

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической кибернетики и компьютерных наук

**РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
ДВУМЕРНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 451 группы
направления 09.03.04 — Программная инженерия
факультета КНиИТ
Павлова Антона Львовича

Научный руководитель

к. т. н., доцент

В. М. Соловьев

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

С. В. Миронов

Саратов 2022

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Клеточный автомат — дискретная модель, изучаемая в различных областях математики, физики, биологии. Основной целью изучения этой модели является алгоритмическая разрешимость различных задач. Благодаря использованию клеточных автоматов возможно изучение и моделирование разнообразных процессов в математике, физическом мире, а также информатике и других прикладных областях науки. Одними из часто используемых и распространенных клеточных автоматов являются двумерные клеточные автоматы. Структура таких автоматов позволяет просто построить их графическое отображение и наблюдать вычисление. Широко изученными являются такие автоматы с квадратной структурой ячеек, зависящие от количества соседних клеток в определенном состоянии, например, автомат фон Неймана, «Conway's Game of Life» и ее разновидности с другими правилами, «Brian's Brain», «Wireworld», также их разновидности, и другие.

Цель бакалаврской работы — является разработка приложения для вычисления клеточных автоматов и графической визуализации некоторых их видов, которое позволит задавать необходимое состояние автомата, его спецификацию, следить за его работой, сохранять и воспроизводить результат.

Поставленная цель определила **следующие задачи:**

- Изучить принципы модели клеточного автомата;
- Создать приложение для вычисления клеточных автоматов;
- Реализовать графическую визуализацию для полученного приложения.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и 5 приложений. Общий объем работы – 73 страницы, из них 61 страница — основное содержание, включая 38 рисунков, список использованных источников информации — 23 наименований.

1 Теоретический материал

1.1 Понятие и определение клеточного автомата

1.1.1 Понятие клеточного автомата

Клеточный автомат — это дискретная динамическая модель, которая состоит из множества элементарных элементов, клеток, которые идентичны между собой, и одинаково и структурированно расположены.

Все множество клеток образуют так называемую решетку (сетку) клеточного автомата. Решетки могут быть разных типов, отличаясь как по размерности, так и по форме. Каждая клетка автомата является простым (конечным) автоматом, математической абстракцией, которая имеет по одному входу и выходу, и в каждый момент времени находится в одном состоянии из множества возможных состояний, а ее состояния определяются состояниями соседних клеток и, возможно, ее собственным состоянием. Для любой клетки определено множество из смежных с ней клеток, с помощью которых определяется ее состояние. Такое множество клеток называется окрестностью. На каждой итерации, используя правила перехода автомата и состояния соседних клеток из окрестности, высчитывается новое состояние каждой клетки. В большинстве типов клеточных автоматов правила преобразования состояния одинаковы для всех клеток и применяются сразу ко всей решетке.

1.2 Виды клеточных автоматов

1.2.1 Классификация по типу сетки

Существует множество различных типов сеток клеточных автоматов. В зависимости от размерности множества клеток, сам клеточный автомат может иметь разную размерность. Так, автоматы могут быть одно-, дву-, трехмерные, и т.д. В простейшем случае используются квадраты в одномерном и двумерном случаях и гиперкубы в многомерных.

Но могут использоваться и другие геометрические фигуры в разных размерностях, например, сетка может быть представлена треугольным паркетом, шестиугольным паркетом.

1.2.2 Тоталистические автоматы

Тоталистическими клеточными автоматами называются автоматы, определение нового состояния которых зависит только от суммы значений состоя-

ний всех клеток из окрестности клетки с ней самой или без нее. Если помимо суммы состояния соседних клеток, состояние клетки зависит также и от ее собственного состояния, такой автомат называется внешним тоталистическим. Примером внешнего тоталистического автомата является «Conway's Game of Life», «Life-like» автоматы, «Wireworld».

1.2.3 Синхронные и асинхронные автоматы

Клеточные автоматы представляют собой распределенную систему параллельно функционирующих объектов.

При синхронной реализации клеточного автомата обычно сначала для каждой из клеток вычисляется новое состояние в соответствии с правилами, значение нового состояния клетки записывается в дополнительное хранилище данных, а затем все новые состояния заменяют старые.

В асинхронной же реализации клетки меняют состояние не одновременно, и порядок, в котором происходит расчет может повлиять на изменение состояния и работу автомата в целом.

