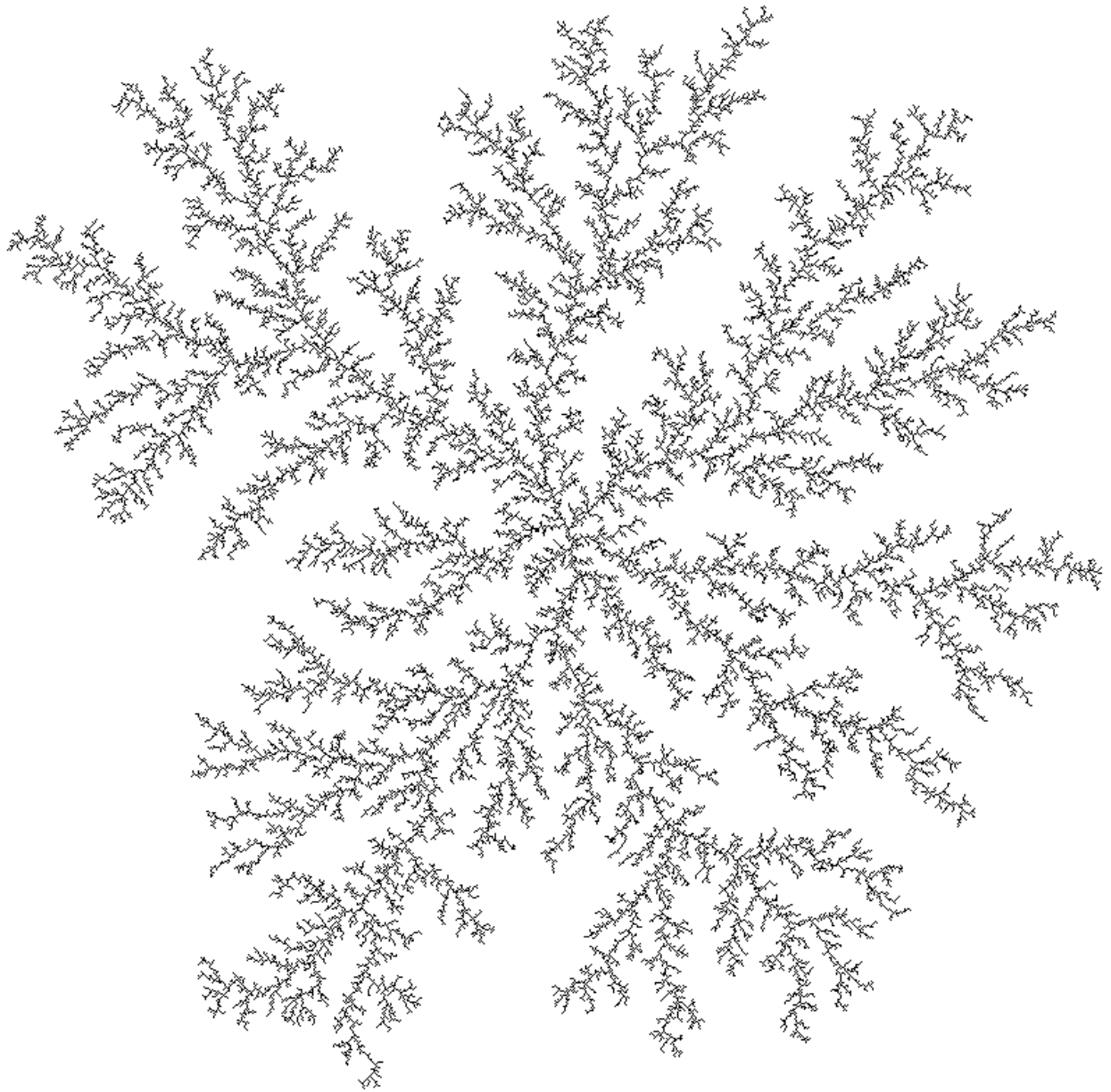
Додаток 1



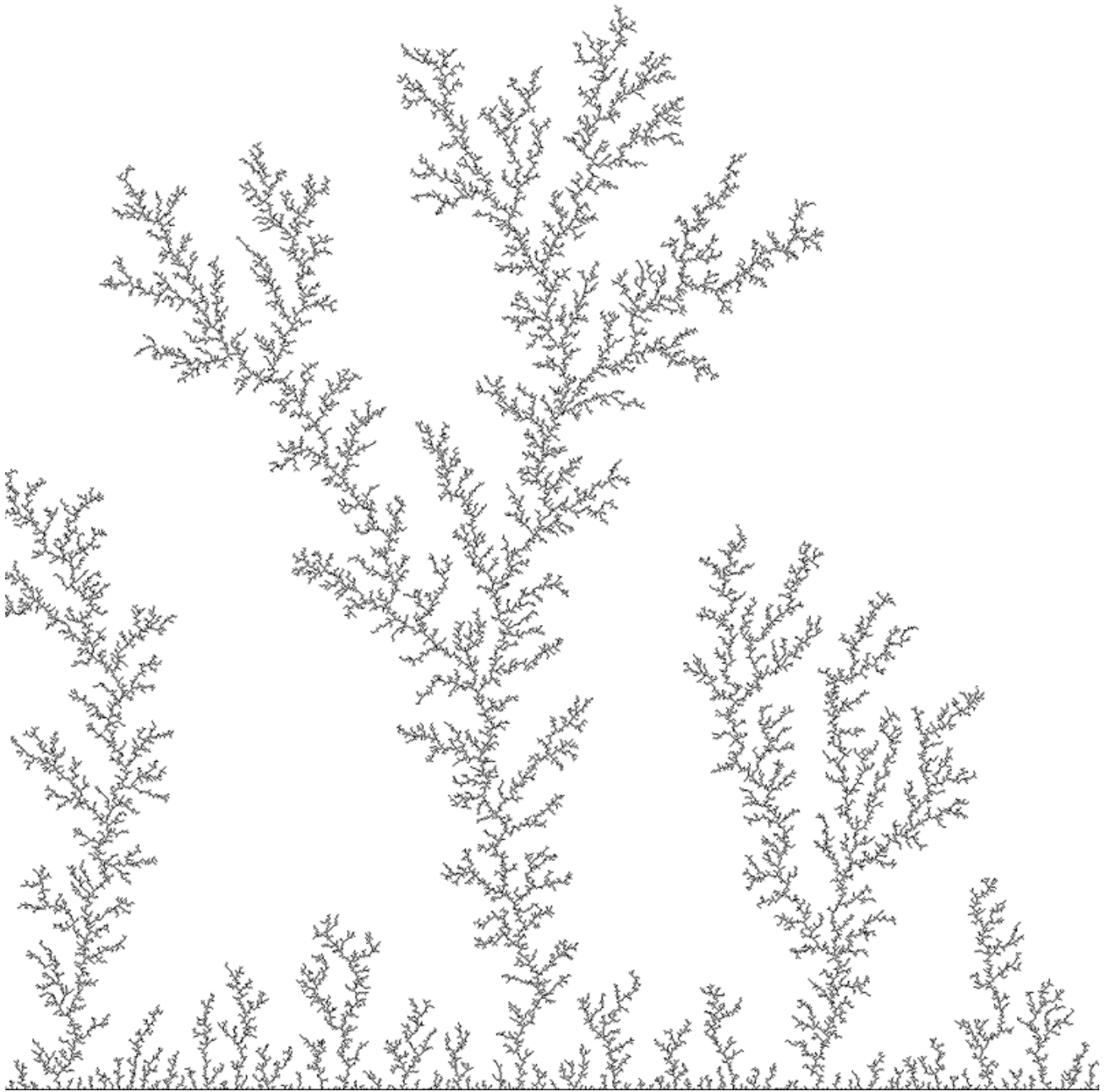
