

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

**Моделювання транспортних потоків на основі клітинних автоматів**  
**Текстова частина до кваліфікаційної роботи**  
**за спеціальністю «Комп'ютерні науки» - 122**

**Керівник кваліфікаційної роботи**

Асистент

Калітовський Б.В.

\_\_\_\_\_ (Підпис)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**Виконала студентка**

КН-4

Блавт К.-М. В.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

Київ 2023

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри мультимедійних систем,  
доцент, к.ф.-м.н.

О. П. Жежерун (підпис)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

студентці Блавт Катерині-Марії Володимирівні

факультету інформатики 4 курсу бакалаврської програми

**ТЕМА: Моделювання транспортних потоків на основі клітинних автоматів**

Зміст ТЧ до кваліфікаційної роботи:

Анотація

Вступ

1. Дослідження клітинних автоматів.
2. Опис та аналіз існуючих моделей.
3. Пропозиція та реалізація розширеної моделі.

Висновки

Список джерел

Додатки (за потреби)

Дата видачі “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

Керівник Калітовський Б.В.

Завдання отримано \_\_\_\_\_

### Календарний план виконання роботи

№	Назва етапу кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапу	Примітка
1.	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	01.10.2022	
2.	Огляд літератури за темою роботи	01.11.2022	
3.	Проведення дослідження	01.12.2022	
4.	Реалізація моделі	01.01.2023	
5.	Написання текстової частини	04.04.2023	
6.	Захист кваліфікаційної роботи	29.05.2023	

Студентка Блавт К.-М. В.

Керівник Калітовський Б. В.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023

## ЗМІСТ

<b>Анотація.....</b>	<b>6</b>
Перелік умовних позначень.....	7
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1: Огляд теоретичної бази.....</b>	<b>10</b>
1.1 Будова та характеристики клітинного автомату та його використання в моделюванні транспортних потоків.....	10
1.1.1 Складові клітинного автомату для моделювання транспортних потоків.....	10
1.1.2 Змінні, що визначають моделі ТСА.....	11
1.1.3 Локальні вимірювання детектором кінцевої довжини.....	12
1.1.4 Глобальні вимірювання на всій решітці.....	14
1.2 Загальна характеристика клітинних автоматів, що моделюють транспортні потоки.....	14
1.2.1 Одноклітинні та багатоклітинні моделі.....	14
1.2.2 Односмугові та багатосмугові моделі.....	15
1.2.3 Детерміновані, стохастичні та заповільнені при старті моделі.....	15
1.3 Співвідношення ТСА з умовами реального світу.....	16
1.4 Висновки до розділу 1.....	17
<b>РОЗДІЛ 2: Опис та аналіз клітинних автоматів, що моделюють транспортні потоки.....</b>	<b>18</b>
2.1 Загальні положення ТСА в дослідженні.....	18
2.2 Wolfram's rule 184 (CA-184).....	18
2.3 Deterministic Fukui-Ishibashi TCA (DFI-TCA).....	21
2.4 Nagel-Schreckenberg TCA (STCA).....	22
2.5 STCA with cruise control (STCA-CC).....	24

2.6 Stochastic Fukui-Ishibashi TCA (SFI-TCA).....	25
2.7 Висновки до розділу 2.....	26
<b>РОЗДІЛ 3: Пропозиція розширеної моделі.....</b>	<b>28</b>
3.1 Опис розширеної моделі.....	28
3.1.1 Загальна характеристика й актуальність.....	28
3.1.2 Будова розширеної моделі.....	28
3.2 Опис реалізації програмного коду.....	30
3.2.1 Важливі класи.....	31
3.2.2 Важливі методи.....	35
3.2.3 Класи експериментів та зображень графіків.....	38
3.3 Результати.....	39
3.4 Висновки до розділу 3.....	55
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>58</b>
Список використаних джерел.....	60

## **Анотація**

У кваліфікаційній роботі розглядаються теоретичні засади моделювання транспортних потоків з використанням клітинних автоматів, оскільки вони є потужним інструментом для дослідження та аналізу руху транспорту в умовах міста. Проводиться аналіз різних існуючих моделей, а також наводиться пропозиція розширення однієї з них із додаванням роботи світлофорів. У роботі виконується розробка та реалізація розширеної моделі на основі клітинних автоматів та декількох різних налаштувань роботи світлофорів.

Після розробки моделі проводиться експериментальне дослідження, яке дозволяє оцінити вплив нових факторів розробленої моделі та зробити висновки про її відповідність умовам реального світу.

Результати дослідження вказують на те, що модель на основі клітинних автоматів є потужним інструментом для аналізу транспортних потоків та управління рухом транспорту. Вона може бути використана для прогнозування заторів, визначення оптимальних стратегій управління світлофорами та вдосконалення дорожньої інфраструктури з метою поліпшення руху транспорту та зменшення перевантаження доріг.

**Ключові слова:** клітинний автомат, моделювання транспортних потоків

**Перелік умовних позначень**

КА - клітинний автомат

ТСА - клітинний автомат транспортного потоку (traffic cellular automata)

ТЗ - транспортний засіб

$v_{sm}$  - середня швидкість

$k$  - щільність транспортних засобів

$q$  - пропускна здатність потоку

## ВСТУП

Моделювання транспортних потоків на основі клітинних автоматів — цікава, складна та актуальна тема в сучасному світі. Проблеми із перевантаженням доріг та заторами є критичними в багатьох містах по всьому світу. Дослідження руху транспорту дозволить краще зрозуміти фактори, які впливають на нього, а також покаже можливості для покращення його ефективності. Таке дослідження може бути корисним для розробки нових стратегій регулювання транспортних потоків та збільшення ефективності доріг. Існують різні фактори оцінки ефективності, такі як час перебування у заторі, пропускна здатність дороги, середня швидкість пересування та інші. Крім того в подальшому моделювання транспортних потоків може бути корисним для вивчення впливу різних зовнішніх параметрів, таких як розмір доріг, кількість смуг, обмеження швидкостей, будова та схема доріг, перехресть, поворотів, доріг з кільцевим рухом, світлофорів, наземних пішохідних переходів, наявності інших учасників дорожнього руху, наприклад, велосипедистів чи пішоходів, а також можливих критичних випадків, коли звичайний рух транспортів має змінюватись через рух машин спеціальних структур швидкої допомоги, пожежної служби, поліції чи інших. Отже, дослідження моделювання транспортних потоків є актуальним та може допомогти в розумінні та покращенні ефективності руху транспортних засобів на дорогах.

Клітинні автомати є гнучким та потужним інструментом для моделювання складних систем за допомогою розбиття великої системи на малі елементи клітинного автомату та простого опису правил змін та поведінки з певних умов.

Об'єктом дослідження є клітинні автомати.



Предметом дослідження є транспортні моделі на основі клітинних автоматів.

Метою дослідження є дослідити, проаналізувати та описати існуючі моделі транспортних потоків побудованих на клітинних автоматах, реалізувати запропоновану нами розширену модель, яка передбачає наявність світлофорів та зробити відповідні висновки.

Мета роботи зумовила наступні завдання:

1. Описати загальні поняття по побудові клітинного автомата, що моделює транспортний потік.
2. Розглянути, описати, проаналізувати конкретні підвиди односмугових одноклітинних ТСА.
3. Зробити пропозицію по розширенню моделі, яка передбачає наявність світлофорів та реалізувати її.
4. Зробити висновки по результатам власної запропонованої моделі.

Робота складається з трьох розділів.

Перший розділ знайомить нас теоретичними основами клітинних автоматів, що моделюють транспортні потоки. Загальна характеристика правил, видів та типів, за якими вони можуть бути змодельовані.

У другому розділі наведено опис п'яти існуючих ТСА та їхня порівняльна характеристика.

У третьому розділі описана наша пропозиція по розширенню попередніх моделей за рахунок додавання фактору наявності двоколірних світлофорів, які в свою чергу також можуть мати різні часові та просторові характеристики, наприклад бути розташованими на однакових чи різних проміжках, а також мати різні частотні інтервали горіння зеленого та червоного світла. Також в цьому розділі описані результати експериментів.

## РОЗДІЛ 1: Огляд теоретичної бази.

1.1 Будова та характеристики клітинного автомату та його використання в моделюванні транспортних потоків.

1.1.1 Складові клітинного автомату для моделювання транспортних потоків.

Клітинний автомат (КА) - це математична модель, що складається з простору, який поділено на сітку клітин, та правил, які визначають зміну стану кожної клітини з часом. Кожна клітина може приймати дискретні значення стану (наприклад, 0 або 1), і зміна стану клітини залежить від стану сусідніх клітин та внутрішніх правил. При моделюванні транспортних потоків підбираються відповідні характеристики кожної зі складових автомату.

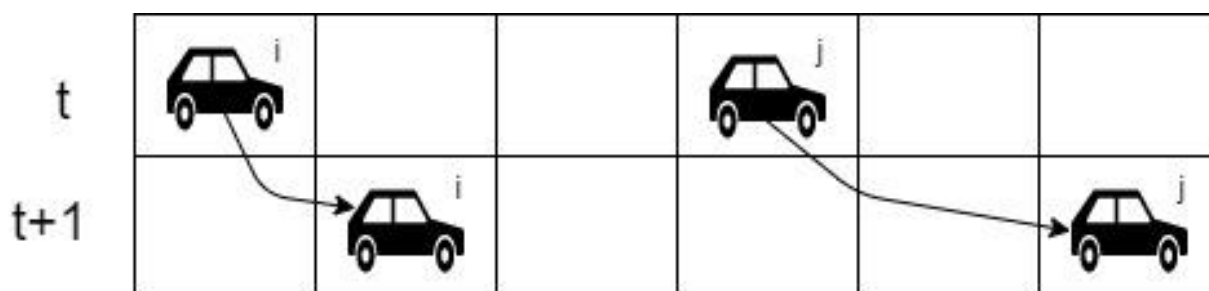
Простір - це сітка клітин, де кожна клітина відповідає деякій ділянці дороги.

Стан клітини - це стан конкретної ділянки дороги в певний момент часу (вільна або зайнята транспортним засобом).

Сусіди - стан сусідніх клітин, відстань до яких не перевищує максимальну.

Правила переходу - визначають, як зміниться стан конкретної клітини в залежності від її теперішнього стану та стану сусідів.

На рисунку 1.1 можна простежити зміну двох автомобілів  $i$  та  $j$  однакового розміру однієї клітинки у два послідовні моменти часу  $t$  і  $t+1$ . Очевидно, що рух першої = 1 клітинка/часокрок, а другої 2 клітинки/часокрок.

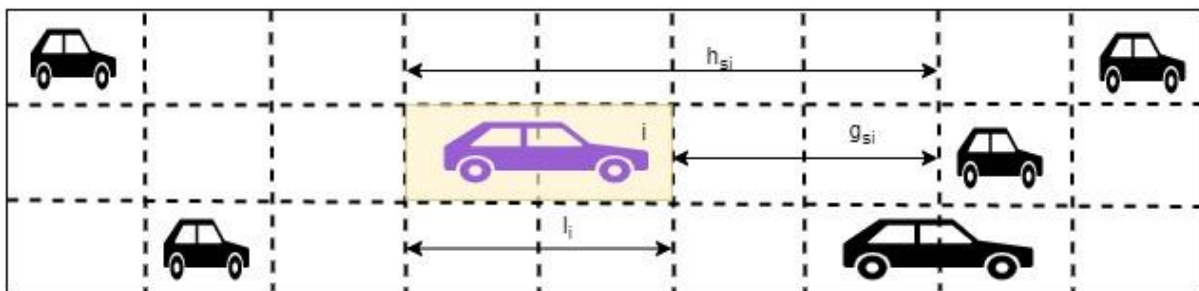


*Рисунок 1.1 Рух двох автомобілів в односмуговій решітці у два послідовні моменти часу.*

### 1.1.2 Змінні, що визначають моделі ТСА.

Отже сітка представляє собою прямокутну двовимірну решітку розміром  $L1 * K1$  клітинок, де  $L1$  - довжина, а  $K1$  - ширина, тобто кількість смуг. Кожна клітинка може бути вільною або заповненою. А транспортний засіб займати одну або декілька послідовних клітинок, тобто мати довжину більшу за одну клітинку. Загалом кожен транспортний засіб характеризується кількома параметрами: просторовим відступом (space headway), просторовим проміжком (space gap), довжиною ТЗ, часовим відступом (time headway), часовим проміжком (time gap), часом зайнятості клітинки (вимірюється як довжина транспорту поділена на швидкість транспорту і це час, який транспорт займає у власній клітинці), швидкістю, максимальною швидкістю.

На рисунку 1.2 можна побачити приклад руху в одну сторону декількох автомобілів різної довжини в решітці на декілька смуг.



*Рисунок 1.2 Розміщення автомобілів, що рухаються у декілька смуг в одну сторону. Для автомобіля  $i$  довжиною  $l_i$  клітинок показані просторові проміжок ( $g_{si}$ ) та відступ ( $h_{si}$ ), для автомобіля з його смуги, що знаходиться перед ним.*

Варто зазначити, що  $h_{si} = g_{si} + l_i$ . Такі ж самі характеристики можна описати для сусідів з лівої та правої смуги.

Для оцінки моделі використовуємо наступні характеристики: глобальні щільність ( $k$ ), пропускна здатність ( $q$ ), та просторово середня швидкість.

В нашому дослідженні ми робимо локальні вимірювання за допомогою штучного циклового детектора обмеженої довжини та глобальні виміри на всій решітці. В подальших позначеннях ми використовуємо загальноприйнятту лексику, тому позначення 'l' вказані для локальних і 'g' для глобальних характеристик. Часова і просторова різниця відповідно  $\Delta T$  (у секундах) та  $\Delta X$  (у метрах). Для всіх подальших експериментів та доведень будемо вважати цілочисловий період вимірювання  $T_{mp}$  у часокроках. Таким чином, беручи дані в інтервалах по 60 секунд з  $\Delta T = 1.2$  секунди, потрібний вимірювальний період:  $T_{mp} = 60:1.2 = 50$  часокроків. Крім того, щільність виражається у транспортних засобах на клітинку, пропускна здатність - у транспортних засобах на часокрок, а середня швидкість простору - у клітинках на часокрок.

Наступні методи вимірювання взято з роботи Свен Маєривота та Барт Де Мур "Cellular Automata Models of Road Traffic"[1].

### 1.1.3 Локальні вимірювання детектором кінцевої довжини

Для локальних вимірювань працюємо зі штучним петлевым детектором скінченної довжини  $Kld \in \mathbb{N}_0$ , розташованим на однопотоковій дорозі. Зауважте, що зазвичай  $Kld \geq v_{max}$ , щоб забезпечити відсутність можливості "пропуску" транспортних засобів між послідовними кроками часу. Перший крок нашого підходу до виконання цих вимірювань полягає в отриманні локальних вимірювань щільності та потоку для такої просторової області вимірювання в певний момент часу  $t$ . Після отримання цих значень можна визначити середню швидкість за допомогою основного співвідношення теорії транспортного потоку  $q = k * v_{sm}$  [4]:

$$kl(t) = \frac{N(t)}{Kld}, \quad (1)$$

$$ql(t) = \frac{1}{Kld} \sum_{i=1}^{N(t)} vi(t), \quad (2)$$

⇓

$$vsml(t) = \frac{ql(t)}{kl(t)} = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^N vi(t). \quad (3)$$

Тут припускається, що на час  $t$  в сегменті петлевого детектора присутні  $N(t)$  транспортних засобів. Вимірювання щільності та потоку на послідовних часокроках тепер тимчасово усереднюються за просторовими областями вимірювання. Аналогічно до попереднього методу, середня швидкість визначається за допомогою раніше згаданого основного співвідношення:

$$kl = \frac{1}{Tmp} \sum_{t=1}^{Tmp} kl(t) = \frac{1}{TmpKld} \sum_{t=1}^{Tmp} N(t), \quad (4)$$

$$ql = \frac{1}{Tmp} \sum_{t=1}^{Tmp} ql(t) = \frac{1}{TmpKld} \sum_{t=1}^{Tmp} \sum_{i=1}^{N(t)} vi(t), \quad (5)$$

⇓

$$\begin{aligned} vsml &= \frac{ql}{kl} = \frac{\sum_{t=1}^{Tmp} \sum_{i=1}^{N(t)} vi(t)}{\sum_{t=1}^{Tmp} N(t)} = \\ &= \sum_{t=1}^{Tmp} N(t) \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} vi(t) / \sum_{t=1}^{Tmp} N(t) = \sum_{t=1}^{Tmp} N(t) vsml(t) / \sum_{t=1}^{Tmp} N(t). \quad (6) \end{aligned}$$

Похідні для  $kl$  і  $ql$ , як описано вище, також відповідають узагальнюючим визначенням щільності та потоку, які визначаються як загальний час, відповідно загальний пройдений шлях, поділені на площу області вимірювання (яка відповідає  $Tmp \cdot Kld$ ). Крім того, слід зауважити, що останнє рівняння (6) по суті є зваженою середньою значень локальних середніх швидкостей  $vsml(t)$  на кожному кроці часу  $t$  з використанням числа транспортних засобів  $N(t)$  як ваг.

