

МЕТОД ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто розробку інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками у містах, орієнтованої на підвищення ефективності регулювання руху на міських перехрестях. Актуальність дослідження зумовлена зростанням інтенсивності транспортних потоків, ускладненням дорожньої інфраструктури та необхідністю адаптивного реагування на зміну дорожньої ситуації. Традиційні підходи до світлофорного регулювання часто не забезпечують достатньої гнучкості, оскільки переважно ґрунтуються на фіксованих режимах роботи або обмеженому наборі числових параметрів. У зв'язку з цим запропонована технологія спрямована на розширення функціональних можливостей систем керування за рахунок поєднання онтологічного моделювання та нечіткої логіки.

Запропонована інтелектуальна інформаційна технологія побудована за модульним принципом і забезпечує повний цикл обробки транспортної інформації: від збору даних із сенсорів, відеокамер, GPS-пристроїв та світлофорних контролерів до їх попередньої обробки, семантичної інтерпретації, нечіткого виведення та формування керувальних впливів. Онтологічна база знань використовується для формалізованого представлення структури транспортної системи, зокрема транспортних потоків, перехресть, напрямків руху, світлофорних об'єктів, сенсорів, параметрів руху та можливих керувальних дій. Завдяки цьому числові дані розглядаються не ізольовано, а в межах змістовного контексту дорожньої ситуації.

Нечіткий модуль призначений для оцінювання стану транспортного потоку в умовах невизначеності, неповноти та неоднозначності вхідної інформації. Він дає змогу враховувати проміжні стани дорожньої ситуації, які складно описати за допомогою чітких логічних правил або жорстких порогових значень. Результатом роботи технології є формування адаптивних керувальних рішень, зокрема зміна тривалості сигналів світлофорного регулювання, коригування фаз світлофорного циклу та надання пріоритету окремим напрямкам руху. Запропонований підхід підвищує адаптивність керування порівняно з наявними технологіями, оскільки враховує не лише параметри транспортного потоку, а й семантичний зміст поточної дорожньої ситуації.

Ключові слова: інтелектуальна інформаційна технологія, транспортні потоки, керування транспортними потоками, міське перехрестя, онтологічне моделювання, онтологічна база знань, нечітка логіка, нечітке виведення, семантична інтерпретація даних, керувальні впливи, світлофорне регулювання.

Вступ

Сучасні міста стикаються зі зростанням інтенсивності руху, перевантаженням вулично-дорожньої мережі та необхідністю гнучкішого регулювання транспортних потоків. Особливо це помітно на перехрестях, де навіть незначні затримки можуть призводити до накопичення черг і зниження пропускної здатності дороги. Традиційні підходи до світлофорного регулювання часто працюють за поперед визначеними режимами, тому не завжди достатньо швидко реагують на зміну дорожньої ситуації. У зв'язку з цим актуальним є створення інтелектуальних інформаційних технологій, здатних аналізувати поточний стан транспортної системи та формувати обґрунтовані керувальні впливи [1], [2].

У результаті проведеного аналізу наявних підходів і технологій керування транспортними потоками встановлено, що вони не мають або мають недостатньо розвинені функціональні можливості



для адаптивного керування в умовах змінної дорожньої ситуації. Зокрема, наявні рішення переважно орієнтовані на обробку числових параметрів руху та недостатньо враховують змістовний контекст транспортної ситуації, взаємозв'язки між елементами дорожньої інфраструктури й умови функціонування конкретного перехрестя. До того ж, обмеженою залишається їх здатність до масштабування, необхідна для поширення технології з окремого перехрестя на більші фрагменти міської транспортної мережі [1], [3].