Додаток 2



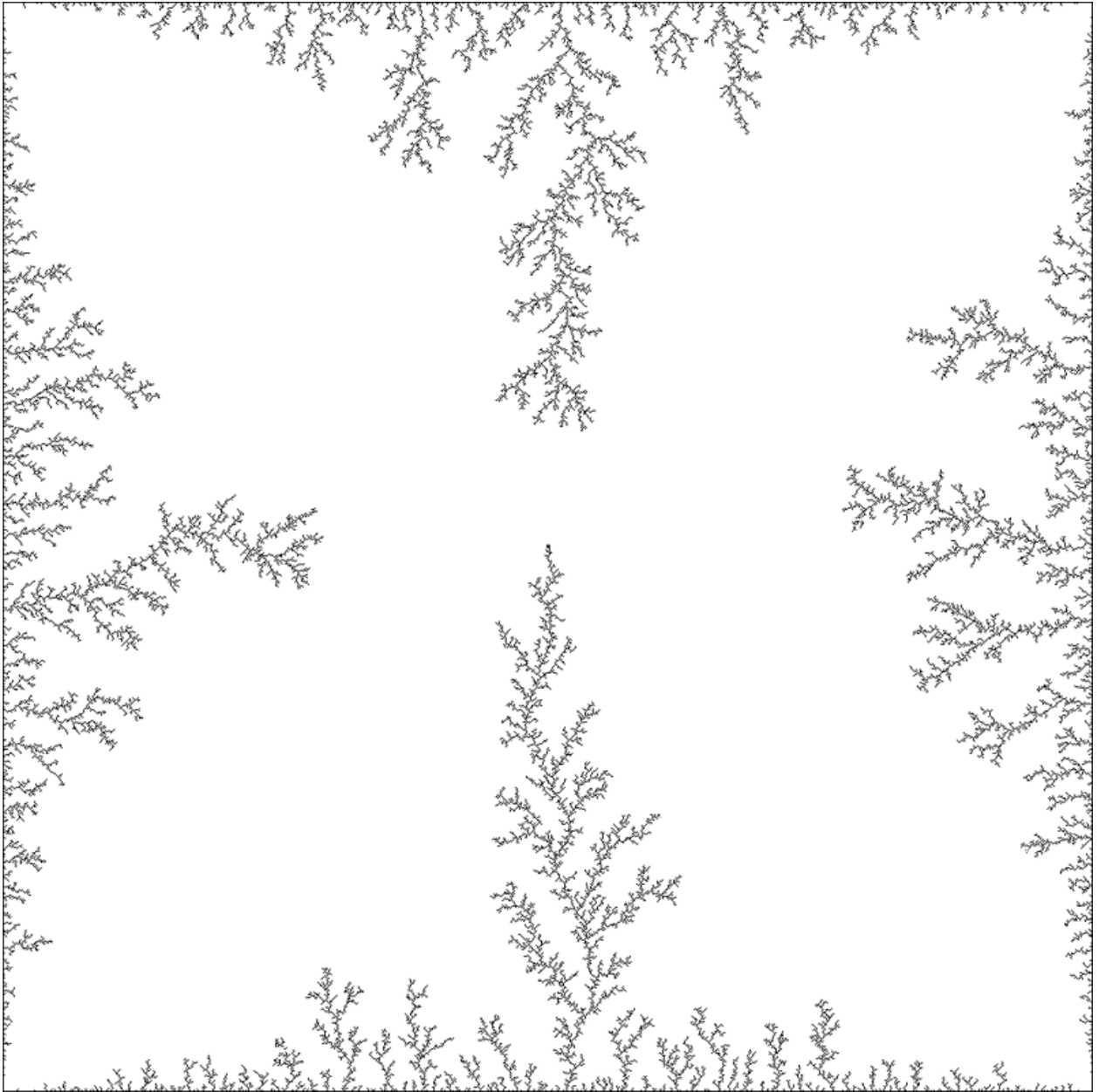
Додаток 3



