

Міністерство освіти і науки України  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВО-МОГИЛЯНСЬКА АКАДЕМІЯ»  
Кафедра мультимедійних систем факультету інформатики

**Аналіз транспортних мереж за допомогою клітинних автоматів**  
**Текстова частина до кваліфікаційної роботи за спеціальністю «Інженерія**  
**програмного забезпечення» - 121**

Керівник курсової роботи

Асистент

Калітовський Б.В.

---

*(підпис)*

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Виконав студент ІІЗ-4

Калінбет В.В.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року

Київ 2024

**Календарний план виконання роботи:**

№	Назва етапу роботи	Термін виконання етапу	Примітка
1.	Отримання теми кваліфікаційної роботи.	19.10.2023	
2.	Дослідження наукових джерел за темою	листопад 2023 р. – березень 2024 р.	
3.	Написання текстової частини роботи	березень - травень 2024 р.	
4.	Створення практичної частини роботи	03.04.2024 – 12.05.2024	
5.	Створення презентації	13.05.2024 – 15.05.2024	
6.	Захист кваліфікаційної роботи	27.05.2024	

Студент Калінбет В. В.

Керівник Калітовський Б.В.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024

## Зміст

Анотація .....	6
Перелік умовних позначень .....	7
Вступ .....	8
<b>1 Розділ 1. Розгляд клітинних автоматів .....</b>	<b>10</b>
1.1 Поняття про клітинні автомати .....	10
1.2 Структура клітинних автоматів .....	10
1.3 Класифікація клітинних автоматів .....	12
1.3.1 Типи клітинних автоматів за Стівеном Вольфрамом .....	12
1.3.2 Стохастичні клітинні автомати .....	13
1.3.3 Асинхронні клітинні автомати .....	13
1.3.4 Блокові клітинні автомати .....	14
1.3.5 Зворотні клітинні автомати .....	14
1.3.6 Клітинні автомати за типами граничних умов .....	14
1.4 Практичне застосування КА .....	15
1.5 Висновки до розділу 1 .....	17
<b>2 Розділ 2. Аналіз транспортних мереж .....</b>	<b>19</b>
2.1 Транспортні мережі .....	19
2.2 Транспортні потоки .....	20
2.2.1 Мікроскопічні параметри транспортних потоків .....	20
2.2.2 Макроскопічні параметри транспортних потоків .....	22
2.2.3 Просторово-часовий графік транспортного потоку .....	24
2.2.4 Фази потоку .....	27
2.2.5 Зв'язок між макроскопічними характеристиками потоку .....	30
2.3 Моделювання транспортних потоків .....	33
2.3.1 Макроскопічні моделі .....	33
2.3.2 Мікроскопічні моделі .....	35
2.4 Висновки до Розділу 2 .....	37
<b>3 Розділ 3. Моделювання транспортних потоків за допомогою клітинних автоматів .....</b>	<b>39</b>
3.1 Проблема дискретизації простору та часу .....	39

3.2	Моделі неперервних транспортних потоків .....	40
3.2.1	Правило 184 .....	40
3.2.2	КА Фукуї-Ісібасі .....	42
3.2.3	Модель Нагеля та Шрекенберга .....	43
3.2.4	Модель зі стоп-сигналами .....	45
3.3	Застосування КА-моделей неперервних потоків в аналізі транспортних мереж .....	47
3.4	Висновки до Розділу 3 .....	48
4	Розділ 4. Інструменти для моделювання в парадигмі клітинних автоматів .....	49
4.1	Постановка задачі.....	49
4.2	Деталі імплементації програмного рішення.....	50
4.3	Керівництво до застосування.....	56
4.3.1	Керівництво до застосування фреймворку .....	57
4.3.2	Керівництво до застосування графічного інтерфейсу.....	60
4.4	Моделювання транспортних потоків за допомогою запропонованих інструментів.....	64
4.4.1	Імплементація Правила 184.....	65
4.4.2	Імплементація моделі Нагеля та Шрекенберга .....	66
4.4.3	Імплементація Моделі зі стоп-сигналами.....	67
4.4.4	Порівняння Моделі Нагеля та Шрекенберга та Моделі зі стоп-сигналами.....	68
4.5	Висновки до Розділу 4 .....	70
	Висновки .....	71
	Список використаних джерел.....	73
	Додаток А.....	76
	Діаграма класів з урахуванням елемента View.....	76
	Додаток Б .....	77
	Графік залежності середньої швидкості відносно часу для Моделі зі стоп-сигналами.....	77
	Додаток В.....	78
	Інтерфейс додатку.....	78



## **Анотація**

У роботі досліджується аналіз неперервних транспортних потоків як важливої складової транспортних мереж. Розглядаються клітинні автомати, як потужний інструмент моделювання складних систем із акцентом на дослідженні їх застосування для побудови моделей транспортних потоків. Виконується розробка програмного рішення для спрощення створення моделей на основі КА для їх подальшого аналізу, реалізується ряд моделей транспортних потоків за допомогою запропонованих інструментів.

В результаті роботи, розроблені інструменти та імплементовані моделі викладено у загальний доступ для використання будь-ким охочим, а на основі реалізації наведених моделей та розгляду релевантної літератури зроблено висновки про специфіку застосування розглянутих моделей.

Робота містить 4 розділи, 25 рисунків, 3 додатки.

Ключові слова: клітинний автомат, неперервний транспортний потік, трафік, модель потоку.

## **Перелік умовних позначень**

КА – клітинний автомат.

ТЗ – транспортний засіб.

## Вступ

Ефективне функціонування транспортних мереж є ключовим фактором у багатьох сферах людської діяльності. Проблеми, пов'язані з заторами, забрудненням повітря, надмірними витратами часу, пов'язані із неоптимальним функціонуванням транспортних мереж торкаються кожного. Для їх вирішення необхідно мати розуміння динаміки роботи транспортних мереж та їх складових, а також мати застосовні моделі для аналізу даних та побудови передбачень.

Клітинні автомати – поширений підхід до моделювання складних систем, що, зокрема, знайшов застосування у сфері аналізу транспортних потоків, привабливість їх використання полягає у простоті визначення їх правил та станів, які, втім, в сукупності, дають складну емерджентну поведінку, яка здатна близько відтворювати цілий ряд реальних складних систем.

У цій роботі досліджується сфера аналізу транспортних мереж із акцентом на транспортних потоках та пропонується програмне рішення для спрощення створення моделей на основі КА.

Об'єктом дослідження є клітинні автомати.

Предметом дослідження є моделі неперервних транспортних потоків на основі КА.

Метою роботи є дослідити використання КА для аналізу транспортних мереж, розробити відповідне програмне рішення для побудови моделей на основі КА для їх подальшого аналізу, реалізувати моделі неперервних транспортних потоків у програмному рішенні.

Робота містить чотири розділи, в першому розглядаються загальні відомості про парадигму клітинних автоматів, в другому - аналіз транспортних мереж з акцентом на розгляді неперервних транспортних потоків, в третьому досліджується застосування клітинних автоматів до їх



моделювання, а в четвертому пропонується програмне рішення для побудови моделей в парадигмі клітинних автоматів та розглядається його застосування на прикладі досліджених моделей.

## **1 Розділ 1. Розгляд клітинних автоматів**

В цьому розділі буде розглянуто загальну інформацію про клітинні автомати, їх історію, складові частини, класифікацію та області застосування.

### **1.1 Поняття про клітинні автомати**

Клітинний автомат – це модель обчислення, що базується на дискретному розділі простору та часу на, відповідно, клітини та часові кроки. Кожна клітина автомату перебуває у певному стані, що змінюється із покроковим плином часу в залежності від станів клітин у визначеному околі даної.

Першими клітинні автомати запропонували та розглянули Джон фон Нейман та Станіслав Улям під час спільної роботи у національній лабораторії Лос-Аламос у США в 1940-их роках. Академічна робота в цьому напрямку продовжувалася в 50-их та 60-их роках, хоч і не завжди під назвою «клітинні автомати». Втім, інтерес до них залишався обмеженим до публікації в жовтні 1970 р. «Гри життя» Джона Конвея в журналі «Scientific American», що продемонструвала широкому загалу комплексний потенціал в простих правилах еволюції у дискретному світі КА. В 1980-их фізик Стівен Вольфрам опублікував перше систематичне дослідження клітинних автоматів, а якому сфокусувався на одновимірних КА. Пізніше було доведено, що правило 110 Вольфрама та «Гра життя» Конвея є Тюрінг-повними. [1]

### **1.2 Структура клітинних автоматів**

Основними структурними елементами клітинних автоматів, оперуючи котрими зручно проводити їх подальшу класифікацію, є простір КА, його поділ, стани клітин автомату, окіл клітини в автоматі та правило переходу стану для клітин.

Пропонуємо детальніше розглянути кожне із них.

## 1. Простір КА, його поділ.

Під поділом простору необхідно розуміти характеристику форми решітки та форми клітин автомату. Решітка може бути як одновимірною, так і набувати більшої кількості вимірів. Типово, розглядають рівні за розміром клітини, які можуть набувати різних геометричних форм (квадратної, шестикутної, трикутної/ізометричної). Решітка, що складає автомат, може вважатися як скінченною, так і нескінченною. Важливим питанням, що виникає на практиці для майже будь-яких КА є визначення граничних умов для решітки, її топології.

## 2. Стани клітин.

Кожна клітина автомату має перебувати у одному зі станів із певної визначеної їх множини. Загальну комбінацію станів всіх клітин автомату на певному кроці часу називають його конфігурацією.

## 3. Окіл клітини.

Для кожної клітини визначається окіл, певна множина клітин, стан котрих враховується при застосуванні правила переходу до даної клітини. Типово, розмір околу один для всіх клітин у автоматі, в найпростішому варіанті, для одновимірної решітки, околom певної клітини можуть вважатися її лівий та правий сусіди або ж лише один із них. При тому, сама клітина не обов'язково входить у свій окіл. На двовимірних квадратних решітках часто розглядають два типи околів: фон Неймана та Мура. В перший входить сама клітина та її верхній, нижній, лівий та правий сусіди. У визначення другого також додаються діагональні сусіди клітини.

## 4. Правило переходу стану.

Правило переходу станів – функція, що застосовується до околу клітини для визначення стану клітини на наступному часовому кроці. [2][3]

## 1.3 Класифікація клітинних автоматів

### 1.3.1 Типи клітинних автоматів за Стівеном Вольфрамом

Першопроходьцем у питанні класифікації поведінки клітинних автоматів є Стівен Вольфрам, який у декількох своїх працях, починаючи в 1980-тих роках, ретельно дослідив одновимірні клітинні автомати, де клітини знаходяться у множині станів  $\{0, 1\}$ , і окіл клітини складається із неї самої та двох її безпосередніх сусідів. Ці КА отримали назву «елементарні». Для визначених множин станів клітин та її околу можливі 8 конфігурацій станів клітин в околі, кожен із яких має співвідноситися із новим станом клітини для утворення функції переходу, що породжує  $2^8 = 256$  можливих правил, за кожним з котрих Вольфрам дослідив еволюцію КА. Базуючись на своїх спостереженнях, він запропонував чотири класи КА:

1. Такі, які при майже всіх початкових конфігураціях швидко еволюціонують у стабільні та однорідні конфігурації, втрачаючи будь-яку можливу випадковість наявну в початкових умовах.
2. Такі, які при майже всіх початкових конфігураціях швидко еволюціонують в стабільні періодичні конфігурації, зміни до початкової конфігурації в них зазвичай залишаються локальними.
3. Такі, які при майже всіх початкових конфігураціях змінюються у хаотичний, схожий на випадковий спосіб, локальні зміни до початкової конфігурації в таких КА зазвичай значно впливають на його глобальну конфігурацію.
4. Такі, які при майже всіх початкових конфігураціях змінюються у складний, певним чином хаотичний спосіб, але із утворенням локальних структур, що довгий час простежуються у конфігурації та можуть вступати у складну взаємодію одна із одною.

Варто зазначити, що чітко визначити приналежність КА до певного із запропонованих класів неможливо. Навіть класифікація КА за більш

строго визначеними класами було показано як алгоритмічно невирішувану задачу.

### **1.3.2 Стохастичні клітинні автомати**

Згадані вище «Гра життя» Конвея та елементарні клітинні автомати, розглянуті Вольфрамом, у типових своїх варіантах еволюціонують у детермінований, хоч і подібний на хаотичний спосіб. Втім, широко розглядаються та застосовуються клітинні автомати, що інкорпорують елемент випадковості у правило переходу станів, такі КА називають стохастичними. Стохастичні автомати часто застосовують для моделювання складних систем, використовуючи ймовірнісний фактор як інструмент абстрагування від деяких вхідних параметрів, правильне моделювання яких може бути занадто складним як концептуально, так і обчислювально.

### **1.3.3 Асинхронні клітинні автомати**

Типовий для більшості клітинних автоматів спосіб оновлення решітки – паралельне синхронне оновлення станів кожної клітини. Це простий та обчислювально вигідний, швидкий спосіб застосування функції переходу до клітини, який є можливим через природу більшості клітинних автоматів, в яких стан клітини у конфігурації на наступному часовому кроці залежить виключно від її околу на поточному. В такому випадку маємо всю необхідну інформацію для незалежного обчислення стану кожної окремої клітини і можемо легко застосувати паралелізацію.

Тим не менш, для моделювання деяких, до прикладу - біологічних, процесів синхронна природа застосування правила переходу є обмеженням до набуття бажаних, близьких до природних, результатів, тож виник окремий тип КА, в яких функція переходу застосовується не одразу до всіх клітини, а у певному, часто випадковому, порядку. Так, стан

оновленої клітини стає її актуальним станом в околах інших клітин, до котрих ще не було застосовано функції переходу.

### **1.3.4 Блокові клітинні автомати**

Блокові клітинні автомати є особливим типом КА, перехід станів клітин в якому відбувається за правилом визначеним для цілих множин – блоків – клітин, що не перетинаються, при тому для кожного часового кроку визначено правило зміни блоку для забезпечення взаємодії всіх клітин на решітці, а оновлення блоків є синхронним та одночасним. Блоки, на які розбивається решітка мають бути рівними у розмірі та формі. Блокові клітинні автомати можливо моделювати класичним підходами КА через розширення множини станів та околів клітин.

### **1.3.5 Зворотні клітинні автомати**

Зворотними клітинними автоматами називають такі, що для кожної конфігурації такого автомату існує одна та лише одна конфігурація, що на наступному часовому кроці призводить до даної. Для зворотного автомату завжди можна визначити автомат, що еволюціонуватиме в оберненому порядку конфігурацій. Існують методи створення правил, що дозволяють визначати зворотні КА, втім, визначення того, чи є довільно заданий, більш, ніж одновимірний, клітинний автомат зворотним є алгоритмічно невирішуваною задачею.

### **1.3.6 Клітинні автомати за типами граничних умов**

Клітинні автомати як математичні конструкти часто задають на решітках необмеженої величини, але практичні симуляції запропонованих моделей вимушені стикатися із очевидним лімітом обчислювальних спроможностей, що призводить до необхідності визначення поведінки клітин, окіл яких обмежений гранями решітки.

Одним із класичних способів знаходження околу для таких клітин є застосування періодичних граничних умов, що у випадку із двовимірною решіткою призводить до утворення нею тора.

Розглядають також інші граничні умови, серед них випадкові – такі, що для клітин, котрим не вистачає сусідів для формування околу його доповнюють клітинами у випадковому стані, іноді із наданням станам ймовірності їх отримання такими додатковими клітинами в залежності від ймовірності існування клітини в такому стані в КА або ймовірності продукування такого стану правилами КА.

Ще одним підходом до вирішення питання граничних умов є застосування клітини із фіксованим станом для доповнення околів клітин, що цього потребують.

Також існує null boundary conditions підхід, що передбачає втрату інформації та зменшення решітки з плином часу. При цьому підході клітини із неповним околom прибирають із решітки на кожному наступному кроці. [3][4][5]

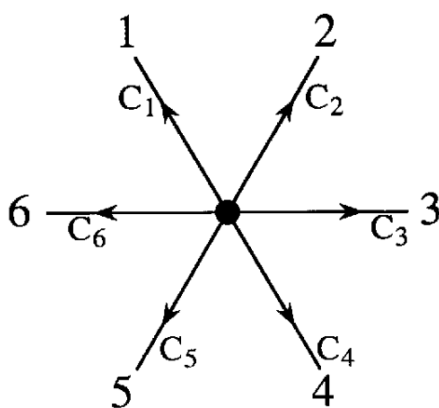
#### **1.4 Практичне застосування КА**

Клітинним автоматам знайдено велику кількість застосувань, від моделювання біологічних, фізичних, хімічних процесів, до генерування музики та мап у відеоіграх, на базі клітинних автоматів запропоновано архітектури процесорів, їм знайдено застосування у криптографії для імплементації односторонніх функцій. Крім того, особливо актуальною для теми даного дослідження областю використання КА є статистична механіка, де їх застосовують для моделювання гідроаеродинамічних процесів та фазових переходів у речовинах.