Для усунення зазначених обмежень доцільним є використання онтологічного моделювання та нечіткої логіки. Онтологічна модель забезпечує формалізоване подання знань про транспортну систему, її об'єкти, властивості та взаємозв'язки, що дає змогу інтерпретувати дані від сенсорів, відеокамер, GPS-пристроїв або світлофорних контролерів у межах цілісної моделі предметної області. Підвищення адаптивності може бути забезпечене за рахунок використання динамічних онтологій, які враховують зміну станів транспортної системи в часі, а масштабованість — за рахунок розширення області та масштабу онтологій. Водночас застосування нечіткого виведення є доцільним для оцінювання параметрів руху в умовах невизначеності, неповноти та неоднозначності даних.

Метою роботи є підвищення ефективності інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками у містах. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести порівняльний аналіз предметної області та наявних підходів до керування транспортними потоками у містах;
- створити онтологічну модель, а на її основі динамічну онтологічну базу знань транспортної системи з урахуванням об'єктів дорожньої інфраструктури, параметрів транспортного потоку та умов функціонування перехрестя;
- розробити метод керування транспортними потоками на основі динамічної онтологічної бази знань та нечіткого логічного виведення;
- на основі запропонованого методу розробити інтелектуальну інформаційну технології керування транспортними потоками;
- сформулювати критерії оцінювання ефективності запропонованої інтелектуальної інформаційної технології;
- провести експериментальні дослідження для оцінювання ефективності інтелектуальної інформаційної технології.

Порівняльний аналіз предметної області та наявних підходів до керування транспортними потоками у містах

Керування транспортними потоками у містах є складною науково-прикладною задачею, що пов'язана з необхідністю забезпечення ефективного функціонування вулично-дорожньої мережі, зменшення затримок, підвищення пропускної здатності перехресть та адаптації транспортної системи до змінних умов руху. Предметна область керування транспортними потоками охоплює транспортні засоби, перехрестя, світлофорні об'єкти, дорожню інфраструктуру, сенсорні системи, параметри транспортного потоку та керувальні впливи. Аналіз цієї області показує, що ефективне керування потребує не лише оброблення числових параметрів руху, а й урахування взаємозв'язків між елементами транспортної системи та поточної дорожньої ситуації.

Наявні підходи до керування транспортними потоками умовно поділяють на класичні, адаптивні та інтелектуальні.

Класичні методи базуються на використанні фіксованих часових програм світлофорного регулювання, у яких тривалість фаз визначається заздалегідь на основі статистичних даних про інтенсивність руху. До таких підходів належать метод фіксованого циклу, розрахунок параметрів світлофорного циклу за аналітичними моделями, зокрема формулою Вебстера, а також координація світлофорів для забезпечення «зеленої хвилі». Перевагою класичних методів є простота реалізації та широке практичне застосування. Водночас їх суттєвим недоліком є відсутність здатності оперативно реагувати на зміну транспортної ситуації, що знижує ефективність керування в умовах нерівномірного або випадкового транспортного навантаження.

Адаптивні системи керування транспортними потоками спрямовані на подолання обмежень класичних методів за рахунок використання даних у реальному часі. Такі системи отримують інформацію від детекторів транспорту, відеокамер, сенсорів або інших джерел і на її основі коригують тривалість фаз світлофорного циклу, довжину циклу та зсуви між перехрестями. Найвідомішими прикладами адаптивних систем є SCOOT, SCATS та SURTRAC. Система SCOOT забезпечує централізовану оптимізацію параметрів світлофорного регулювання, SCATS використовує вибір

режимів керування на основі ступеня насичення підходів до перехрестя, а SURTRAC застосовує децентралізований підхід і формує розклад фаз світлофорів у реальному часі [1].

Порівняно з класичними методами адаптивні системи мають вищу ефективність, оскільки враховують поточний стан транспортної мережі.

Проте такі системи також мають низку обмежень. Зокрема, вони переважно орієнтовані на числові параметри транспортного потоку, наприклад інтенсивність руху, довжину черги, затримки та рівень насичення. Водночас недостатньо враховуються змістовний контекст транспортної ситуації, семантичні зв'язки між елементами дорожньої інфраструктури, умови функціонування конкретного перехрестя та невизначеність вхідних даних. Це ускладнює пояснення прийнятих рішень і обмежує можливості таких систем у складних або нестандартних дорожніх ситуаціях [3], [4].