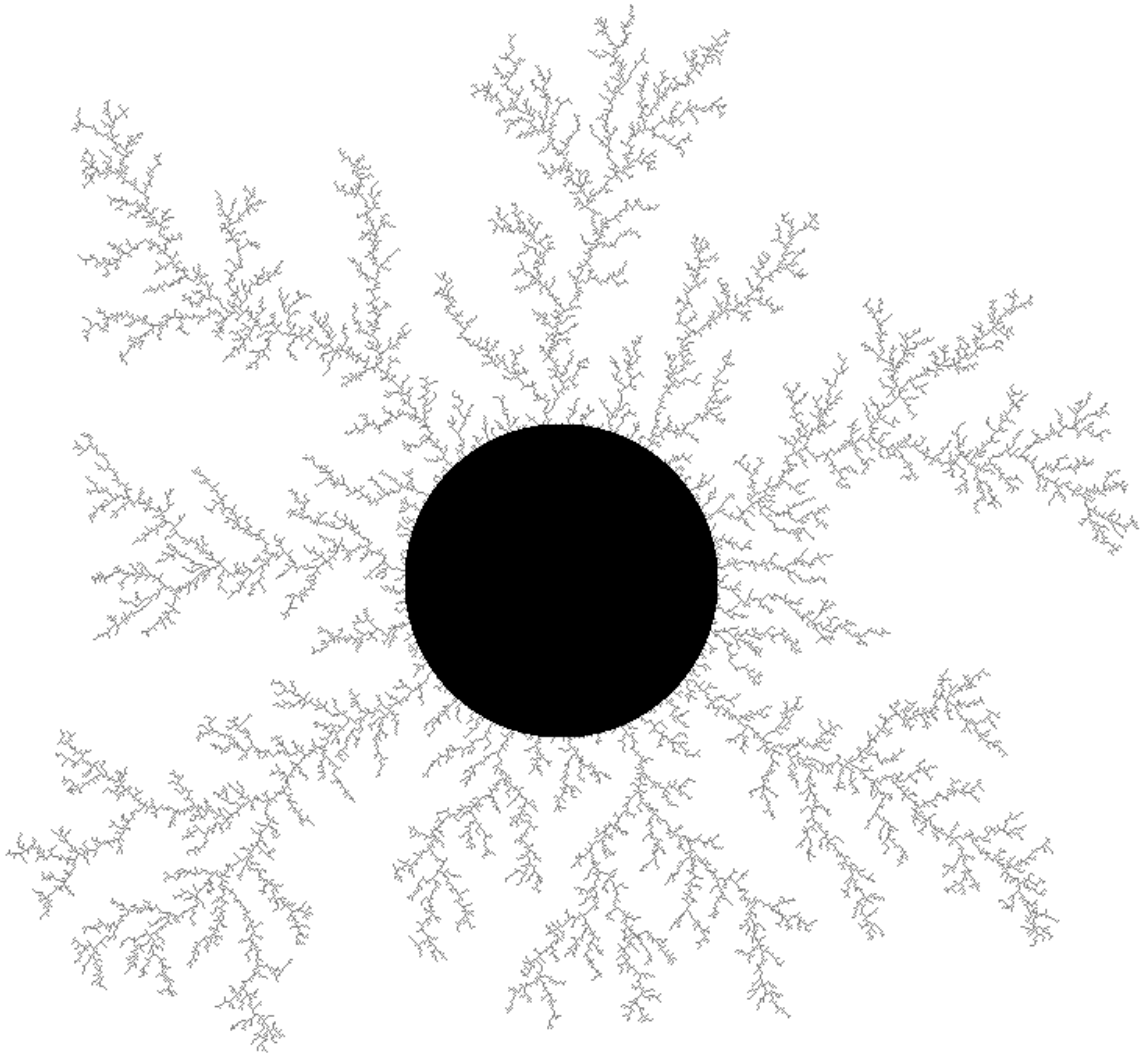
Додаток 4



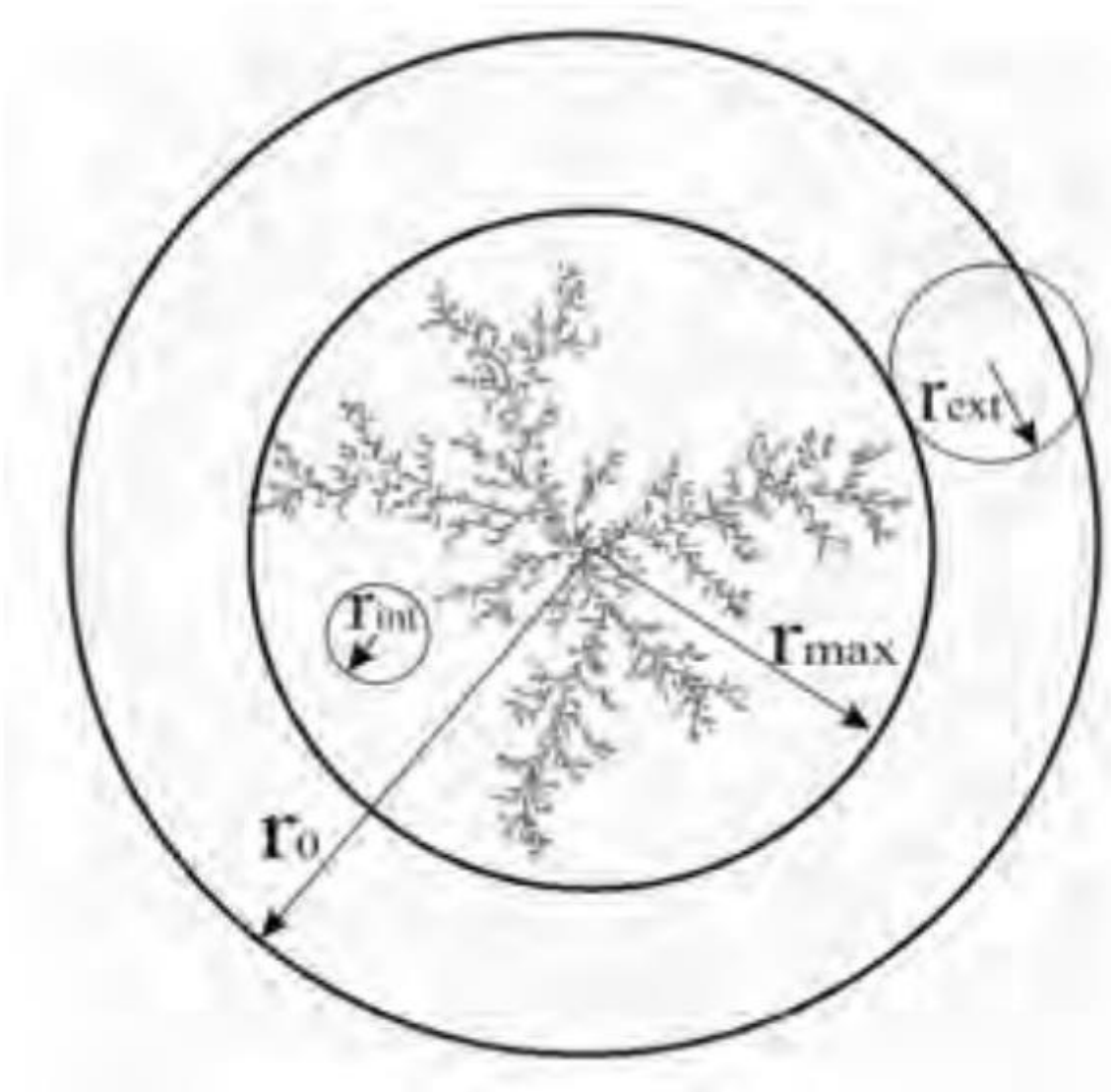
Додаток 5