Одним із типів моделей, які були застосовані у статистичній механіці є Lattice gas automata, за допомогою якої успішно моделюють поведінку газів за рівнянням Нав'є-Стокса.

Прикладом Lattice gas automata моделі може слугувати FHP (Frisch, Hasslacher, Pomeau) модель, яка використовує клітинний автомат із двовимірною решіткою поділеною на рівні трикутники, де клітини зручно уявляти вершинами цих трикутників, а околom множину вершин шестикутника, утвореного трикутниками, спільною вершиною котрих є дана клітина. Множина станів клітин моделі може бути характеризуванa наступним чином:

- а) кожна клітина автомату може бути зайнята частинками газу, або ж бути вільною;
- б) кожна частинка газу має швидкість, направлену в бік одного із сусідів клітини;



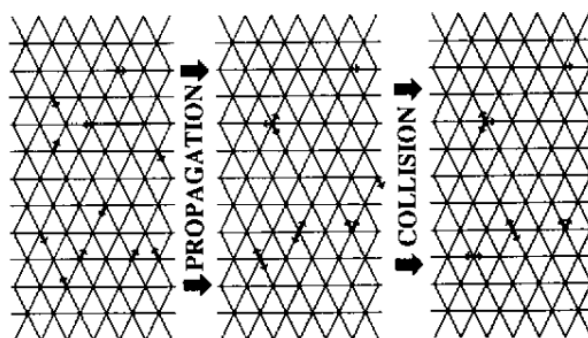
*Рис. 1 Зображення можливих напрямлень векторів швидкості частинки газу в моделі FHP.*

- в) декілька часток можуть перебувати в одній із клітин решітки, при тому вводиться обмеження, що не дозволяє в одній клітині решітки одночасно перебувати двом частинкам, із одним напрямком вектору швидкості.



Для моделі визначаються правила обробки колізій (станів, в яких декілька часток знаходяться в одній клітині), що слідує закону збереження маси (кількості частинок) та імпульсу для отримання фізично релевантних результатів.

Оновлення конфігурації КА для кожного часового кроку відбувається у двох фазах: пересування (propagation) та колізії (collision). На першій, частинки пересуваються до наступної клітини у відповідності із напрямком свого вектору швидкості. На другій, застосовуються правила обробки колізій. Ці фази повторюються кожний часовий крок.



*Рис. 2 Зображення фаз оновлення КА в FHP моделі.*

Із отриманих конфігурацій FHP моделі можна вираховувати макроскопічні виміри густини, швидкості, імпульсу у системі, релевантні для опису течії газу або рідини. [5][6][7]

## **1.5 Висновки до розділу 1**

В цьому розділі було розглянуто історію, структуру та класифікацію клітинних автоматів, описано деякі області їх практичного застосування та наведено FHP модель, як один із прикладів успішного практичного застосування парадигми КА для моделювання фізичних процесів, який показує її гнучкість та застосовність до моделювання складних систем і

служить демонстрацією потенційної практичної користі її подальшого застосування то розвитку. В наступному розділі переходимо до аналізу транспортних мереж.

## **2 Розділ 2. Аналіз транспортних мереж.**

В цьому розділі буде розглянуто загальну інформацію про аналіз транспортних мереж із фокусом на аналізі неперервних автомобільних потоків, як важливої складової дисципліни аналізу транспортних мереж.

### **2.1 Транспортні мережі**

Транспортні мережі – один із об'єктів дослідження науки про мережі, яка займається вивченням різного типу складних систем, що можна представити у вигляді графів із різною топологією. Однією із основних цілей науки про мережі є створення прикладних моделей таких систем, в множину котрих входять і транспортні системи. [8][9]

Транспортні мережі охоплюють широкий спектр різноманітних складних систем, де відбувається переміщення вантажів, пасажирів, товарів та транспортних засобів. Це можуть бути мережі аеропортів, автодоріг, залізниць, трубопроводів, громадського транспорту, морських портів, а також будь-які комбінації цих та інших видів мереж.

Математичним представленням транспортних мереж є просторовий граф. Особливістю цієї моделі є те, що із кожним ребром асоційована певна множина характеристик, що визначають «ціну» цього ребра, важливу для моделювання процесів, що відбуваються у даній мережі. В якості такої «ціни» можна розглядати фізичну відстань між вершинами з'єднаними цим ребром, або ж час, що витрачається на перехід по даному ребру. Загально, такі графи обмежені певними геометричними характеристиками та інкорпують географічну інформацію про об'єкти моделі, що представлені ребрами та вершинами цього графу. [10]

При розгляді автомобільних мереж, як підтипу транспортних, вершинами такого графу можна представляти перехрестя, початкові та кінцеві точки

подорожей, з'їзди з магістральних автодоріг, мости, перетини з іншими транспортними мережами.

Ребрами ж можна вважати дороги та вулиці, що з'єднують ці вершини. У кожного ребра є своя множина характеристик, що впливає на рух по ньому: його довжина та ширина, правила дорожнього руху, зокрема, обмеження швидкості, кількість смуг на дорозі, тощо.

Для успішного моделювання транспортних мереж за допомогою просторових графів, необхідно мати застосовні моделі для опису поведінки системи як у вершинах цього графу, так і на його ребрах.

Надалі, ми фокусуємося на розгляді аналізу та моделювання неперервних автомобільних потоків, як важливого аспекту моделювання одного із найпоширеніших типів транспортних мереж саме на ребрах його графу.

## **2.2 Транспортні потоки**

Транспортні потоки – це рух транспортних засобів відповідною інфраструктурою. Вивчення транспортних потоків передбачає пошук математичних способів описати взаємодію між транспортом, зокрема автомобільним, його операторами (водіями, тощо), що складають мобільну компоненту потоку, та інфраструктурою: мережею доріг, дорожніми знаками, розміткою, інструментами контролю (до прикладу, світлофорами), що складає немобільну компоненту взаємодії.

### **2.2.1 Мікроскопічні параметри транспортних потоків**

Мобільна компонента транспортних потоків складається з індивідуальних транспортних засобів та їх водіїв, чия взаємодія один з одним та немобільною компонентною в спільності визначає загальну динаміку транспортного потоку, тож важливо розглядати певні значення, що характеризують кожного окремого учасника потоку – мікроскопічні параметри.

У виборі множини параметрів для розгляду полягає певна складність, адже врахування всіх аспектів, що впливають на поведінку водіїв та транспортних засобів у потоці може виявитися непрактично складною задачею, тому при аналізі потоків зазвичай враховують доволі обмежену множину параметрів, відкидаючи решту фізичних та психологічних факторів, що впливають на зв'язку водій-транспортний засіб.

Пропонуємо огляд набору мікроскопічних параметрів, що часто використовують для аналізу транспортних потоків.

- a) Довжина транспортного засобу ( $l_i$ ).
- b) Позиція в відносно початку потоку ( $x_i$ ).
- c) Швидкість:  $v_i = \frac{dx_i}{dt}$ .
- d) Прискорення:  $a_i = \frac{dv_i}{dt}$
- e) Часові інтервали – виміри часу, що розділяють два послідовні транспортні засоби у потоці. При аналізі транспортних потоків, зазвичай використовують два типи часових інтервалів: Headway ( $h_i$ ) та Gap ( $g_i$ ), що називатимемо, відповідно, «позиційним» та «проміжковим» інтервалами. Headway, або ж позиційний інтервал – це проміжок часу, що проходить між тим як передній бампер передуючого транспортного засобу перетинає визначену точку дороги та тим, як цю ж точку перетинає передній бампер наступного. Gap, або ж проміжковий інтервал – це проміжок часу, що проходить між тим як передуючий транспортний засіб покидає визначену точку дороги та наступний її займає. Інакшими словами, це проміжок часу між тим, як задній бампер переднього та передній бампер наступного транспортного засобу проходять визначену точку дороги.

f) Просторові інтервали – виміри відстані, що розділяють два послідовні транспортні засоби у потоці. Зазвичай використовують два типи просторових інтервалів, що визначаються аналогічно часовим, їх теж називатимемо «позиційним» та «проміжковим» (Spacing ( $s_i$ ) та Clearance ( $c_i$ ) відповідно). Позиційний просторовий інтервал – добуток швидкості (самого транспортного засобу) та позиційного часового інтервалу, проміжковий – відповідно швидкості та проміжкового часового інтервалу.

$$s_i = v_i \cdot h_i$$

$$c_i = v_i \cdot g_i$$

Інтервальні виміри часто застосовують для характеризування позиції транспортного засобу як відносно передуючих йому, так і відносно попередніх.

### 2.2.2 Макроскопічні параметри транспортних потоків

Для характеризування транспортних потоків в цілому використовують ряд сукупних характеристик, що називають макроскопічними.

а) Середня швидкість потоку.

Переважно, в певний момент часу, швидкість кожного транспортного засобу на дорозі дещо відрізнятиметься від його сусідів, тож для характеризування транспортних потоків використовують середню швидкість учасників потоку.

Зазвичай розглядають середню швидкість всіх транспортних засобів у певній площині чи зоні дослідження, найчастіше на протязі певного відрізка дороги (*space-mean speed*,  $v_s$ ), що визначають як:

$$v_s = \frac{L}{t_{average}}, \text{ де } L - \text{довжина досліджуваного відрізка дороги, а}$$

$t_{average}$  – середній час необхідний транспорту на подолання цього відрізка. Глен Уордроп продемонстрував, що  $v_s$  також можна

знаходити як середнє гармонійне швидкостей виміряних у певній точці досліджуваної ділянки дороги.

$$v_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}}$$

Знайдені цими способами значення будуть рівні за припущення, що швидкості транспортних засобів на решті протягу досліджуваного відрізка дороги не відрізнятимуться від швидкості в обраній точці для виміру, інакше, значення отримане через середнє гармонійне швидкостей буде трохи вищим за отримане через середній час подорожі відрізком, через надання більшої ваги швидшим машинам, і, відповідно, нижчої повільнішим.

- b) Інтенсивність, або об'єм потоку ( $q$ ) – кількість транспортних засобів, що проїжджає певну визначену точку за фіксований інтервал часу.

$$q = \frac{N}{T}$$

Де  $N$  – кількість машин, а  $T$  – інтервал часу.

Порахувавши кількість авто, що перетнуть певний відрізок дороги за хвилину, знайдемо інтенсивність потоку на хвилину на даній точці дороги. Характеризує темп руху транспортних засобів дорогою.

Інтенсивність потоку обернено пропорційна середньому позиційному часовому інтервалу  $N$  машин для точки дороги, яку перетне передуюча машина групи через час, рівний своєму позиційному часовому інтервалу:

$$q = \frac{1}{h_{average}}$$

Де  $h_{average}$  – середнє арифметичне  $h$  для досліджуваної групи з  $N$  машин.

- c) Щільність ( $k$ ) – це кількість транспортних засобів, присутніх на певному проміжку дороги:

$k = \frac{N}{L}$  Де  $L$  – довжина відрізка дороги.

Зазвичай вимірюється у кількості авто на кілометр. Висока щільність означає, що транспортні засоби знаходяться на дуже малій відстані один від одного, низька ж значить велику дистанцію між ними.

Щільність обернено пропорційна середньому позиційному просторовому інтервалу  $N$  машин для відрізка дороги від початкової до кінцевої машини досліджуваної групи:

$$k = \frac{1}{s_{average}}$$

Де  $s_{average}$  – середнє арифметичне  $s$  для досліджуваної групи з  $N$  машин. [11] [12] [13]

### 2.2.3 Просторово-часовий графік транспортного потоку

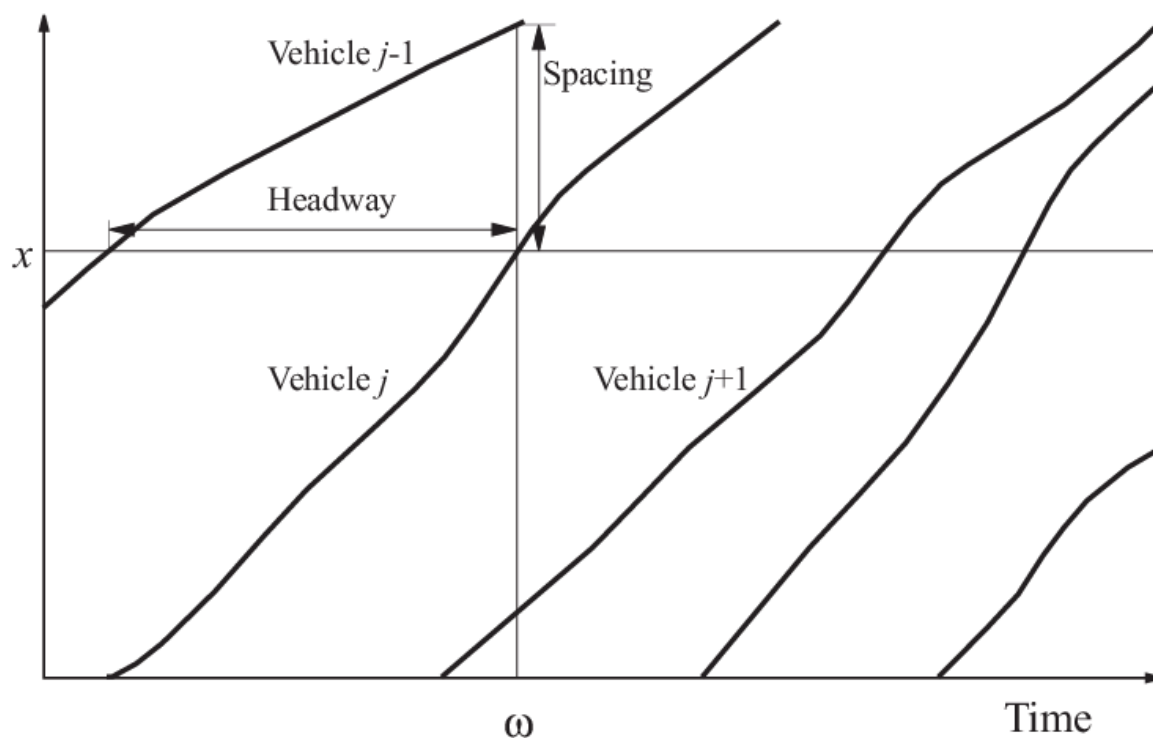
Одним із поширених типів зображення транспортних потоків для їх аналізу та дослідження є застосування просторово-часових графіків, що зображують траєкторії руху транспортних засобів певним відрізком дороги відносно досліджуваного проміжку часу.

На просторово-часових графіках одна вісь відображає час, інша – відстань транспортного засобу від обраної точки дороги. Кожна лінія на графіку – траєкторія руху одного транспортного засобу досліджуваним відрізком дороги. Перетин однієї лінії іншою зазвичай означає обгін одного транспортного засобу іншим (втім, може бути і зіткненням), зникнення лінії із графіку – припинення пересування відстежуваного транспортного засобу досліджуваним відрізком дороги, у випадках, коли вимірюється рух однією зі смуг багатосмугової дороги, може йтися про зміну смуг водієм, тоді, у разі повернення водія у потік транспортну на досліджуваній смузі можемо побачити появу нової лінії на графіку. Так само виглядатиме



поява нових учасників руху у потоці в наслідок приєднання із різного типу вершин графу транспортної мережі.

Position



*Рис. 3 Приклад просторово-часового графіку.*

Кутовий коефіцієнт прямої на графіку – це швидкість транспортного засобу. Вигнуті проміжки прямих означають, що в цей час транспортний засіб мав відмінне від нуля прискорення.