Інтелектуальні підходи до керування транспортними потоками передбачають використання методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки, машинного навчання, мультиагентних систем та онтологічних баз знань. Нечітка логіка дає змогу працювати з невизначеними, неповними та неоднозначними даними, що є характерним для реальних транспортних процесів. Онтологічні бази знань забезпечують формалізоване подання знань про транспортну систему, її об'єкти, властивості та взаємозв'язки. Поєднання цих підходів створює передумови для переходу від простого оброблення параметрів руху до інтерпретації транспортної ситуації в межах цілісної моделі предметної області [3]—[8].

У результаті проведеного порівняльного аналізу встановлено, що наявні технології керування транспортними потоками не мають або мають недостатньо розвинені функціональні можливості щодо адаптивності, здатності до навчання, роботи з невизначеністю, інтеграції різнорідних джерел даних, урахування контексту транспортної ситуації та масштабування на більші фрагменти міської транспортної мережі.

Це вказує на доцільність розробки інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками на основі інтеграції онтологічної бази знань та нечіткого виведення. Такий підхід дозволяє підвищити адаптивність керування за рахунок урахування динамічних змін транспортної ситуації та забезпечити здатність до навчання і масштабованість шляхом розширення області й масштабу онтологічного подання знань.

Створення онтологічної моделі транспортної системи

Для формалізованого представлення предметної області керування транспортними потоками розроблено нову онтологічну модель транспортної системи. Її структура відображає основні сутності міської транспортної інфраструктури, параметри транспортного потоку та умови функціонування перехрестя. Побудова такої моделі дає змогу описати транспортну систему не як сукупність окремих числових показників, а як цілісний інформаційний простір, у якому враховуються об'єкти, їх властивості та взаємозв'язки [4]—[9].

До основних класів онтологічної моделі віднесено транспортну систему, перехрестя, дороги, світлофорні об'єкти, транспортні потоки, транспортні засоби та сенсори збору даних. Для кожного класу визначено набір атрибутів, що характеризують його властивості та дозволяють формалізувати поточний стан транспортної системи.

Таблиця 1

Діапазон вхідних та вихідних змінних

Клас	Опис	Ключові атрибути (data properties)
TransportSystem	транспортна система в цілому	systemID, cityName, coverageArea
Intersection	дорожнє перехрестя	intersectionID, location, numberOfLanes
Road	дорога або вулична ділянка	roadID, length, speedLimit, roadType
TrafficLight	світлофорний об'єкт	lightID, cycleTime, currentPhase, isOperational
TrafficFlow	потік транспортних засобів	flowID, density, speed, volume, timestamp
Vehicle	транспортний засіб	vehicleID, vehicleType, speed, currentLocation
Sensor	датчик / сенсор збору даних	sensorID, sensorType, dataFormat, samplingRate

Як видно з табл. 1, запропонована структура онтології охоплює як фізичні об'єкти транспортної інфраструктури, так і динамічні параметри транспортного потоку. Зокрема, для класу TrafficFlow враховуються щільність, швидкість, інтенсивність руху та часові характеристики, а для класу TrafficLight — тривалість циклу, поточна фаза та працездатність світлофорного об'єкта.

Важливим елементом онтологічної моделі є система об'єктних властивостей, яка визначає зв'язки між класами. Саме ці зв'язки забезпечують цілісність моделі та дозволяють описати логіку взаємодії між елементами транспортної системи.

Подані в табл. 2 об'єктні властивості дозволяють представити транспортну систему як семантичну мережу, у якій дороги, перехрестя, світлофорні об'єкти, сенсори та транспортні потоки розглядаються не ізольовано, а у взаємозв'язку. До прикладу, світлофорний об'єкт регулює перехрестя, дорога характеризується транспортним потоком, а сенсор фіксує параметри руху та передає дані для подальшого аналізу.

