



Україна на шляху до вуглецевої нейтральності



Адаптивна система дорожнього руху для зменшення трафіку та викідів CO₂

Хмельницький | Гібридний формат | 24 квітня 2026

Едуард Манзюк

Хмельницький національний університет



Funded by
the European Union



Трафік і CO₂ проблема наших міст

Де «ховається» найбільше забруднення?

Зупинки і старты - найбільш витратний режим: паливо витрачається без корисної роботи, двигун перегрівається.

Один неоптимальний сигнал світлофора

= сотні зайвих зупинок за годину = тонни CO₂ за рік

Ключове питання:

Чи можна знизити викиди БЕЗ зміни автомобілів і доріг?

Відповідь: ТАК - через розумне управління сигналами перехресть

25%

від усіх світових

викидів CO₂

40%

викидів у містах

від міського вуглецевого сліду

#2

місце транспорту

за викидами в Україні після енергетики

Хмельницький і проєкт U_CAN

Горизонт Європа | GA № 101148374

Мета: допомогти українським містам рухатися до вуглецевої нейтральності

Чому Хмельницький?

Відеоспостереження на перехрестях та лічильники транспорту

Активна співпраця між ХНУ та ХМР

Ключовий висновок досліджень

Кожне перехрестя має унікальні фізичні особливості - нахил, склад трафіку, геометрію.

Врахування цих особливостей у ШІ-системі відкриває нові можливості ефективного регулювання.

Дослідження 1: Топографічно-адаптований ШІ

Ryzhanskyi et al., Future Transportation, 2026 (MDPI)

Як врахувати фізичні особливості перехрестя в алгоритмі навчання з підкріпленням



Дослідження 2: Адаптивне розпізнавання патернів

Pavlyshyn et al., Future Transportation, 2025 (MDPI)

Каскадна кластеризація для автоматичного виявлення режимів руху міста



Чому особливості конкретного перехрестя мають значення?

1

Нахил дороги

Підйом/спуск → різна вартість старту/зупинки. Приклад: 3.8° на одному підході дає +39.5% CO₂ при незнанні рельєфу.

2

Склад трафіку

Частка вантажівок, автобусів, електромобілів → різні профілі викидів і різна вага рішення.

3

Геометрія

Кількість смуг, радіус повороту, ширина проїзду → різна пропускна здатність.

4

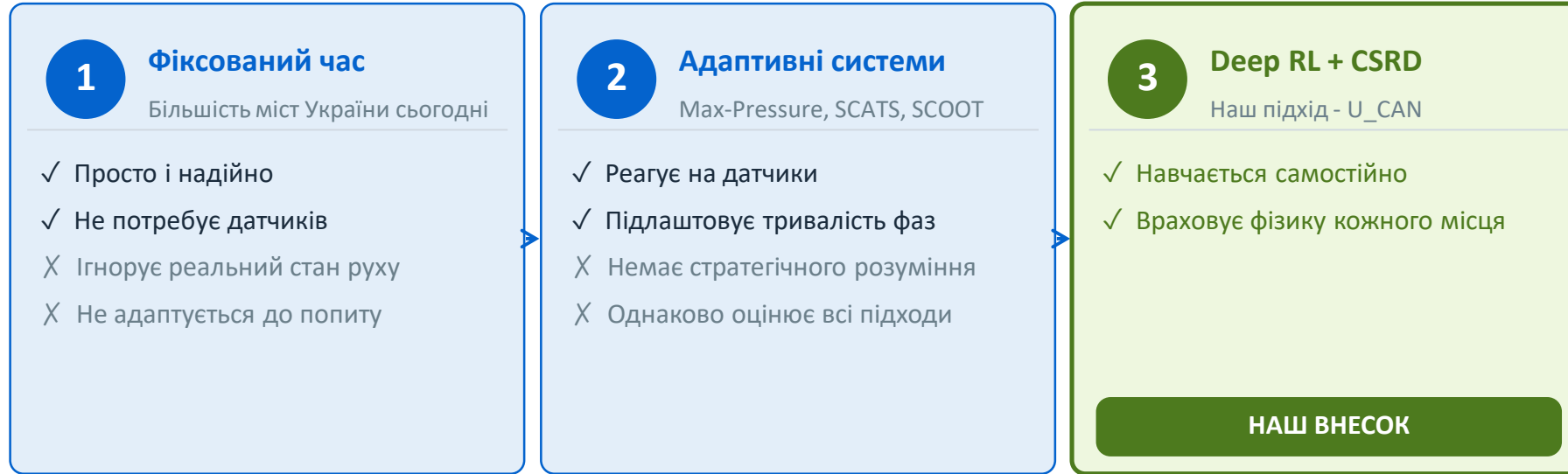
Інтенсивність

Пікові навантаження, сезонні та добові коливання → різна критичність затримок.