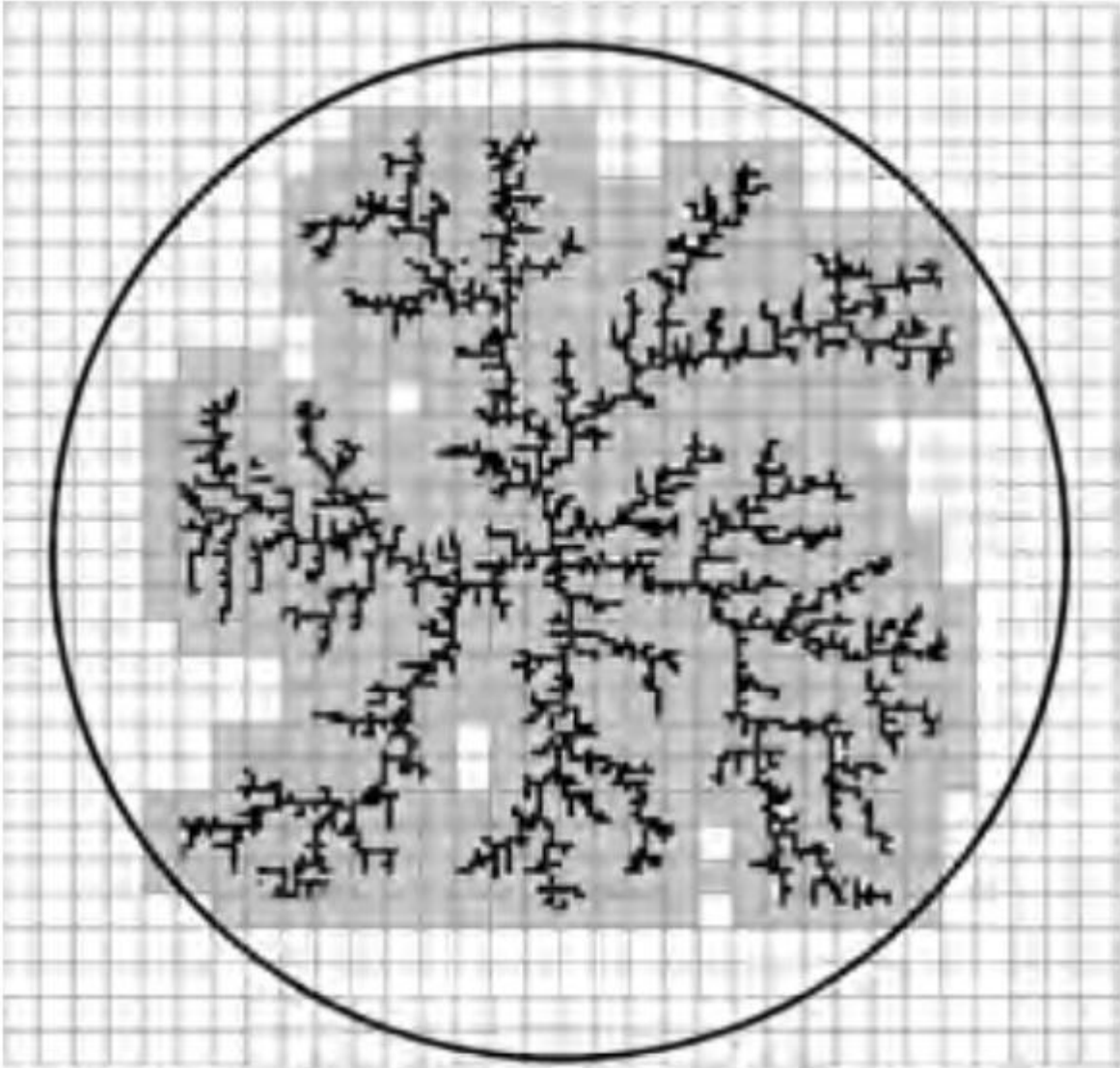
Додаток 6



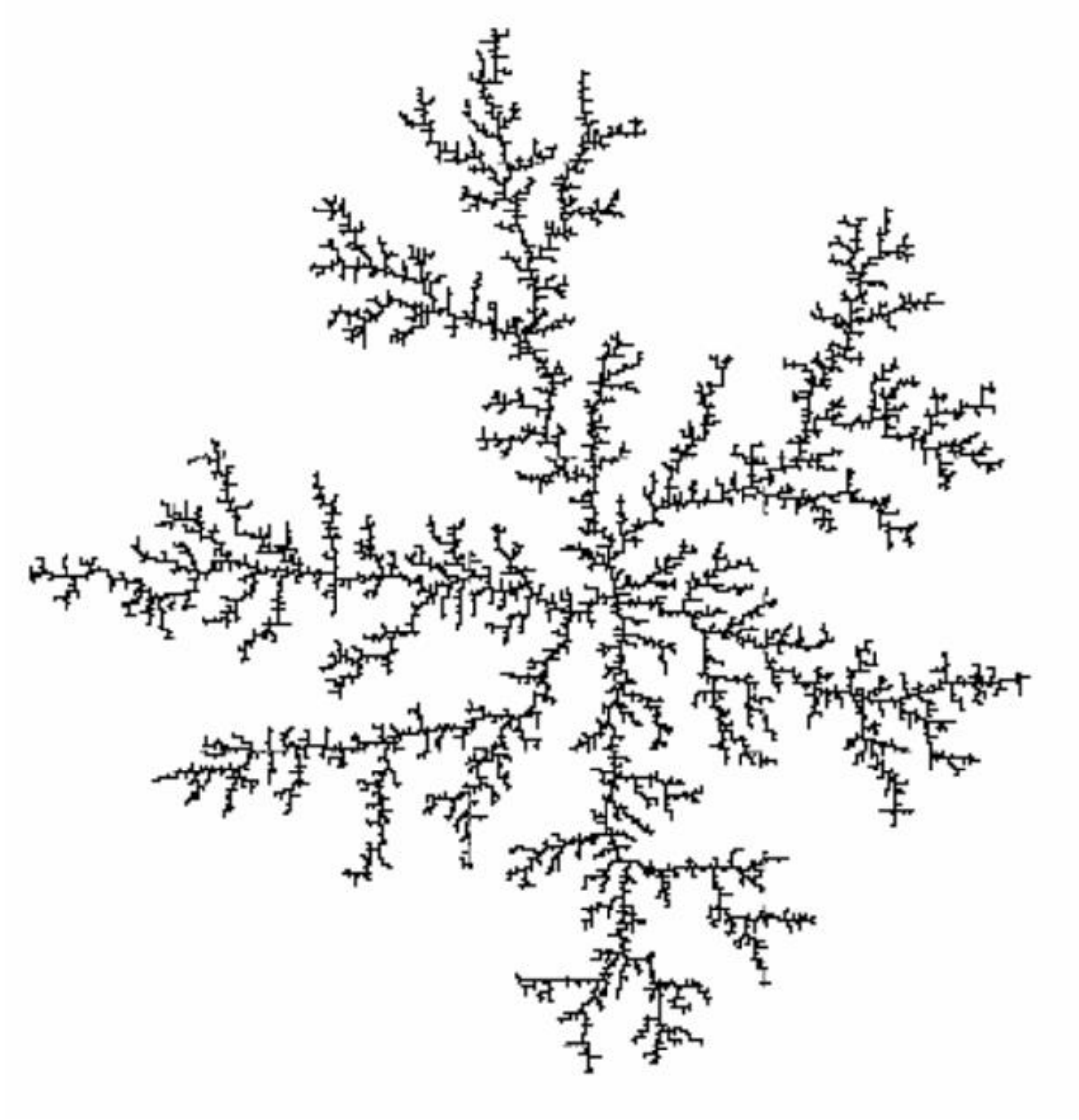