Таблиця 2

Об'єктні властивості онтологічної моделі

Властивість	Домен (Domain)	Діапазон (Range)	Семантика
controls	TrafficLight	Intersection	світлофор регулює перехрестя
hasTrafficFlow	Road	TrafficFlow	дорога характеризується потоком
detectedBy	TrafficFlow	Sensor	потік фіксується сенсором
locatedAt	Sensor	Intersection	сенсор розміщений на перехресті
partOf	Road	TransportSystem	дорога є частиною системи
traverses	Vehicle	Road	транспортний засіб рухається дорогою
monitors	Sensor	Road	сенсор відстежує стан дороги
connectsTo	Intersection	Intersection	перехрестя з'єднані між собою

Ієрархічна організація класів онтології дозволяє впорядкувати знання про предметну область за принципом узагальнення та спеціалізації. Узагальнене представлення ієрархії класів онтологічної моделі транспортної системи показано на рис. 1.

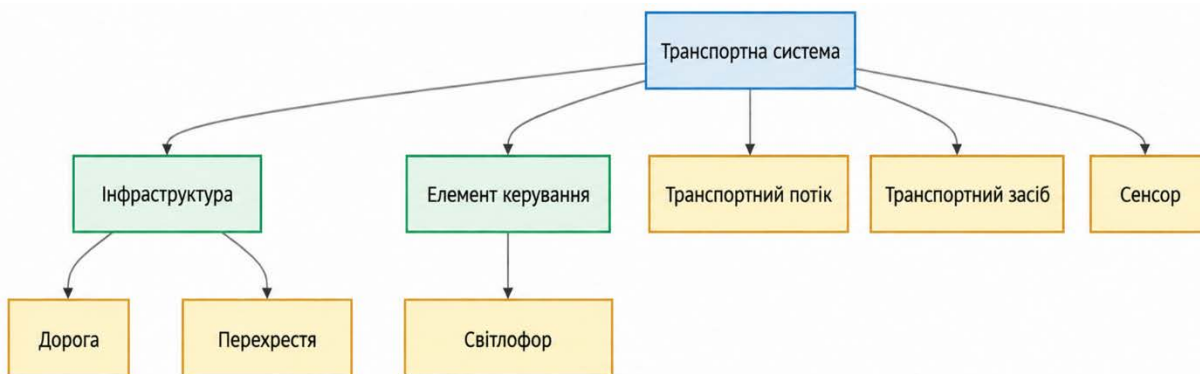


Рис. 1. Ієрархія класів онтологічної моделі транспортної системи

Як показано на рис. 1, транспортна система подається як узагальнювальний клас, що об'єднує основні групи сутностей: дорожню інфраструктуру, засоби керування рухом, транспортні процеси, транспортні об'єкти та засоби збору даних. Така структура забезпечує логічну декомпозицію предметної області та створює основу для подальшого розширення онтологічної моделі.

Отже, створення нової онтологічної моделі транспортної системи дозволяє формалізувати знання про об'єкти дорожньої інфраструктури, параметри транспортного потоку та умови функціонування перехрестя. Розроблена модель забезпечує інтеграцію різномірних джерел даних, підтримує опис взаємозв'язків між елементами транспортної системи та створює передумови для поєднання онтологічного представлення знань з методами нечіткого виведення.

Формування динамічної онтологічної бази знань транспортних потоків і дорожньої ситуації

На основі розробленої онтологічної моделі транспортної системи сформовано онтологічну базу знань, призначену для подання, збереження та використання знань про транспортні потоки й поточну дорожню ситуацію. Якщо онтологічна модель визначає загальну структуру предметної області, тобто класи, властивості та зв'язки між ними, то онтологічна база знань наповнює цю модель конкретними екземплярами, фактами та правилами, які характеризують стан транспортної системи [9], [11].