Принцип CSRD (Context-Specific Reward Design) контролер адаптується до особливостей КОЖНОГО конкретного перехрестя

Підхід масштабується: той самий метод → промислові райони, школи, вузлові зупинки, спеціальні маршрути

Три покоління управління світлофорами

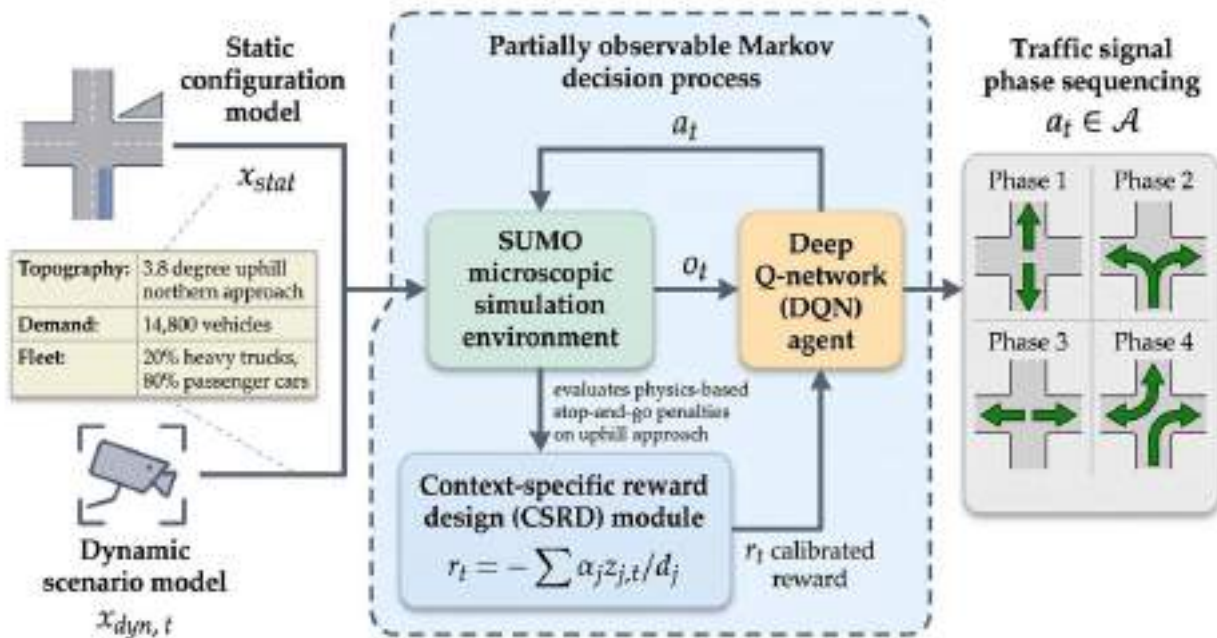


Критична прогалина навіть у DRL-систем:

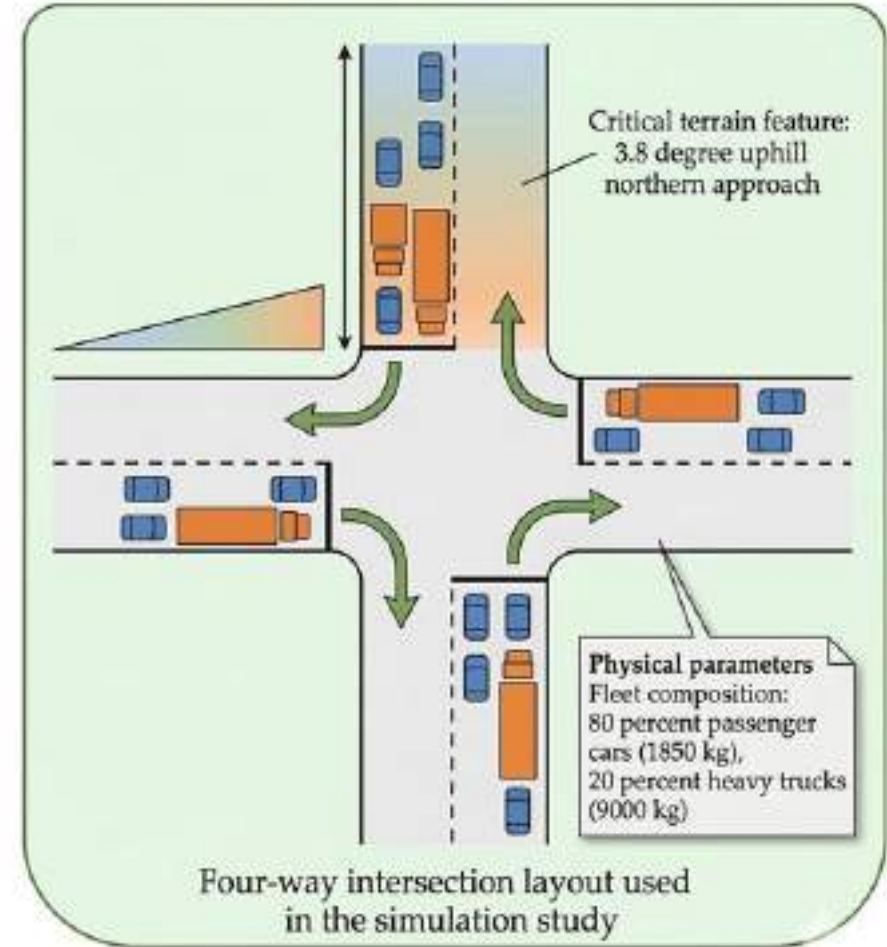
Всі підходи до перехрестя оцінюються однаково - без урахування фізичних особливостей конкретного місця.

Наш внесок: CSRD Context-Specific Reward Design - DRL-система з контекстно-специфічним проектуванням нагороди.

Схема методу та модель перехрестя



Загальна схема методу



Модель перехрестя

Як навчається ШІ-агент на перехресті?