Додаток 7



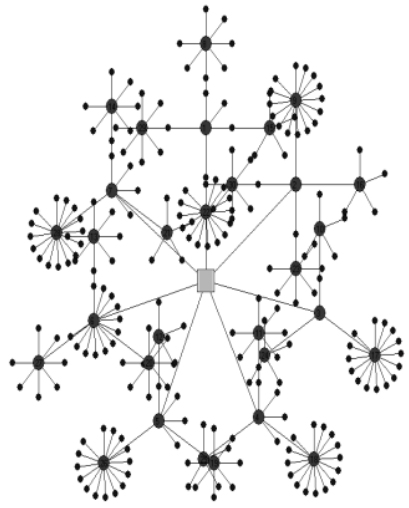
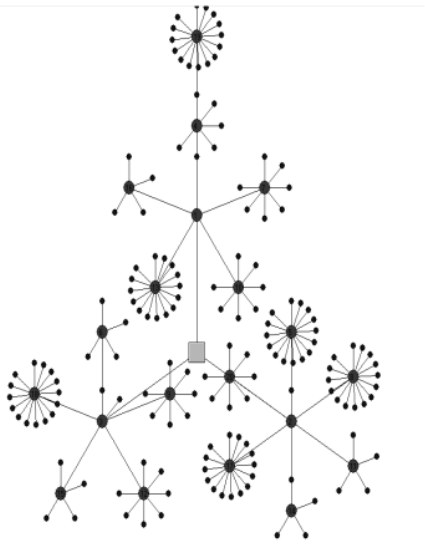