### 1.1.4 Глобальні вимірювання на всій решітці

Для глобальних вимірювань ми розглядаємо  $N$  транспортних засобів, які рухаються в закритій односмуговій решітці з довжиною  $KL$  комірок. Внаслідок цього глобальна щільність  $kg$  залишається постійною протягом усього періоду вимірювання.

Рівняння для знаходження  $kg$ ,  $qg$  та  $vsmg$  є такими ж як у минулому пункті, але  $Kld=KL$  і є наступними:

$$kg = \frac{N}{KL}, \quad (7)$$

$$qg = \frac{1}{T_{mp} KL} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \sum_{i=1}^N vi(t), \quad (8)$$

⇓

$$\begin{aligned} vsmg &= \frac{qg}{kg} = \frac{1}{T_{mp} N} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \sum_{i=1}^N vi(t) = \\ &= \frac{1}{T_{mp} N} \sum_{t=1}^{T_{mp}} N \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N vi(t) = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{t=1}^{T_{mp}} vsmg(t). \quad (9) \end{aligned}$$

## 1.2 Загальна характеристика клітинних автоматів, що моделюють транспортні потоки.

### 1.2.1 Одноклітинні та багатоклітинні моделі.

Як ми описували раніше в кожен конкретний момент клітина може мати один стан - бути вільною або зайнятою. Деколи це складно поєднувати з реальним світом, оскільки рух транспорту є досить динамічним, тому прийнято розділяти ТСА за ознакою кількості зайнятих клітин транспортом певної довжини на одноклітинні та багатоклітинні.

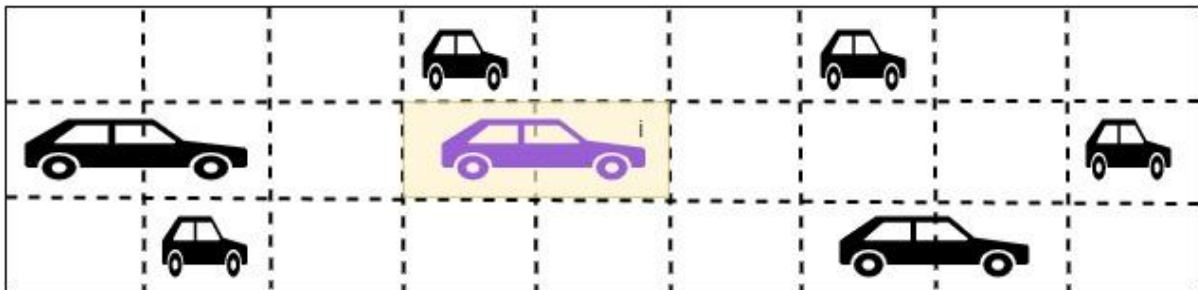
Одноклітинні - такі, що в конкретний момент часу клітина може бути зайнятою лише одною єдиною машиною.

Багатоклітинні - транспорт може займати певну кількість клітинок підряд позовжньо у сторону руху.

В нашому дослідженні ми будемо використовувати одноклітинні моделі.

### 1.2.2 Односмугові та багатосмугові моделі.

Моделювання транспортних потоків, що є в реальному світі включають в себе різновиди доріг. Односмугові чи багато смугові, однонаправленні чи із зустрічним рухом. Також вони можуть зустрічатись в різних комбінаціях, тому правила і моделі там будуть складніші. Наприклад, якщо розглядати кілька смугову модель руху в одну сторону, яку можна зобразити у формі декілька рядної решітки, то кількість сусідів, стани яких впливають на конкретну клітинку збільшуються, а також додаються правила зміни смуги руху. Як згадувалось у пункті 1.1.2 для автомобіля і можна визначити просторовий проміжок та відступ для всіх сусідів.



*Рисунок 1.3 Декілька смуговий однонаправлений рух.*

Для односмугових моделей, які ми будемо розглядати надалі правила й умови переходу простіші, залежать лише від стану сусідніх клітин.

### 1.2.3 Детерміновані, стохастичні та заповільнені при старті моделі.

Детерміновані моделі - це такі моделі, де рух транспортних засобів визначається точно і однозначно в залежності від стану дороги та транспортних засобів, що перебувають в його сусідстві. Такі моделі є простішими та швидшими для обчислення результатів. Проте менш

реалістичними, оскільки утворення заторів є менш ймовірнішим, оскільки всі машини рухаються з однаковою швидкістю в кожен конкретний момент часу.

У стохастичних моделях рух транспортних засобів моделюється з використанням випадкових факторів, таких як ймовірність зупинки, розгону, гальмування та інші. Тому стохастичні моделі клітинних автоматів можуть бути більш реалістичними, оскільки вони враховують деяку невизначеність в поведінці водіїв та умовах на дорозі, яка може впливати на рух транспорту. Для таких моделей вводиться величина, що впливає на правила переходів, що в свою чергу буде викликати виникнення фантомних заторів та наближувати модель до реального життя.

Тип заповільнених при старті моделей вважається складнішим, проте ще більш вдосконаленим та таким, що схожий з реальністю, в тому плані, що час виходу із затору є довшим за час входу в нього. Для вирішення цієї проблеми було вирішено залишити безперервний потік транспорту, проте зробити затримку для такого, що повністю зупинився перед моментом його наступного прискорення, від цієї ідеї і пішла назва таких типів моделей.

Детальніше детерміновані та стохастичні моделі ми розглянемо у наступному розділі на конкретних існуючих моделях.

### 1.3 Співвідношення ТСА з умовами реального світу.

Звичайно у реальному світі відстані вимірюються в метрах, а не клітинках, а час в секундах, а не часокроках. Для цього введемо наступні відповідності і переведення. Наприклад, якщо ми встановимо  $\Delta T = 1.2$  с,  $\Delta X = 7.5$  м і  $v_{\max} = 5$  клітинок/часокрок, то  $v_i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ , що відповідає максимуму  $5 \times \Delta X / \Delta T = 5 \times 7.5 \text{ м} \div 1.2 \text{ с} = 31.25 \text{ м/с} = 112.5$



км/год. Як видно з цього пояснення, ми розглядаємо лише позитивні швидкості у наших моделях, тобто транспортні засоби завжди рухаються вперед.

#### 1.4 Висновки до розділу 1.

Отже, клітинний автомат це дієва математична модель, яка за допомогою чіткої структури та правил може охопити та описати в собі багато факторів з реального світу, таким чином моделювання транспортних потоків на її основі є актуальним та цікавим завданням. Існують різні види ТСА за характеристикою руху детерміновані, стохастичні, заповільнені при старті. Моделювання може відбуватись для одно або багатосмугових доріг, а перебування ТЗ в моменти руху в одній або декількох клітинках, що має свій вплив на загальне моделювання руху цілого потоку.

## **РОЗДІЛ 2: Опис та аналіз клітинних автоматів, що моделюють транспортні потоки.**

### 2.1 Загальні положення ТСА в дослідженні.

В другому розділі ми опишемо п'ять базових класичних ТСА: дві детерміновані та три стохастичні. В даній роботі ми акцентуємо увагу на одноклітинних моделях, в яких, як сказано раніше в конкретний момент часу в клітинці може перебувати лише один транспортний засіб, якщо він там є. Всі транспортні засоби є однакові за розміром і становлять одну клітинку. Транспортний потік вважається однорідним, тому й характеристики всіх автомобілів однакові. Також усі розглянуті надалі моделі будуть для однонаправленої односмугової решітки шириною в одну клітинку із замкнутим циклом. Довжина цієї решітки дорівнює 1000 клітинок, що є достатньо великою для проведення потрібних експериментів та уникнення небажаних помилок та ускладнень через обмежений простір. Експерименти з однорідним транспортним потоком. Кількість запусків, що вимірюються в часококах є рівною 10000, щоб уникнути наслідків переходів від початкових умов за перші 1000 кроків. Результати взяті з досліджень Свена Маєрвіота та Барта Де Мура у роботі “Cellular Automata Models of Road Traffic”[1].

Надалі назви моделей будуть позначатись англійською мовою та прийнятими скороченнями в загальній літературі для уникнення непорозуміння і збереження відповідностей.

### 2.2 Wolfram's rule 184 (CA-184)

CA-184 - це одновимірна ТСА, тобто ширина сітки одна клітинка. Сусіди, що беруться до уваги при розрахунку правил переходу - це по одній крайній клітинці в обидві сторони від заданої.

На рисунку 2.1 зображено приклад переходу клітини  $i$  з моменту часу  $t$  в наступний момент часу  $t+1$ , при умовах, що сусідні клітинки  $i-1$  та  $i+1$  мали відповідно стани 0 та 1, а стан самої клітинки  $i$  був 0, де 0 - порожня клітинка, 1 - в клітинці є транспортний засіб відповідно.

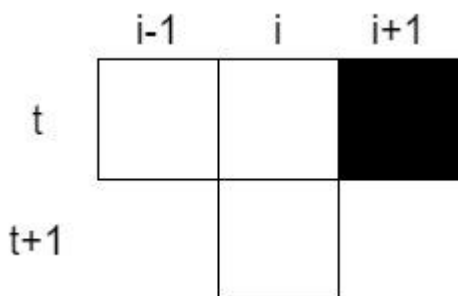


Рисунок 2.1 Клітинка  $i$  як була порожньою в момента часу  $t$ , так і залишилась в момент часу  $t+1$ .

Походження назви досить цікаве. Як ми бачимо в переході беруть участь три послідовні клітинки, кожна з яких має стан 0 або 1, кількість можливих станів рівна  $2^3=8$ . (1 1 1) (1 1 0) (1 0 1) (1 0 0) (0 1 1) (0 1 0) (0 0 1) (0 0 0) відповідні стани обраної клітинки та її сусідів записані в формі двійкового числа та відсортовані по спаданню. На рисунку 2.2 можна побачити, у що перейде  $i$ -та клітинка в наступний момент часу. Якщо з утворених станів записати двійкове число, вийде  $(10111000)_2$ , а при переведенні в десяткову систему числення воно рівне 184.

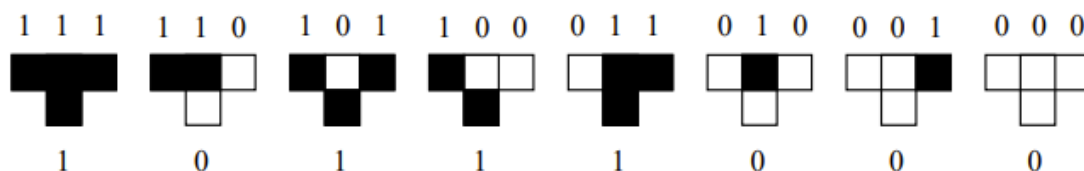


Рисунок 2.2 Переходи всіх можливих станів СА-184.

На рисунку видно, що кожна заповнена частинка рухається на крок вправо, якщо її правий сусід вільний. Максимальна швидкість з якою може рухатись транспорт 1 клітинка/часокрок.

Для СА-184 справедливі наступні два правила переходу:

П1: прискорення та гальмування

$$v_i(t) \leftarrow \min\{g_{si}(t-1), 1\}, \quad (10)$$

П2: рух ТЗ

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t), \quad (11)$$

Правило П1, рівняння (10), встановлює швидкість  $i$ -го автомобіля, для конкретного моменту часу в оновленій конфігурації; там зазначено, що транспортний засіб завжди прагне їхати зі швидкістю 1 клітинка/часокрок, якщо цьому не перешкоджає його безпосередній лідер, тобто найближчий автомобіль попереду, у такому випадку  $g_{si}(t-1) = 0$ , і транспортний засіб, зупиняється, щоб уникнути зіткнення. Правило П2, рівняння (11), дозволяє транспортним засобам рухатися вперед в решітці.

Характеристики моделі є наступними. На рисунку 2.3 показані діаграми  $(k, v_{sm})$  та  $(k, q)$ . Як видно з лівої частини, глобальна середня швидкість простору залишається постійною і дорівнює  $v_{sm} = 1$  клітинка/часокрок, поки не буде досягнута критична щільність  $k_c = 0.5$ , після чого  $v_{sm}$  почне зменшуватися до нуля, коли досягається критична щільність  $k = 1$ . Аналогічно, глобальний потік спочатку зростає, а потім лінійно зменшується зі щільністю, нижче і вище критичної щільності. В такій моделі досягається потік пропускної здатності  $q_{sar} = 0.5$  транспортних засобів/часокрок.

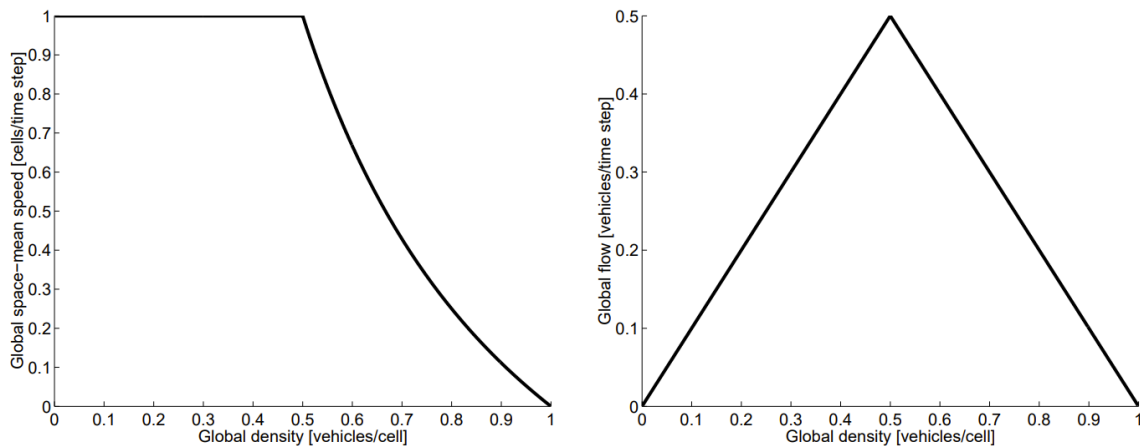


Рисунок 2.3 Зліва - залежність глобальної середньої швидкості( $v_{sm}$ ) від щільності( $k$ ). Справа - залежність глобальної пропускної здатності потоку ( $q$ ) від щільності( $k$ ).

### 2.3 Deterministic Fukui-Ishibashi TCA (DFI-TCA)

Цю модель Фукуї та Ісібаші створили у 1996 році узагальнивши CA-184. Вона є у двох варіаціях - детермінованій та стохастичній[5]. Спочатку розглянемо першу. Вони додали декілька вдосконалень до попередньої. По-перше, тепер можна було задати максимальну швидкість, а не лише 1 чи 0. По-друге, транспортні засоби могли пришвидшуватись моментально, до максимально можливої швидкості.

Тому перше правило, тепер виглядає ось так:

П1: прискорення та гальмування

$$v_i(t) \leftarrow \min\{g_{si}(t-1), v_{max}\}, \quad (12)$$

П2: рух ТЗ

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t), \quad (13)$$

Так само, як і раніше, транспортний засіб буде уникати зіткнення, враховуючи розмір просторового проміжку. Для цього він застосовуватиме миттєве гальмування: наприклад, швидкий транспортний засіб може

повністю зупинитися під час наближення до кінця затору, раптово знижуючи швидкість з  $v_{max}$  до 0 за один крок часу.

На рисунку 2.4 показано графіки залежності глобальних показників ( $k$ ,  $v_{sm}$ ) та ( $k$ ,  $q$ ) для різних максимальних швидкостей.

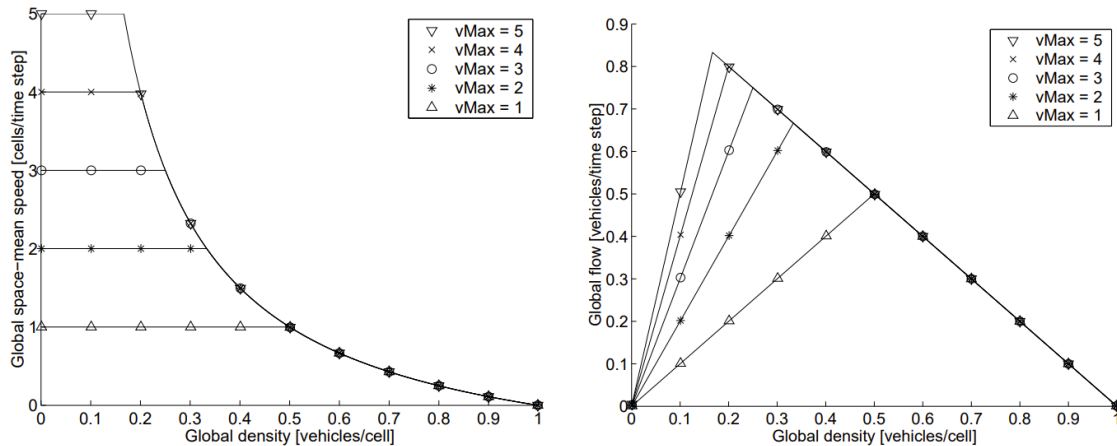


Рисунок 2.4 Зліва - залежність глобальної середньої швидкості( $v_{sm}$ ) від щільності( $k$ ), справа - залежність пропускної здатності потоку ( $q$ ) від щільності( $k$ ) для різних максимальних швидкостей  $v_{max} \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ .

Проте перше правило можна переписати з можливістю поступового пришвидшення, на одну клітинку за часокрок, проте дослідження показало, що в глобальному сенсі це не сильно змінює ситуацію.

П1: прискорення та гальмування

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{si}(t-1), v_{max}\}, (13)$$

## 2.4 Nagel-Schreckenberg TCA (STCA)

У 1992 році Нагель та Шрекенберг запропонували модель TCA, яка здатна відтворювати декілька характеристик реального руху транспорту, наприклад, спонтанне виникнення транспортних заторів[6]. Вона явно включає стохастичний шумовий член в одне зі своїх правил, яке ми представляємо у тому ж форматі, що і правила раніше обговорюваних

детермінованих моделей ТСА. STCA складається з наступних трьох правил:

П1: прискорення та гальмування

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{si}(t-1), v_{max}\}, \quad (14)$$

П2: рандомізація

$$\xi(t) < p \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t-1), \xi(t)\}, \quad (15)$$

П3: рух ТЗ

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t), \quad (16)$$

Правило П2, рівняння (15), вводить стохастичність в систему. На кожному кроці часу  $t$  випадкове число  $\xi(t) \in [0, 1]$  вибирається з рівномірного розподілу. Це число потім порівнюється зі стохастичним параметром шуму  $p \in [0, 1]$  (який називається ймовірністю сповільнення); в результаті існує ймовірність  $p$  того, що транспортний засіб сповільниться до швидкості  $v_i(t) - 1$  клітинка/часокрок. Модель STCA називається мінімальною моделлю в тому сенсі, що всі ці правила є необхідними для відтворення основних рис руху транспорту в реальному житті.

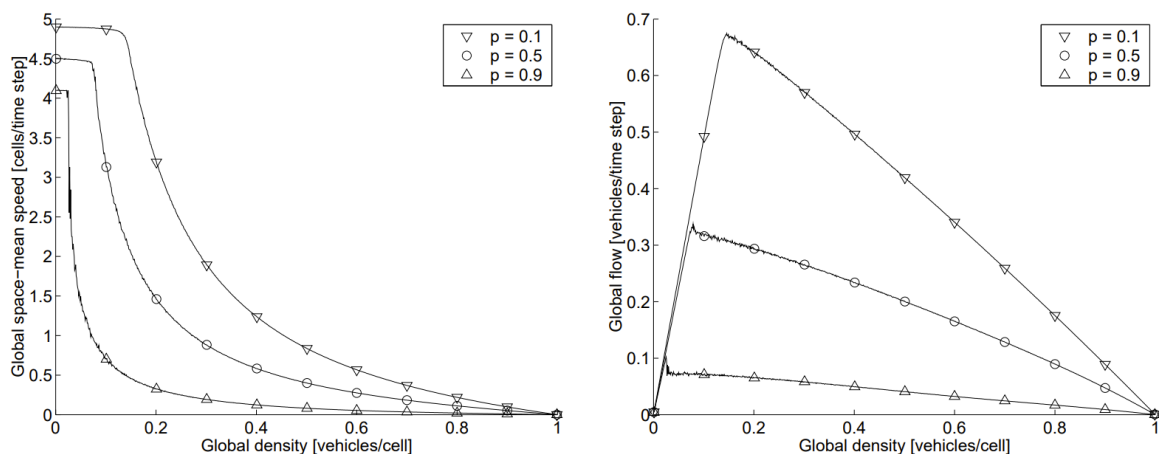


Рисунок 2.5 Графіки для різних ймовірностей сповільнення  $p \in \{0,1, 0,5, 0,9\}$ . Зліва -  $(k, v_{sm})$  графіки для STCA. Праворуч -  $(k, q)$  графіки для тих же моделей STCA.

Помітно, що значення максимальних середніх швидкостей та пропускних здатностей потоків менші, ніж у попередніх моделях.

## 2.5 STCA with cruise control (STCA-CC)

Притаманною ознакою моделі STCA є виникнення багатьох нестабільних штучних заторів. Через шум, притаманний моделі, затор може виникнути при будь-якій щільності, навіть спричиняючи локальне зупинення руху в режимі вільного потоку. Один зі способів усунення цього явища полягає у стабілізації гілки вільного потоку на діаграмі  $(k, q)$ . Це можна зробити, обмеживши рандомізацію для транспортних засобів високої швидкості.

Правила 1-3 залишаються незмінними, але додали до них правило П0:

П0: визначення стохастичного шуму

$$\begin{aligned} v_i(t-1) = v_{max} &\Rightarrow p'(t) \leftarrow 0, \\ v_i(t-1) < v_{max} &\Rightarrow p'(t) \leftarrow p, \end{aligned} \quad (17)$$

П1: прискорення та гальмування

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{si}(t-1), v_{max}\}, \quad (18)$$

П2: рандомізація

$$\xi(t) < p'(t) \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t-1)\}, \quad (19)$$

П3: рух ТЗ

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t), \quad (20)$$

Де  $p$  тепер замінено на  $p'(t)$  у правилі рандомізації STCA П2, тобто у рівнянні (17). Це нове правило ефективно вимикає рандомізацію для транспортних засобів високої швидкості, оскільки стохастична поведінка залишається лише у транспортних засобів, що вже перебувають в заторі. Отримана модель TCA називається STCA у режимі керування швидкості або STCA-CC. На рисунку 2.6 показані діаграми  $(k, v_{sm})$  та  $(k, q)$  для STCA-CC з  $v_{max} = 5$  клітинок/часокрок та  $p = 0.2$  для рівномірного розподілу автомобілів на початку та компактного суперзатору, коли всі



автомобілі скупчуються на початку решітки. Як видно з правої частини, діаграма  $(k, q)$  має типову обернену форму лямбди. STCA-CC є бістабільною, оскільки як рух у вільному потоці, так і рух у заторі стабільні (перший через відсутність шуму). Транспортні засоби, що переходять від вільного потоку до затору, зустрічають при критичній щільності явище, схоже на зниження ємності. Зворотний перехід до вільного потоку відбувається через меншу щільність та, відповідно, менший потік (який є вихідним потоком  $q_{out}$  з затору). Порівнюючи праві частини рисунка 2.5 і рисунка 2.6, видно, що дестабілізація гілки вільного потоку є основною причиною зниження ємності, досягнутої при нижчій критичній щільності. [1]

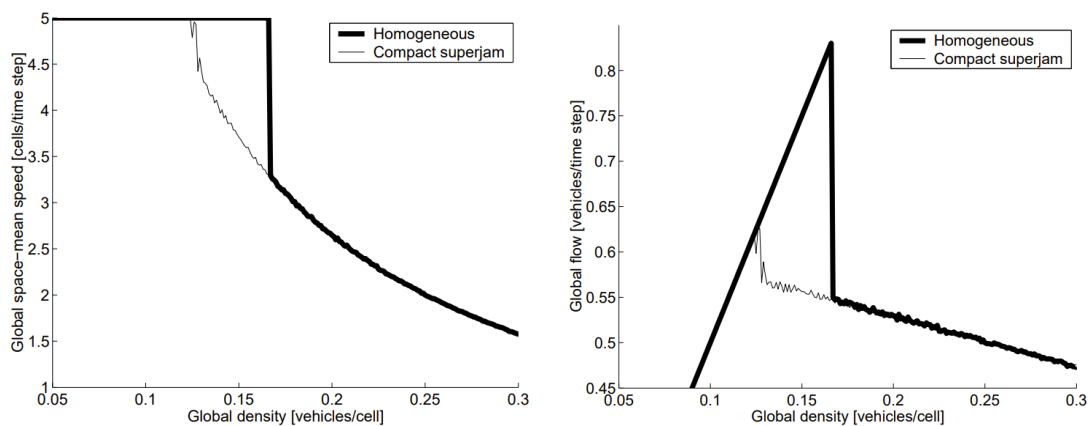


Рисунок 2.6 Зліва -  $(k, v_{sm})$  та справа -  $(k, q)$  графіки для моделі STCA-CC з  $v_{max} = 5$  кліток/часокрок та  $p = 0,2$ . Товста суцільна лінія позначає глобальні вимірювання отримані при однорідному розподілі ТЗ на початку, тонка суцільна лінія відображає графік при компактному супердзаторі.

## 2.6 Stochastic Fukui-Ishibashi TCA (SFI-TCA)

Ми вже розглядали детерміновану модель Fukui-Ishibashi у пункті 2.3. У своїй початковій формулюванні Фукуї та Ішібаші вводили стохастичність, але тільки для транспортних засобів, які рухаються з найвищою можливою швидкістю  $v_{max}$  клітинок/часокрок. Ми можемо виразити правила цієї

моделі, розглядаючи правила П2 та П3 STCA, тобто рівняння (15) та (16), але тепер доповнені правилом П1 DFI-TCA для миттєвого прискорення, тобто рівнянням (12) розділу 2.3 і, як у моделі STCA-CC, додатковим правилом П0. Тому загальний набір правил виглядає ось так:

П0: визначення стохастичного шуму

$$\begin{aligned} vi(t - 1) = v_{max} &\Rightarrow p'(t) \leftarrow p, \\ vi(t - 1) < v_{max} &\Rightarrow p'(t) \leftarrow 0, \end{aligned} \quad (21)$$

П1: прискорення та гальмування

$$vi(t) \leftarrow \min\{gsi(t - 1), v_{max}\}, \quad (22)$$

П2: рандомізація

$$\xi(t) < p \Rightarrow vi(t) \leftarrow \max\{0, vi(t - 1)\}, \quad (23)$$

П3: рух ТЗ

$$xi(t) \leftarrow xi(t - 1) + vi(t), \quad (24)$$

Обґрунтування конкретної випадковості в моделі SFI-TCA полягає в тому, що водії, які рухаються з максимально високою швидкістю, не можуть нескінченно сконцентрувати свою увагу. Внаслідок цього будуть спостерігатися коливання рівномірності руху при цих високих швидкостях[5]. Таким чином, це відповідає протилежному обмеженню автоматичного регулювання швидкості, наприклад, моделі STCA-CC.

## 2.7 Висновки до розділу 2.

Отже ми розглянули п'ять моделей від найпростіших, до тих, що включають в собі певні видозміни в правилах та поведінці. Загалом інформацію можна подати в таблиці 2.1.

Назва	Тип	$v_{max}$	Кількість правил	Опис
CA-184	детермінована	1	2	Рухається на 1 клітинку, якщо попереду вільно.
DFI-TCA	детермінована	5	2	Може різко починати рух або різко зупинитись від максимальної швидкості одразу до нульової.
STCA	стохастична	5	3	Додається рандомізація для всіх ТЗ, які можуть сповільнитись на 1 клітинку/часокрок.
STCA-CC	стохастична	5	4	Рандомізація для всіх, хто не має максимальну швидкість.
SFI-TCA	стохастична	5	4	Може різко починати рух або різко зупинитись від максимальної швидкості одразу до нульової, а рандомізація лише для ТЗ із максимальною швидкістю.

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика TCA моделей.

## РОЗДІЛ 3: Пропозиція розширеної моделі

### 3.1 Опис розширеної моделі.

#### 3.1.1 Загальна характеристика й актуальність.

В межах даного дослідження ми хочемо розширити попередньо розглянуті моделі з додаванням фактору наявності двоколірних світлофорів.

Додавання світлофорів до моделі є хорошим рішенням для дослідження з кількох причин:

- 1) Реалістичність: Світлофори є важливою складовою реальних дорожніх систем, тому їх включення в модель дозволяє краще відтворити реальні умови руху транспорту.
- 2) Вивчення впливу: Дослідження впливу світлофорів на трафік може надати цінну інформацію про ефективність регулюючих систем управління рухом. Це може допомогти в розробці ефективних стратегій управління рухом для поліпшення пропускнуої здатності і зменшення заторів.
- 3) Варіація параметрів: Дослідження світлофорів дозволяє змінювати різні параметри, такі як час роботи світлофорів, розташування перехресть, алгоритми перемикання та інші. Це дозволяє оцінити, як зміни в цих параметрах впливають на трафік.
- 4) Розуміння взаємодії: Додавання світлофорів дозволяє вивчати взаємодію між світлофорами і водіями. Це може включати аналіз впливу світлофорів на рух транспорту, розташування заторів, час очікування та інші аспекти дорожнього руху.

#### 3.1.2 Будова розширеної моделі.

В нашому дослідженні, в якості сітки ми обрали прямокутну одновимірну сітку, яка характеризує однонаправлений односмуговий рух. Два

відповідні стани визначають зайнятість клітинки автомобілем або пустим місцем. До уваги беруться лише крайні сусіди. А правила переходу і є правилами руху транспортних засобів в залежності від вищеперелічених факторів. Варто зазначити, що розмір автомобіля в нашому дослідженні є однаковий для всіх автомобілів і буде такий, що займатиме одну клітинку. Тобто в кожний конкретний момент часу значення кожної клітинки перераховується згідно правил і лише тоді крок моделі вважається завершеним і як результат у нас є нова сітка станів.

Ми додали в нашій моделі декілька різних варіантів взаємодії та впливу.

По-перше, розташування: однорідне або хаотичне з певними умовами. Однорідне розташування в основному присутнє у великих містах мегаполісах побудованим за квартальною схемою, а проблема заторів там якраз актуальна. Під хаотичним розташуванням світлофорів мається на увазі те, що проміжки будуть нерівномірні.

По-друге, різні частотні інтервали горіння зеленого та червоного світла по різному характеризують рух. Дослідження цього впливу світлофорів може дати чітке розуміння транспортних потоків на різних ділянках дороги. За призначенням світлофори бувають різні, такі, що надають можливість переходу пішоходам, такі, що регулюють перехрестя, комбіновані та інші. Ми фокусуємо увагу на такому, регулював би рух ТЗ перед пішохідним переходом. Наприклад, якщо розглядати світлофор призначений для пропуску пішоходів, то біля школи частота перемикання світла на червоне буде більшою, ніж на дорозі з меншою кількістю пішоходів десь на окраїні міста. Тобто тривалості горіння зеленого світла різні. Ми розглядаємо спрощену систему, де червоний сигнал для ТЗ рівний часу зеленого сигналу для пішоходів, упущені деталі стосовно часу миготіння та

проміжку перехідного часу між світлофорами. В реальному світі тривалість горіння червоного світла визначається за певними формулами, розрахованими експертами і прописаними в ДСТУ. За ним проміжок часу, необхідний для перетинання пішоходами проїзної частини ( $t_{пш}$ ), розраховують за формулою:  $t_{пш} = B / V_{пш} + 5$ , де  $B$  - ширина проїзної частини у місці переходу (м), нехай в наших умовах це буде 3.5 м, оскільки стандарти для різних категорій доріг відрізняються, тому беремо середнє значення;  $V_{пш}$  — швидкість пішоходів на переході (1,3 м/с)[2]. Тобто  $t_{пш} = 3.5 \text{ м} : 1.3 \text{ м/с} + 5 = 7,7 \text{ с}$ . В нашій моделі при  $\Delta T = 1.2 \text{ с}$ ,  $t_{пш}$  як час горіння червоного сигналу світлофору є рівний  $t_{ч} = t_{пш} / \Delta T = 7$  часокроки (все одно заокруглюємо до більших цілих значень).

По-третє, схема перемикання світлофорів в залежності від початкових умов запуску також може бути різною і в залежності від цього рух та його характеристики відрізнятимуться. Ці налаштування залежать від фактичної будови дороги та перехресть. Ми розглянемо три типи розподілу початкових кольорів сигналів: зелений для всіх світлофорів, випадковий розподіл та розподіл за групами, тобто декілька підряд червоних, декілька підряд зелених.

Додавання світлофорів дещо змінює правила переходу клітини з одного стану в інший, а саме обрахування просторового проміжку тепер має враховувати не лише відстань до найближчого автомобіля попереду, але й відстань до найближчого червоного світлофора.

### 3.2 Опис реалізації програмного коду.

Модель реалізовано на мові Java. Варто зазначити, що за основу бралась частина проекту Свена Масрівота[3]. Підрахунок даних та система експериментів залишилась незмінною, проте модель видозмінена і

відповідає вимогам, запропонованої нами, розширеної моделі із світлофорами. Також для цього були змінені деякі класи та методи, а також додані нові.

### 3.2.1 Важливі класи.

#### 1) Клас Cell

Цей клас характеризує клітинку.

Cell Class
+ fMaxSpeed: int + fSpeed: int + fSpaceGap: int + fVehicleID: int + fVehicleLength: int + fLightID: int + color: int + tg: int + tr: int
+ Cell() + clear(): void + copyTo(cell: Cell): void

#### 2) Клас State

Клас, що описує стан всієї решітки в конкретний момент часу.

State Class
+ fCells: Cell[] + fTime: int

<pre> + fNrOfVehicles: int + fNrOfLights: int + positionsOfLights: int[] + timeforredval: int + timeforgreenval: int </pre>
<pre> + calcSpaceCaps(): void + clear(): void + copyTo(state: State): void + distributeLights(nrOfLights: int, distLightHomog: boolean, clicking: int): void +distributeVehicals(nrOfVehicals:int,maxSpeed:int,distributeHomogeneously: boolean): void +setGlobalMaxSpeed(maxSpeed: int): int +updateLight(timechanging: int): void +updatetimers(): void </pre>

### 3) Клас TrafficCellularAutomaton

Базовий клас, який має основні загальні методи та визначення. Від нього будуть наслідуватись наступні TCA.