Аналогія: навчання як гра в шахи

1 **Робить хід**
Обирає фазу сигналу (з 4 варіантів) на основі поточного стану перехрестя



2 **Бачить результат**
Отримує оцінку (reward): наскільки рішення знизило CO₂ і черги



3 **Запам'ятовує**
Через тисячі симуляцій стає кращим без явних правил від людини

200 епізодів × 9 год симуляції = оптимальна стратегія

Що бачить агент

- Черги та швидкості
- Тип автомобілів (легкові / вантажні)
- Нахил дороги на підході
- Поточну фазу сигналу
- Старти і зупинки на підйомі

Ключова інновація

На рівній дорозі:

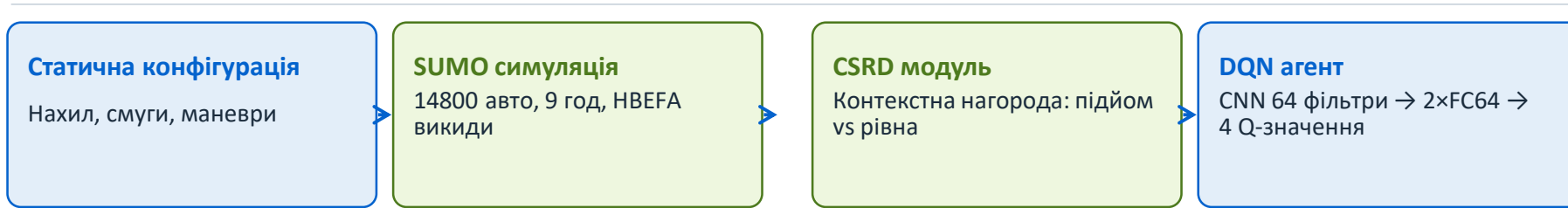
Штраф за тривале очікування та викиди

На підйомі з вантажівками:

Штраф за КОЖНУ зупинку і старт

→ Агент розуміє що безперервний рух на підйомі важливіший за мінімальну чергу

Архітектура CSRD-DQN контролера



Функції нагороди

Рівна дорога (CSRD-U):

$$r = -0.5 \cdot E / (|L| \cdot 10^4) - 0.1 \cdot W / (|L| \cdot 10^2)$$

Де E — сума викидів, W — сума очікувань по смугах

Підйом з вантажівками (CSRD-T):

$$r = -1.5W - 0.5Q - 0.7N \uparrow \text{start} - 0.7N \uparrow \text{stop}$$

Q — черга, $N \uparrow$ — старт/зупинки на підйомі

Симулятор: SUMO v1.22 + TraCI v1.24

Профілі викидів: HBEFA4 (PC_petrol_Euro-4, RT_gt7_5t_Euro-IV)

5 незалежних запусків × 200 епізодів навчання

ε-жадібна стратегія під час навчання

Перевірка Велча по 5 незалежних сідах

Цифровий двійник перехрестя Хмельницького

Параметри симуляції

| | | | |
|---------------|----------------------------|-------------|---------------------------|
| ◆ Тип | Чотиристоронній перехрест | ◆ Горизонт | 9 годин (32 400 с) |
| ◆ Транспорт | 14 800 автомобілів | ◆ Навчання | 200 епізодів × 5 запусків |
| ◆ Флот | 80% легкові + 20% вантажні | ◆ Симулятор | SUMO v1.22 + TraCI v1.24 |
| ◆ Особливість | Підйом 3.8° (пн. підхід) | | |

Три сценарії порівняння

1

Рівна дорога

Нульовий нахил. CSRD-U як базовий контролер без топографії.

2

Підйом 3.8° без адаптації

Той самий CSRD-U на підйомі - без зміни функції нагороди.

3

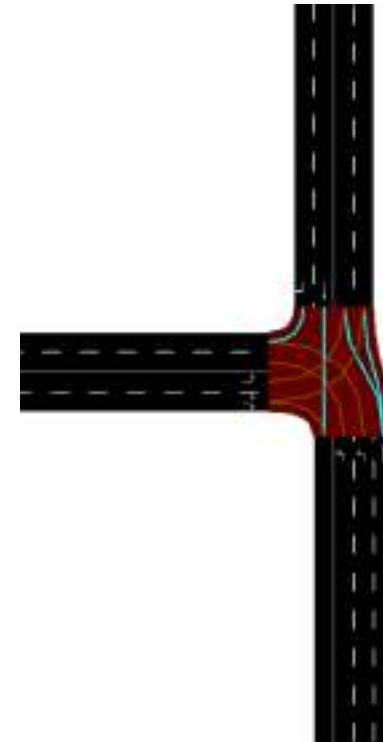
Підйом 3.8° + CSRD-T

Топографічно-адаптований контролер з новою функцією нагороди.