Користь просторово-часових графіків для дисципліни аналізу транспортних потоків полягає у простоті зображення за їх допомогою різного роду утворень та процесів, притаманних транспортним потокам. Так, на просторово-часовому графіку легко побачити і відстежити у часі утворення зон зі зниженою середньою швидкістю пересування, підвищеною щільністю, скороченими інтервалами між транспортними засобами. На них очевидні «ударні хвилі» - масові зміни в характеристиках руху транспортних засобів у потоці через зміну умов для

одного чи декількох передуючих решті, що поширюються подібно до ударних хвиль у речовині. Так, при зниженні швидкості одного передуючого транспортного засобу, через будь-який ряд причин, якщо наступний за ним транспортний засіб знаходиться на достатньо малому інтервалі від нього, задля уникнення зіткнення водій попереднього транспортного засобу буде змушений реагувати зниженням швидкості. Така взаємодія між учасниками потоку при достатньо високій щільності може призводити до утворення широкої зони зі зниженою середньою швидкістю руху дорогою, що просторово-часовому графіку виглядає як щільне групування проміжків прямих із помітним зниженням кутового коефіцієнта кожної на цих проміжках. Зворотні процеси також гарно зображуються на просторово-часових графіках. [13]

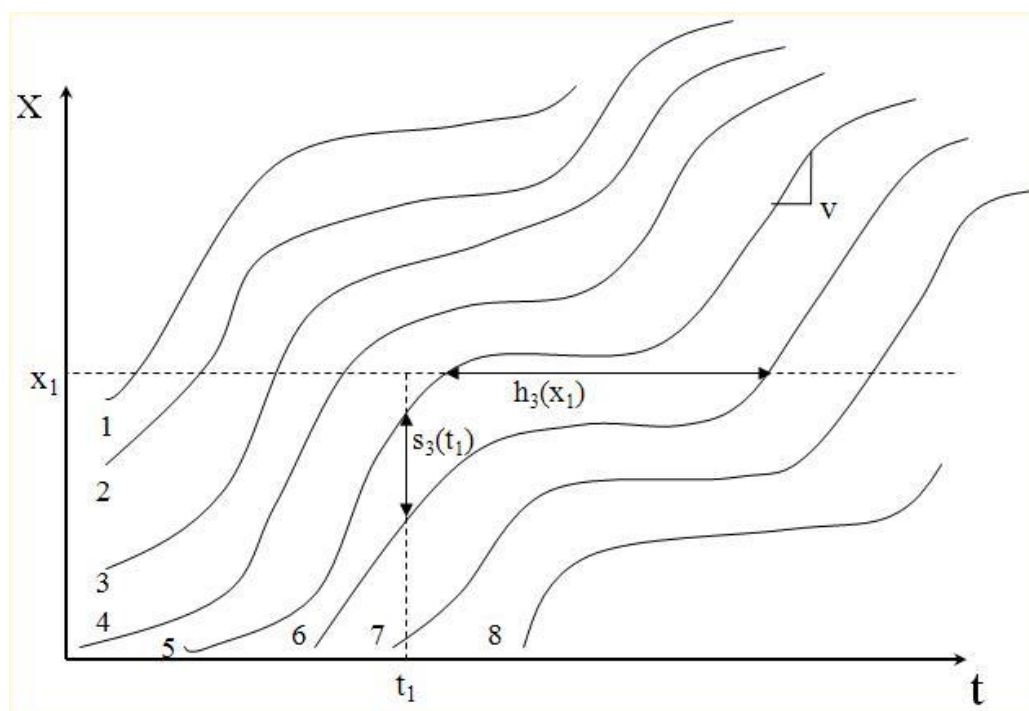


Рис. 4 Приклад формування затору за транспортним засобом №1 на просторово-часовій [діаграмі](#).

#### 2.2.4 Фази потоку

Аналізуючи транспортні потоки розділяють декілька станів, в яких може перебувати потік, такі стани називають режимами або фазами транспортного потоку.

Кожна фаза потоку характеризується певним набором унікальних властивостей, їх класифікація базується на макроскопічних характеристиках потоку (щільність, інтенсивність, середня швидкість, тощо).

Традиційно виділяють фазу вільного та перевантаженого трафіка, втім, також існує теорія трьох фаз у потоці, розроблена Борисом Кернером, за якою виділяють дві фази із традиційного режиму перевантаженого трафіка. Для всіх теорій важливим аспектом є аналіз поведінки потоку близько найвищого значення інтенсивності, як найоптимальнішого і бажаного для вищого пасажиро- та вантажообігу стану транспортного потоку.

Розглянемо певні феноменологічні характеристики фаз потоків [12].

##### а) Фаза вільного трафіка

При ненавантаженій інфраструктурі, транспорт може вільно рухатися на бажаній швидкості, через те, що учасники руху не заважають одне-одному, а у разі зустрічі із повільнішим передуючим транспортним засобом мають можливість його обігнати.

Швидкість машин у такому потоці зазвичай обмежена лише фізичними характеристиками машин та, у більшості випадків, обмеженнями швидкості накладеними регуляторними органами відповідних юрисдикцій.

Акцентують увагу на *середній швидкості потоку* для певної дороги у *фазі вільного трафіку* (*free-flow speed,  $v_{ff}$* ) – це максимальна можлива середня швидкість транспортних засобів на досліджуваній ділянці.

Вільний трафік можливий лише при низькій щільності потоку, тобто із високими інтервалами між машинами, що дозволяє маленьким локальним коливанням у динаміці руху транспортних засобів не перетворюватися на глобальні зміни у динаміці потоку через поширення «ударних хвиль», тому потік у фазі вільного трафіка називають *стабільним*.

#### б) Фаза потоку максимальної інтенсивності

При збільшенні щільності транспортні засоби знаходитимуться на все менших інтервалах відносно один одного у потоці. Спостерігаючи за певною точкою дороги, зі збільшенням щільності потоку бачимо і підвищення кількості машин, що дану точку перетинають, тобто підвищення інтенсивності потоку.

При тому, в певний момент часу, буде досягнута *максимальна інтенсивність потоку* (*capacity flow,  $q_c$* ), можлива за даних інфраструктурних та регуляторних обмежень.

За максимальної інтенсивності, знаємо, що середній часовий проміжковий інтервал між машинами – мінімальний, за таких умов спостерігається формування локальних щільних груп транспортних засобів, що рухаються із *середньою швидкістю максимальної інтенсивності* (*capacity-flow speed,  $v_c$* ).

У таких групах, що мають в своєму складі машини із неоптимально низькими інтервалами, уповільнення руху однієї машини у групі може призвести до каскадного ефекту уповільнення («ударної хвилі») із перебільшеним гальмуванням в результаті реакції решти водіїв, через

це трафік у фазі потоку максимальної інтенсивності характеризують як *нестабільний*.

### с) Фаза перевантаженого трафіка

При подальшому збільшенні кількості транспортних засобів на дорозі, каскадне уповільнення руху в рамках певних локальних груп часто переростає у каскадний ефект уповільнення всього досліджуваного потоку, що призводить до зменшення його інтенсивності, такий трафік називають *перевантаженим*.

Щільність за котрої відбувається перехід до перевантаженого трафіка називають *критичною щільністю* ( $k_c$ ).

Вищі значення щільності мають тенденцію призводити до погіршення характеристик транспортного потоку, з'являється явище змінної зупинки та початку руху (stop-and-go traffic), що також поширюється потоком подібно хвилям в речовині. При досягненні достатньо високої щільності ( $k_j$ ), виникає затор, цей показник називають *щільністю виникнення заторів* (jam density).

За теорією трьох фаз потоку, фазу перевантаженого трафіка розбивають на дві інші: фазу синхронізованого потоку та фазу широкого рухомого затору. Це розбиття базується на спостереженні в емпіричних даних, що при високих щільностях потоки демонструють складну поведінку, і не завжди формуються затори, які призводять до серйозного зниження інтенсивності потоку або зупинки значної його частини на тривалий час. Те, коли це все ж відбувається винесено до фази широкого рухомого затору. Натомість, можливий стан, коли потік із великою щільністю все ж рухається із достатньо високою інтенсивністю (хоч і нижчою за максимальну), а швидкість його учасників залишається відносно високою, водночас синхронізуючись до певного вузького

проміжку значень, це стало ґрунтом для виділення такого стану в окрему фазу синхронізованого потоку. [12]

### 2.2.5 Зв'язок між макроскопічними характеристиками потоку

Розглянуті макроскопічні характеристики транспортного потоку, а саме щільність, середня швидкість та інтенсивність пов'язані розробленим Джоном Гленом Уордропом у 1952 р. рівнянням, що набуло назви «fundamental relation of traffic flow» [11]:

$$q = k \cdot v_s$$

Воно побудоване на декількох припущеннях, що не обов'язково виконуються для будь-якого транспортного потоку. Це призводить до того, що не в усіх умовах (особливо при перевантаженому трафіку) з рівняння можна отримати правильні значення для шуканих величин.

Спроби показати чіткий математичний зв'язок між інтенсивністю, середньою швидкістю та щільністю потоку тривають ще з 1930 років.

Першою такою спробою вважають роботу Брюса Гріншилдса, який в 1935 р., базуючись на невеликому емпіричному дослідженні запропонував лінійну залежність між щільністю за середньою швидкістю у потоці.

На основі його пропозиції виник перший вид так званих «фундаментальних діаграм», що часто використовують для аналізу даних про транспортні потоки, йдеться про діаграму, що демонструє кореляцію між середньою швидкістю та щільністю потоку.

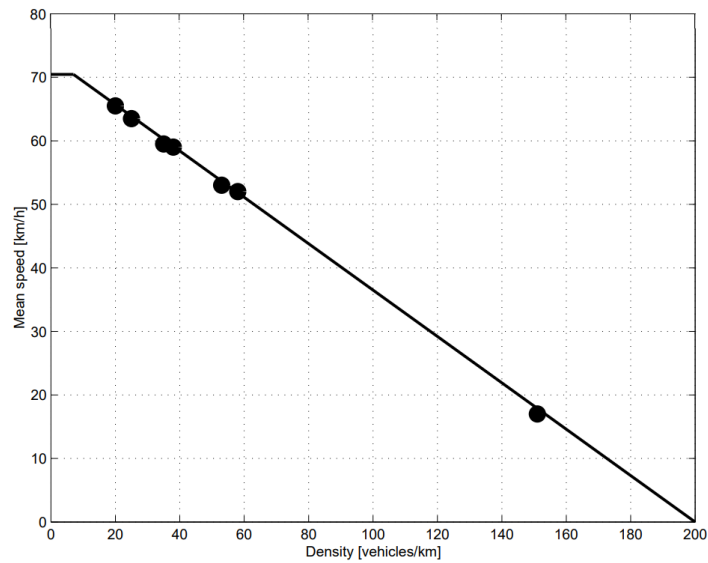


Рис. 5 Фундаментальна діаграма типу щільність-швидкість заснована на даних та гіпотезі Гріншилдса.

Пізніше, Лайтхілл, Вітем і Річардс (Lighthill, Whitham and Richards) запропонували власну теорію взаємодії макроскопічних характеристик, засновану на гіпотезі, що інтенсивність є функцією щільності та існує крива, що показує таку залежність, і, таким чином, використовуючи рівняння Уордропса зв'язали швидкість та інтенсивність.

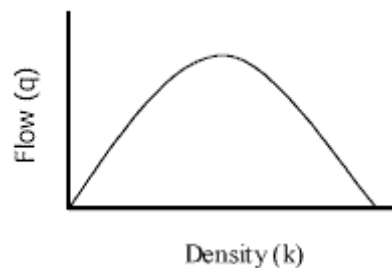


Рис. 6 Фундаментальна діаграма типу щільність-інтенсивність

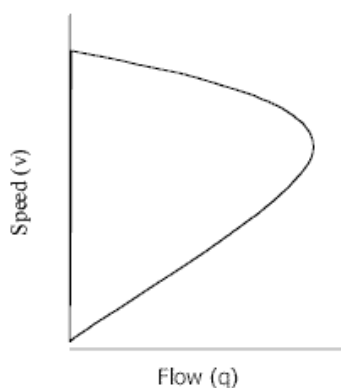


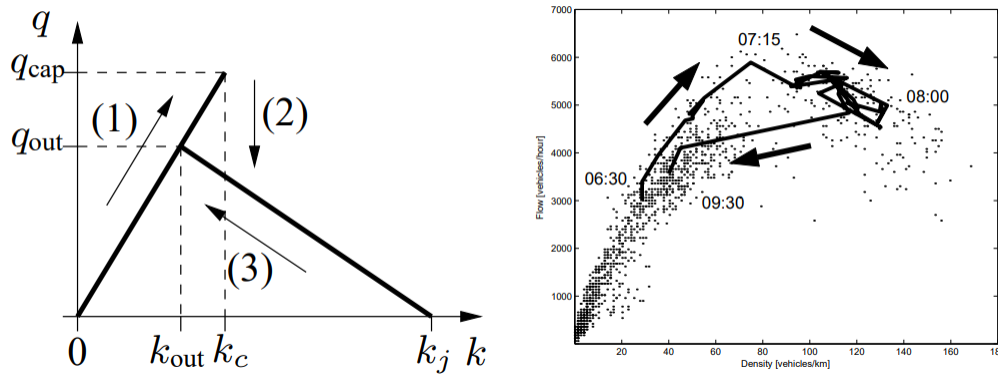
Рис. 7 Фундаментальна діаграма типу швидкість-інтенсивність.

В науковій літературі пропонуються різні форми зображених на графіках кривих, але справедливо стверджувати, що жодна не є точним відображенням емпіричних даних, втім на графіках зручно зображувати реальні, важливі для аналізу транспортних потоків пов'язані феномени, описані в секції 2.2.4. Так, на фундаментальній діаграмі типу щільність-інтенсивність, щільність змінюється від 0 до  $k_j$ , а інтенсивність від 0 до  $q_c$  досягаючи максимуму в точці  $k_c$ ; на діаграмі типу швидкість-інтенсивність зміна швидкості обмежена 0 та  $v_{ff}$ , а  $q_c$  досягається у точці  $v_c$ .

Важливим спостереженням в емпіричних даних, яке вплинуло на типове схематичне зображення фундаментальної діаграми було те, що для повернення у фазу вільного потоку, наприклад після проходження ранкової години пік, щільність потоку повинна стати відчутно нижчою за критичну, тобто повернення до фази вільного трафіка майже ніколи не відбувається із відновленням режиму максимальної інтенсивності. Цю поведінку можна зрозуміти через те, що в умовах максимальної інтенсивності потік вже питомо нестабільний, і уповільнення деяких його учасників, із будь-якої причини (дорожні роботи, певні психологічні фактори, різкі повороти у дорозі, ДТП), вже може призвести до утворення несприятливих умов трафіка, що поширюватимуться потоком, знижуючи



його інтенсивність, через це інтуїтивно зрозуміла необхідність повернення до помітно нижчої за критичну щільності задля відновлення стабільного потоку. Для схематичного зображення описаного феномену було запропоновано криву «форми оберненої  $\lambda$ » [11][12][13]



*Рис. 8 Ліво: Схематична крива на діаграмі щільність-інтенсивність, що демонструє феномен щільності/інтенсивності повернення до стабільного потоку. Право: емпіричні дані щільності/інтенсивності ранкового трафіка на шосе біля Лінкеровера, Бельгія, що демонструють даний феномен. [12]*

## 2.3 Моделювання транспортних потоків

З метою вивчення, дослідження, аналізу та прогнозування поведінки транспортних потоків застосовують широкий ряд моделей, що загально розподіляють у два основні класи, засади моделювання потоків у яких ми розглянемо.

### 2.3.1 Макроскопічні моделі

Макроскопічний підхід до моделювання транспортних потоків передбачає відкидання розгляду індивідуальних учасників потоку на користь опису його поведінки на рівні сукупних характеристик потоку, зокрема розглянутих у попередніх розділах, на додачу до котрих застосовують і ряд інших.

Основним макроскопічним підходом до моделювання трафіка є спроба його аналізу як гідроаеродинамічного процесу. За цією аналогією, транспортний потік розглядають як одновимірну стисливу рідину, що призводить до наступних припущень:

- а) Існує рівняння неперервності для потоку.
- б) Існує співвідношення один-до-одного між інтенсивністю та щільністю або між швидкістю та щільністю потоку.

Прості макроскопічні моделі, засновані на цій аналогії, складаються із двох рівнянь: рівняння неперервності та рівняння стану (що встановлює співвідношення із припущення б), при розгляді цих двох рівнянь разом із «фундаментальним рівнянням» ми можемо отримати середню швидкість, інтенсивність та щільність потоку у будь-який момент часу на будь-якій ділянці дороги, що дозволяє розраховувати затримки, час подорожі та інші характеристики, що застосовуються для оцінки ефективності транспортної системи в цілому.

Ще одним макроскопічним підходом до аналізу транспортних потоків, є їх оцінка на рівні мережі, в даному випадку відкидають не лише розгляд індивідуальних учасників потоку, а й розгляд його динаміки на окремих дорогах – ребрах графу мережі, а також у його вершинах (до прикладу, перехрестях, що не розглядається нами у даній роботі). У таких моделях зазвичай розглядають трафік на рівні цілих міст або агломерацій, параметри, що цікавлять аналітиків включають дистанцію пройденої на одиницю площі, щільність доріг (співвідношення площі доріг до загальної площі міста), зважену середню швидкість.

Моделювання транспортних потоків на такому рівні корисне для оцінки регуляцій, інфраструктурних змін та стратегій управління потоками, що вводяться на загальносистемному рівні.

### 2.3.2 Мікроскопічні моделі

Мікроскопічний підхід до моделювання транспортних потоків передбачає створення моделі поведінки окремих учасників потоку та опис правил, за якими вони взаємодіють один із одним.