#### TrafficCellularAutomaton Class

```

+ fInitialState: State
+ fState: State
+fMaxSpeed: int
+ fCellLength: double
+ fTrafficLightIsRed: boolean
+ fInitialMaxSpeed: int

```



```

+ fLoopDetectors: Vector
+ fDetectorRange: int
+ fLoopDetectorMeasurementInterval: int
+ fMultipleOfSampleTimeToSimulate: int
+ fPerformGlobalMeasurements: boolean
+ fMeasurementTimeLeft: int
+ fMeanGlobalFlow: double
+ fSpaceMeanSpeed: double
+ fGlobalDensity: double
+fAverageGapSize: double
+ fGapSizeVariance: double
- fSumOfGapSizes: double
- fSumOfGapSizesSquared: double

```

```

+ TrafficCellularAutomaton(initialState: State,maxSpeed: int, cellLength:
double,          nrOfLoopDetectors:    int,    detectorRange:    int,
loopDetectorMeasurementInterval:      int,
multipleOfSampleTimeToSimulate:      int,
performGlobalMeasurements: boolean)
+ reset(): void
+ advanceOneStep(): void
+ globalMeasurementsUpdated(): boolean
+ setState(state: State): void
- applyRules(nextState: State): void
- applyRulesToCell(sourceCell: Cell, cellNr: int, nextState: State): void
+ resetLoopDetectors(): void
+ setLoopDetectorsMeasurementInterval( measurementInterval: int): void
-createLoopDetectors(nrOfLoopDetectors:    int,    detectorRange:    int,

```

```

loopDetectorMeasurementInterval: int): void
+ setGlobalMaxSpeed(maxSpeed: int): void
+ getMaxSpeed(cellNr: int): int

```

#### 4) Клас StochasticTCA

Базовий клас звичайної стохастичної моделі.

```

StochasticTCA extends TrafficCellularAutomaton

```

```

- fSlowdownProbability: double

```

```

+ StochasticTCA(initialState: State, maxSpeed: int, cellLength: double,
nrOfLoopDetectors:          int,          detectorRange:          int,
loopDetectorMeasurementInterval: int, multipleOfSampleTimeToSimulate:
int, performGlobalMeasurements: boolean, slowdownProbability: double)
- applyRulesToCell(sourceCell: Cell, cellNr: int, nextState: State): void

```

#### 5) Клас FukuiIshibashiTCA

Клас запропонованої розширеної моделі. Саме тут в її методах були певні зміни у правилах переходу.

```

FukuiIshibashiTCA extends StochasticTCA

```

```

+ FukuiIshibashiTCA (initialState: State, maxSpeed: int, cellLength: double,
nrOfLoopDetectors:          int,          detectorRange:          int,
loopDetectorMeasurementInterval: int, multipleOfSampleTimeToSimulate:
int, performGlobalMeasurements: boolean, slowdownProbability: double)
- applyRulesToCell(sourceCell: Cell, cellNr: int, nextState: State): void

```

### 3.2.2 Важливі методи.

#### 1) Метод `applyRulesToCell` у `FukuiIshibashiTCA.java`

В нашому випадку правила П0 та П2 об'єднані в друге правило. Рандомізація застосовується лише до ТЗ, які рухаються з максимальною швидкістю.

```
protected void applyRulesToCell(Cell sourceCell, int cellNr, State nextState)
{
    nextState.fCells[cellNr].fSpeed=-1;

    int maxSpeed = getMaxSpeed(cellNr);

    // rule 1: determine instantaneous acceleration and braking
    if (maxSpeed < sourceCell.fSpaceGap) {
        sourceCell.fSpeed = maxSpeed;
    }
    else {
        sourceCell.fSpeed = sourceCell.fSpaceGap;
    }

    // rule 2: randomize
    if ((sourceCell.fSpeed == maxSpeed) && (Math.random() < fSlowdownProbability)) {
        // note that we use random() < probability to capture the zero probability
        --sourceCell.fSpeed;
        if (sourceCell.fSpeed < 0) {
            sourceCell.fSpeed = 0;
        }
    }

    // rule 3: advance vehicle

    int targetCellNr = fState.successor(cellNr, sourceCell.fSpeed);
    nextState.fCells[targetCellNr].fSpeed = sourceCell.fSpeed;
    nextState.fCells[targetCellNr].fMaxSpeed = sourceCell.fMaxSpeed;
    nextState.fCells[targetCellNr].fSpeed = sourceCell.fSpeed;
    nextState.fCells[targetCellNr].fSpaceGap = sourceCell.fSpaceGap;
    nextState.fCells[targetCellNr].fVehicleID = sourceCell.fVehicleID;
    nextState.fCells[targetCellNr].fVehicleLength = sourceCell.fVehicleLength;
}
```

Рисунок 3.1 Метод `applyRulesToCell` у `FukuiIshibashiTCA.java`

#### 2) Метод `distributeLights` з `State.java`

Розставляє світлофори на решітці відповідно до заданих умов. Кількість світлофорів задається.

```

public void distributeLights(int nrOfLights, boolean distributeHomogeneously, int clicking) {
    // clear lattice
    for (int cellNr = 0; cellNr < fCells.length; cellNr++) {
        fCells[cellNr].fLightID = -1;
        fCells[cellNr].color=-1;
    }

    // create a set containing unique lights IDs
    Vector lightIDs = new Vector(nrOfLights);
    for (int lightID = 0; lightID < nrOfLights; ++lightID) {
        lightIDs.add(lightID);
    }

    if (distributeHomogeneously) {

        // homogeneously distribute some lights over the lattice
        int lightPosition = 0;
        positionsOfLights=new int[nrOfLights];
        for (int lightNr = 0; lightNr < nrOfLights; lightNr++) {
            fCells[lightPosition].fLightID = lightNr;

            // fill cells
            if (clicking==0) { //початку всі зелені
                fCells[lightPosition].color = 1;
            }
            else if (clicking==1){ //рандомно
                if (Math.random()<0.5) {
                    fCells[lightPosition].color = 1;
                }else{
                    fCells[lightPosition].color = 0;
                }
            }else{ //по черзі по групах по 3 і 2
                int inset = 5;
                int g = 3;
                int r= inset-g;
                if (lightNr%5==1 ||lightNr%5==2||lightNr%5==3){
                    fCells[lightPosition].color = 1;
                } else{
                    fCells[lightPosition].color = 0;
                }
            }
            positionsOfLights[lightNr]=lightPosition;
            lightPosition += (1 - fCells.length/nrOfLights);
        }
    }
}

```

```

else {
    // random distribution
    // generate map of positions
    int[] positions = new int[nrOfLights];
    for (int lightNr = 0; lightNr < nrOfLights; ++lightNr) {
        // find a suitable position for the light
        int position = 0;
        boolean positionOk = false;
        while (!positionOk) {
            position = (int) (Math.random() * fCells.length);

            boolean positionEncountered = false;
            for (int i = 0; i < lightNr; ++i) {
                if (positions[i] == position) {
                    positionEncountered = true;
                }
            }
            positionOk = (positionEncountered == false);}
        positions[lightNr] = position;
    }
    // fill cells
    for (int i = 0; i < nrOfLights; ++i) {
        fCells[positions[i]].fLightID = i;
        if (clicking==0) { //початку всі зелені
            fCells[positions[i]].color = 1;
        }
        else if (clicking==1){ //рандомно
            if (Math.random()<0.5) {
                fCells[positions[i]].color = 1;
            }else{
                fCells[positions[i]].color = 0;
            }
        }
        }else{ //по черзі по групах по 3 і 2
            int inset = 5;
            int g = 3;
            int r = inset-g;
            if (i%5==1 || i%5==2 || i%5==3){
                fCells[positions[i]].color = 1;
            } else{
                fCells[positions[i]].color = 0;
            }
        }
    }
    positionsOfLights=positions;
}
fNrOfLights = nrOfLights;
}

```

Рисунок 3.2 Метод *distributeLights* з *State.java*

### 3) Метод *updateLight* у *State.java*

Цей метод керує частотою перемикання світлофора на червоне.

```

public void updateLight(int timechangingequal) {
    for (Cell cell:fCells
        ) {
        if(cell.tg==timechangingequal*timeforgreenval){
            cell.tg=0;
            cell.color=0;
        }
        if(cell.tr==timeforredval){
            cell.tr=0;
            cell.color=1;
        }
    }
}
}

```

*Рисунок 3.3 Метод updateLight з State.java*

#### 4) Метод updatetimers з State.java

Метод оновлює значення внутрішніх лічильників часу для кожного з сигналів світлофору.

```

public void updatetimers() {
    for (Cell cell:
        fCells) {
        if(cell.color==1){
            cell.tg++;
        }else{
            cell.tr++;
        }
    }
}
}

```

*Рисунок 3.4 Метод updatetimers з State.java*

### 3.2.3 Класи експериментів та зображень графіків.

#### 1) AllExperiments class

Клас дозволяє провести експерименти та записати значення змінних густини потоку та середньої швидкості в залежності від щільності в файл із розширенням .data.

В його методі main відбувається запуск експериментів для всіх комбінацій змінних параметрів для наявності світлофора в моделі. В папці проекту можна знайти всі дані експериментів.

## 2) DataFileGraphics class

Використовує згенеровані файли класом AllExperiments, для зображення схематичних графіків залежностей густини потоку та середньої швидкості від щільності, а також зберігає .png зображення графіків з інформативними назвами. В папці проекту можна знайти всі діаграми експериментів.

### 3.3 Результати

В ході дослідження було проведено 16 експериментів для кожної комбінації параметрів.

Параметри світлофорів:

- 1) Розподіл світлофорів по решітці: рівномірний або випадковий.
- 2) Частота перемикання світлофора: зробили для двох значень timechanging 3 та 7. Це означає, що тричі підряд горітиме зелений сигнал, один раз червоний, ніби біля школи, де він має загорятись частіше, або сім разів зелений сигнал, один раз червоний, якщо уявляти потреби зупинок транспорту на окраїні міста.
- 3) Початкові умови для вмикання світлофорів трьох видів: зелений для всіх світлофорів, випадковий розподіл зеленого на початку та розподіл за групами. В одному випадку 3 зелених - 2 червоних підряд, в іншому 4 зелених - 1 червоний підряд.

Загальні параметри:

Розмір решітки = 1000 клітинок.

Кількість повторів симуляції = 10000 разів.

Тривалість часокроку = 1.2 с.

Кількість світлофорів = 30 шт.

Розмір групи світлофорів = 5 (3 зелені/2 червоні та 4 зелених/1 червоний).

Один проміжок горіння червоного = 7 часокроків.

Один проміжок горіння зеленого = 21 часокрок.

Максимальна швидкість ТЗ = 5 клітинок/часокрок.

Ймовірність сповільнення  $p = \{0.1, 0.5, 0.9\}$ .

Розподіл ТЗ - рівномірний.

Експерименти :

- 1) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - всі зелені.

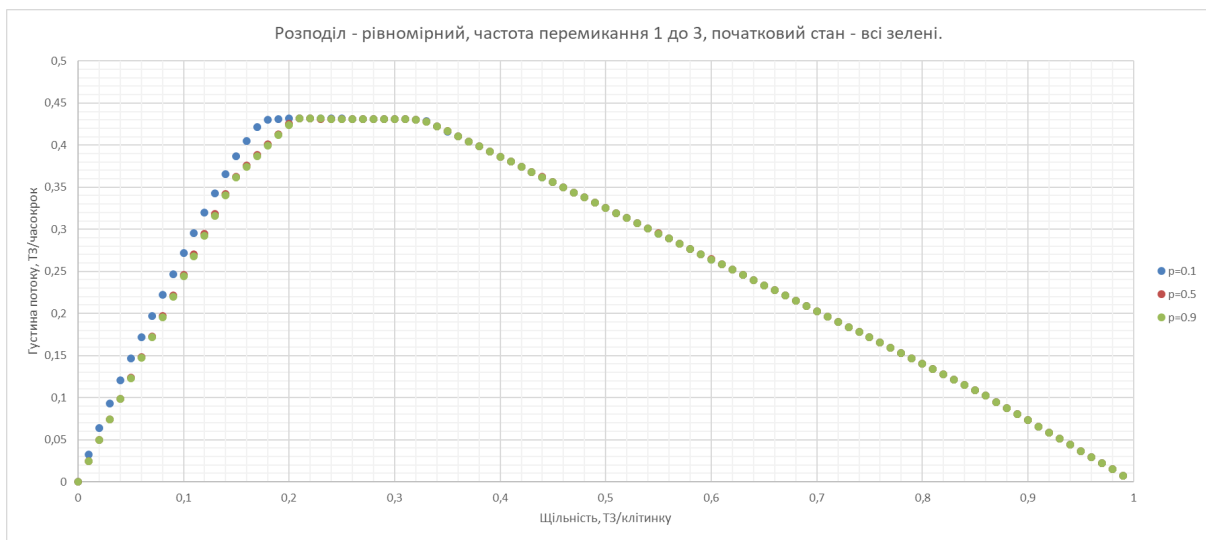


Рисунок 3.5 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

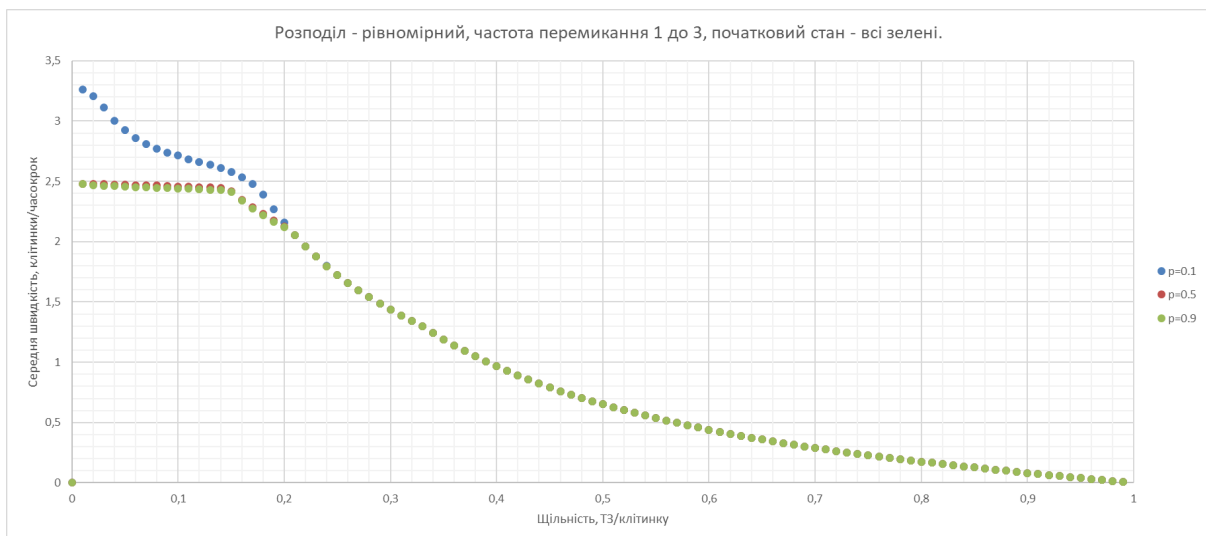


Рисунок 3.6 Середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.



2) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - всі зелені.