Цифровий двійник перехрестя Хмельницького



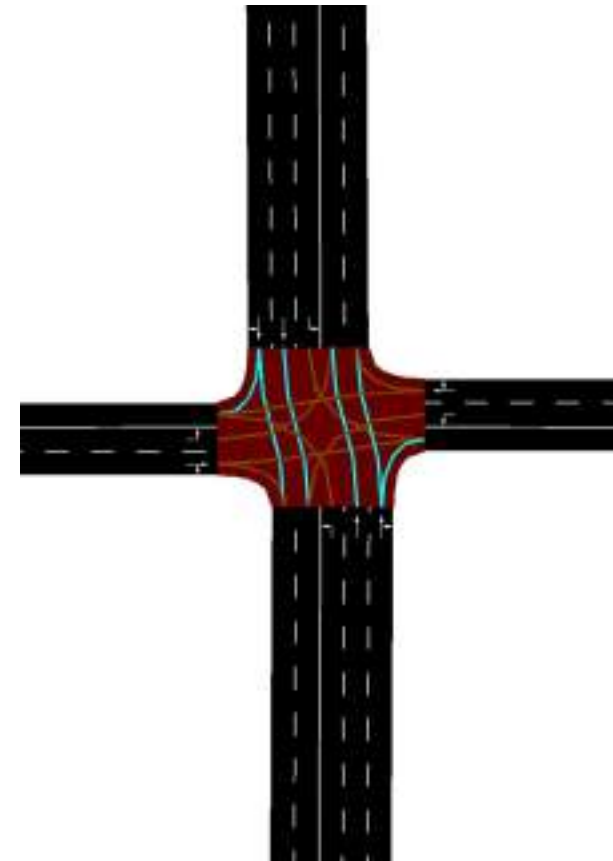
вул. Князя Святослава Хороброго – вул. Грушевського



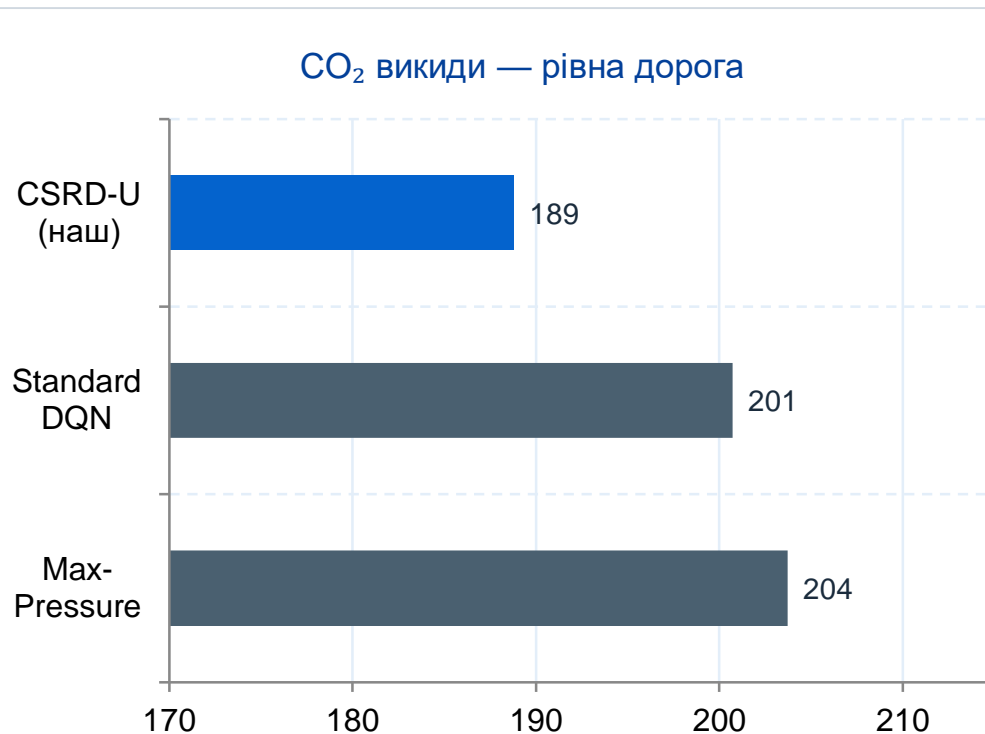
Цифровий двійник перехрестя Хмельницького