1.2.4 Стохастические автоматы

Стохастические клеточные автоматы или вероятностные клеточные автоматы являются отдельным важным классом клеточных автоматов. Правило обновления таких автоматов является стохастическим, то есть новые состояния клеток определяются с помощью какого-либо вероятностного правила. Даже если сами правила перехода состояний автомата являются простыми, при задействовании вероятностного элемента может возникнуть сложное и непредсказуемое поведение сущностей клеточного автомата.

1.3 Двумерные клеточные автоматы

1.3.1 Автомат фон Неймана

В 1940-х известный математик Джон фон Нейман пытался создать гипотетическую самовоспроизводящуюся машину. В результате он создал двумерный клеточный автомат с квадратными клетками, с некоторой окрестностью (окрестностью фон Неймана) и с 29 возможными состояниями для каждой клетки. Фон Нейман предоставил доказательство существования паттерна, который может создавать бесконечные копии самого себя в данной клеточной вселенной и разработал конфигурацию из 200 000 клеток, которая могла бы

это делать. Эта конфигурация известна как универсальный конструктор фон Неймана.

1.3.2 «Conway's Game of Life»

«Conway's Game of Life» («Игра Жизнь») это двумерный клеточный автомат с квадратной сеткой и следующими правилами перехода состояний, которые используют окрестность Мура первого порядка:

- **Правило 1.** Живая клетка с менее чем двумя живыми соседями умирает;
- **Правило 2.** Живая клетка с двумя-тремя живыми соседями остается живой;
- **Правило 3.** Живая клетка с более чем тремя живыми соседями умирает;
- **Правило 4.** Мертвая клетка, имеющая ровно три живых соседа, становится живой клеткой.

1.3.3 «Life-like» автоматы

С момента создания «Conway's Game of Life» были разработаны новые, похожие клеточные автоматы. Их можно выделить в класс «Life-like» автоматов. Такие автоматы удовлетворяют следующим критериям:

- Массив ячеек автомата является двумерным;
- Каждая ячейка автомата имеет два состояния;
- Окрестность каждой ячейки - это окрестность Мура;

Описание правил таких автоматов может быть задано различными способами. Например, для однозначного и исчерпывающего определения «Life-like» автомата правило может быть записано в виде Bu/Sx , где x и y это возрастающая последовательность десятичных цифр, обозначающих, сколько «живых» соседей необходимо для выполнения правила «рождения» (B) или «выживания» (S).

1.3.4 Автомат «Wireworld»

«Wireworld» — это двумерный клеточный автомат, изобретенный Брайаном Сильверманом. «Wireworld» позволяет моделировать электронные логические схемы, а также является полным по Тьюрингу.

Каждая клетка автомата может находиться в одном из четырех различных состояний:

- «пусто» (обычно черный цвет);

- «голова электрона» (обычно синий цвет);
- «хвост электрона» (обычно красный цвет);
- «проводник» (обычно желтый цвет).

1.3.5 Автомат «Brian's Brain»

«Brian's Brain» — это клеточный автомат, разработанный Брайаном Сильверманом, который очень похож на его правило B2/S (Seeds) клеточного автомата «Conway's Game of Life».

«Brian's Brain» состоит из бесконечной двумерной сетки ячеек, но, в отличие от «Seeds», каждая ячейка может находиться в одном из трех состояний: «включено», «умирает» или «выключено». Считается, что каждая ячейка имеет восемь соседей (окрестность Мура), как в «Conway's Game of Life».

2 Практическая часть

Приложение было разработано на языке программирования Python 3 с использованием библиотеки PyQt6, позволяющей использовать фреймворк Qt (используемый для C++) в Python. Также для более эффективного вычисления и хранения данных в массиве используется библиотека Numpy.

PyQt — это набор инструментов, являющийся продуктом библиотеки Qt и языка программирования Python.

Одним из основных классов PyQt является класс QWidget — реализация виджета. Виджеты — это компоненты графического интерфейса и основные строительные блоки пользовательских интерфейсов. Виджет может быть меткой, кнопкой, меню, полем со списком, скроллером, панелью инструментов, диалоговым окном файла и т. д.

Относительный порядок этих виджетов в фрейме приложения определяется и управляется менеджером компоновки.

Точкой входа каждого приложения PyQt является класс QApplication, представляющий само приложение. Он обрабатывает всю инициализацию и отображение элементов.