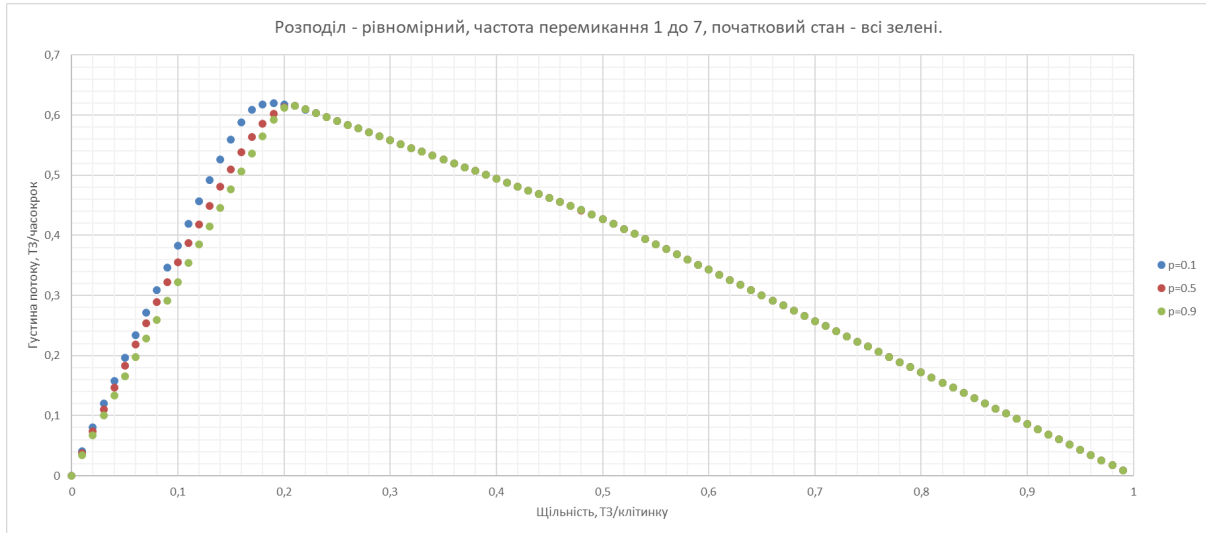


Рисунок 3.7 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

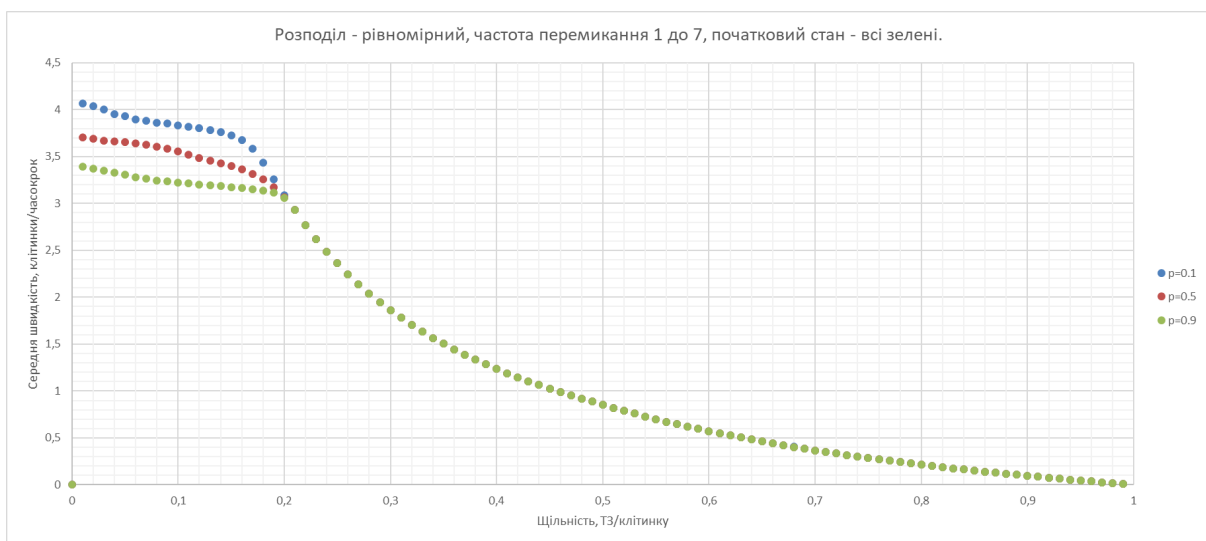


Рисунок 3.8 Середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

3) Розподіл св. - випадковий, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - всі зелені.

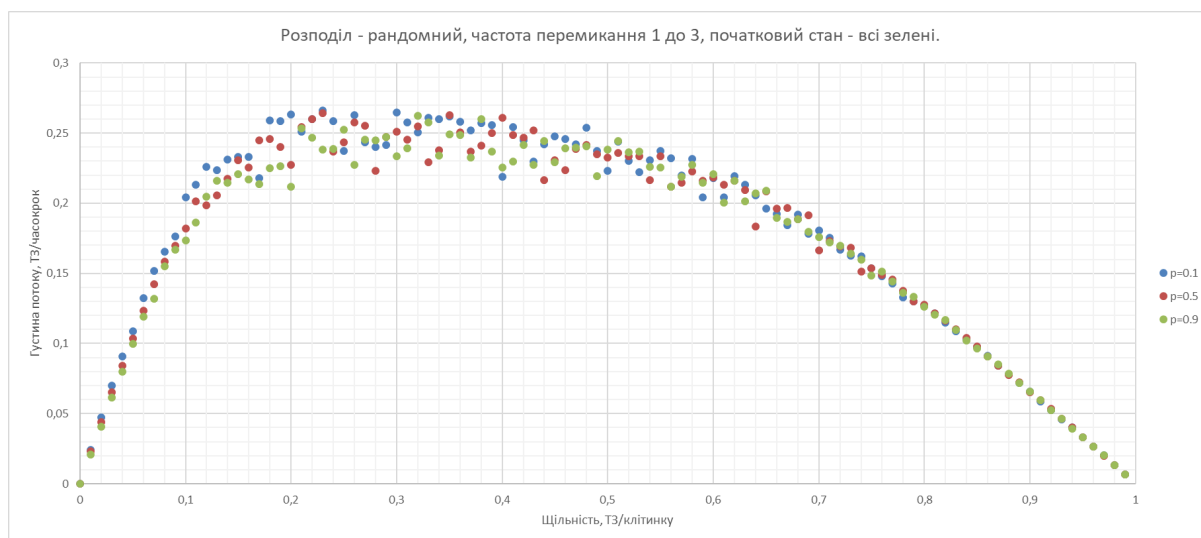


Рисунок 3.9 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

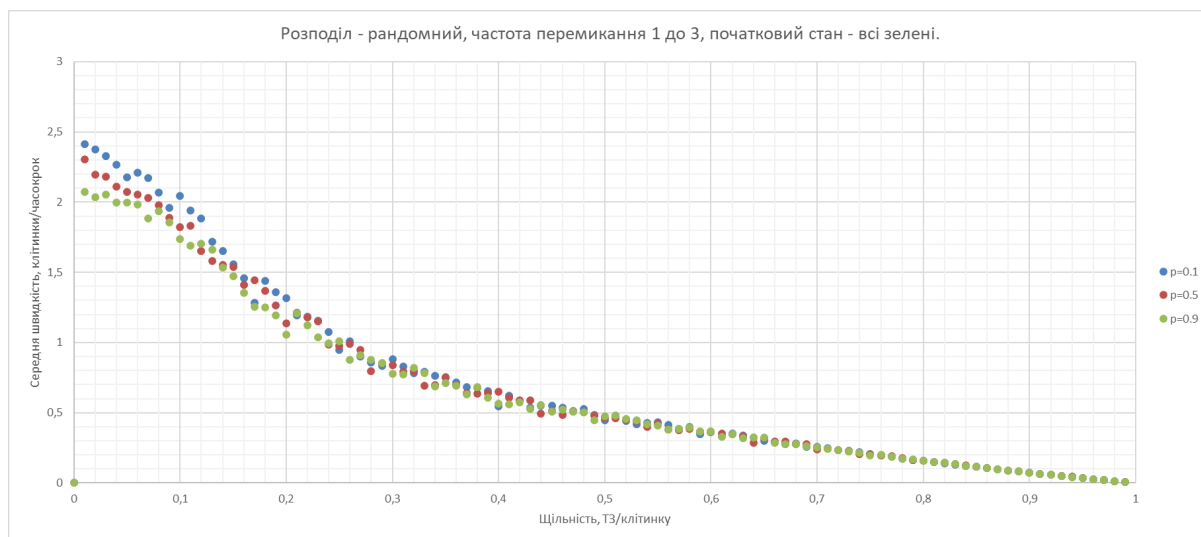


Рисунок 3.10 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 4) Розподіл св. - випадковий, частота перемикавання 1 до 7, початковий стан - всі зелені.

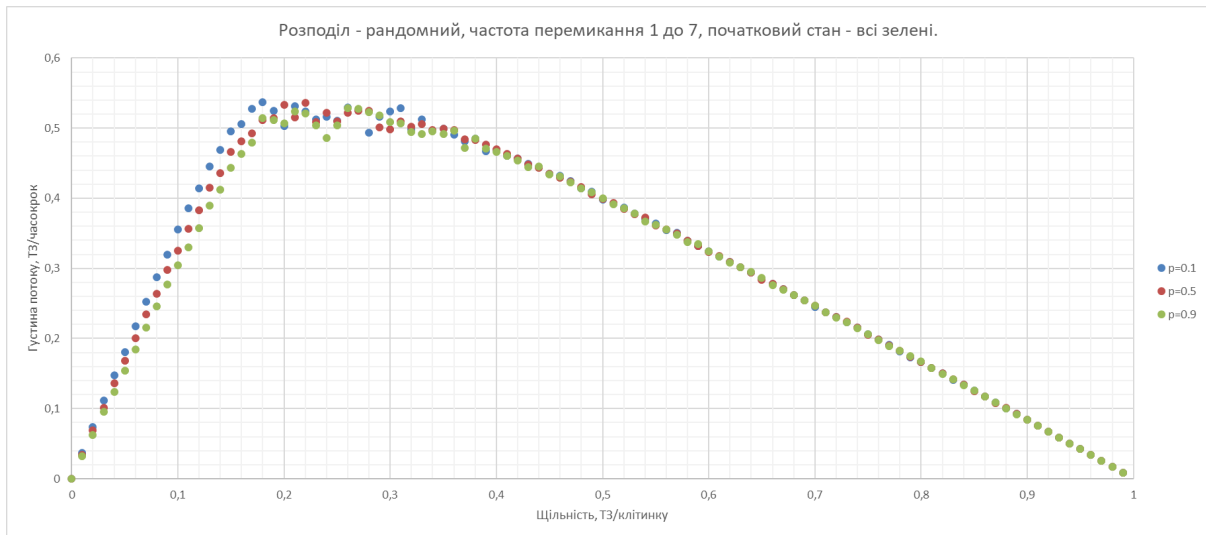


Рисунок 3.11 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

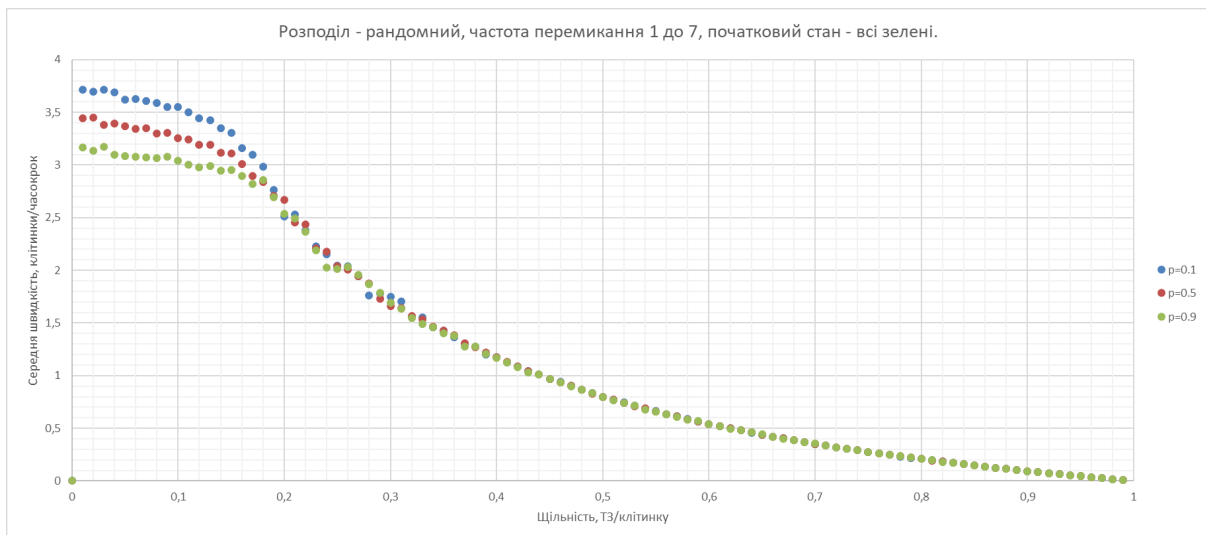


Рисунок 3.12 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 5) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - випадковий.

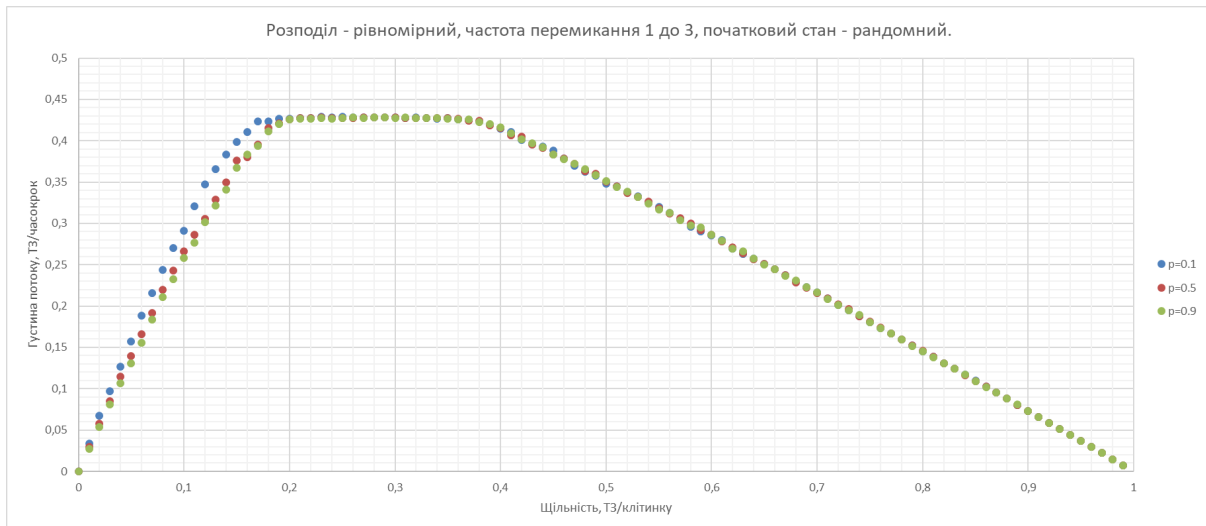


Рисунок 3.13 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

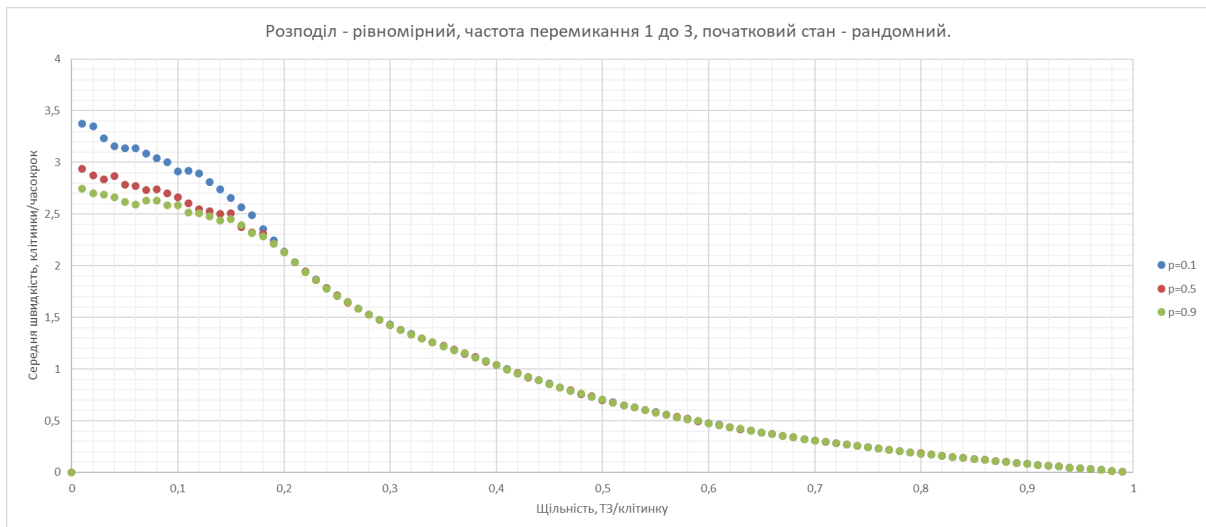


Рисунок 3.14 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- б) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - випадковий.