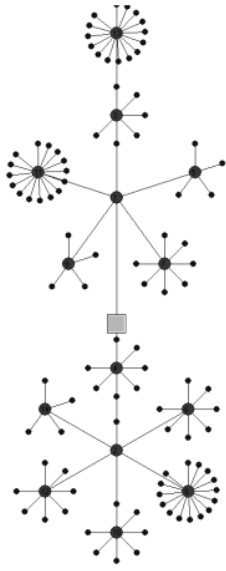
Додаток 8



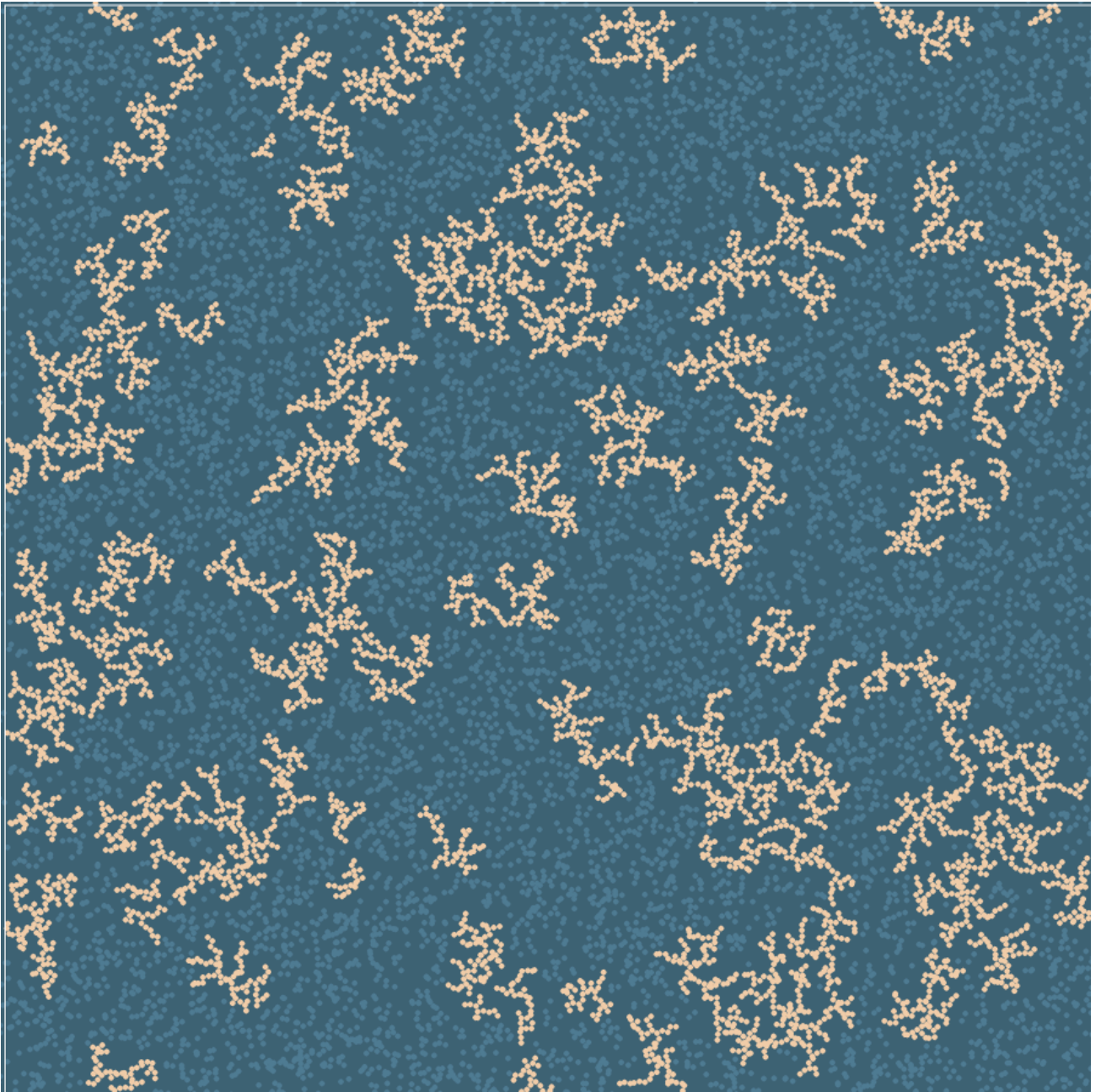