вул. Прибузька - вул. Старокостянтинівське шосе



Результат 1: Рівна дорога - CSRD-U проти базових систем



Ключові показники

-7.3%

vs Max-Pressure

CO₂ менше

-5.9%

vs Standard DQN

CO₂ менше

0.97

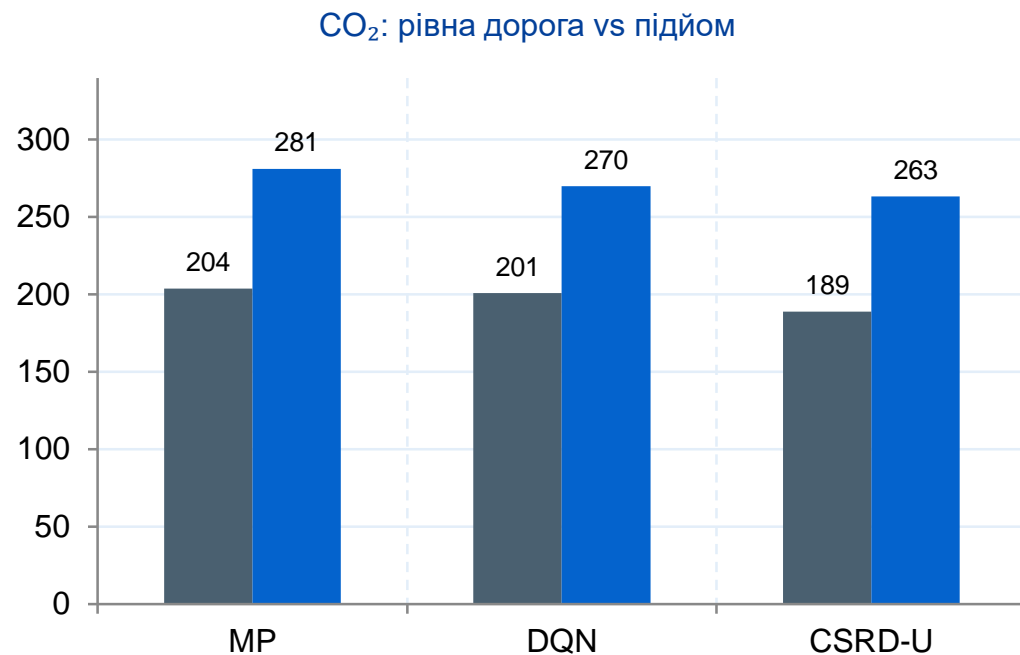
авто

найменша черга

Висновок: навіть без урахування рельєфу - правильно налаштована функція нагороди дає перевагу

Система збіглася після 100 епізодів навчання з 200 · Час поїздки: 43.9 с — найкращий

Результат 2: Підйом 3.8° без адаптації - структурна проблема



Чутливість до нахилу (+%)

| Система | CO ₂ | Час | Черга |
|---------|-----------------|--------|--------|
| MP | +37.9% | +65.2% | +52.9% |
| DQN | +34.4% | +62.2% | +63.9% |
| CSRD-U | +39.5% | +69.1% | +71.1% |

Чому система деградує на підйомі?

Скорочення черги на 1 авто → 5 зайвих стартів вантажівки на підйомі → у 3–5 разів більше CO₂

Висновок: рельєф змінює правила гри - потрібна інша логіка управління

Результат 3: CSRD-T - топографічно-адаптований контролер



Від одного перехрестя до системного підходу

8.6%

зниження CO₂ на **ОДНОМУ** перехресті за 9 годин

Без зміни інфраструктури. Без нових авто. Тільки алгоритм.

Та сама методологія CSRD адаптується до будь-якої особливості:

Промислові райони

Великий потік вантажного транспорту
→ CSRD пріоритизує безперервний рух важких авто

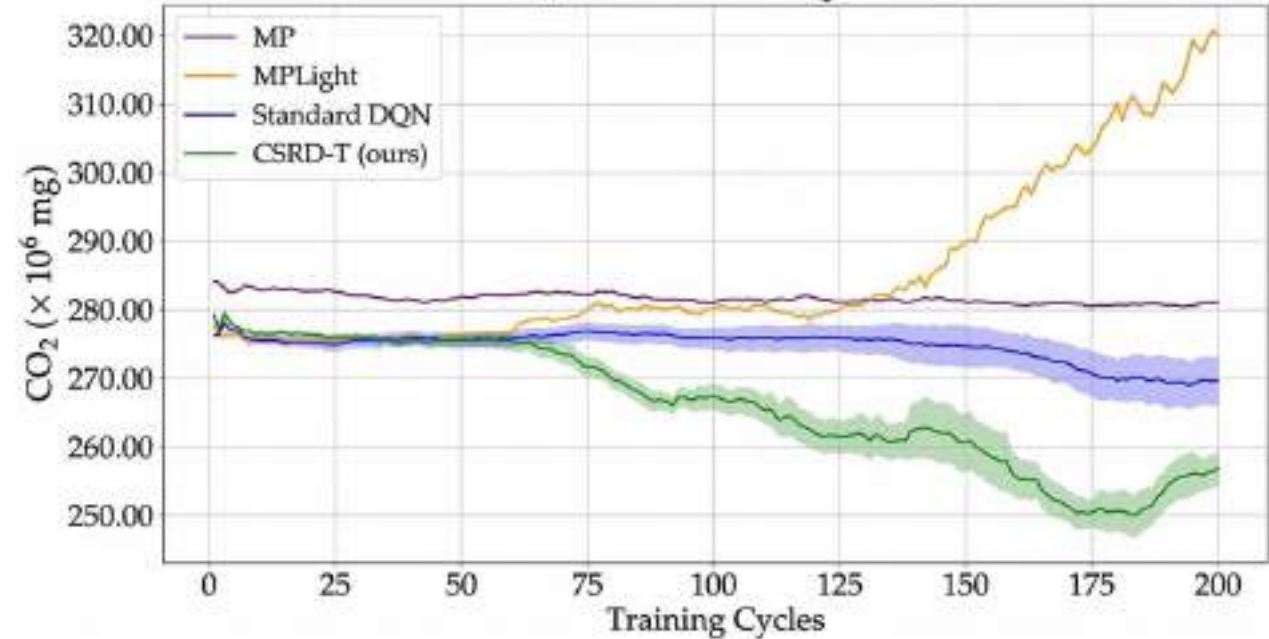
Біля шкіл/лікарень

Підвищений пішохідний трафік → безпека і передбачуваність як домінуюча мета

Зупинки транспорту

Пріоритет автобусів і тролейбусів → скорочення затримок громадського транспорту

CO₂ Emissions Comparison



Частина 2: Як розпізнати транспортні режими міста?