До складу онтологічної бази знань входять відомості про конкретні перехрестя, дороги, світлофорні об'єкти, сенсори, транспортні потоки та транспортні засоби. Наприклад, для певного

перехрестя можуть зберігатися дані про кількість смуг руху, поточну фазу світлофора, інтенсивність транспортного потоку, швидкість руху, щільність потоку, довжину черги та час фіксації цих параметрів. Такі дані можуть надходити від сенсорів, відеокамер, GPS-пристроїв або світлофорних контролерів і далі інтерпретуватися в межах онтологічної структури.

Для подання знань у базі використовуються не лише окремі числові значення, а й семантичні зв'язки між об'єктами транспортної системи. До прикладу, сенсор може бути пов'язаний з конкретно ділянкою дороги, транспортний потік — з відповідним напрямком руху, а світлофорний об'єкт — з перехрестям, яке він регулює. Завдяки цьому дорожня ситуація розглядається не як набір ізольованих параметрів, а як цілісна сукупність взаємопов'язаних знань [4], [11].

Приклад фрагмента онтологічної бази знань подано в табл. 3.

Таблиця 3

Приклад фрагмента онтологічної бази знань транспортної ситуації

Екземпляр	Клас	Властивість / зв'язок	Значення
Intersection_1	Intersection	location	вул. Київська — вул. Стрілецька
Intersection_1	Intersection	numberOfLanes	4
Road_1	Road	partOf	TransportSystem_1
Road_1	Road	connectsTo	Intersection_1
TrafficLight_1	TrafficLight	controls	Intersection_1
TrafficLight_1	TrafficLight	currentPhase	green
TrafficLight_1	TrafficLight	cycleTime	90 с
Sensor_1	Sensor	locatedAt	Intersection_1
Sensor_1	Sensor	monitors	Road_1
TrafficFlow_1	TrafficFlow	detectedBy	Sensor_1
TrafficFlow_1	TrafficFlow	density	high
TrafficFlow_1	TrafficFlow	speed	low
TrafficFlow_1	TrafficFlow	volume	820 авт./год
TrafficFlow_1	TrafficFlow	queueLength	18 авт.
TrafficFlow_1	TrafficFlow	timestamp	08:30

Наведений приклад демонструє, що онтологічна база знань містить конкретні факти про дорожню ситуацію. Зокрема, перехрестя Intersection_1 має визначене місце розташування та кількість смуг руху, світлофор TrafficLight_1 регулює це перехрестя, сенсор Sensor_1 відстежує стан дороги Road_1, а транспортний потік TrafficFlow_1 характеризується високою щільністю, низькою швидкістю та значною довжиною черги.

Онтологічна база знань також може містити правила, які дають змогу виконувати логічне виведення та визначати стан транспортної ситуації. Наприклад, якщо транспортний потік має високу щільність, низьку швидкість руху та значну довжину черги, то стан підходу до перехрестя може бути визначений як перевантажений. Такий висновок може бути поданий у вигляді правила [3], [11]:

Якщо density = high, speed = low та queueLength = high, **то** congestionLevel = high.

Отримане значення рівня завантаженості може використовуватися як вхідний параметр для нечіткого виведення та подальшого формування керуючого впливу, наприклад збільшення тривалості зеленого сигналу для відповідного напрямку руху.

Формування онтологічної бази знань забезпечує можливість накопичення, оновлення та повторного використання знань про транспортні потоки й дорожню ситуацію. Це дозволяє підвищити узгодженість даних, інтегрувати інформацію з різномірних джерел та створити основу для адаптивного керування транспортними потоками в умовах змінної міської транспортної мережі.