Як вже було загадано, враховувати всі параметри, що впливають на рух учасників потоку непрактично складно, тож систему водій-машина в таких моделях зазвичай не розглядають, використовуючи, натомість, більш абстрактного «учасника потоку» через розгляд вкрай спрощеної поведінки людини в умовах руху транспорту.

Втім, також існують моделі, в яких окрім згаданих раніше мікроскопічних параметрів потоків детальніше представлено поведінку окремих водіїв та їх реакцію на стимули під час керування машиною, основна проблема застосування таких моделей полягає в тому, що вони обчислювально складні, що не дозволяє ефективно їх застосовувати для аналізу проблем мережного рівня.

Класичним підходом до мікроскопічного моделювання трафіка є опис динаміки руху кожного окремого учасника як функції позицій та швидкостей його сусідів. Для аналізу неперервних автомобільних потоків зазвичай розглядають два залежних від згаданих характеристик процеси – це зміна швидкості та зміна смуги руху.

Описуючи функцію зміни швидкості учасника потоку природньо зробити припущення, що існує певне бажане значення швидкості, якого він прагне, що визначене міркуваннями безпеки, регуляторними обмеженнями і т. ін.

Таку динаміку зміни швидкості представляють як релаксацію на певному проміжку часу:

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{v_{\text{des}} - v_i}{\tau}$$

Де  $v_{\text{des}}$  – бажана швидкість,  $\frac{dv_i(t)}{dt}$  – прискорення учасника потоку, а  $\tau$  – час релаксації, за який відбувається зміна швидкості до бажаної.

Майже всі мікроскопічні моделі транспортних потоків мають за основу описану динаміку, в якій, за аналогією із фізичними процесами релаксації, учасники потоку мають тенденцію повертатися до певного «рівноважного» значення  $v_{\text{des}}$  після того, як певні несприятливі умови, що у багатьох моделях обмежується необхідністю уповільнитись задля уникнення колізії із передуючим транспортним засобом (втім, зрозуміло, що причини зміни швидкості можуть бути не тільки зовнішніми), змусили їх змінити свою швидкість. [14]

Опис поведінки водіїв під час зміни смуги руху охоплює правила, які визначають рішення про перехід на іншу смугу. Такі рішення поділяють на вимушені та невимушені, у випадку першого йдеться про певну необхідність, що диктує потребу зміни смуги, це можуть бути регуляторні обмеження, або необхідність покинути потік (звернути на іншу дорогу, тощо). У випадку невимушених змін смуги йдеться про рішення змінити смугу для покращення своїх умов, це може бути як задля досягнення бажаної швидкості, так і для покращення безпекових умов або через бажання уникнути учасників потоку, що приєднуються із в'їздів на шосе, тощо. Для аналізу рішень водіїв застосовують теорію ігор. Зазвичай, процес прийняття рішення про зміну смуг моделюють використовуючи наступну послідовність кроків:

1. Визначення, чи є бажаною зміна смуги.
2. Обрання бажаної смуги.
3. Визначення, чи можлива обрана зміна у поточних умовах (в залежності від інтервалів, швидкостей та прискорення учасника потоку та його сусідів). [15]

Серед мікроскопічних моделей трафіка можна виділити три типи за тим, як час та простір представлені у моделі.

Першим із них є тип моделей, в яких час та простір аналізуються як неперервні змінні, тут швидкість учасників потоку моделюється через звичайні диференціальні рівняння. Поширеною моделлю такого типу є Intelligent Driver model, запропонована в 2000 р. Трайбером, Хеннеке та Хельбінгом.

Другим типом постають моделі, в яких час представлено як дискретну змінну, тут швидкість на часовому кроці  $t$  залежить від умов на кроці  $t - 1$ , прикладом таких моделей є модель Гіпса. Перевагою цього типу моделей є їх відносна обчислювальна простота порівняно із попереднім типом через відсутність необхідності вирішувати диференціальні рівняння.

Третім типом, що особливо цікавить нас у контексті даної роботи, є підхід, коли і час і простір моделі розглядають як дискретні змінні. В такому випадку, модель можна представити у вигляді клітинного автомату.

Порівняно з іншими мікроскопічними моделями, цей тип відрізняється нижчою точністю, але значно вищою обчислювальною ефективністю. [14]

Ще однією перевагою клітинних автоматів для моделювання трафіка є інтуїтивна зрозумілість правил, що визначають поведінку учасників потоку, що дозволяє легко експериментувати із ними для перевірки гіпотез і конструювання потенційно кращих моделей.

## **2.4 Висновки до Розділу 2**

В цьому розділі розглянуто місце аналізу неперервних транспортних потоків у ширшій дисципліні аналізу транспортних мереж, аргументовано його важливість, описано характеристики транспортних потоків та методи їх представлення, наведено поширені способи моделювання трафіка та

визначено місце застосування клітинних автоматів у контексті аналізу транспортних потоків.

### **3 Розділ 3. Моделювання транспортних потоків за допомогою клітинних автоматів**

В цьому розділі буде досліджено застосування парадигми клітинних автоматів у сфері аналізу транспортних потоків.

#### **3.1 Проблема дискретизації простору та часу**

Застосування клітинних автоматів передбачає дискретизацію простору та часу для створення моделей. Питання того, яким саме чином відбувається розділ важливе для конструювання реалістичних моделей та аналізу результатів симуляцій, і залежить від того, на якому рівні та які саме характеристики транспортного потоку ми хочемо точно відобразити у певній моделі, тож вибір часового кроку та розміру клітини для моделі нетривіальний процес, який потребує дослідження релевантних емпіричних даних.

Одним із підходів, що використовується для вибору розбиття простору та часу в КА моделях трафіка є аналіз отриманих даних в абстрактних величинах «клітинок» та «часових кроків» та підбирання підходящих значень фізичних величин для їх характеризувати, так, в основоположній для поля застосування КА в мікроскопічному моделюванні транспортних потоків праці Нагеля та Шрекенберга, автори, спираючись на дані, що у стані затору одна машина займає в середньому 7,5 м дороги, що стало довжиною клітинки, розглянули отримані із симуляцій макроскопічні характеристики потоку в декількох його фазах, і прийшли до висновку, що реалістичним часовим кроком для запропонованої моделі є одна секунда [16]. Засновуючись на цьому, в аналізі багатьох моделей КА для неперервних потоків транспорту застосовують саме такий часовий крок. Натомість, дискретизація простору доволі часто відрізняється, в деяких пізніших моделях, із метою більш реалістичного моделювання мікроскопічних характеристик потоків, застосовують інше розбиття

простору, до прикладу, в моделі В. Кноспе та ін. від 2000 р. довжина клітинки складає 1,5 м а у моделі Кернера, Кленова та Вольфа автори застосовують значення 0,5 м.[17][18]

### 3.2 Моделі неперервних транспортних потоків

Одним із найпростіших видів транспортних потоків є неперервні потоки на односмуговій автомобільній дорозі, саме на такому, дещо виродженому, прикладі часто перевіряють відповідність певних моделей вимогам, а також проводять дослідження їх феноменологічних якостей і того, як вони співвідносяться із емпіричними даними, через це такі потоки та їх моделювання є одним із найдослідженіших сфер аналізу транспортних потоків.

#### 3.2.1 Правило 184

Певним відповідником цього типу потоків зі сфери теоретичного дослідження КА є елементарні клітинні автомати, розгляд котрих допоміг розвитку парадигми та її популяризації для моделювання складніших систем. Їх дослідження показало, що деякі вкрай прості КА здатні показувати статистично подібну поведінку до транспортних потоків.

Правило 184 – один із КА з множини елементарних, дослідженої С. Вольфрамом [2]. Нагадаємо, що це одновимірні КА, чого, втім, достатньо для мінімального моделювання односмугових неперервних потоків.

Стан клітин у правилі 184 обмежений множиною  $\{0, 1\}$ .

Окіл клітини складається із неї самої та її безпосередніх правого та лівого сусідів.

Правило переходу подають наступною таблицею станів:

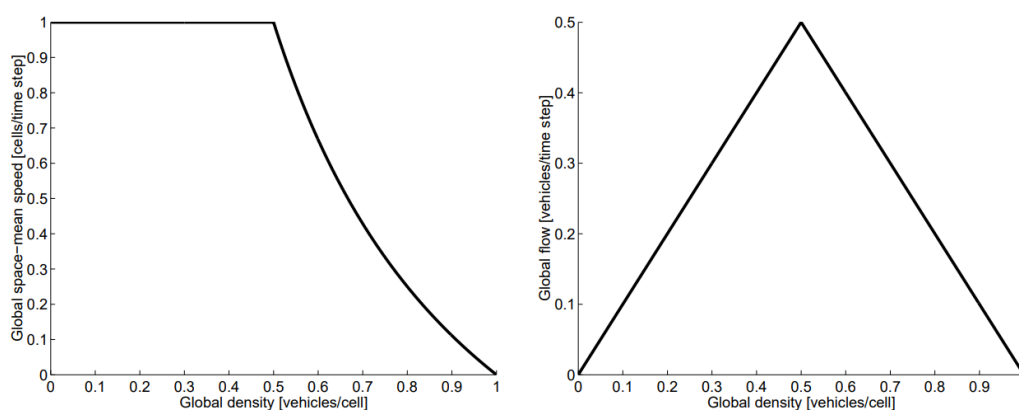
000	100	110	111	011	001	101	010
0	1	0	1	1	0	1	0



Де верхній рядок – окіл, а нижній – результуючий стан клітини на наступному часовому кроці.

Простими словами, подане правило можна описати наступним чином: у разі, якщо клітинка «зайнята», тобто перебуває у стані 1, і має праворуч себе вільну клітину – вона «займає» її на наступному кроці еволюції моделі.

Якщо вважатимемо простір даного КА смугою руху транспорту, а стани клітинок, відповідно, позначками про те, чи зайнята конкретна секція дороги автомобілем, отримаємо спрощену модель транспортного потоку, що рухається зліва направо.



*Рис. 9 Фундаментальна діаграма транспортного потоку, отримана із правила 184 [3].*

Макроскопічні характеристики потоку отримані із правила 184 співвідносяться віддалено подібно до експериментально отриманих даних, потік змодельований цим правилом може знаходитися у режимі вільного та перевантаженого трафіка, для моделі існує значення критичної щільності та асоційовані з ним значення середньої швидкості та інтенсивності. На мікроскопічному рівні спостерігається характерне потокам формування груп машин, а у перевантаженій фазі виникає явище змінного початку і зупинки руху.

Втім, поведінка моделі занадто проста та показує характеристики лише віддалено подібні до реальних транспортних потоків, мінімалістичні правила та детермінована природа даного КА не дозволяють моделювати складніші феномени у трафіку, такі як спонтанне формування та розбиття скупчень або груп машин подібних до заторів та ін. Тим не менш, дане правило гарно демонструє, що мінімалістичні КА здатні мати складні емерджентні властивості, що цікавлять нас у контексті аналізу транспортних потоків.

### 3.2.2 КА Фукуї-Ісібасі

Для реалістичного моделювання транспортних потоків за допомогою КА необхідно виступити за межі множини елементарних КА, однією із моделей, що пропонує мінімальні, порівняно із правилом 184, зміни, що призводять до дещо реалістичніших результатів є модель запропонована та досліджена Фукуї та Ісібасі [3]. Ключовою зміною стало введення параметру максимальної швидкості, що може досягатися транспортним засобом у потоці. Різниця із правилом 184 полягає у тому, що в разі, коли учасник потоку на певному часовому кроці опиняється в умовах, за яких він може здійснити перехід на більше, ніж одну клітинку за часокрок, при цьому не на більше, ніж дозволяє глобальне обмеження швидкості і проміжковий просторовий інтервал між даним та передуючим учасником, наш учасник здійснює максимально довгий можливий перехід, миттєво прискорюючись до необхідної швидкості, або ж знижуючи її для уникнення зіткнення. [3]

Іншою, цінною для розуміння необхідних складових реалістичної КА-моделі транспортного потоку зміною, внесеною Фукуї та Ісібасі в свою модель, є використання стохастичного елементу до швидкості учасників потоку, що мали б пересуватися із максимальною швидкістю.

Аргументуючи це тим, що водії не здатні постійно підтримувати

максимальну швидкість, автори ввели випадкову можливість уповільнення учасників потоку із максимальною швидкістю. Таке нововведення дозволило реалістичніше змодельовати фазу вільного трафіка.

Дослідження моделі без стохастичного елементу показує характеристики майже ідентичні до Правила 184, але навіть без випадкових величин дана модель дозволяє дослідити вплив змін обмеження швидкості на характеристики потоків [3]. Втім, саме стохастичність наближає розглянуту модель до більш реалістичних результатів, що вказує на корисність використання ймовірнісних елементів у правилах КА для моделювання транспортних потоків.

### **3.2.3 Модель Нагеля та Шрекенберга**

Як вже було згадано, основоположною працею в сфері застосування КА для аналізу транспортних потоків вважається робота Кая Нагеля та Міхаеля Шрекенберга від 1992 р.

Автори запропонували доволі мінімалістичну модель, що, все ж, показала складну емерджентну поведінку дуже подібну до реальних неперервних односмугових автомобільних потоків.

Запропонований в оригіналі КА є одновимірним, клітинки в ньому можуть бути характеризовані як зайняті та вільні, кожний учасник потоку займає максимум одну клітинку, а глобально присутнє обмеження швидкості.

Окіл клітини в автоматі береться із урахуванням максимальної швидкості для того, щоб забезпечити можливість пересування без зіткнень (як і в багатьох інших мікроскопічних моделях трафіка, це ускладнення не моделюється). Тобто, околom клітини вважаємо множину, що складається із неї самої в об'єднанні із  $v_{max}$  передуючих клітинок.

В авторському формулюванні, зміна позиції та швидкості учасника потоку відбувається за правилом, що складається із чотирьох кроків [16]:

1. Прискорення, для досягнення бажаної швидкості, що вважається рівною максимальній. У разі, якщо  $v_i(t - 1) < v_{max}$  і  $g_i(t) < v_i(t - 1)$  то  $v_i(t) \leftarrow v_i(t - 1) + 1$ .
2. Сповільнення, для уникнення зіткнень. У разі, якщо  $g_i(t - 1) > v_i(t)$  то  $v_i(t) \leftarrow g_i(t - 1)$
3. Рандомізація, на кожному кроці існує певна ймовірність уповільнення всіх учасників потоку. Із ймовірністю  $p$   $v_i(t) \leftarrow \max(v_i(t - 1) - 1, 0)$ .
4. Пересування, на кожному часовому кроці всі учасники потоку пересуваються на визначену їх новою швидкістю кількість клітинок вперед.  $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$ .

Крок рандомізації автори відмічають «суттєвим», стверджуючи, що без нього реалістично моделювати поведінку потоків не вийде.

У пізніших дослідженнях набір правил із моделі Нагеля-Шрекенберга відзначають як мінімально необхідний для реалістичного моделювання транспортних потоків за допомогою КА [3][17]. Подальший розвиток багатьох моделей у парадигмі можна розглядати як процес ітеративних змін до цієї моделі з метою наближення певних, обраних авторами подальших досліджень, характеристик даного КА до реальності.

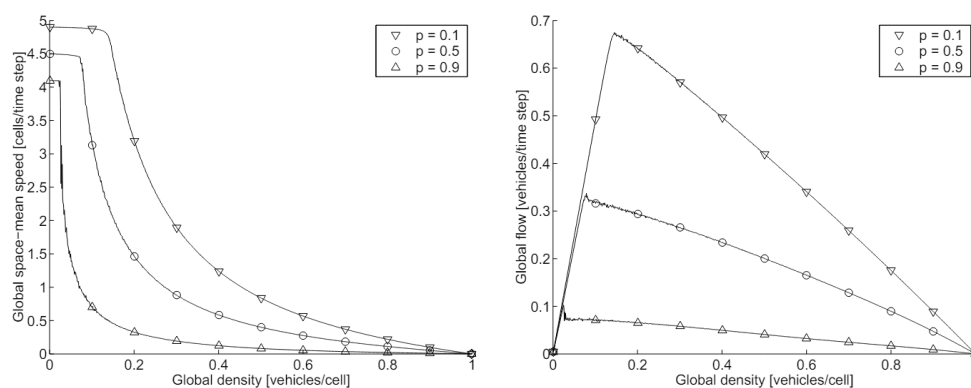


Рис. 10 Фундаментальні діаграми моделі Нагеля-Шрекенберга для різних ймовірностей уповільнення [3].

Одним із цікавих артефактів правила рандомізації, у тій формі, що воно представлено в розглянутій моделі, є те, що через це трафік стає локально нестабільним за будь-якої щільності, тобто навіть за умов вільного трафіка можуть формуватися локальні затори. Для уникнення цього, Кай Нагель та Мая Пачуські запропонували додаткове правило, що дає ефект подібний до круїз-контролю для авто на великих швидкостях: якщо швидкість, з якою рухався учасник потоку на попередньому часовому кроці рівна максимальній, то імовірність уповільнення  $p$  на кроці  $3$  для нього стає рівна  $0$  [3].