Місто ніколи не рухається однаково - є стійкі повторювані режими руху

Знаючи поточний режим - ШІ-контролер може застосувати найкращу стратегію завчасно

1 Ранковий пік

07:00–09:00

Інтенсивний потік в центр міста

2 Вечірній пік

17:00–19:30

Зворотний напрямок, розтягнутий у часі

3 Нічний трафік

22:00–06:00

Малоінтенсивний, але непередбачуваний

4 Маршрут «Гречани»

специфічний

Потік житловий масив ↔ центр — специфічний для Хмельницького

Питання: чи може машинне навчання автоматично розпізнати ці режими без заданих правил?

Відповідь: так через адаптивну каскадну кластеризацію транспортних потоків

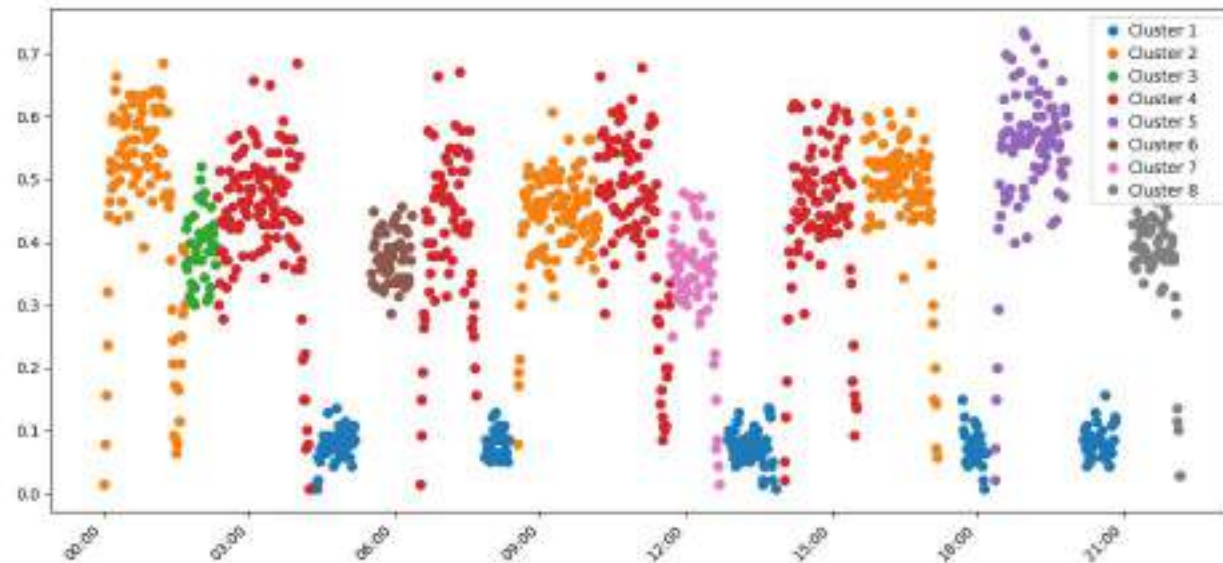
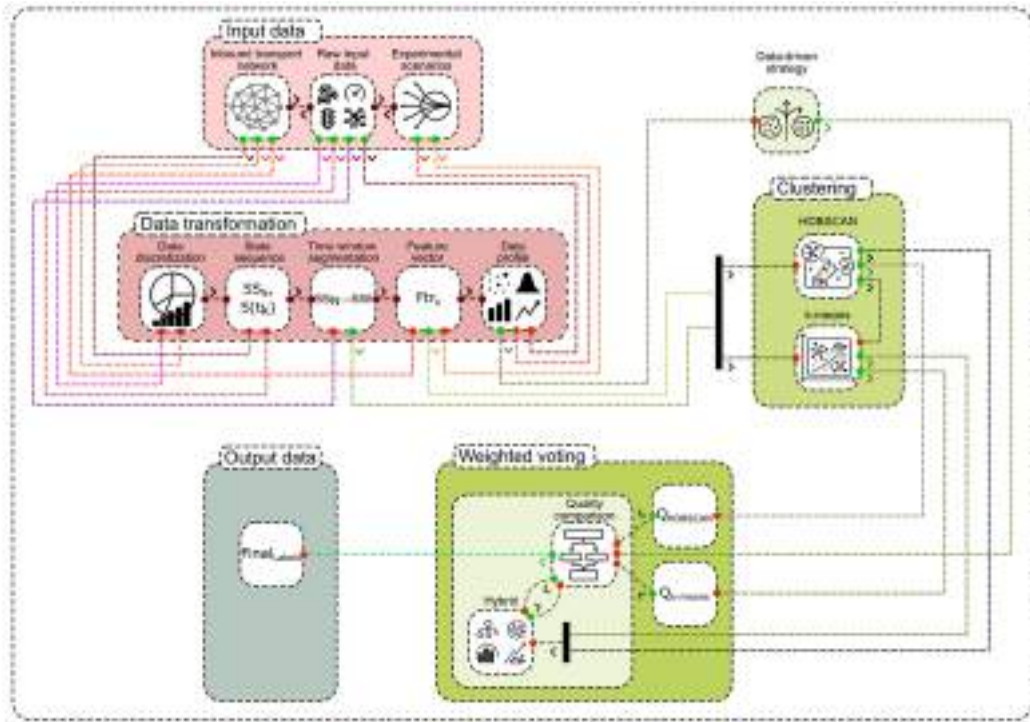
Частина 2: Як розпізнати транспортні режими міста?