Всегда существует только один экземпляр QApplication, независимо от количества окон или модальных окон в приложении.

Программный код приложения состоит из двух частей: реализации вычисления клеточных автоматов и описания графического интерфейса.

Реализация клеточных автоматов отделена в отдельные классы и написана только с использованием библиотеки Numpy. Интерфейс обращается к реализации через предоставленные методы и позволяет настраивать параметры и отображать автомат с помощью PyQt.

2.1 Клеточные автоматы

Базовым классом для всех клеточных автоматов в программе является абстрактный класс CellularAutomaton.

Класс GameOfLife реализует все «Life-like» автоматы, включая по умолчанию автомат «Conway's Game of Life». Этот класс является наследником класса CellularAutomaton.

Класс GameOfLifeWithAge реализует вариацию «Life-like» автоматов с отслеживанием количества итераций автомата, в течение которых в клет-

ке постоянно присутствует жизнь. Этот класс является наследником класса `GameOfLife`.

Класс `BriansBrain` является наследником класса `CellularAutomaton`. Помимо «мертвого» и «живого» состояния, в данном автомате есть «умирающее» состояние. Этим состояниям соответствуют черный, белый и красный цвета. Начальными состояниями могут быть только 0 и 1.

Класс `Wireworld` является наследником класса `CellularAutomaton`. Автомат реализует состояния «мертв», «голова электрона», «хвост электрона», «проводник». Им соответствуют черный, синий, красный и желтый цвета.

Класс `Wireworld` является наследником класса `CellularAutomaton`.

2.2 Пользовательский интерфейс

В главном файле приложения `main.py` происходит создание экземпляра приложения Qt, создание окна выбора типа автомата класса `SelectionWindow`, его отображение и запуск цикла приложения.

Класс `SelectionWindow` является виджетом Qt и наследником класса Qt `QWidget`. При его инициализации определяются кнопки выбора типа автомата `QPushButton`, которые помещаются в `QVBoxLayout`, являющийся главным `layout` виджета.

Класс `UniverseView` является наследником класса `QGraphicsView`, который, в свою очередь, является виджетом `QWidget`. `QGraphicsView` является виджетом, отображением графической сцены `QGraphicsScene`, оба этих класса являются частью фреймворка Qt `Graphics View Framework`.

Класс `CellView` реализует отображение одной конкретной клетки автомата и является наследником класса Qt `QGraphicsRectItem`, представляющего графические квадратные объекты, размещаемые на сцене.

Основной класс `ToolBar` представляет собой виджет Qt и является наследником класса `QWidget`. Он является основным классом, представляющим панель инструментов для автоматов, но для автоматов, представленных в приложении, для каждого существует своя вариация панели инструментов. Тем не менее, эти классы не объединены в ООП иерархии, так как в наследовании классов `QWidget` есть некоторые ограничения. Эти классы панелей инструментов называются `ToolBar`, `ToolBarGol`, `ToolBarWireworld`, `ToolBarJvN`.

3 Работа приложения

3.1 Основные возможности

При запуске программы открывается окно выбора типа автомата.

После нажатия на любую из кнопок, открывается окно автомата с панелью инструментов и графическим отображением автомата.

Размер отображения клетки автомата можно менять в диапазоне от 4 до 13. При этом будет сохраняться состояние автомата и размер окна будет автоматически подстраиваться.

Количество строк и столбцов может меняться в диапазоне от 20 до 150. При изменении количества строк или столбцов будет каждый раз обновляться автомат.

Нажатие на кнопку «Clear» ставит все клетки в состояние «мертв». Кнопка «Randomize» с равной вероятностью устанавливает каждую клетку в состояние «жив» или «мертв».

Кнопка «Step» выполняет сразу n количество шагов. Количество шагов, которое выполняется за одно нажатие, можно изменять в поле справа от кнопки. При нажатии на кнопку она становится неактивной, пока процесс просчета и отрисовки не будет закончен.

Ниже кнопки «Step» находятся элементы для работы с режимом непрерывного вычисления состояний автомата. Поле «FPS» отображает количество шагов в секунду, поле «ms» отображает задержку между шагами в миллисекундах. Слайдер ниже позволяет уменьшать или увеличивать количество шагов в секунду. Кнопка «Run» одновременно и запускает, и останавливает режим вычисления.

Кнопка «Choose Automaton Type» позволяет закрыть окно автомата и вернуться к выбору типа автомата.