Метод керування транспортними потоками на основі динамічної онтологічної моделі та нечіткого виведення

Метод керування транспортними потоками на основі онтологічної моделі та нечіткого виведення передбачає послідовне перетворення вхідних транспортних даних у семантично інтерпретовані знання, а потім — у керувальні рішення. Основна ідея методу полягає у поєднанні онтологічного

подання дорожньої ситуації з механізмами нечіткої логіки, що дає змогу враховувати як числові параметри транспортного потоку, так і змістовний контекст функціонування перехрестя [3], [4].

На першому етапі методу здійснюється отримання даних про стан транспортної системи. До таких даних належать інтенсивність руху, швидкість транспортного потоку, щільність, довжина черги, поточна фаза світлофорного циклу, час очікування та інші параметри, які характеризують дорожню ситуацію. Після попередньої обробки ці дані передаються до онтологічного модуля, де виконується їх семантична інтерпретація.

Онтологічна база знань використовується для встановлення зв'язків між параметрами руху, елементами дорожньої інфраструктури та умовами функціонування конкретного перехрестя. Наприклад, однакова довжина черги може мати різне значення для головної дороги, другорядного напрямку, громадського транспорту або перехрестя з різною пропускною здатністю. Саме тому перед використанням нечіткого виведення вхідні параметри уточнюються з урахуванням онтологічного контексту.

Після формування семантичного опису дорожньої ситуації дані передаються до модуля нечіткого виведення. На цьому етапі виконується фазифікація вхідних параметрів, тобто перетворення числових значень у лінгвістичні змінні. Наприклад, інтенсивність руху може бути подана як низька, середня або висока, а довжина черги — як мала, помірна або значна. Це дозволяє працювати з невизначеними та проміжними станами транспортного потоку, які складно описати за допомогою жорстких порогових значень [5]—[8].

Далі застосовується база нечітких правил, яка визначає залежність між станом транспортної ситуації та можливими керувальними діями. Наприклад, якщо інтенсивність руху є високою, швидкість потоку низькою, а довжина черги значною, то доцільним може бути збільшення тривалості зеленого сигналу для відповідного напрямку. Після застосування правил результати агрегуються та дефазифікуються, унаслідок чого формується чітке значення керувального параметра [6], [8].

Структурну схему методу керування транспортними потоками на основі динамічної онтологічної моделі та нечіткого виведення показано на рис. 2.

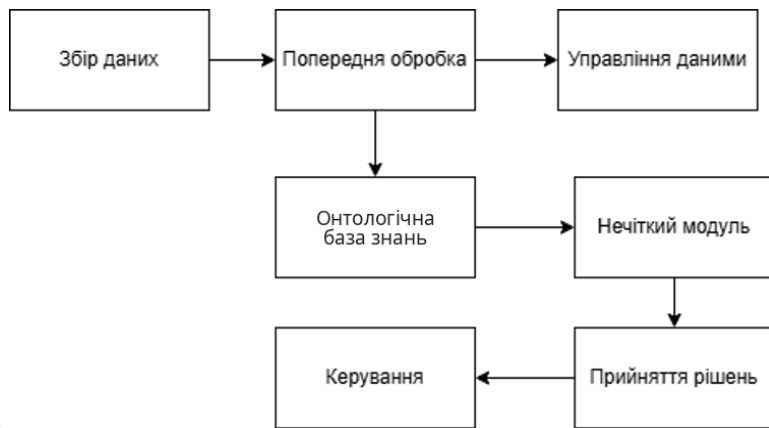


Рис. 2. Структурна схема методу керування транспортними потоками на основі динамічної онтологічної моделі та нечіткого виведення

Інтелектуальна інформаційна технологія керування транспортними потоками

Запропонована інтелектуальна інформаційна технологія керування транспортними потоками будується за модульним принципом. Це дає змогу поділити процес керування на окремі функціональні етапи: збір даних, їх попередню обробку, збереження, семантичну інтерпретацію, нечітке виведення та формування керувальних впливів. Така структура забезпечує послідовний перехід від первинних транспортних даних до знань про дорожню ситуацію, а від них — до практичних рішень для світлофорного регулювання.