Даний підхід зміни параметра рандомізації як частини стану клітини в автоматі і його варіації часто застосовуються для побудови більш складних КА для транспортних потоків.

### **3.2.4 Модель зі стоп-сигналами**

Не у всіх КА-моделях транспортних потоків їх учасників представляють однією клітинкою, існують моделі, в яких розглядають неоднорідні потоки, що складаються із набору типів авто різної довжини, або для моделі обирають дрібнішу дискретизацію простору, що призводить до необхідності представлення учасників потоку декількома клітинками.

Однією із моделей, де використання дрібнішої дискретизації простору призвело до цієї необхідності є вже згадана вище модель В. Кноспе та ін. від 2000 р. [17], тут автори ставили на меті зробити модель, що більше відповідатиме емпіричним даним по мікроскопічних характеристиках трафіка та досягне кращого відображення метастабільних станів потоку, зокрема фази синхронізованого потоку.

Для досягнення цього, автори ввели в опис стану учасника потоку параметр «стоп-сигналу», що дозволяє відобразити у моделі реагування водіїв на зниження швидкості передуючих транспортних засобів.

Крім того, у моделі застосовується поняття «ефективного проміжку», тобто моделюється передбачення водіями позиції передуючого учасника, базуючись на його поточній швидкості, це дозволяє реалістичніше моделювати потік, через те, що, водії, очевидно, не сприймають інших учасників потоку як стаціонарні об'єкти, а очікують їх рух.

У моделі також присутнє правило визначення параметра рандомізації, тут воно представлено як функція поточної швидкості учасника та стоп-сигналу передуючого йому авто, вона визначає три значення параметра рандомізації для трьох типів часників потоку – тих, що на даному кроці не рухаються (перебувають у заторі, тощо), тих, що реагують на стоп-сигнал передуючого учасника та решту. Представити цю функцію можна наступним чином:

$$p = p(v_i(t - 1), b_{i+1}(t - 1)) = \begin{cases} p_b \text{ якщо } b_{i+1}(t - 1) = 1 \text{ і } t_{h_i} < t_{s_i} \\ p_0 \text{ якщо } v_i(t - 1) = 0 \\ p_d \text{ у решті випадків} \end{cases}$$

Де  $t_{h_i} = g_i/v_i$ , а  $t_{s_i} = \min(v_i, h_{int})$ , тут  $h_{int}$  – максимальний час необхідний для досягнення передуючого транспортного засобу на поточній швидкості за якого стоп-сигнали вважаємо ефективними (тобто такими, що на них реагуватимуть інші водії). Таким чином,  $t_{s_i}$  – часовий горизонт взаємодії учасника потоку зі стоп-сигналами передуючого йому транспорту.

З урахуванням цієї функції, правила цієї моделі наступні:

1. Визначення параметра рандомізації:  $p \leftarrow p(v_i(t - 1), b_{i+1}(t - 1))$
2. Прискорення, відбувається якщо не гальмує ні сам учасник, ні передуючий йому, або ж у випадку, коли передуючий учасник знаходиться за часовим горизонтом взаємодії:  $((b_{i+1} = 0) \wedge (b_i = 0)) \vee (t_{h_i} \geq t_{s_i})$  то  $v_i(t) \leftarrow \min(v_i(t - 1) + 1, v_{max})$ .

3. Визначення ефективного проміжкового інтервалу:  $g_i^{eff} \leftarrow g_i(t - 1) + \max(\min(v_{i+1}(t - 1), g_{i+1}(t - 1) - g_{sec}), 0)$ , другий доданок тут – очікувана швидкість передуючого учасника із поправкою на бажану безпечну відстань  $g_{sec}$ .
4. Уповільнення, аналогічне правилу Нагеля-Шрекенберга:  $v_i(t) \leftarrow \min(v_i(t), g_i^{eff})$
5. Рандомізація: Із імовірністю  $p$   $v_i(t) \leftarrow \max(v_i(t) - 1, 0)$ .
6. Визначення стану стоп-сигналу: якщо  $v_i(t) < v_i(t - 1)$ , то  $b_i(t) \leftarrow 1$ , інакше  $b_i \leftarrow 0$ .
7. Пересування:  $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$ .

В оглядовій літературі відмічають, що за допомогою даної моделі можна симулювати подібні до фази синхронізованого потоку феномени, при цьому отримуючи реалістичні характеристики на мікроскопічному рівні [3]. Втім, в деяких новіших оглядових працях відмічають деякі недоліки моделі в зображенні синхронізованого трафіка та приходять до висновку, що модель не може задовільно його відтворювати [19].

### 3.3 Застосування КА-моделей неперервних потоків в аналізі транспортних мереж

Як і для окремішнього аналізу потоків, для аналізу транспортних мереж в цілому також застосовують парадигму КА, а розглянуті моделі неперервних потоків часто є важливою складовою ширших моделей транспортних мереж.

Наприклад, в роботі [20], автори ставлять на меті аналіз стратегій контролю на регульованому перехресті з точки зору оптимізації викидів. Запропонована модель розширює базову модель Нагеля та Шрекеберга, автори додають правила зміни смуги, розглядають два типи авто у потоці залежно від їх швидкості, а також вводять регуляторний елемент у вигляді

світлофорів, втім базова динаміка руху учасників потоку зберігається із класичної моделі, якої виявилось достатньо для отримання необхідних авторам мікроскопічних характеристик потоку для подальшого аналізу, за їх допомогою, викидів, що генеруються учасниками потоку.

Це демонструє цінність та користь розгляду та подальшого розвитку моделей неперервних транспортних потоків як важливої складової ширших моделей транспортних мереж.

### **3.4 Висновки до Розділу 3**

В цьому розділі наведено характеристику декількох моделей із парадигми клітинних автоматів, що застосовують для аналізу неперервних транспортних потоків, визначено важливі складові будови таких моделей, певні їх спільності, описано деякі виклики, що постають в процесі моделювання, і визначено місце КА-моделей неперервного трафіка в ширших моделях транспортних мереж.



## **4 Розділ 4. Інструменти для моделювання в парадигмі клітинних автоматів**

В цьому розділі пропонується фреймворк-рушій для побудови довільних моделей у парадигмі клітинних автоматів на двовимірній прямокутній решітці та демонструється його застосовність до моделювання транспортних потоків через розгляд імплементації ряду згаданих раніше моделей.

### **4.1 Постановка задачі**

Метою виконаної роботи було створення набору інструментів для розробки моделей на основі КА та виконання симуляцій із їх використанням на довільних двовимірних прямокутних решітках разом із інтеграцією в запропоноване програмне рішення деяких способів візуалізації даних отриманих із симуляцій, з акцентом на застосуванні запропонованих рішень до моделювання транспортних потоків.

Вибір саме прямокутної двовимірної решітки засновується на спостереженні, що така конфігурація КА, хоч і є доволі простою, широко застосовується у сфері аналізу транспортних мереж, і на її основі будують багато різноманітних моделей потоків автомобільного транспорту, зокрема, не тільки неперервних. Клітинний автомат, що застосували у роботі [20] для моделювання трафіка на регульованому перехресті можна представити на двовимірній прямокутній решітці, а у роботі «A cellular automata model for urban traffic with multiple roundabouts» [21] використовують дану конфігурацію для моделювання руху на кругових перехрестях, тож створення інструментів для роботи із подібними КА виправдане.

## 4.2 Деталі імплементації програмного рішення

Програмне рішення представляє із себе фреймворк для створення КА-моделей мовою Java.

Ми пропонуємо користувачу наших інструментів працювати за класичним архітектурним підходом MVC (Model-View-Controller), в якому ми пропонуємо готове рішення для Controller та View, очікуючи визначення компонента Model від користувача. Model, в нашому випадку, це стан та правила переходу стану для клітини автомата.

Спрощена діаграма класів, з якими передбачається пряма взаємодія користувача в процесі розробки моделей за допомогою фреймворку наступна:

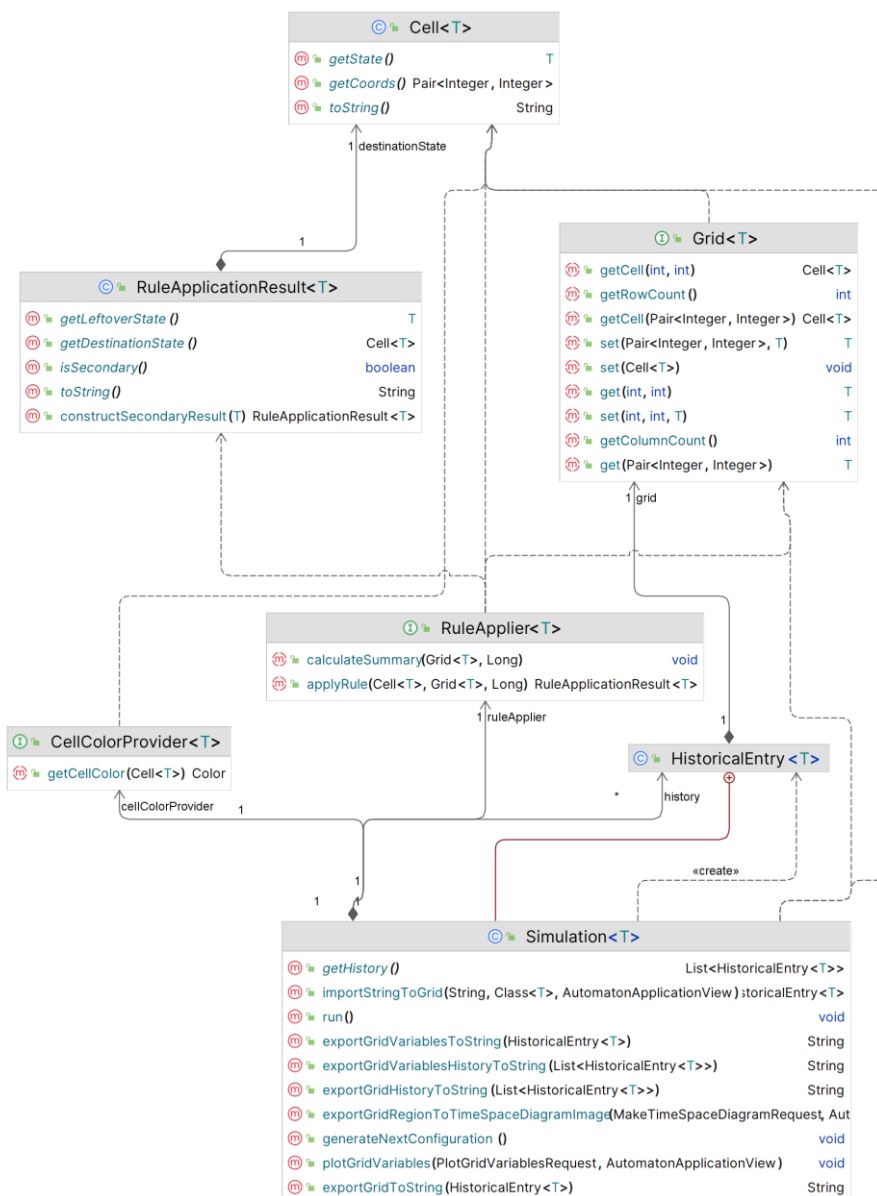


Рис. 11 Діаграма класів, з якими безпосередньо працюватиме користувач фреймворку.

Основний інтерфейс, що має визначити користувач – це *RuleApplier* для параметру типу *T*, де тип *T* – клас, що представляє стан клітини автомату, а метод *applyRule* вищезгаданого інтерфейсу – повертає результат застосування правила до клітини на визначеному часокроці.

*RuleApplicationResult* – клас, що описує результат застосування правила до певної клітинки, в даному класі інкапсульована певна специфічна для

нашого фреймворку логіка, що робить його легшим до застосування саме у сфері аналізу транспортних мереж, адже результат виконання правила над клітинкою передбачає можливість одночасної модифікації двох позицій решітки, що є відходом від класичних КА, втім значно спрощує роботу із мікроскопічними моделями транспортних мереж.

Користувач також має змогу впливати на *View* через визначення для типу *T* інтерфейсу *CellColorProvider*, результат виконання методу *getCellColor* якого визначає колір клітинки у графічному інтерфейсі в залежності від її стану.

Інтерфейс *Grid* описує структуру даних, використану для представлення решітки у нашому програмному рішенні.

Клас *Cell* описує стан клітинки та її координати у даній решітці.

Клас *Simulation* – елемент *Controller* застосунку, через нього відбувається керування процесом еволюції клітинного автомата.

Діаграма класів застосунку із врахуванням елемента *View* наступна:

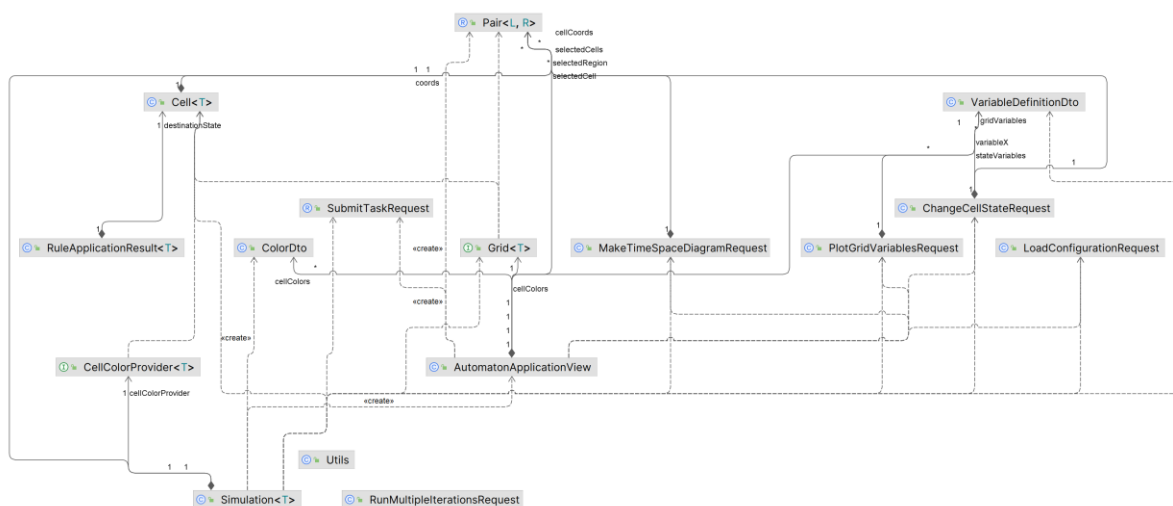


Рис. 12 Діаграма класів з урахуванням елемента *View*

За графічний інтерфейс користувача у програмі відповідає клас *AutomatonApplicationView*, створений за допомогою Java Swing. Об'єкт

цього класу автоматично створюється при запуску симуляції через метод *run()* у *Simulation* і користувач фреймворку не має необхідності виконувати додаткові налаштування даного класу для того, щоб бути здатним використовувати надані графічні інструменти роботи із КА, адже мінімалістичний графічний інтерфейс автоматично генерується на основі визначеного користувачем фреймворку класу, що описує стан клітини, через застосування Reflection API.

Важливою, для правильної роботи фреймворку із заданим класом стану клітини, частиною запропонованого програмного рішення є дві анотації, на позначення різних типів змінних стану, що фреймворк застосовує для роботи із довільними класами стану клітини через Reflection API. Ми пропонуємо роботу із двома видами змінних для типу стану: змінна клітинки (*@StateVariable*) та змінна конфігурації (*@GridVariable*), обидва типи змінних мають бути позначені відповідними анотаціями у класі-визначенні стану, аби фреймворк знав, які саме поля класу є частиною симуляції та мають бути враховані при застосуванні правил переходу стану рушієм, а також, з урахуванням яких полів класу необхідно генерувати графічний інтерфейс.

Останньою важливою частиною розробленого фреймворку є рушій для застосуванням правил еволюції КА до визначеної решітки.