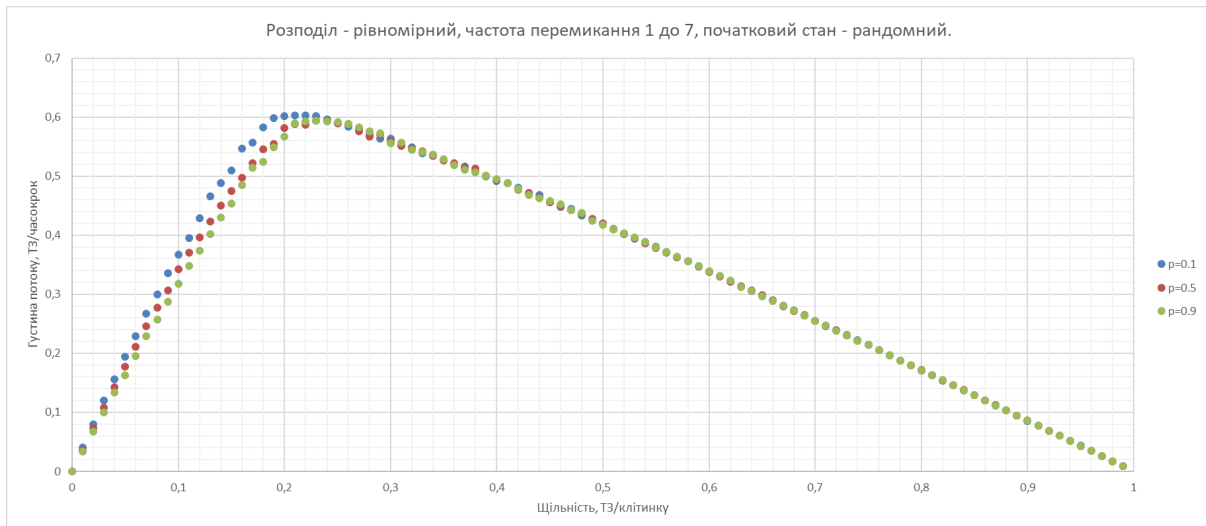


Рисунок 3.15 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

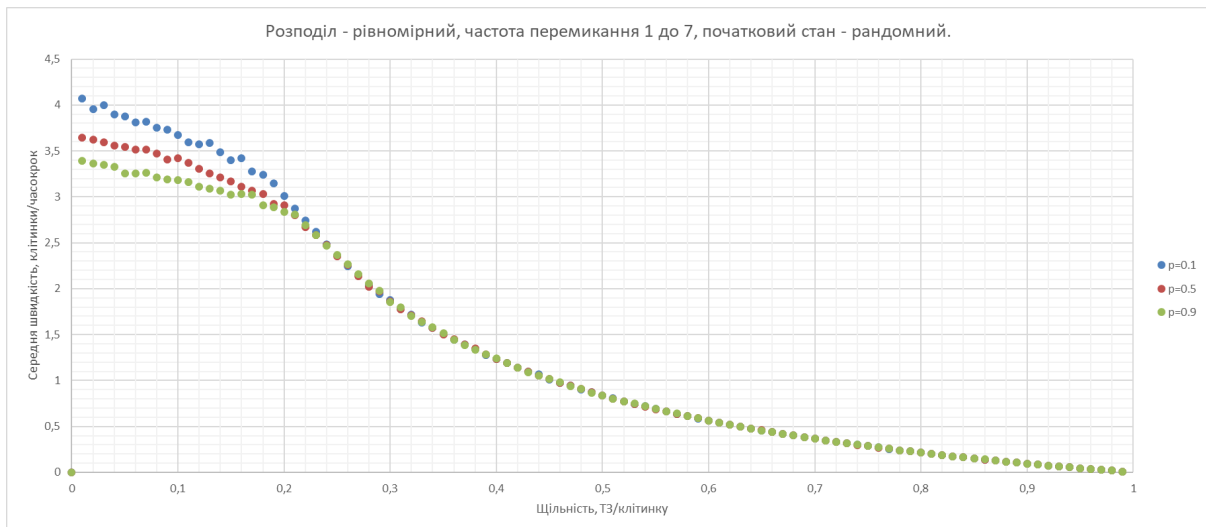


Рисунок 3.16 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

7) Розподіл св. - випадковий, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - випадковий.

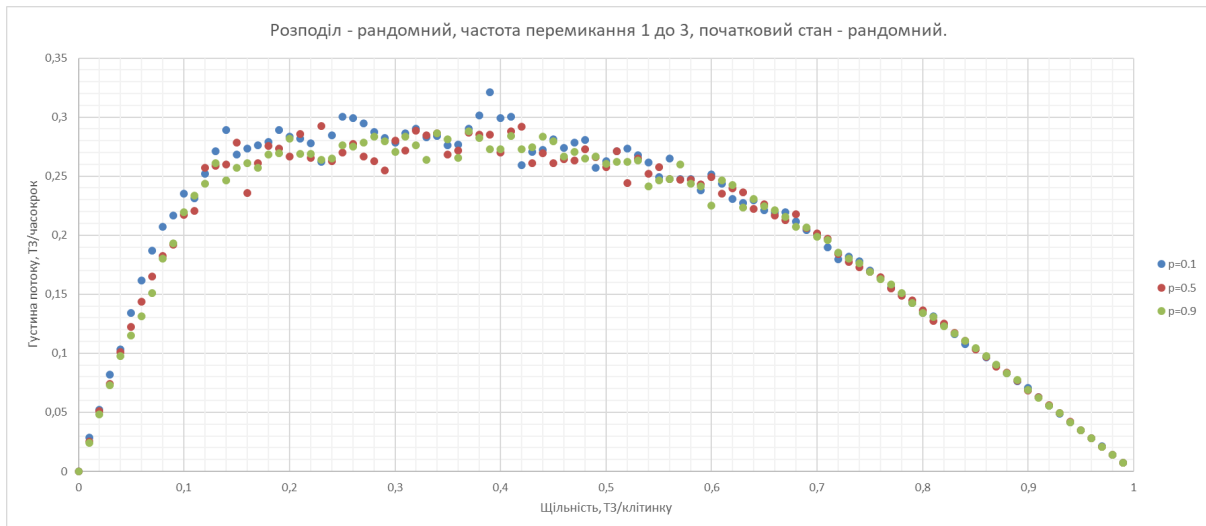


Рисунок 3.17 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

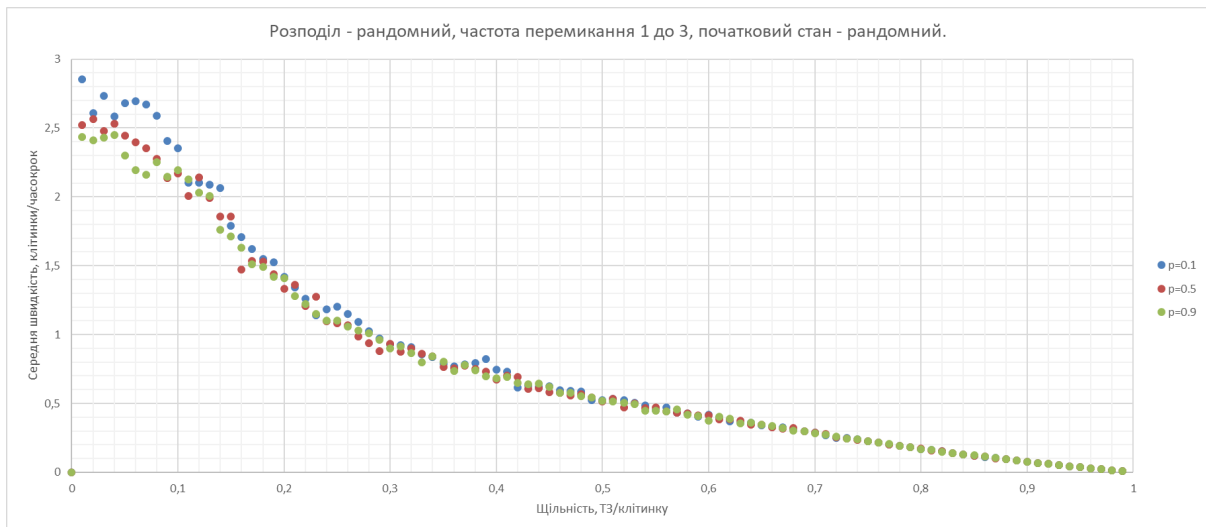


Рисунок 3.18 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 8) Розподіл св. - випадковий, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - випадковий.

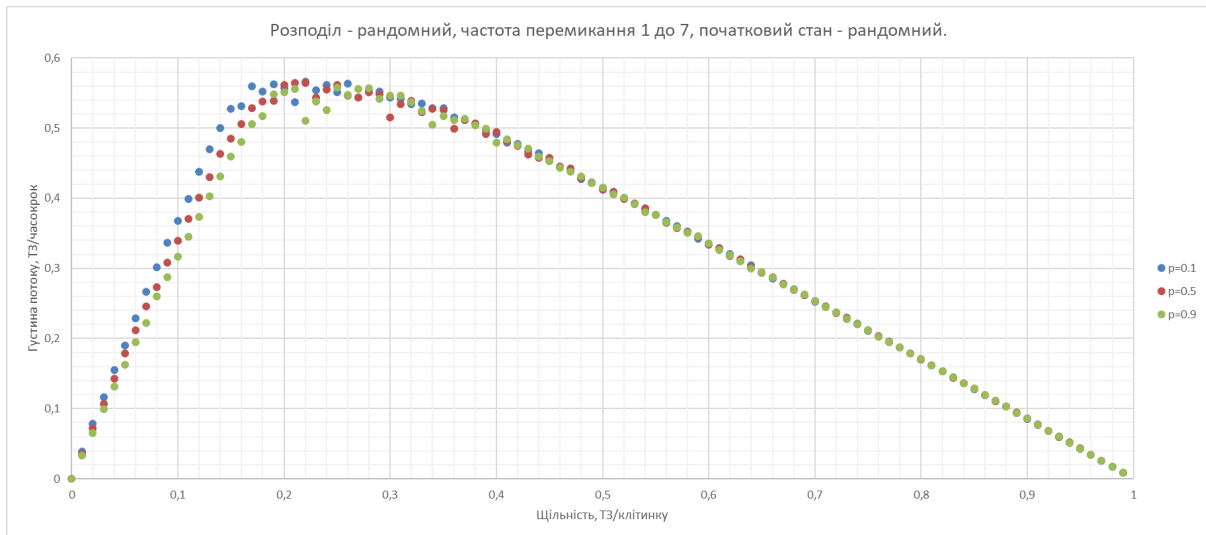


Рисунок 3.19 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

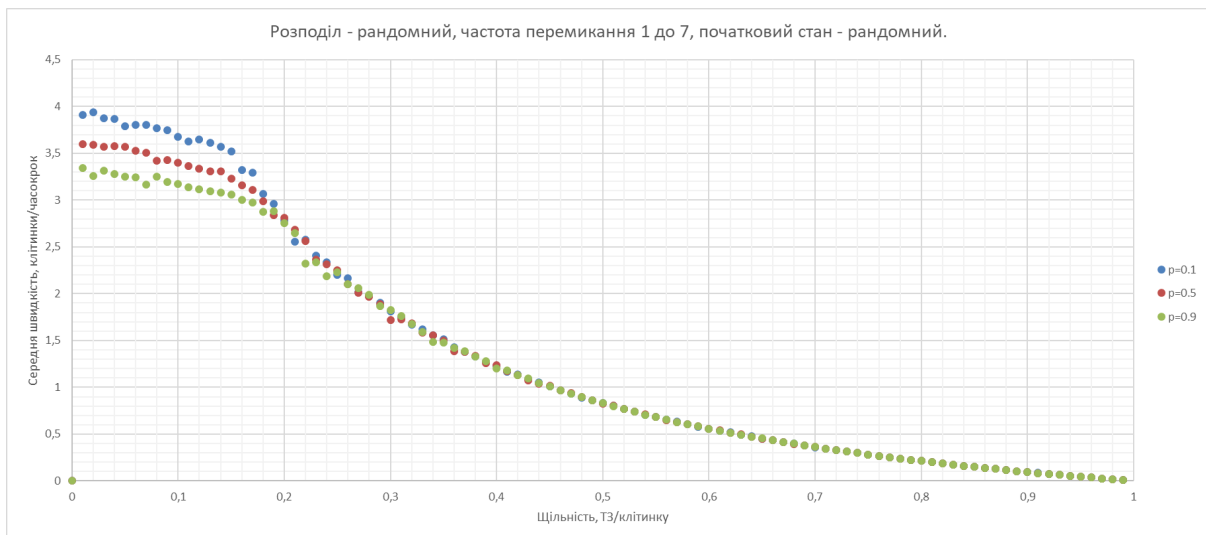


Рисунок 3.20 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 9) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - по групах(3 зелених, 2 червоних).

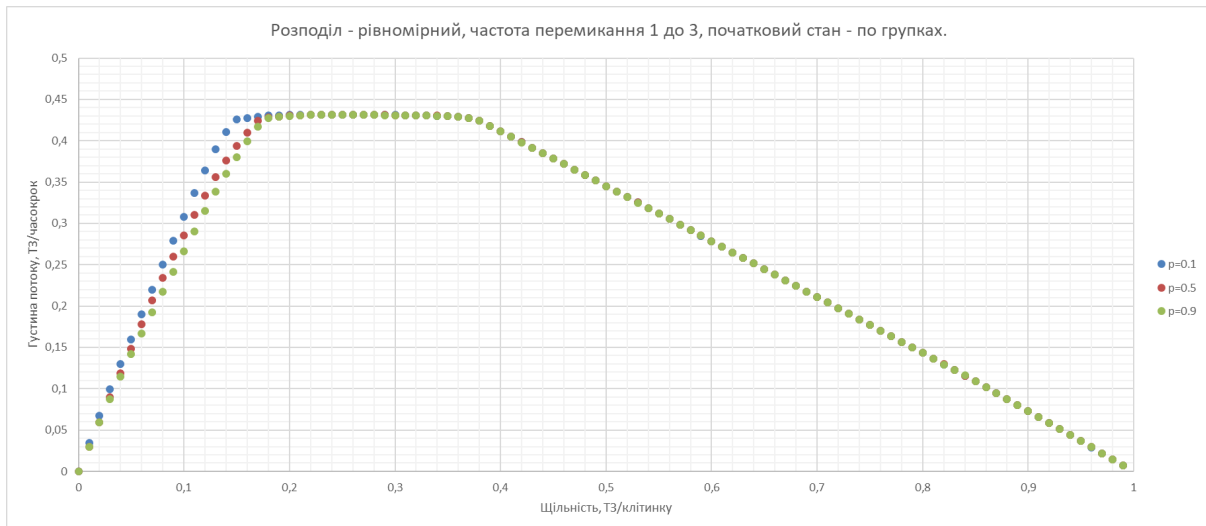


Рисунок 3.21 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

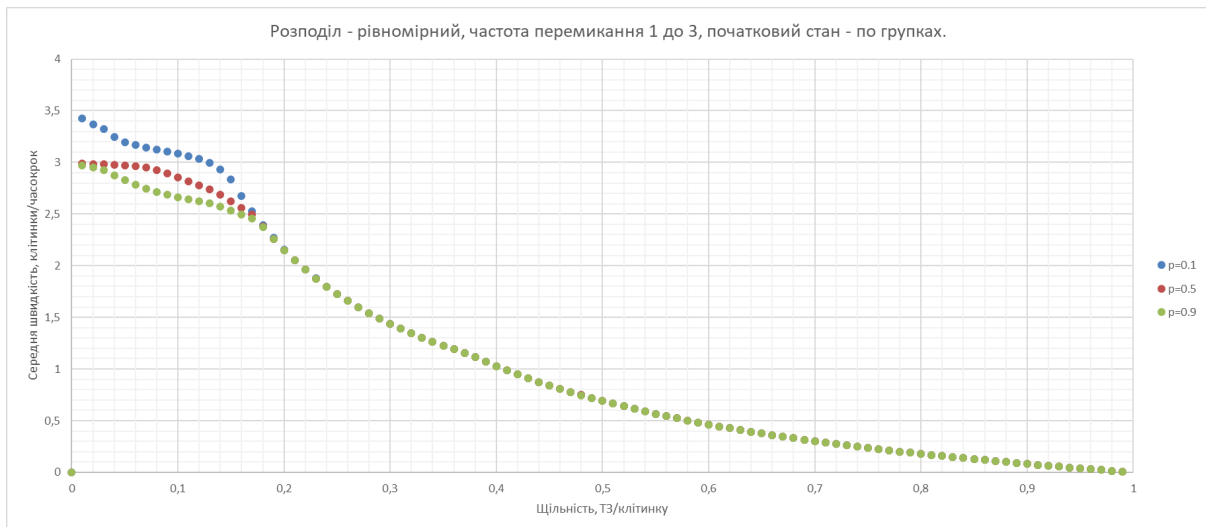
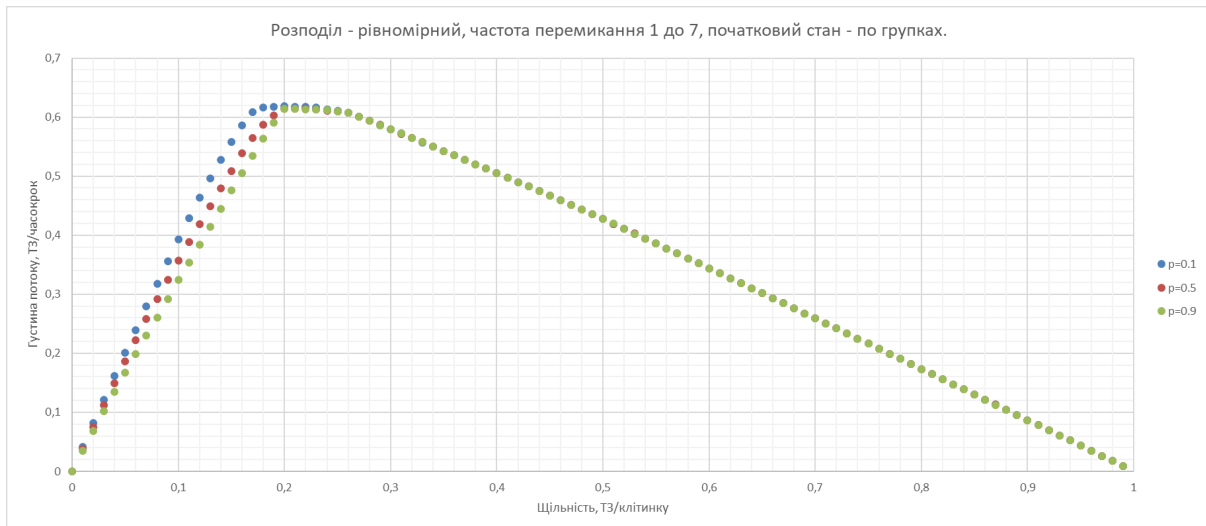


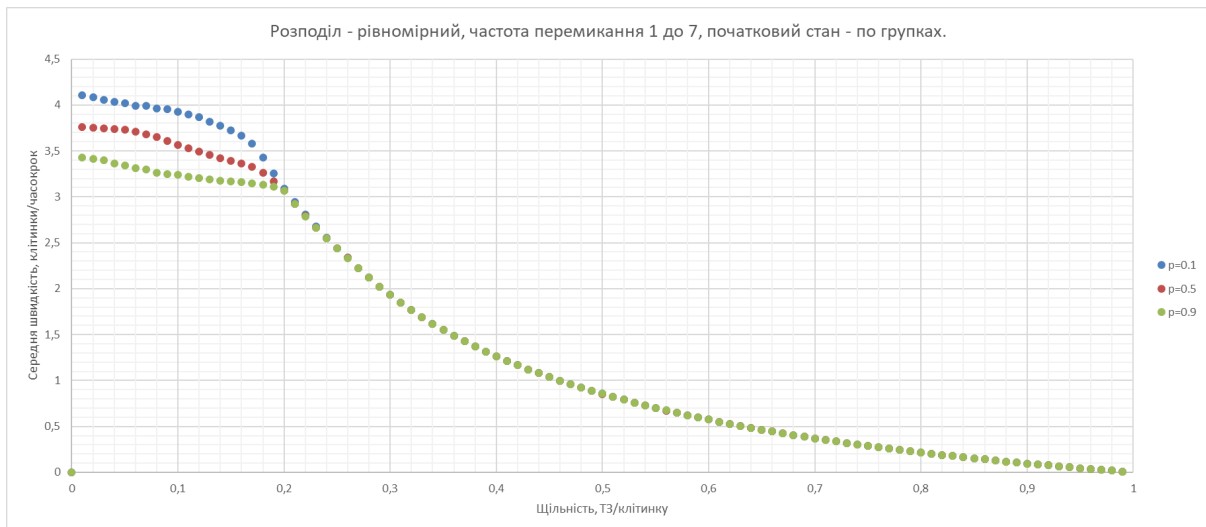
Рисунок 3.22 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 10) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - по групах(3 зелених, 2 червоних).