До складу інформаційної технології входять модуль збору даних, модуль попередньої обробки, база транспортних даних, онтологічний модуль, онтологічна база знань, модуль нечіткого виведення, модуль формування керувальних впливів та виконавчий компонент, представлений світлофорним контролером або іншою системою регулювання руху. Джерелами вхідної інформації можуть бути дорожні сенсори, відеокамери, GPS-пристрої, світлофорні контролери, навігаційні сервіси та інші елементи транспортної інфраструктури.

Модуль попередньої обробки виконує фільтрацію шумів, усунення пропущених значень, нормалізацію параметрів і надання даним єдиного формату. Після цього дані зберігаються у базі транспортних даних, що забезпечує накопичення поточних та історичних відомостей про стан транспортної системи. Це дає змогу аналізувати повторювані ситуації, виявляти тенденції та порівнювати поточний стан перехрестя з попередніми режимами його функціонування.

Ключовим компонентом технології є онтологічний модуль, який забезпечує формальне подання знань про транспортну систему, її об'єкти, властивості та взаємозв'язки. Його призначення полягає



Рис. 3. Загальна структурна схема інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками у містах

у зіставленні вхідних параметрів з поняттями онтології, встановленні зв'язків між об'єктами транспортної системи та формуванні контексту поточної дорожньої ситуації. Завдяки цьому значення інтенсивності руху, довжини черги або швидкості потоку розглядаються не як ізольовані числові показники, а як характеристики певного транспортного потоку, пов'язаного з конкретним напрямком руху, фазою світлофорного циклу та умовами функціонування перехрестя [3], [4], [11].

Узагальнену структурну схему інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками у містах показано на рис. 3.

Завершальним компонентом технології є модуль формування керувальних впливів. Він інтерпретує результати нечіткого виведення та перетворює їх у конкретні команди для виконавчих пристроїв. До таких команд можуть належати зміна тривалості зеленого сигналу, коригування фаз світлофорного циклу, адаптація черговості фаз або надання пріоритету окремим напрямкам руху. Перед передачею команди до світлофорного контролера враховуються обмеження щодо мінімальної та максимальної тривалості фаз, безпекових інтервалів, поточного режиму роботи перехрестя та технічних можливостей виконавчих пристроїв.

Отже, запропонована структура інформаційної технології реалізує замкнений цикл керування транспортними потоками. Дані про стан транспортної мережі надходять до системи, проходять попередню обробку, інтерпретуються через онтологічну модель, аналізуються за допомогою нечіткої логіки та перетворюються у керувальні впливи. Після реалізації цих впливів змінюється стан транспортного потоку, що знову фіксується джерелами даних. Це забезпечує адаптацію системи до змін дорожньої ситуації в режимі, наближеному до реального часу [3], [5], [8].

Програмно-модульна реалізація інформаційної технології та механізмів прийняття рішень

Програмно-модульна реалізація інтелектуальної інформаційної технології керування транспортними потоками спрямована на практичне відтворення запропонованої архітектури у вигляді взаємопов'язаних програмних компонентів. Її основним завданням є забезпечення послідовного переходу від первинних транспортних даних до семантично інтерпретованих знань, а надалі — до керувальних рішень для світлофорного регулювання. У межах такого підходу транспортні параметри розглядаються не лише як набір числових значень, а як елементи певної дорожньої ситуації, що мають зміст, зв'язки з іншими об'єктами та впливають на вибір керувального впливу.

У запропонованій інформаційній технології програмна структура охоплює модулі збору й попередньої обробки даних, керування транспортними даними, онтологічного представлення знань, логічного та нечіткого виведення, а також формування керувальних впливів. Узагальнено цю структуру можна подати через діаграму класів, де відображаються основні програмні сутності системи та зв'язки між ними.