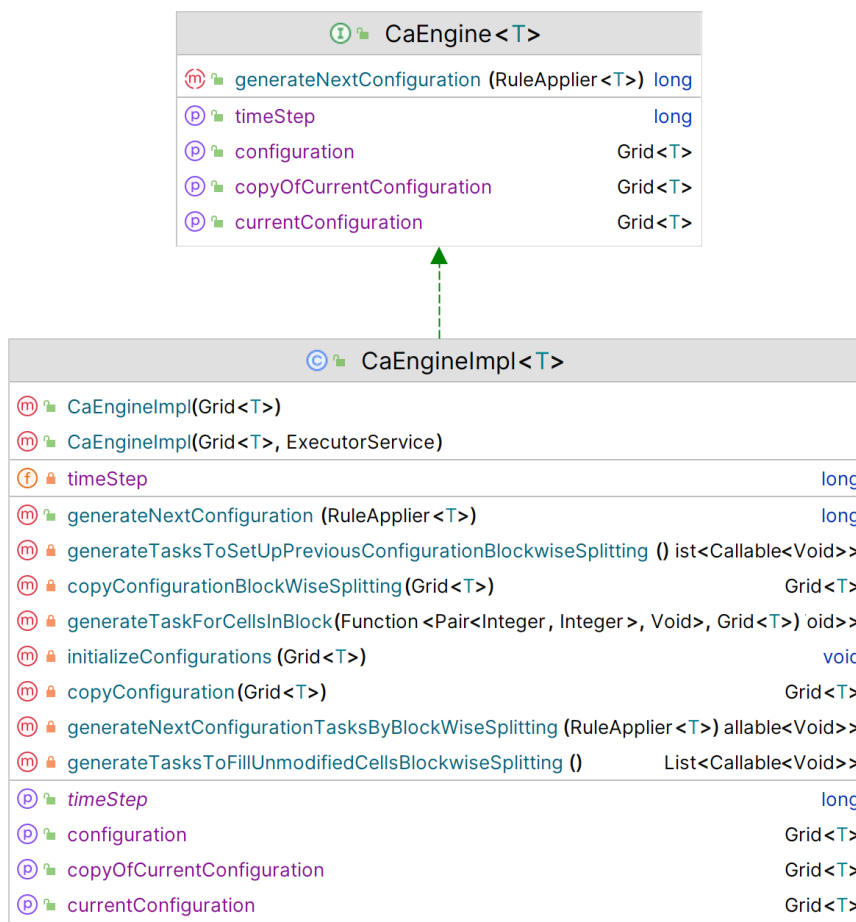


Рис. 13 Опис класів рушія.

Рушій у системі представлено інтерфейсом *CaEngine*, який реалізовано у класі *CaEngineImpl*, виконання правил еволюції рушієм відбувається паралельно, із застосуванням блокового розбиття решітки для оптимізації розміру завдання виконуваного кожним окремим потоком системи, розбиття також враховує кількість процесорів, що ОС виділила для виконуваної JVM. Процес застосування правил до решітки у нашій імплементації розбито на два етапи, адже ми дозволяємо модифікацію одразу двох позицій на решітці як результату застосування правила до однієї клітинки з її околom. Як згадано раніше, це значно спрощує визначення правил для моделей типових в аналізі транспортних мереж, адже такий підхід дозволяє легко описувати перехід певної мікроскопічної частинки решіткою, але з точки зору застосування правил на рівні рушія

це вводить певну складність, адже у разі, коли модельована частинка, або ж, у нашому випадку, транспортний засіб, покидає певну клітинку решітки, ми не можемо бути впевнені у тому, що знаємо стані цієї клітинки до застосування правила переходу до решти клітинок, адже звільнену даним транспортним засобом позицію може зайняти інший. Тобто, у нас існує необхідність залишити можливість модифікації позиції решітки, яку покинули, в процесі застосування правил до решти множини транспортних засобів, але також є необхідність надати стан клітинки, в якому вона опиниться у разі, якщо вона все ж не буде модифікована застосуванням правил до решти решітки. Через це, нам довелося розбити застосування правил на два етапи, в першому з котрих відбувається остаточне визначення стану клітинок, результат застосування правил до яких не позначено як *isSecondary*, із одночасним записом решти результатів в окрему решітку *secondaryResultsGrid*.

```

int rows = previousGridConfiguration.getRowCount();
int cols = previousGridConfiguration.getColumnCount();
currentGridConfiguration = new GridSparseImpl<>(rows, cols);
secondaryResultsGrid = new GridSparseImpl<>(rows, cols);
return generateTaskForCellsInBlock(coords -> {
    try {
        T state = previousGridConfiguration.get(coords);
        if (state != null) {
            var ruleApplicationResult = ruleApplier.applyRule(new Cell<>(state, coords), previousGridConfiguration, timeStep);
            if (ruleApplicationResult.isSecondary()) {
                secondaryResultsGrid.set(coords, ruleApplicationResult.getLeftoverState());
            }
            if (ruleApplicationResult.getDestinationState() != null) {
                currentGridConfiguration.set(ruleApplicationResult.getDestinationState());
            }
            if (!ruleApplicationResult.isSecondary()) {
                currentGridConfiguration.set(coords, ruleApplicationResult.getLeftoverState());
            }
        }
    } catch (Exception e) {
        System.err.printf("Got exception while applying a rule: %s\n", e.getMessage());
        throw new RuntimeException(e);
    }
    return null;
}, previousGridConfiguration);

```

Рис. 14 Код першого етапу застосування правил до решітки.

А на другому етапі, результати із решітки *secondaryResultsGrid* переносяться в основну решітку, в разі, якщо стан даної позиції основної решітки не було модифіковано після завершення процесу застосування правил до всієї решітки.

```

return generateTaskForCellsInBlock(coords -> {
    try {
        var hasSecondaryResult = secondaryResultsGrid.get(coords) != null;
        if (currentGridConfiguration.getCell(coords).getState() == null) {
            if (hasSecondaryResult) {
                currentGridConfiguration.set(secondaryResultsGrid.getCell(coords));
            }
        }
        return null;
    } catch (Exception e) {
        System.err.printf("Got exception while carrying over state between iterations: %s\n", e.getMessage());
        throw new RuntimeException(e);
    }
}, currentGridConfiguration);

```

Рис. 15 Код другого етапу застосування правил до решітки.

### 4.3 Керівництво до застосування

Запропоновані інструменти розробки моделей КА опубліковані та доступні до підключення у будь-який програмний проект мовою Java версії 21 або вище.

Зокрема, для підключення можна зручно застосувати поширені інструменти збірки програмних проектів Maven або Gradle.

Для використання нашого фреймворку у проекті із Maven, необхідно додати наступну XML-конфігурацію до файлу *pom.xml* проекту:

```

<repositories>
  <repository>
    <id>Ca-application-repository</id>
    <url>https://dlwohzsvsnjov2.cloudfront.net/release</url>
  </repository>
</repositories>

<dependencies>
  <dependency>
    <groupId>io.github.vsevladhort</groupId>
    <artifactId>ca_application</artifactId>
    <version>1.0.0</version>
  </dependency>
</dependencies>

```



Для використання його у проекті із Gradle, при застосуванні Groovy достатньо додати наступне до *build.gradle*:

```
repositories {
    maven {
        url "https://dlwohzsvsnjov2.cloudfront.net/release"
    }
}

dependencies {
    implementation 'io.github.vsevladhort:ca_application:1.0.0'
}
```

Або ж, в разі, якщо ви користуєтеся Kotlin, наступне до файлу *build.gradle.kts*:

```
repositories {
    maven {
        url = uri("https://dlwohzsvsnjov2.cloudfront.net/release")
    }
}

dependencies {
    implementation("io.github.vsevladhort:ca_application:1.0.0")
}
```

#### 4.3.1 Керівництво до застосування фреймворку

Як було зазначено вище, від користувача фреймворку очікується визначення інтерфейсу *RuleApplier* та класу стану клітини із анотованими полями, що характеризують, відповідно, або стан однієї клітини, у випадку зі *@StateVariable*, або решітки в цілому, у випадку із *@GridVariable*.

Важливо зазначити, що для коректної роботи рушія, клас, що визначає стан клітинки має містити публічний конструктор без аргументів.

Фреймворк підтримує роботу із чотирма типами даних для змінних: *int*, *double*, *boolean* та *String*.

Глобальні змінні, позначені *@GridVariable* можуть бути лише статичними і їх використання передбачено для встановлення значень, що спільні для всієї решітки або її регіону, в контексті моделювання транспортних потоків це може бути обмеження швидкості, значення імовірності стохастичних подій (таких, як уповільнення), або ж глобальні виміри на решітці, такі, як щільність, середня швидкість та інтенсивність потоку.

Змінні стану клітини, позначені *@StateVariable*, специфічні для окремої клітинки автомату та не можуть бути статичними, це змінні, що визначають стан кожної окремої клітинки автомату. В контексті аналізу транспортних потоків, це, до прикладу, позначки того, чи містить дана клітинка учасника потоку, його швидкість і т. ін.

Анотації *@GridVariable* та *@StateVariable* підтримують надання мета-інформації, що застосовується згенерованим графічним інтерфейсом. Зокрема, можна задавати назву змінної, що використовуватиметься для її відображення у графічному інтерфейсі, а також дані для валідації вводу, такі як обмеження на дозволений перелік стрічок та мінімальне та максимальне значення для числових типів даних. Це задається через властивості *name*, *allowedStrings*, та *min* з *max* відповідно. У разі, якщо обидва аргументи *min* та *max* визначені, їх буде використано для обмеження зони відображення значень даної числової змінної при генерації графіків з її участю.

Важливим аспектом роботи із інтерфейсом *RuleApplier* є те, що у методи, які необхідно визначити користувачу, а саме:

```
RuleApplicationResult<T> applyRule(@NonNull Cell<T> cell, Grid<T> grid,
Long timeStep);
```

Та

```
void calculateSummary(Grid<T> grid, Long timeStep);
```

передається загальна решітка клітинного автомату на кроці  $t - 1$  для *applyRule* та кроці  $t$  для *calculateSummary*. Це посилення на актуальні об'єкти, що використовуються рушієм, що створює небезпеку невизначеної поведінки рушія у разі їх модифікації користувачем, але заради обчислювальної ефективності, як однієї з основних переваг КА, ми покладаємо на користувача відповідальність не модифікувати передані об'єкти.

Метод *calculateSummary* викликається рушієм після застосування правила до всієї решітки, в даному методі користувач може проводити аналітичні обчислення отриманої конфігурації КА.

Фреймворк також містить інтерфейс *CellColorProvider* із методом *getCellColor* із якого користувач може повернути об'єкт класу *Color* в залежності від отриманого стану клітинки, цей об'єкт буде використано для відображення клітинки на графічному інтерфейсі та у згенерованих просторово-часових діаграмах для виділеного регіону решітки.

Для запуску симуляції за визначеними правилами користувач має створити новий екземпляр класу *Simulation* через наступний конструктор:

```
public Simulation (RuleApplier<T> ruleApplier,
                  CellColorProvider<T> cellColorProvider,
                  Map<String, Supplier<Grid<T>>>
                  initialConfigurationSuppliers,
                  String configurationName)
```

Та передати у нього програмно задану початкову конфігурацію через аргумент *initialConfigurationSuppliers* та *configurationName*, для визначення того, яку саме конфігурацію потрібно обрати із наданої мапи конфігурацій.

Програмно задана конфігурація – це заповнена довільними станами клітинок решітка, представлена відповідним інтерфейсом, загаданим раніше.

Після цього, користувач може запустити графічний інтерфейс для взаємодії зі створеною моделлю через виклик методу *run* на створеному екземплярі класу *Simulation*.

### 4.3.2 Керівництво до застосування графічного інтерфейсу

Розглянемо можливості графічного інтерфейсу, що пропонується фреймворком на прикладі інтерфейсу згенерованого для Моделі зі стоп-сигналами.

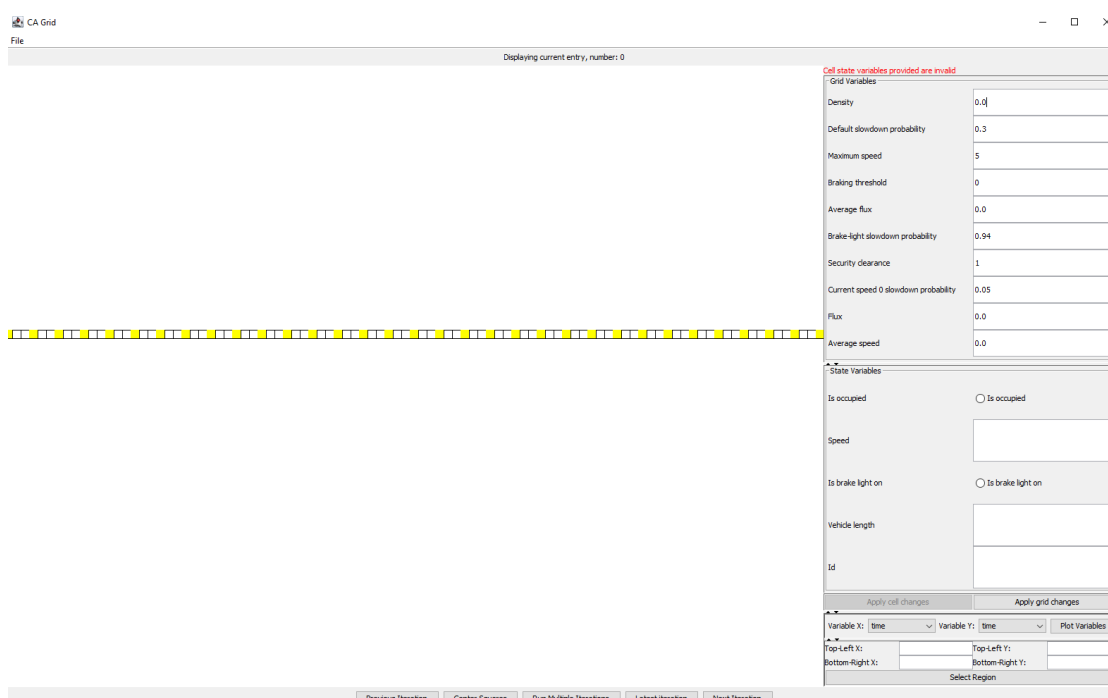


Рис. 16 Приклад графічного інтерфейсу програми

У правій частині ми бачимо панель редагування стану клітинок автомату, зміни можуть бути внесені лише для поточної конфігурації решітки, зміна історичних конфігурацій не передбачена.

Grid Variables	
Density	0.34
Default slowdown probability	0.3
Maximum speed	5
Braking threshold	0
Average flux	0.32
Brake-light slowdown probability	0.94
Security clearance	1
Current speed 0 slowdown probability	0.05
Flux	0.32
Average speed	0.9411764705882353

State Variables	
Is occupied	<input checked="" type="radio"/> Is occupied
Speed	1
Is brake light on	<input type="radio"/> Is brake light on
Vehicle length	1
Id	91

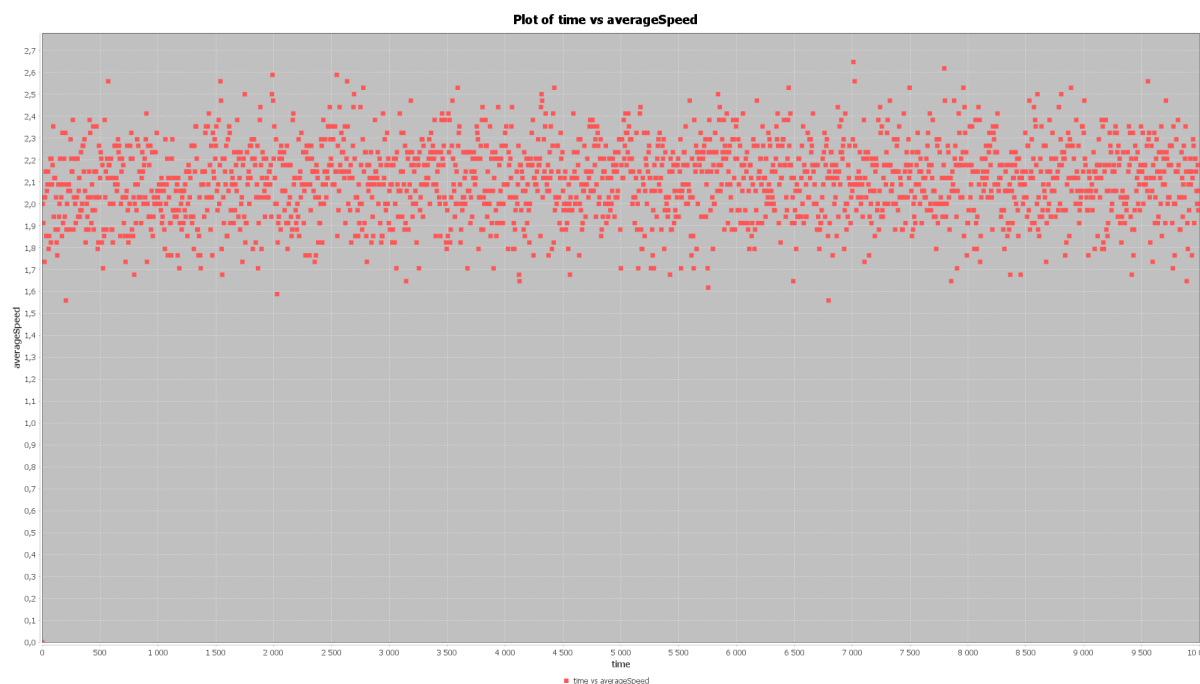
Apply cell changes      Apply grid changes

Variable X: time    Variable Y: time    Plot Variables

Top-Left X:      Top-Left Y:        
Bottom-Right X:      Bottom-Right Y:        
Select Region

*Рис. 17 панель редагування стану, вибору регіону, вибору змінних для створення графіків.*

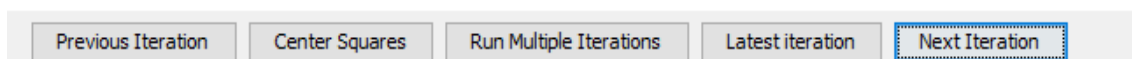
Нижче за панель редагування глобальних змінних та змінних стану бачимо панель створення графіків числових змінних одна відносно одної або відносно часу.