*Рисунок 3.23 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.*



*Рисунок 3.24 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.*

- 11) Розподіл св.- випадковий, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - по групах(3 зелених, 2 червоних).

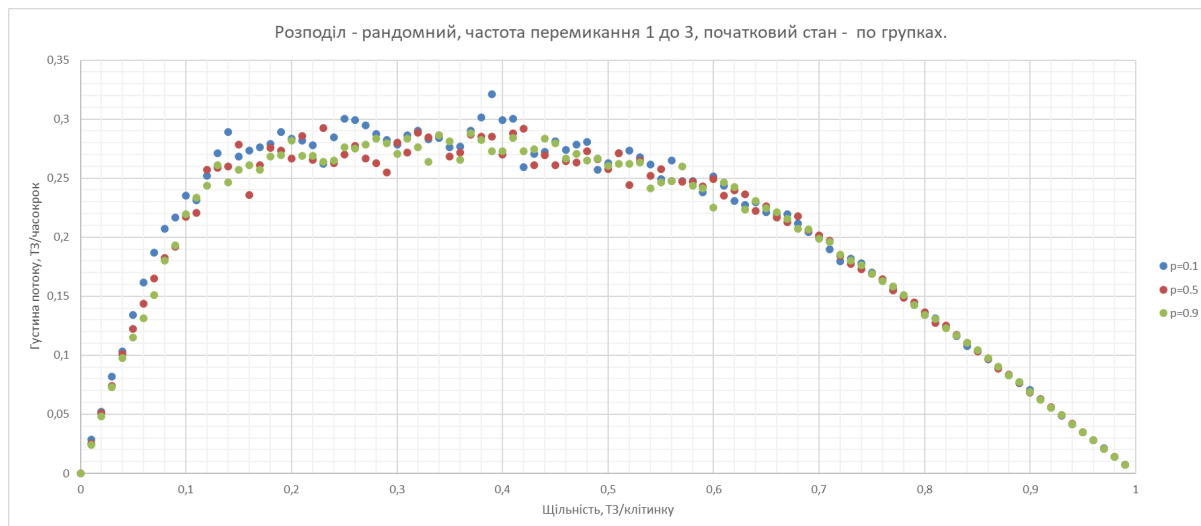


Рисунок 3.25 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

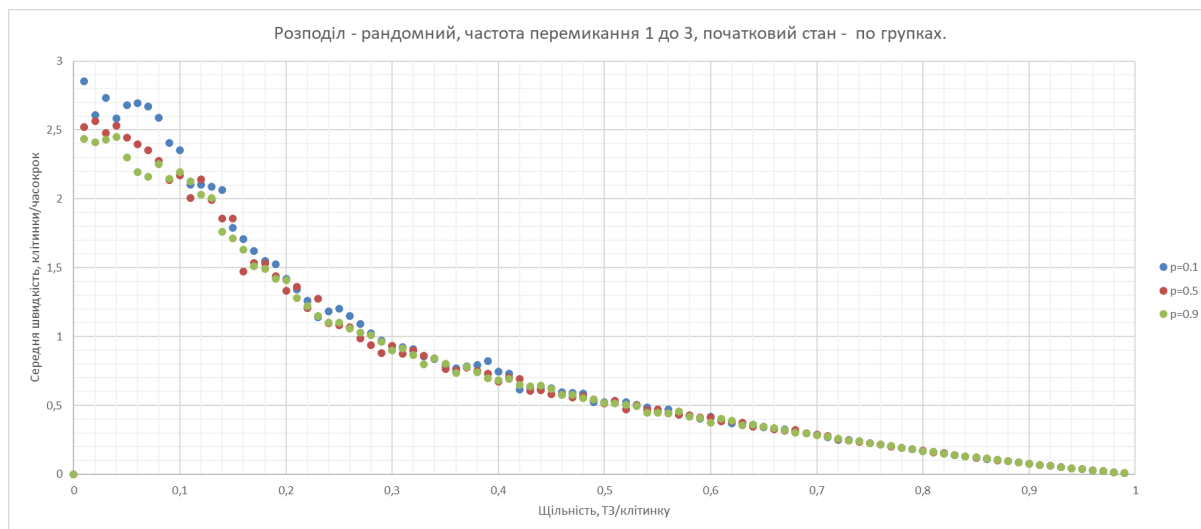


Рисунок 3.26 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 12) Розподіл св. - випадковий, частота перемикачів 1 до 7, початковий стан - по групах (3 зелених, 2 червоних).

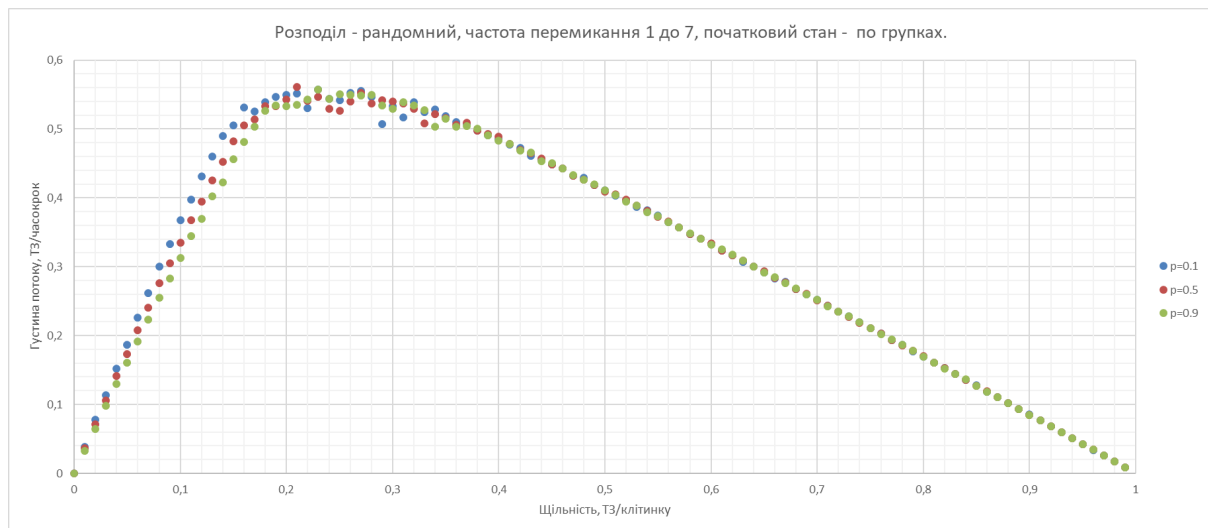


Рисунок 3.27 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

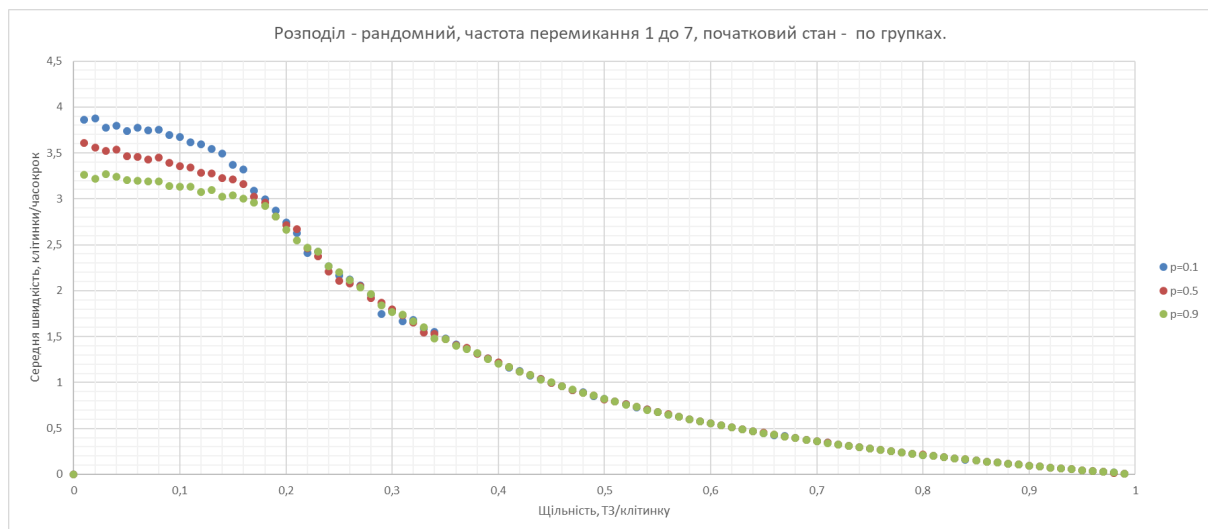


Рисунок 3.28 Середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 13) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - по групах(4 зелених, 1 червоний).

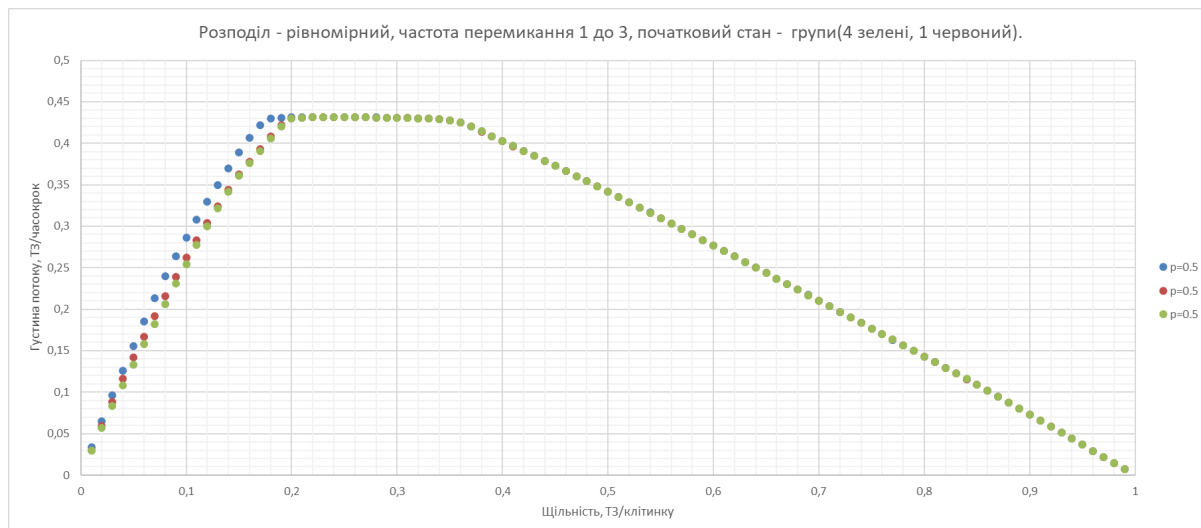


Рисунок 3.29 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

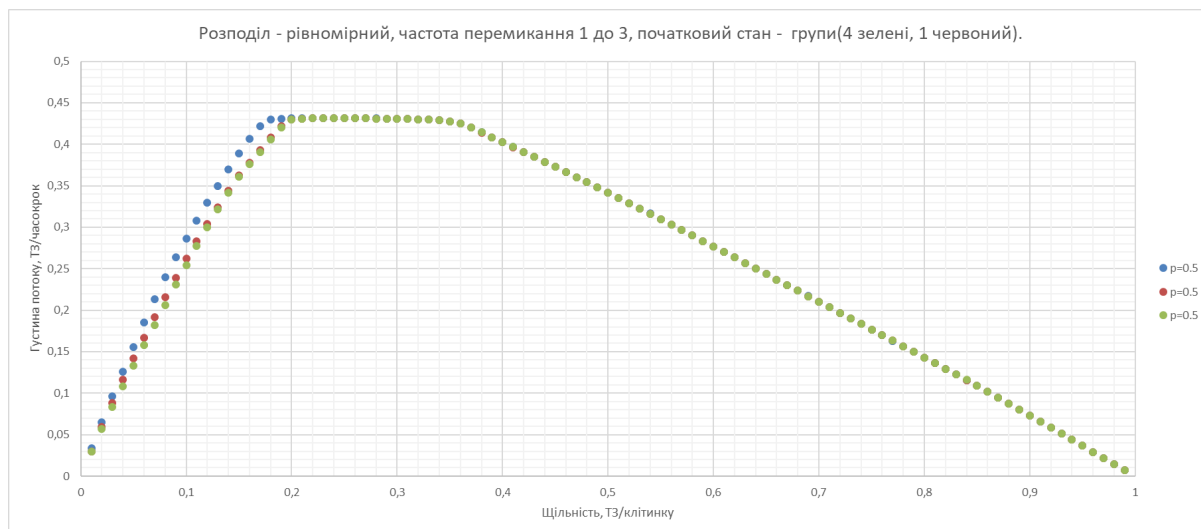


Рисунок 3.30 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 14) Розподіл св. - рівномірний, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - по групах(4 зелених, 1 червоний).

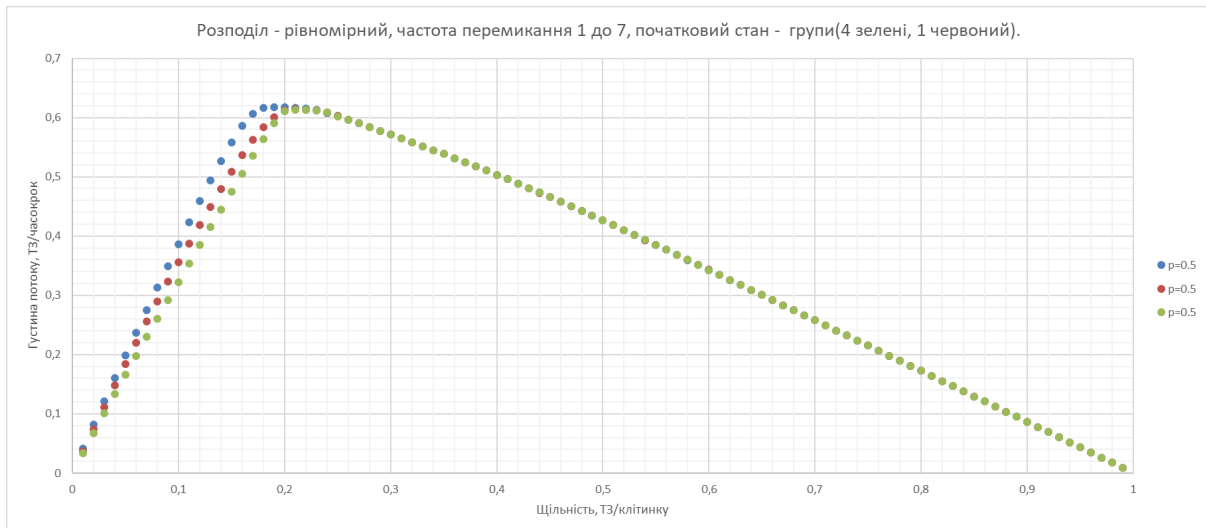


Рисунок 3.31 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

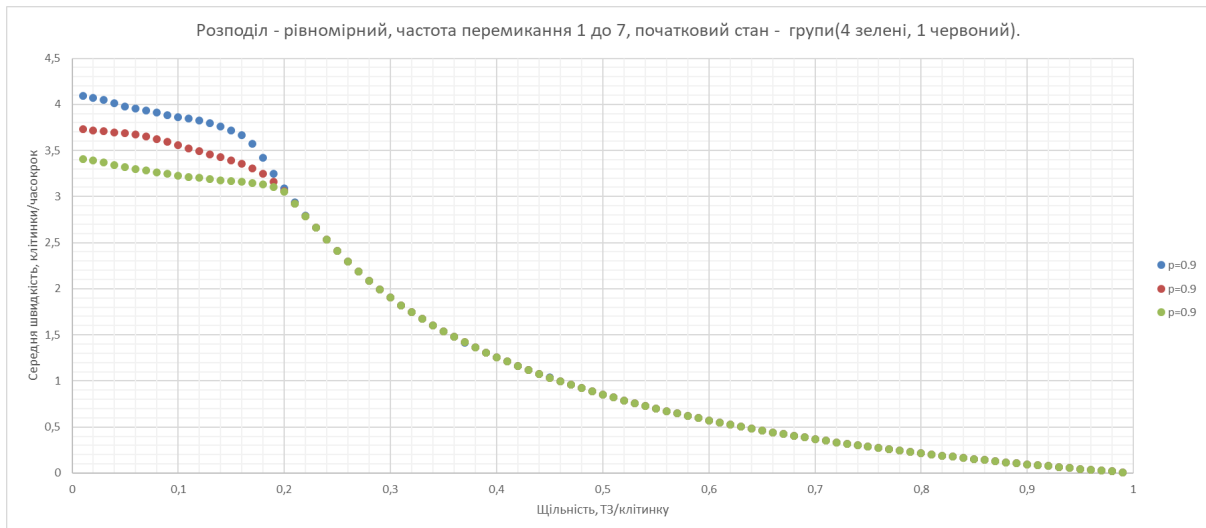


Рисунок 3.32 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 15) Розподіл св.- випадковий, частота перемикання 1 до 3, початковий стан - по групах(4 зелених, 1 червоний).