Моделювання 10 перехресть міста:

1. Кам'янецька - Тернопільська
2. Кам'янецька - Інститутська
3. Героїв Майдану - Грушевського
4. Кам'янецька - Героїв Маріуполя
5. Кам'янецька - Свято-Покровська
6. Кам'янецька - Прибузька
7. Прибузька - Свободи
8. Прибузька - Старокостянтинівське Шосе
9. Зарічанська - Свободи
10. Проспект Миру - Панаса Мирного

Адаптивна кластеризація трафіку



Навіщо розпізнавати режими?

→ Знаючи поточний режим — ШІ обирає кращу стратегію

→ Виявлення аномалій: аварії, свята, перекриття

Адаптивний каскад: HDBSCAN + K-means

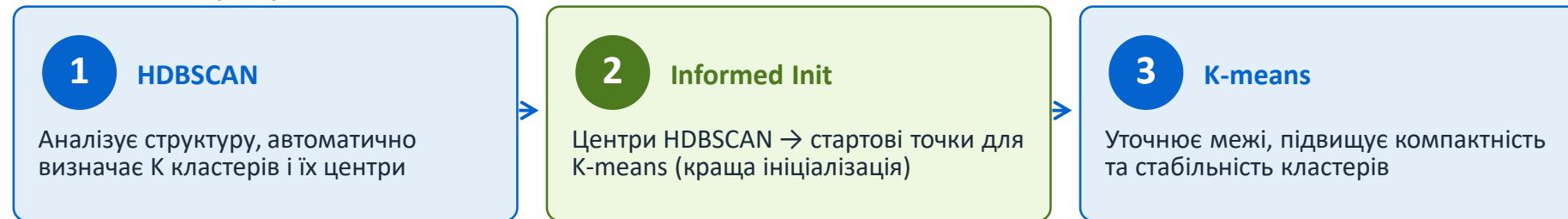
HDBSCAN

- ✓ Групи довільної форми
- ✓ Сам визначає кількість K
- ✓ Ігнорує шум як outliers
- ! Погіршується при великій розмірності

K-means

- ✓ Компактні чіткі кластери
- ✓ Ефективний і швидкий
- ✓ Стабільні межі кластерів
- ! Потребує K наперед
- ! Чутливий до ініціалізації

Наш каскад — три кроки:



Адаптивне зважене голосування: $\delta = 0.03$ порогова стійкість · Не потребує ручного налаштування

Валідація: цифровий двійник мережі Хмельницького

8 сценаріїв руху

Ранковий пік

Вечірній пік

Нічний трафік

Маршрут «Гречани»

Змішаний режим 1

Змішаний режим 2

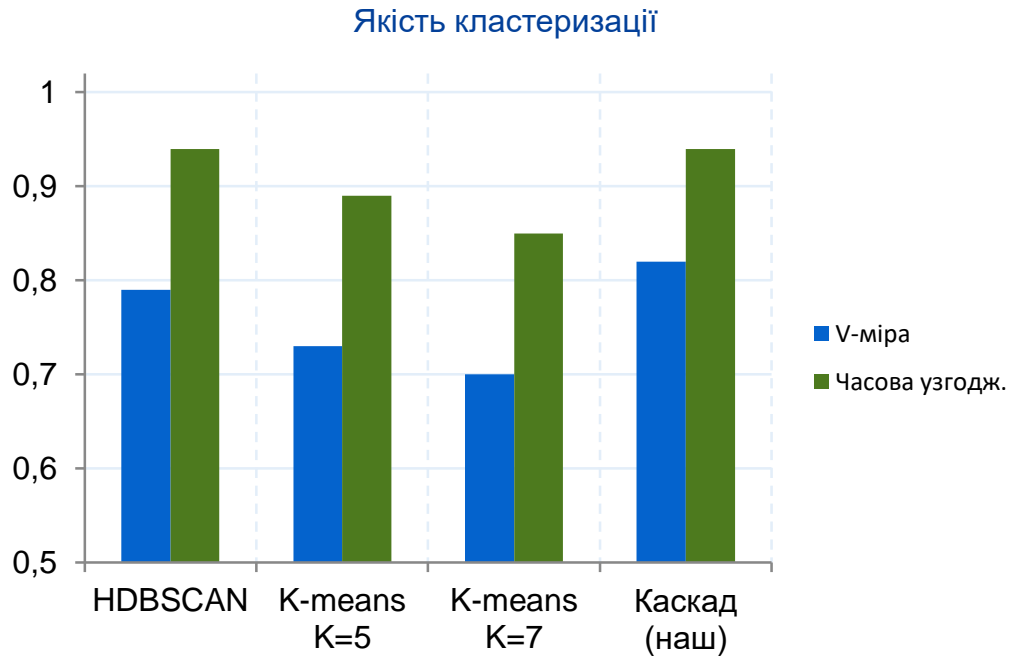
Змішаний режим 3

Змішаний режим 4

Метрики оцінки: V-міра, ARI, NMI (зовнішні) + Silhouette, Davies-Bouldin (внутрішні)

Робастність: тест Вілкоксона + Гауссовий шум 15–35% · Два формати: агрегований та деталізований по перехрестях