Додаток 9



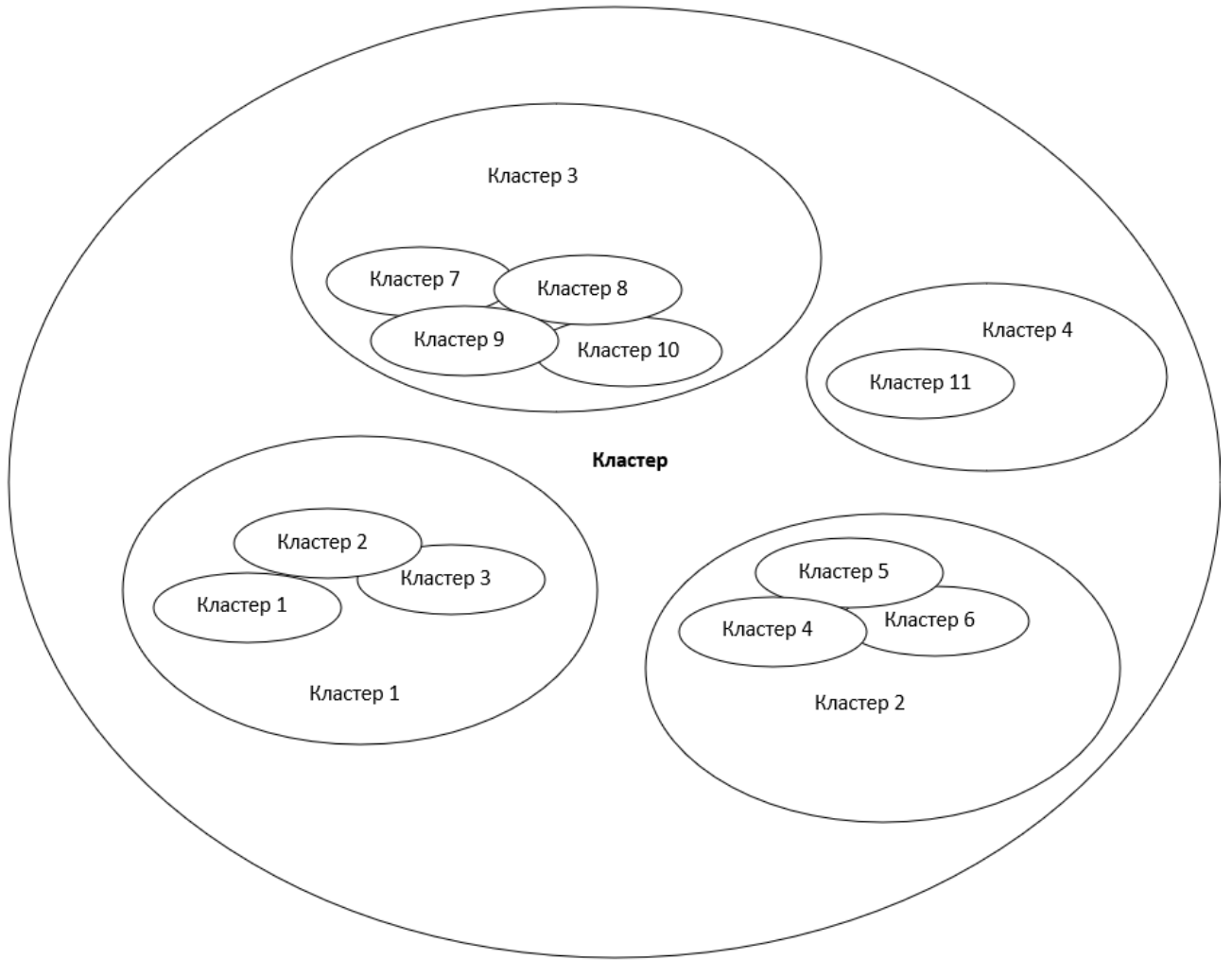
Додаток 10