*Рис. 18 Приклад графіку залежності середньої швидкості відносно часу для Моделі зі стоп-сигналами (щільність 0,34 ТЗ/клітинку).*

Нижче за неї розташована панель вибору прямокутної секції у решітці клітинного автомату, яка працює через задання координат лівої верхньої та правої нижньої вершини прямокутника, що користувач бажає виділити.

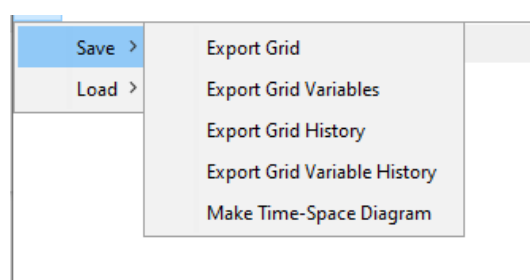
Знизу по центру розташовано панель із кнопками керування симуляцією, зліва на право це: кнопка переходу до попередньої ітерації в історії клітинного автомату, кнопка відцентрування клітинок у секції екрану, що їх зображує, кнопка для виклику діалогу про виконання певної кількості ітерації еволюції клітинного автомату, кнопка переходу до останньої ітерації в історії симуляції та кнопка перегляду, або ж генерації, наступної ітерації моделі.



*Рис. 19 Панель кнопок керування симуляцією.*

Основна секція екрану застосунку зайнята інтерактивним полем, що відображає обрану зі списку історії симуляції конфігурацію. Кліком на клітинку її можна обрати та подивитися у правій панелі її стан, за необхідності – відредагувати. Також, можна виділити та відредагувати будь-яку групу клітинок.

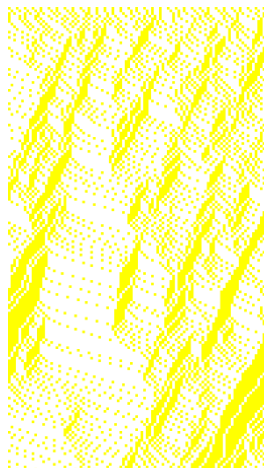
Верхнє меню застосунку містить опції експорту даних симуляції у форматі JSON, для потенційного застосування до отриманих даних більш потужних аналітичних інструментів.



*Рис. 20 Меню експорту даних*

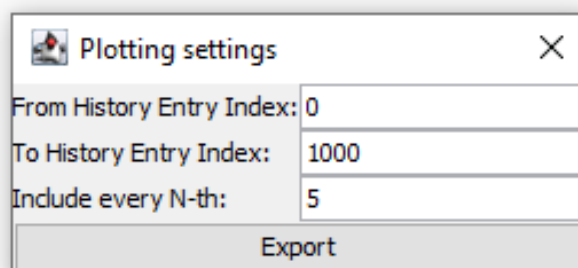
Також присутня опція імпорту раніше збереженої у форматі JSON конфігурації решітки клітинного автомату, у разі успішного імпорту конфігурації, її буде встановлено як найновішу ітерацію симуляції.

Окрім цього, присутня можливість генерації просторово-часових діаграм для виділеної секції клітинного автомата. За допомогою цього інструмента зручно генерувати типові для представлення даних про транспортний потік на певній секції дороги просторово-часові діаграми, описані у роботі раніше.



*Рис. 21 Приклад секції Просторово-часової діаграми для Моделі Нагеля та Шрекенберга із щільністю 0,34 ТЗ/клітинку.*

Для генерації просторово-часових діаграм та створення графіків із використанням числових глобальних змінних присутній спільний діалог вибору секції конфігурацій зі списку історії симуляції, для яких буде створено відповідний графік або діаграму, він включає можливість обрати початковий та кінцевий індекс, а також крок, із яким конфігурації включати до вибірки, по якій генеруватимуться відповідні зображення



*Рис. 22 Діалог вибору секції із історії симуляції.*

#### **4.4 Моделювання транспортних потоків за допомогою запропонованих інструментів**

В рамках роботи ми імплементували ряд моделей транспортних потоків із застосуванням запропонованих нами інструментів. Дані імплементациї



можуть слугувати хорошим прикладом для всіх охочих застосовувати даний фреймворк у своїх цілях, а також можуть бути використані для аналізу та вивчення імплементованих моделей та їх поведінки за різних умов.

#### 4.4.1 Імплементация Правила 184

Найпростішою моделлю, що ми реалізували є Правило 184, на його прикладі можна гарно побачити різницю класичного підходу до визначення правил клітинного автомату та специфічного для нашого фреймворку підходу, що дозволяє нам простіше працювати із моделями транспортних потоків.

У нашій реалізації даної моделі, ми розглядаємо кожен рядок решітки як окрему смугу руху і застосовуємо періодичні граничні умови, тобто моделюємо рух замкненою кільцевою дорогою.

Код застосування правила до клітинки виглядає наступним чином:

```
public RuleApplicationResult<Rule184Implementation> applyRule(@NonNull Cell<Rule184Implementation> cell,
                                                             Grid<Rule184Implementation> grid,
                                                             Long timeStep) {
    // Якщо розглядаємо клітинку із транспортним засобом
    if (cell.getState().occupied) {
        // То спершу визначаємо координати передуючої клітинки дороги
        int nextCellColumn = cell.getCoords().column() + 1 >= grid.getColumnCount() ? 0 : cell.getCoords().column() + 1;
        var neighbourCoordinates = new Pair<>(nextCellColumn, cell.getCoords().row());

        // Якщо наступна клітинка не зайнята, переходимо в неї
        if (grid.get(neighbourCoordinates) == null || !grid.get(neighbourCoordinates).occupied) {
            // Перехід симулюємо так: клітинка із поточними координатами матиме стан (leftoverState) occupied: false,
            // А клітинка, в яку переходимо (destinationState) (клітинка із вище визначеними координатами) матиме стан occupied: true
            return new RuleApplicationResult<>(new Rule184Implementation(occupied: false),
                                              new Cell<>(copyState(cell.getState()),
                                              neighbourCoordinates));
        } else {
            // Інакше, лишаємося в поточній клітинці
            return new RuleApplicationResult<>(copyState(cell.getState()));
        }
    }
    // Якщо клітинка без транспортного засобу, то лишаємо її такою ж, в разі, якщо у неї не перейшов інший транспортний засіб
    return RuleApplicationResult.constructSecondaryResult(copyState(cell.getState()));
}
```

*Рис. 23 Код реалізації Правила 184*

Як бачимо, порівняно із класичним підходом до визначення стану клітини для правила 184, застосовуючи наш, достатньо розглянути лише саму клітинку та правого її сусіда, а не повний її окіл.

#### 4.4.2 Імплементация моделі Нагеля та Шрекенберга

Окрім правила 184, ми також імплементували класичну модель Нагеля та Шрекенберга [16], адже це основоположна модель в галузі застосування КА до аналізу транспортних потоків, тож неможливо обійтися без пропозиції реалізації цієї моделі нашими інструментами.

Як і з правилом 184, ми обмежилися моделлю для замкненої кільцевої дороги без додаткових правил зміни смуги.

```
@Override
public RuleApplicationResult<NaSchImplementation> applyRule(@NonNull Cell<NaSchImplementation> cell,
                                                           Grid<NaSchImplementation> grid,
                                                           Long timeStep) {

    if (cell.getState().occupied) {
        int clearance = calculateClearance(cell, grid); // Визначаємо проміжковий інтервал

        int nextSpeed = Math.min(cell.getState().speed + 1, clearance); // Прискорення та уповільнення

        if (random.nextDouble() < slowingProbability) // Випадкове уповільнення
            nextSpeed = Math.max(nextSpeed - 1, 0);

        // Пересування кільцевою дорогою
        int columnToMoveTo = (cell.getCoords().column() + nextSpeed) % grid.getColumnCount();
        var coordinatesToMoveTo = new Pair<>(columnToMoveTo, cell.getCoords().row());

        if (coordinatesToMoveTo.equals(cell.getCoords()))
            return new RuleApplicationResult<>(new NaSchImplementation( occupied: true, nextSpeed));

        return new RuleApplicationResult<>(new NaSchImplementation( occupied: false, speed: 0),
                                           new Cell<>(new NaSchImplementation( occupied: true, nextSpeed), coordinatesToMoveTo));
    }

    return RuleApplicationResult.constructSecondaryResult(copyState(cell.getState()));
}
```

Окрім цього, до моделі інтегровано підрахунок типових макроскопічних характеристик транспортного потоку:

```
@Override
public void calculateSummary(Grid<NaSchImplementation> grid, Long timeStep) {
    int totalCells = grid.getColumnCount();
    int occupiedCount = 0;
    int totalSpeed = 0;
    for (Cell<NaSchImplementation> cell : grid) {
        if (cell.getState().occupied) {
            occupiedCount++;
            totalSpeed += cell.getState().speed;
        }
    }

    // Значення середньої швидкості, щільності та інтенсивності потоку на даній ітерації
    density = (double) occupiedCount / totalCells;
    averageSpeed = occupiedCount > 0 ? (double) totalSpeed / occupiedCount : 0;
    flux = density * averageSpeed;
    sumOfFlux += flux;
    averageFlux = sumOfFlux / timeStep;
}
```

Клас *NaSchImplementation*, що визначає стан клітинки у даній моделі, має наступний набір змінних:

```
@StateVariable(name = "Is occupied")
private boolean occupied;
@StateVariable(name = "Speed")
private int speed;
@GridVariable(name = "Slowdown probability", min = 0, max = 1)
private static double slowingProbability = 0.4;
@GridVariable(name = "Maximum speed", min = 0)
private static int maxSpeed = 5;
@GridVariable(name = "Density")
private static double density = 0;
@GridVariable(name = "Flux")
private static double flux = 0;
@GridVariable(name = "Average speed")
private static double averageSpeed = 0;
private static double sumOfFlux = 0;
@GridVariable(name = "Average flux")
private static double averageFlux = 0;
```

#### 4.4.3 Імплементация Моделі зі стоп-сигналами

Найскладнішою за своєю динамікою моделлю, що ми імплементували за допомогою наших інструментів є Модель зі стоп-сигналами авторства Кноспе, Сантена, Шадшнайдера та Шрекенберга [17], яку ми детальніше описували в розділі 3.2.4.

Як і з двома попередніми моделями, ми обмежилися випадком замкненої кільцевої дороги.

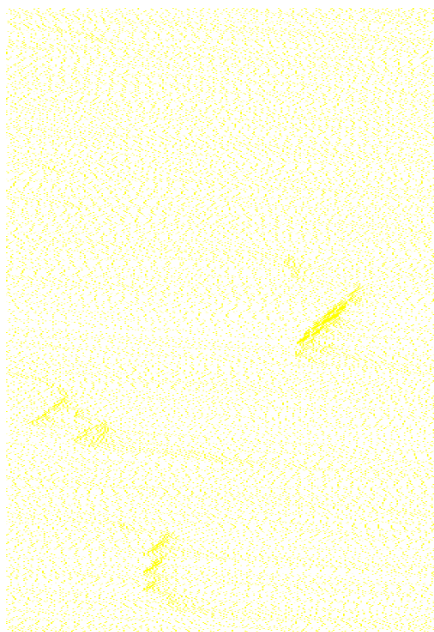
Макроскопічні виміри для даної моделі ми проводимо так само, як і в попередньому випадку.

Цікавим аспектом реалізації саме цієї моделі є те, що тут важливо правильно застосувати двоетапну природу нашого рушія, адже модель має елемент передбачення позиції передуючого учасника попереднім, тобто існує імовірність, що клітинку, яку покинув транспортний засіб прямо на

наступному часовому кроці вже займе інший. Через це, важливо зазначати, що стан, який залишає по собі ТЗ покидаючи клітинку є вторинним результатом, що ми і робимо в нашій реалізації.

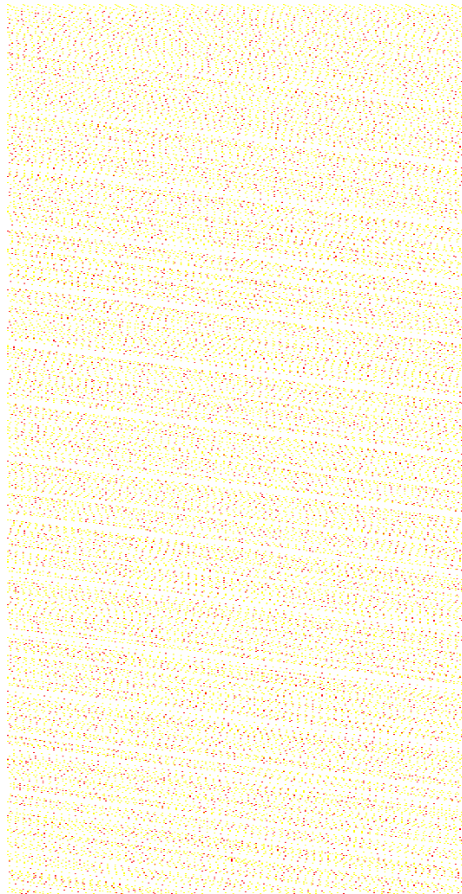
#### **4.4.4 Порівняння Моделі Нагеля та Шрекенберга та Моделі зі стоп-сигналами.**

На наступному зображенні показано один із наших експериментів із моделлю Нагеля та Шрекенберга, на якому видно описаний раніше (3.2.3) артефакт правила рандомізації, у тій формі, що воно існує у даній моделі, а саме: регіони нестабільності що виникають за умов, коли трафік повинен перебувати у стабільній фазі вільного потоку:



*Рис. 24 Просторово-часова діаграма для Моделі Нагеля та Шрекенберга із щільністю 0,1 ТЗ/клітинку.*

За допомогою запропонованих інструментів можна гарно і легко зобразити відмінність Моделі зі стоп-сигналами від Моделі Нагеля та Шрекенберга у тому, яку динаміку вона має при низькій щільності ТЗ:



*Рис. 25 Просторово-часова діаграма для Моделі зі стоп-сигналами із щільністю 0,1 ТЗ/клітинку. Червоні клітинки - гальмуючі ТЗ.*

Як бачимо, порівняно із моделлю Нагеля та Шрекенберга, модель зі стоп сигналами гарно зображає стабільну фазу вільного трафіка.

Крім того, як було загадано в 3.2.4, дана модель може зображати стани потоку подібні до фази синхронізованого трафіка, що якісно відрізняє її від моделі Нагеля та Шрекенберга, втім, у загаданих раніше працях [20] та [21] для зображення потоку застосовують саме останню.

Це створює питання, для чого нехтувати більш реалістичною моделлю?

Враховуючи складність імплементації Моделі зі стоп-сигналами, можемо зробити висновок, що для праць, які концентруються на розгляді інших аспектів транспортних мереж, таких як стратегії регуляції руху на перехрестях, і потребують лише дещо реалістичного зображення потоку,

застосування моделі Нагеля та Шрекенберга виправдано через її простоту, так як це дозволяє легше її модифікувати для побудови ширших моделей транспортних мереж.

#### **4.5 Висновки до Розділу 4**

В цьому розділі запропоновано фреймворк-рушій для побудови моделей у парадигмі клітинних автоматів на двовимірній прямокутній решітці, описано деталі його реалізації, надано керівництво до його застосування, продемонстровано його застосовність до моделювання транспортних потоків та показано зручну для моделювання транспортних мереж особливість будови запропонованого фреймворку, що дозволяє модифікувати одразу дві клітинки під час застосування правила переходу стану до однієї, що спрощує моделювання пересування частинок або ТЗ решіткою. Засновуючись на наведеній імплементації моделі Нагеля та Шрекенберга та Моделі зі стоп-сигналами, зроблено висновок, що через складність реалізації другої, застосування першої у ширших моделях транспортних мереж часто виправдане.

## Висновки

У роботі було досліджено клітинні автомати та області їх використання, проведено дослідження загальних засад аналізу транспортних мереж із фокусом на аналізі неперервних автомобільних потоків, охарактеризовано застосування клітинних автоматів у контексті аналізу транспортних потоків.