Точність розпізнавання: 92–95%



0.82 V-міра

95% Точність ідентифікації

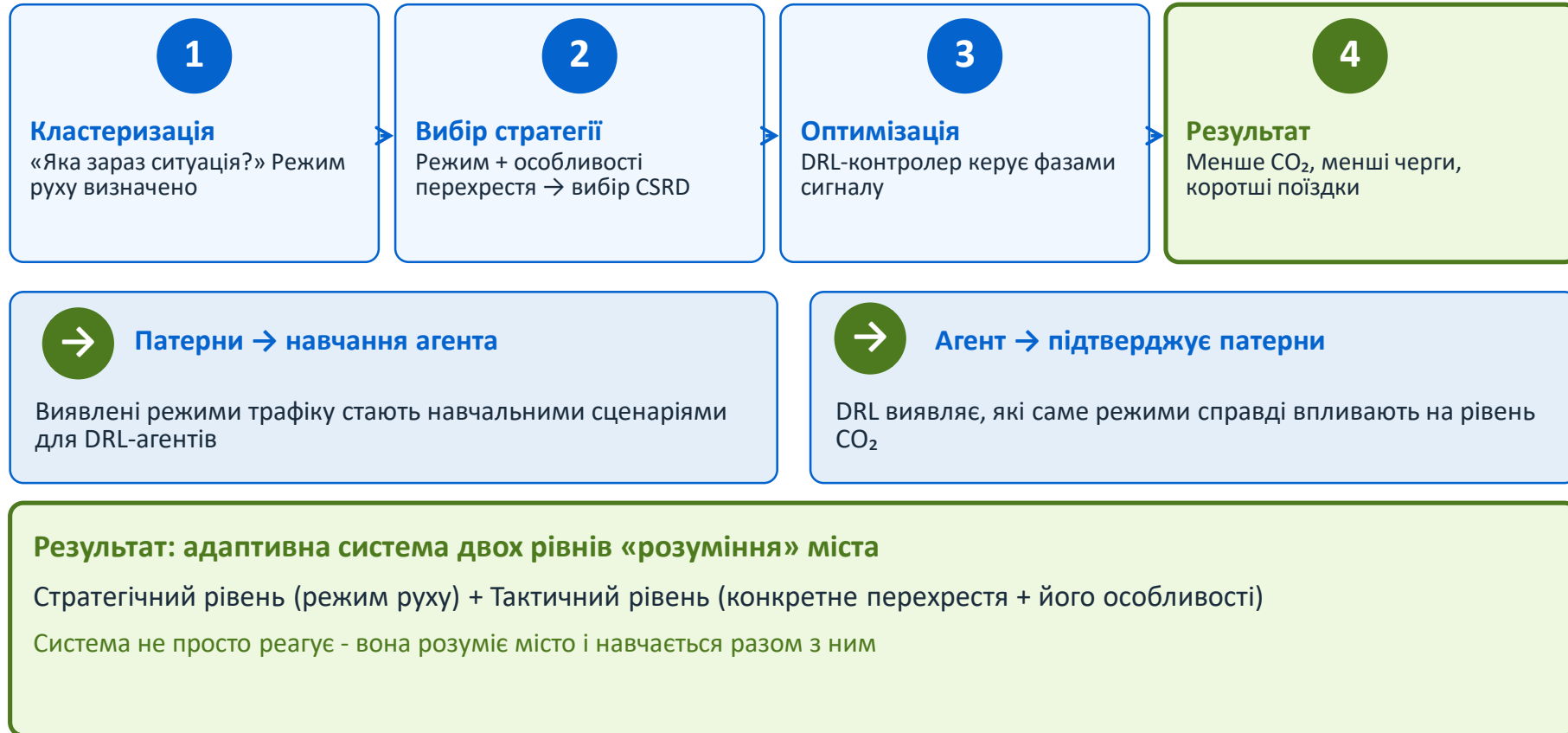
0.94 Часова узгодженість

K=8 Авт. визначено кластерів

HDBSCAN автоматично виявив K=8 кластерів — рівно стільки, скільки сценаріїв закладено в симуляції

$p < 0.01$ (тест Вілкоксона) · +10–14% компактність кластерів vs HDBSCAN standalone

Синергія двох підходів: від розпізнавання до дії



Обмеження та відкриті питання

Поточні обмеження

- ! Одне перехрестя - потрібне масштабування на мережу
- ! Симуляція не враховує погоду, пішоходів, аварії
- ! Два класи авто - реальний парк різноманітніший
- ! Поведінка реальних водіїв відрізняється від модельної
- ! Sim-to-real gap - відмінності симуляції і дійсності

Відкриті питання

- Координація між перехрестями (мультиагентний DRL)
- Електромобілі нульові місц. викиди - нова функція нагороди
- Руйнування інфраструктури → адаптація алгоритмів
- Розробка даних для міст без відеоспостереження

Чотири ключові принципи

①

Кожне перехрестя унікальне

Фізичні особливості місця фундаментально змінюють оптимальну стратегію управління. Підйом 3.8° — лише один приклад.

③

Автоматичне розпізнавання режимів

Точність 92–95%, часова узгодженість 0.94. Система «читає» місто і підлаштовується.

②

Правильна «мотивація» ШІ

CSRD-T: -8.6% CO₂ vs MP, -4.7% vs DQN. Функція нагороди — не деталь, а основа системи.

④

Практичний потенціал

Без зміни інфраструктури



CAN

Funded under HORIZON-MISS-2023-CIT-02 call, GA 101148374. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.



**Funded by
the European Union**

Дякую за увагу!