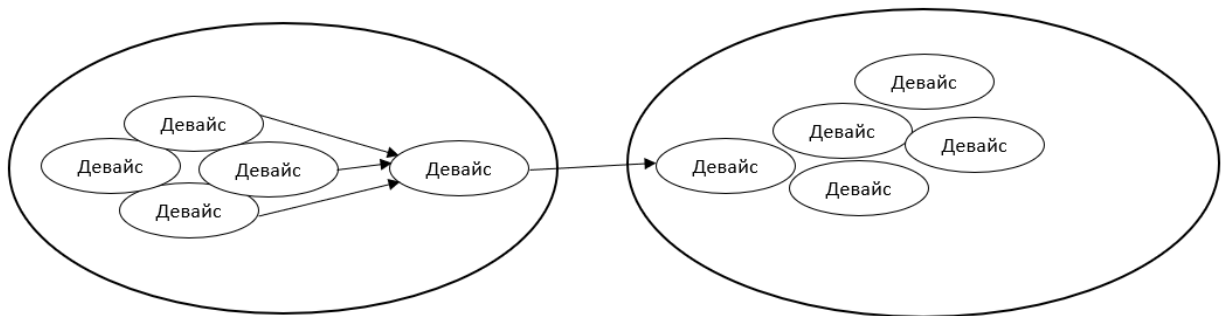
Додаток 11



Додаток 12



Додаток 13



Додаток 14