У практичній частині роботи розроблено фреймворк-рушію із графічним інтерфейсом для побудови довільних моделей у парадигмі клітинних автоматів на двовимірній прямокутній решітці, який опубліковано у Maven-репозиторії для зручного застосування будь-ким охочим.

У запропонований інтерфейс інтегровано інструменти для побудови графіків отриманих із моделей числових вимірів та для генерації просторово-часових діаграм, крім того, надано можливість експорту даних у форматі JSON для зручнішого застосування до отриманих даних потужніших аналітичних інструментів.

Використовуючи запропоновані інструменти, показано їх застосовність до аналізу транспортних мереж, через реалізацію трьох моделей транспортних потоків, а саме: Правила 184, Моделі Нагеля та Шрекенберга та Моделі зі стоп-сигналами.

На основі наведених імплементацій та розглянутої літератури, можна зробити висновок, що хоч Модель Нагеля та Шрекенберга і менш реалістична за Модель зі стоп-сигналами, на відміну від Правила 184, її простих правил вже достатньо для моделювання більшості феноменів трафіка, тож її популярність для побудови ширших моделей транспортних мереж виправдана її простішою реалізацією, що робить її легшою до модифікації.

Отже, в результаті виконаної роботи досліджено область моделювання транспортних мереж за допомогою парадигми клітинних автоматів та запропоновано програмне рішення для роботи із КА-моделями, що може бути розширене та покращене в майбутньому, зокрема через поліпшення згенерованого графічного інтерфейсу, додавання потужніших аналітичних інструментів та розширення можливостей рушія для роботи із не лише двовимірними прямокутними решітками.



## Список використаних джерел

1. Schiff J. Cellular Automata: A Discrete View of the World / Joel L. Schiff., 2008.
2. Wolfram S. A New Kind of Science / Stephen Wolfram., 2002.
3. Maerivoet S. Cellular Automata Models of Road Traffic [Електронний ресурс] / S. Maerivoet, B. De Moor. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/physics/0509082.pdf>.
4. LuValle B. The Effects of Boundary Conditions on Cellular Automata [Електронний ресурс] / Brian J. LuValle. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://content.wolfram.com/sites/13/2019/04/28-1-5.pdf>.
5. Cellular automaton [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_automaton](https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton).
6. Lattice gas automaton [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lattice\\_gas\\_automaton](https://en.wikipedia.org/wiki/Lattice_gas_automaton).
7. Lim H. Lattice-gas automaton simulations of simple fluid dynamical problems [Електронний ресурс] / H. A. Lim // Mathematical and Computer Modelling. – 1990. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089571779090276S>.
8. Network Science [Електронний ресурс] // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/11516/network-science>.
9. Network science [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_science](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_science).
10. Barthelemy M. Spatial Networks [Електронний ресурс] / Marc Barthelemy. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/1010.0302v2.pdf>.
11. Gartner N. Revised Monograph on Traffic Flow Theory. / N. Gartner, C. Messer, A. Rathi., 2001.

12. Maerivoet S. Traffic Flow Theory [Электронный ресурс] / S. Maerivoet, B. De Moor. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/physics/0507126.pdf>.
13. Transportation Engineering Online Lab Manual [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://www.webpages.uidaho.edu/niatt\\_labmanual/index.htm](https://www.webpages.uidaho.edu/niatt_labmanual/index.htm).
14. Krauß S. Microscopic modeling of traffic flow: investigation of collision free vehicle dynamics. [Электронный ресурс] / Stefan Krauß. – 1998. – Режим доступа до ресурсу: <https://sumo.dlr.de/pdf/KraussDiss.pdf>.
15. Mathew T. Lane Changing Models Lecture Notes in Transportation Systems Engineering [Электронный ресурс] / Том V. Mathew – Режим доступа до ресурсу: [https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/534\\_LaneChange/web/web.html#x1-50012](https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/534_LaneChange/web/web.html#x1-50012).
16. Nagel K. A cellular automaton model for freeway traffic / K. Nagel, M. Schreckenberg. // Journal de Physique I. – 1992. – С. 2221–2229.
17. Towards a realistic microscopic description of highway traffic [Электронный ресурс] / W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg. – 2000. – Режим доступа до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0012204.pdf>.
18. Kerner B. Cellular automata approach to three-phase traffic theory [Электронный ресурс] / B. Kerner, S. Klenov, D. Wolf. – 2002. – Режим доступа до ресурсу: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0206370.pdf>.
19. Tian J. Cellular automata approach to synchronized traffic flow modelling [Электронный ресурс] / J. Tian, C. Zhu, R. Jiang. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.05555>.
20. Cellular Automata Model for Analysis and Optimization of Traffic Emission at Signalized Intersection [Электронный ресурс] / R. Marzoug,

N. Lakouari, J. Cruz, C. Gómez. – 2022. – Режим доступа до ресурсу:  
<https://doi.org/10.3390/su142114048>.

- 21.Regragui Y. A cellular automata model for urban traffic with multiple roundabouts [Электронный ресурс] / Y. Regragui, N. Moussa // Chinese Journal of Physics. – 2018. – Режим доступа до ресурсу:  
<https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.02.010>.

## Додаток А

## Діаграма класів з урахуванням елемента View

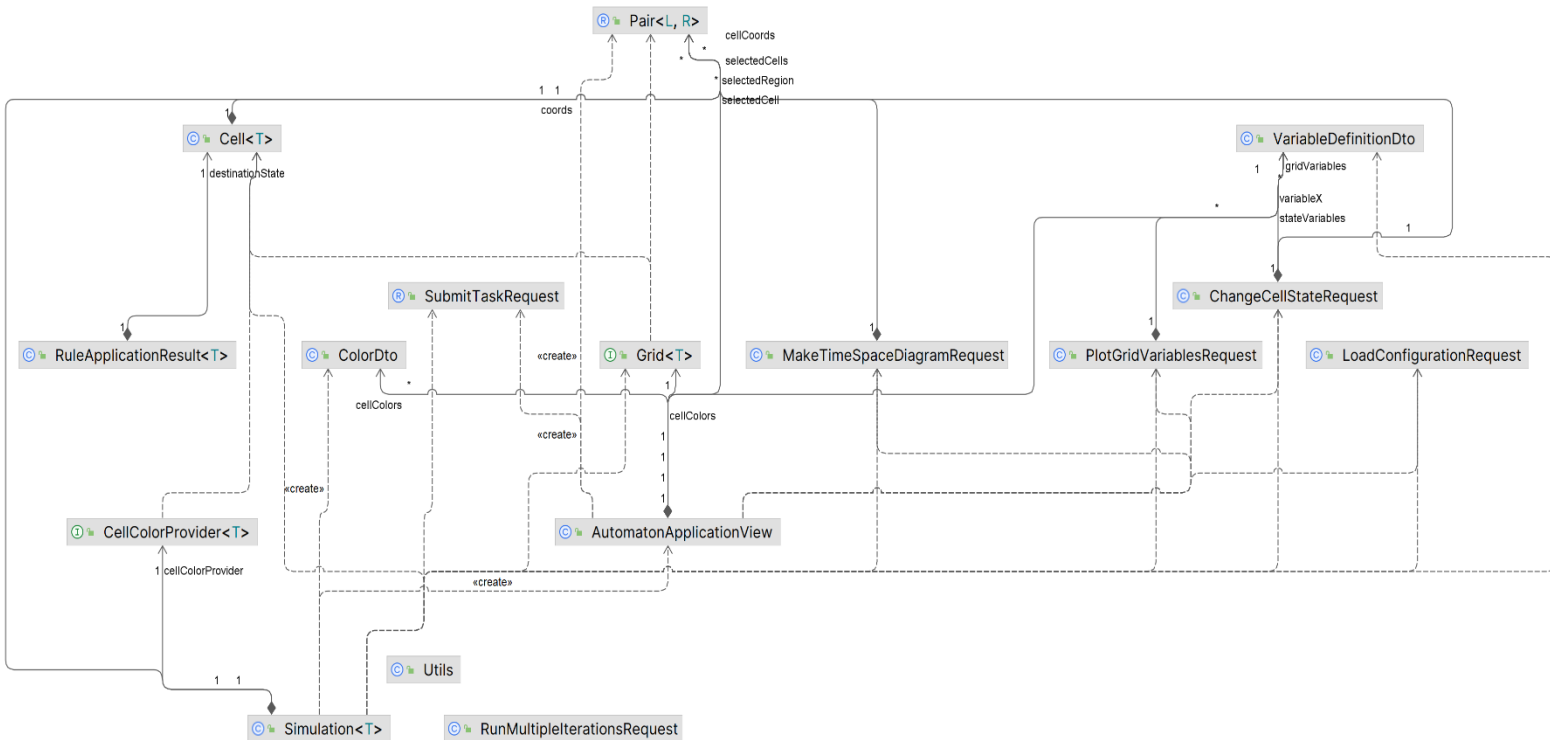


Рис. А.1 Діаграма класів з урахуванням елемента View.

## Додаток Б

### Графік залежності середньої швидкості відносно часу для Моделі зі стоп-сигналами

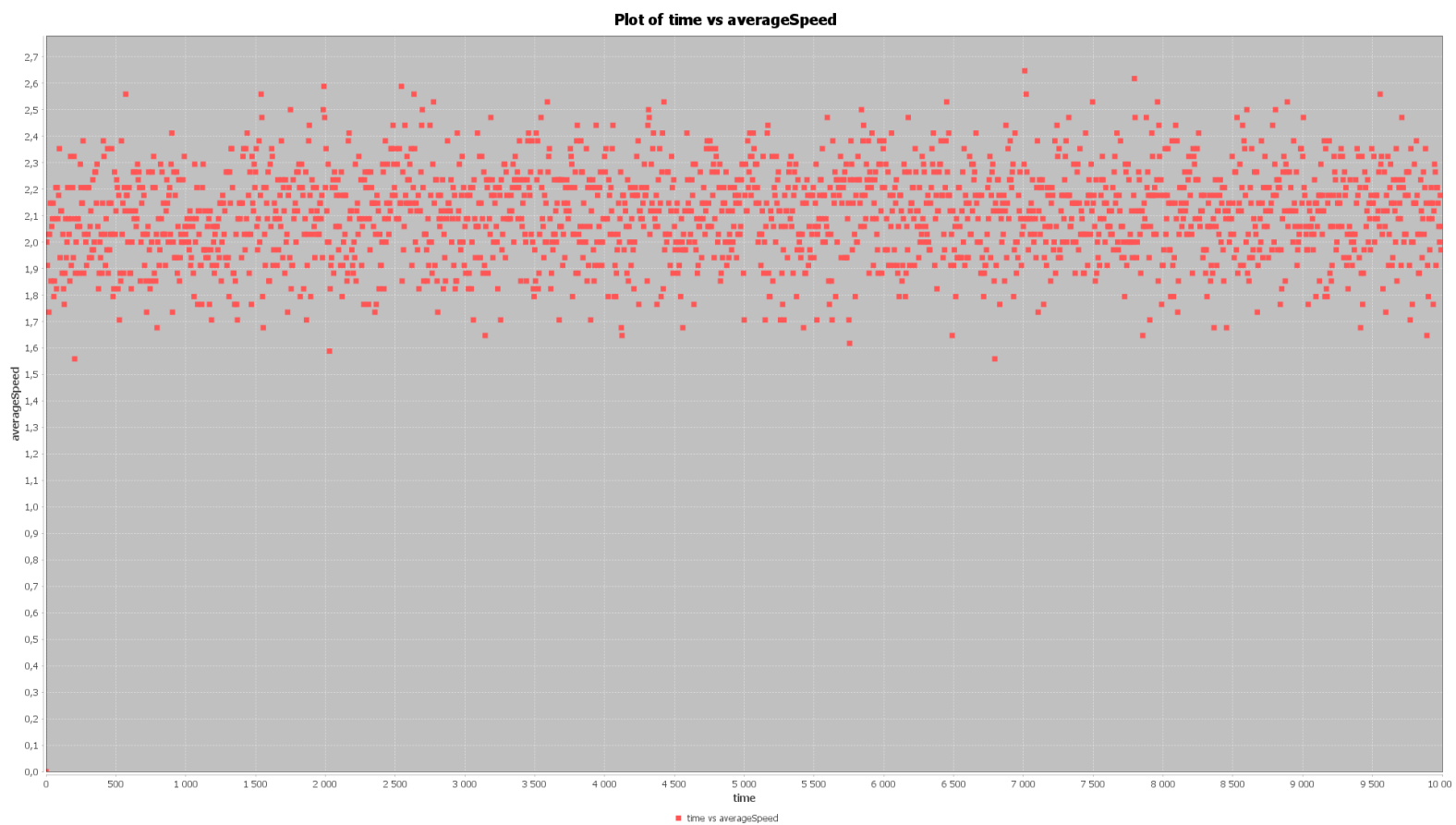


Рис. Б.1 Графік залежності середньої швидкості відносно часу для Моделі зі стоп-сигналами.

## Додаток В

### Інтерфейс додатку

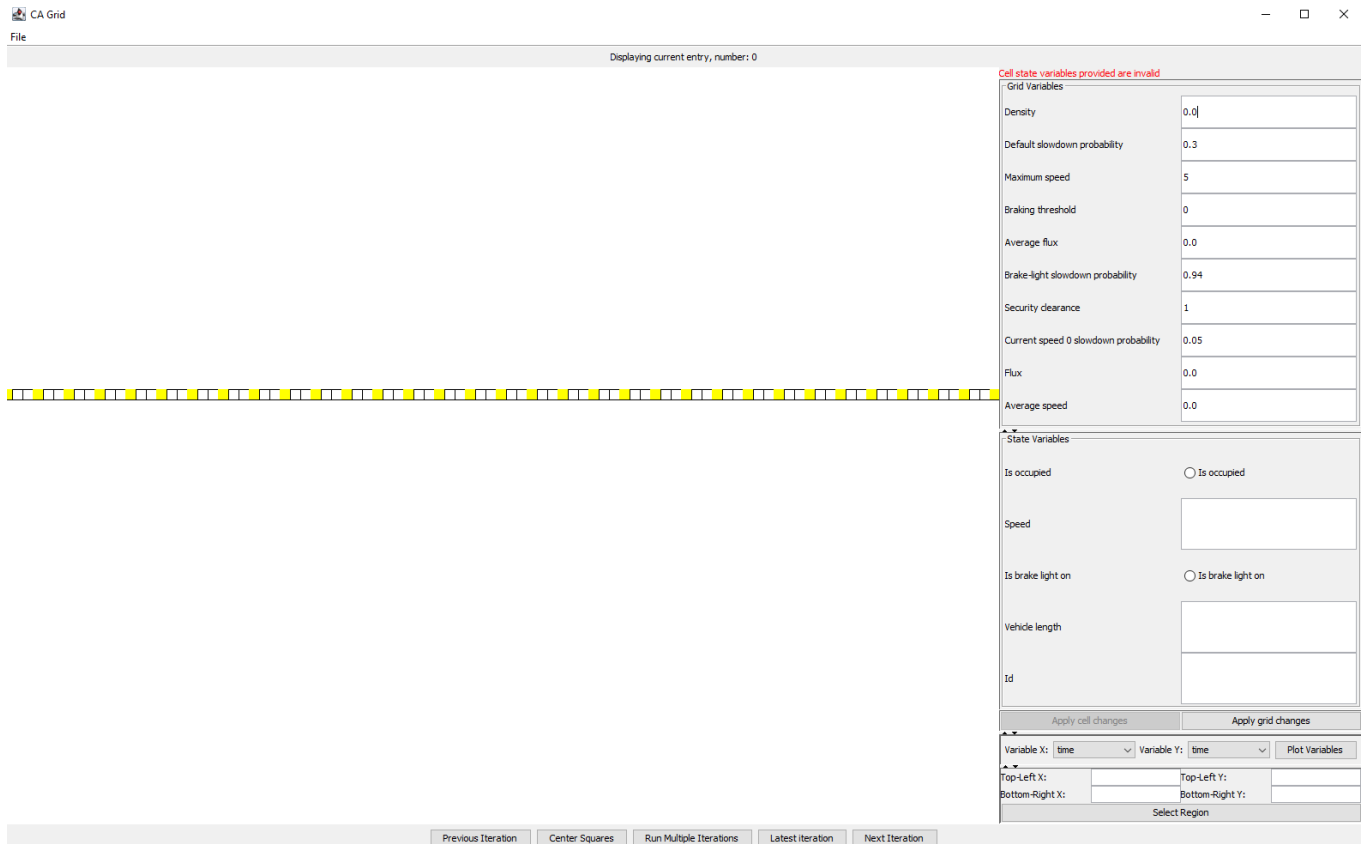


Рис. В.1 Зображення інтерфейсу.