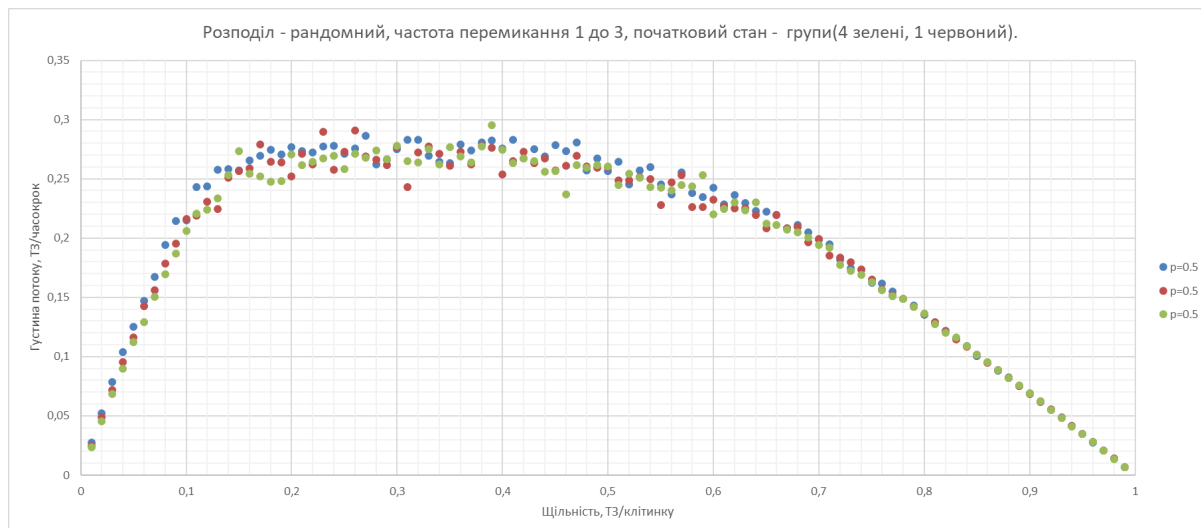


Рисунок 3.33 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

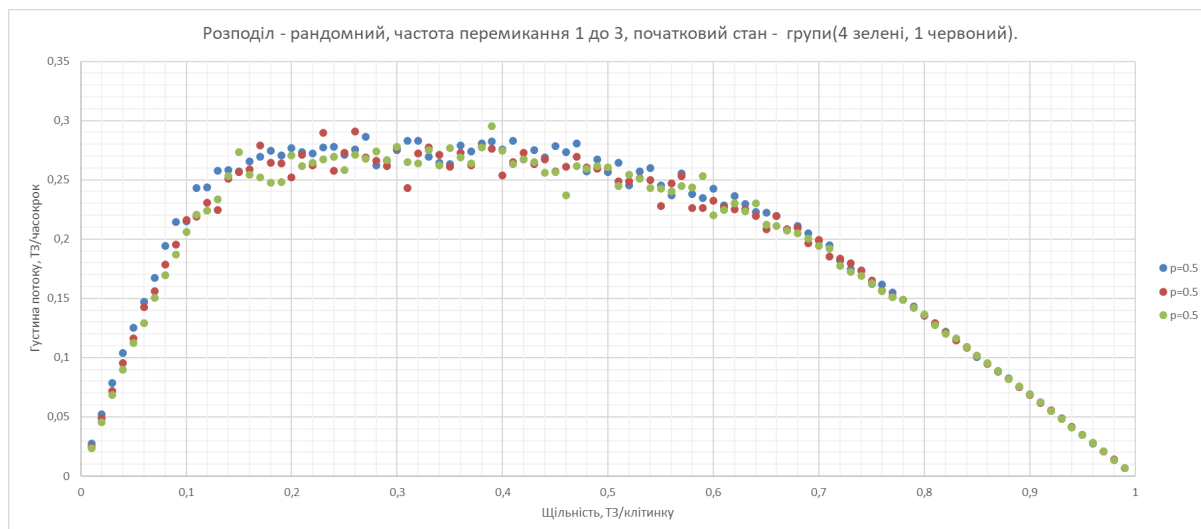


Рисунок 3.34 Залежність середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

- 16) Розподіл св. - випадковий, частота перемикання 1 до 7, початковий стан - по групах(4 зелених, 1 червоний).

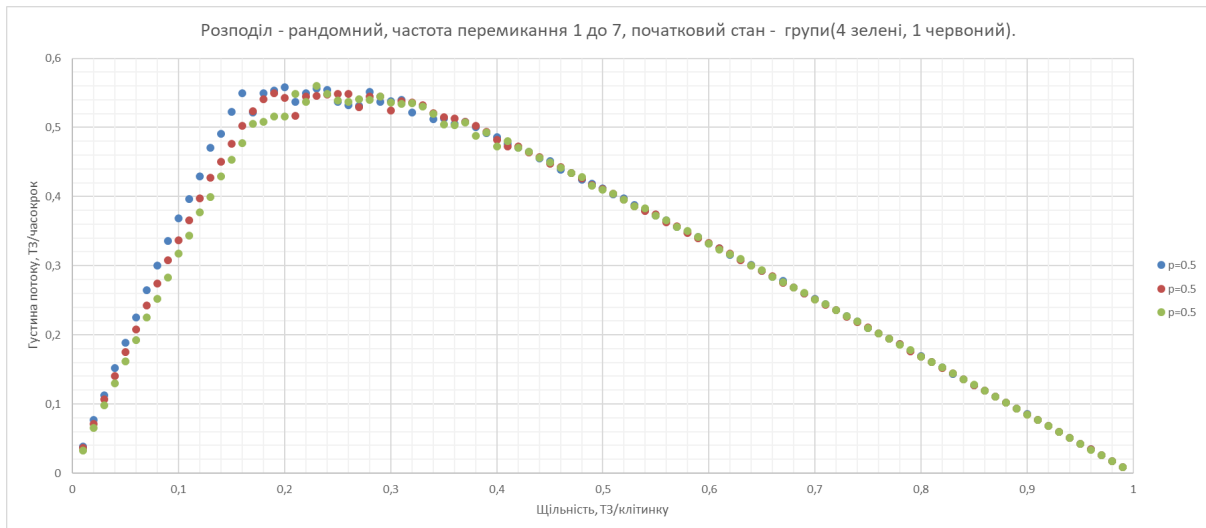


Рисунок 3.27 Залежність густини потоку від щільності при умовах на рисунку.

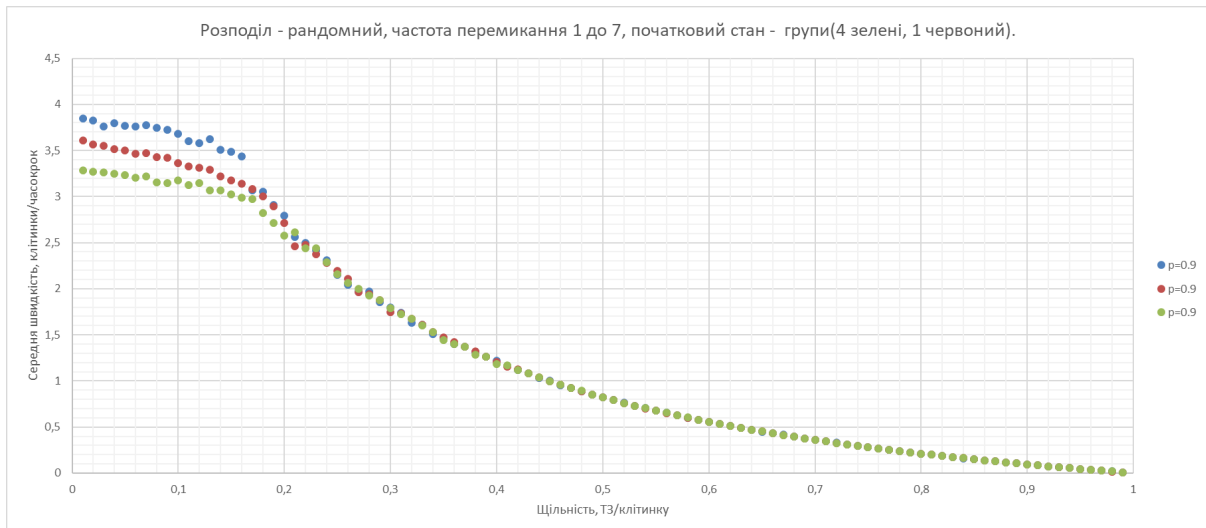


Рисунок 3.28 Середньої швидкості від щільності при умовах на рисунку.

### 3.4 Висновки до розділу 3.

Зведені результати глобальних характеристик всіх експериментів наведені у таблиці нижче.

№	Розподіл світлофорів	Частота	Поч. стан	Критична щільність потоку	Максимальний потік	Критична щільність швидкості	Максимальна швидкість
1	рівномірний	3	всі зелені	0.325	0.44	0.16	$p=0.1$ на початку 3.3, для $p=0.5$ s 0.9 2.5
2	рівномірний	7	всі зелені	0.2	0.62	0.2	$p=0.1$ на початку трішки від 4 до 3.7, для $p=0.5$ 3.2 і 0.9 - 3.3
3	рандомний	3	всі зелені		0.25		2.4
4	рандомний	7	всі зелені	0.35	0.54	0.2	$p=0.1$ на початку трішки 3.7, для $p=0.5$ 3.5 і 0.9 - 3.2
5	рівномірний	3	рандомний	0.38	0.43	0.18	$p=0.1$ на початку трішки 3.4, для $p=0.5$ 2.8 і 0.9 - 2.5
6	рівномірний	7	рандомний	0.24	0.6	0.2	$p=0.1$ на початку трішки від 4 до 3.7, для $p=0.5$ 3.5 і 0.9 - 3.3
7	рандомний	3	рандомний		0.27		2.5
8	рандомний	7	рандомний	0.27	0.55	0.2	$p=0.1$ на початку трішки від 4 до 3.7, для $p=0.5$ 3.5 і 0.9 - 3.2
9	рівномірний	3	погрупка x23	0.37	0.44	0.16	$p=0.1$ на початку трішки 3.4, для $p=0.5$ 3 і 0.9 - 3
10	рівномірний	7	погрупка x23	0.26	0.62	0.2	$p=0.1$ на початку трішки від 4 до 3.7, для $p=0.5$ 3.7 і 0.9 - 3.3
11	рандомний	3	погрупка x23		0.27		2.5
12	рандомний	7	погрупка x23	0.3	0.55	0.18	$p=0.1$ на початку трішки 3.7, для $p=0.5$ 3.5 і 0.9 - 3.2



13	рівномірний	3	погрупка x41	0.38	0.44	0.2	p=0.1 на початку трішки 3.4, для p=0.5 3 і 0.9 - 3
14	рівномірний	7	погрупка x41	0.2	0.62	0.2	p=0.1 на початку трішки від 4.1 до 3.7, для p=0.5 3.7 і 0.9 - 3.3
15	рандомний	3	погрупка x41		0.27		2.5
16	рандомний	7	погрупка x41	0.4	0.55	0.2	p=0.1 на початку трішки 3.7, для p=0.5 3.5 і 0.9 - 3.2

*Таблиця 3.1 Порівняльна характеристика результатів експериментів.*

## ВИСНОВКИ

В роботі описано поняття клітинного автомата, що моделює транспортний потік, його будова, правила та принципи роботи. Розглянуто, яких видів бувають ТСА, а саме одноклітинні чи багатоклітинні, односмугові чи багатосмугові, детеміновані, стохастичні чи сповільненні на старті. Справді, КА - проста, зрозуміла й гнучка математична модель, яка дозволяє зручно моделювати рух транспортних потоків. Опис фізичних характеристик руху вдало накладається на представлені для роботи складові класичного клітинного автомату.

В продовження теоретичного огляду ТСА також було розглянуто декілька прикладів існуючих одноклітинних односмугових моделей: CA-184, DFI-TCA, STCA, STCA-CC, SFI-TCA. Описано правила їх роботи та загальні характеристики і результати. Такий послідовний розгляд різних ТСА ще раз підтвердив, зручність використання КА для моделювання, оскільки часто наступна модель є удосконаленням або поєднанням попередніх. Причому кожен із запропонованих вдосконалень наближував модель до поведінки транспортних потоків у реальному світі. Запропонована розширена модель, що являє собою додавання двоколірних світлофорів є беззаперечним реалістичним доповненням, вартим уваги й дослідження. Нові параметри включають в себе рівномірність або хаотичність розподілу світлофорів, різну частоту загоряння червоного сигналу та вплив початкових значень сигналів та схеми перемикачів на рух транспортного потоку. Результати експериментів показали, що як і очікувалось середня швидкість та пропускна здатність впали, проте практично для всіх моделей значення критичної щільності, при якій відбувається спад приблизно однаковий і варіюється в межах між 0.16-0.25 ТЗ/клітинку. Також є ще два цікавих результати, що видно з усіх графіків.

По-перше, графіки залежності густини потоку від щільності як для рівномірного, так і для хаотичного розподілу світлофорів при частіших перемиканням човоного і менших тривалостях зеленого мають "плато", при якому тримається максимально можлива пропускна здатність, що витягує значення критичної щільності аж до 0.25 ТЗ/клітинку в деяких випадках. Також варто зазначити, що спосіб початкових увімкнень світлофорів, суттєво не впливає. Проте, другий цікавий факт - максимальна середня швидкість ніколи не досягає максимальної можливої швидкості. Також, при частішій зміні сигналів світлофорів, швидкість спадає стрімкіше, ніж при більших проміжках горіння зеленого сигналу світлофору.

Експерименти з випадковим розподілом світлофорів дають такі ж хаотичні та розкидані результати, проте патерн графіків зберігається. Значення пропускної здатності потоків для експериментів з більшим часом тривалості горіння зеленого сигналу також вищі в середньому на 0.2 ТЗ/клітинку.

При різних групах початкових вмикань в групі з 4 зеленими/1 червоним максимальні значення швидкостей та пропускних здатностей потоку рівні значенням у групі з 3 зелених/2 червоних, але досягаються при трішки більшій щільності.

Отже, результати роботи показали, що ТСА ефективний спосіб дослідження і дана модель з світлофорами може бути застосована як до інших моделей, так і розширена й вдосконалена ще більше.

## Список використаних джерел

1. Maerivoet S., De Moor B. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports*. 2005. Т. 419, № 1. С. 1–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.005>
2. Страница 3: ДСТУ 4092-2002. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосовування та вимоги безпеки (40982). ДНАОП - Нормативно-правовая библиотека инструкции документы. URL: [https://dnaop.com/html/40982\\_3.html](https://dnaop.com/html/40982_3.html)
3. [www.maerivoet.org](http://www.maerivoet.org). [www.maerivoet.org](http://www.maerivoet.org). URL: <http://www.maerivoet.org/index.php?page=traffic-smtca#code>
4. Nagel K., Wagner P., Woesler R. Still Flowing: Approaches to Traffic Flow and Traffic Jam Modeling. *Operations Research*. 2003. Т. 51, № 5. С. 681–710. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.51.5.681.16755>
5. Fukui M., Ishibashi Y. Traffic Flow in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1996. Т. 65, № 6. С. 1868–1870. URL: <https://doi.org/10.1143/jpsj.65.1868>
6. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*. 1992. Т. 2, № 12. С. 2221–2229. URL: <https://doi.org/10.1051/jp1:1992277>