Кнопки «Open» и «Save» позволяют соответственно открыть диалоговые окна для открытия и сохранения состояния в файл.

Также состояние клеток автомата можно менять вручную, кликнув по клетке. При клике левой кнопкой мыши состояние клетки заменится на состояние, выбранное в панели выбора состояний клетки. При клике правой кнопки мыши клетка всегда устанавливается в состояние «мертва».

3.2 Game Of Life

В панели инструментов клеточного автомата «Game Of Life», если выбран режим фиксированного правила «Fixed Rule», по нажатию на кнопку выпадающего списка, можно выбрать одно из заранее зафиксированных в программе правил.

Чтобы задать свое правило по схеме «B*/S*», необходимо переключить режим выбора правила на «Custom Rule». После этого активируется поле ввода рядом, а выпадающий список будет заблокирован. Необходимо ввести количество соседей для «B» и «S».

Чтобы включить отображение «возраста» клеток, необходимо активировать пункт «With Age».

В режиме «With Age» правило образования клеток не меняется, но если в конкретной клетке состояние «жив» не меняется больше одного шага эволюции, то оттенок цвета отображения клетки начинает меняться в зависимости от количество шагов, в течение которых она живет. Оттенок меняется по схеме HSL в диапазоне от 0 до 239. Соответственно, только образовавшиеся клетки имеют красный цвет, а максимально «старые» имеют синий цвет.

3.3 Brian's Brain

Клетки данного автомата имеют три состояния: «жив», «мертв», «умирает». Этим состояниям соответствуют белый, черный и красный цвета. При генерации случайного начального состояния и используются только состояния клеток «жив» или «мертв».

3.4 Wireworld

Автомат «Wireworld» позволяет симулировать электронные логические компоненты. Его состояниям: «пустой», «голова электрона», «хвост электрона», «проводник» — соответствуют черный, синий, красный и темно-желтый цвета. Так как случайное начальное состояние для этого автомата несет мало практической пользы, кнопка для его инициализации отсутствует и состояния можно задавать только вручную или считав из файла.

В автомате можно реализовать такие элементарные элементы как диод, логический «OR», логический «XOR», логический «AND» и другие.

Кроме этих элементов в автомате «Wireworld» существует большое количество их аналогов и вариаций. Используя эти элементарные элементы и

другие специфические структуры этого автомата, можно реализовывать сложные системы, вплоть до простейших компьютеров.

3.5 Клеточный автомат фон Неймана

Так же как и для «Wireworld», в приложении отсутствует кнопка для инициализации случайного состояния автомата фон Неймана, но вместо этого присутствует обширная панель выбора состояния.

Клеточный автомат фон Неймана создавался как поле для реализации универсального конструктора, самовоспроизводящейся машины. Поэтому он имеет сложную структуру и взаимодействие элементов, позволяя создавать комплексные машины внутри автомата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были изучены принципы модели клеточного автомата, реализовано приложение, рассчитывающее поведение следующих клеточных автоматов: «Conway's Game of Life», а также ее разновидность, отслеживающей время «жизни» клетки, «Brian's Brain», «Wireworld», автомат фон Неймана. Также была реализована графическая часть приложения, предоставляющая возможности сохранять и воспроизводить состояние автомата, редактировать его вручную, задавать правила, отслеживать процесс выполнения автомата.

Данное приложение позволяет, как запускать автомат из сохраненных состояний для демонстрации, так и исследовать поведение из случайного состояния, задавать состояние вручную для изучения конкретных структур. Исходя из этого, приложение можно использовать для обучающих и демонстрационных целей, для исследования поведения автоматов с нестандартными правилами, и даже в развлекательных целях.

Таким образом, были достигнуты поставленная цель и задачи по реализации приложения.

Основные источники информации:

- K, Z. Calculating Space / Z. K. — Cambridge, Mass.: MIT Technical Translation, 1970.
- Gray, L. A Mathematician Looks at Wolfram's New Kind of Science. / L. Gray. — 2003. — Vol. 50. — Pp. 200–211.
- Von Neumann J., B.-A. Theory of self-reproducing automata / B.-A. Von Neumann, J. // Urbana. — 1996.
- Eppstein, D. Growth and decay in life-like cellular automata / D. Eppstein // Springer-Verlag. — 2010.
- Burks, A. Essays on cellular automata. / A. Burks. — Urban, IL: University of Illinois Press, 1970.