На відміну від традиційних програмних систем, у яких дані здебільшого зберігаються у вигляді таблиць або об'єктів, запропонована технологія передбачає використання онтологічної бази знань. Її призначення полягає у формальному описі предметної області транспортної системи міста. У такій базі знань подаються не лише окремі об'єкти, наприклад перехрестя, транспортний потік, сенсор або світлофор, а й відношення між ними. Саме це дає змогу встановлювати змістовні зв'язки між даними, отриманими з різних джерел.

Ключовим засобом реалізації онтологічної бази знань у межах запропонованої інформаційної технології є мова OWL — Web Ontology Language. Вона використовується для формального подання онтологій і дозволяє описувати класи, властивості, індивіди та значення даних, що важливо

для структурованого представлення знань у складних предметних сферах [7]. Для задач керування транспортними потоками це має особливе значення, оскільки транспортна система міста містить велику кількість взаємопов'язаних елементів: дороги, перехрестя, напрями руху, світлофорні фази, сенсори, транспортні потоки та керувальні впливи [9].

У межах онтології транспортної системи можуть бути визначені базові класи, що описують її основні сутності: Intersection, RoadSegment, TrafficFlow, Vehicle, TrafficLight, Sensor, TrafficPhase, TrafficParameter, TrafficState та ControlAction. Проте важливим є не сам перелік класів, а їх семантичні зв'язки. Наприклад, транспортний потік може бути пов'язаний з певним напрямком руху, напрямком — з конкретним перехрестям, сенсор — з ділянкою дороги, а керувальний вплив — з фазою світлофорного циклу.

Саме завдяки таким зв'язкам система отримує можливість інтерпретувати вхідні дані в межах цілісної моделі дорожньої ситуації.

OWL дозволяє описувати відношення між сутностями за допомогою об'єктних і дата-властивостей. Об'єктні властивості можуть відображати зв'язки типу hasTrafficFlow, isLocatedAt, controlsDirection, hasSensor, hasTrafficPhase. Дата-властивості, у свою чергу, застосовуються для подання числових або текстових параметрів: інтенсивності руху, середньої швидкості, довжини черги, тривалості зеленого сигналу, часу оновлення даних. У результаті в одній моделі поєднуються структурні знання про транспортну систему та поточні параметри її функціонування [9].

Особливістю OWL є можливість формалізувати не лише явні знання, а й логічні обмеження між елементами предметної області. Наприклад, можна визначити, що кожен сенсор має бути пов'язаний з певною ділянкою дороги, кожна фаза світлофорного регулювання належить конкретному світлофорному об'єкту, а кожен керувальний вплив повинен відповідати певному транспортному стану. Такі обмеження підвищують коректність моделі та зменшують ризик використання суперечливих або неповних даних під час прийняття рішень.

У запропонованій технології онтологічна база знань виконує роль активного компонента, а не пасивного сховища інформації. Вона забезпечує семантичну інтерпретацію транспортних даних, що надходять із сенсорів, відеокамер, GPS-пристроїв або світлофорних контролерів. Наприклад, числове значення довжини черги саме по собі не дає повного уявлення про дорожню ситуацію. Але якщо це значення пов'язати з типом перехрестя, напрямком руху, поточною фазою світлофора та рівнем інтенсивності потоку, воно набуває змістовного контексту. Така логіка відповідає матеріалам дисертації, де програмна реалізація інформаційної технології розглядається як послідовний перехід від даних до знань, а від знань — до керувальних рішень.

Для роботи з онтологічною базою знань можливим є також використання RDF та SPARQL. RDF забезпечує подання інформації у вигляді тверджень типу «суб'єкт – предикат – об'єкт», що добре узгоджується з природою онтологічного опису транспортної системи. SPARQL, відповідно до специфікації W3C, є мовою запитів до RDF-даних і може застосовуватися для отримання інформації з різномірних джерел, якщо ці дані подані або відображені у RDF-формі. У межах розробленої технології SPARQL-запити можуть використовуватися для вибору перевантажених напрямків руху, пошуку сенсорів, пов'язаних із певною ділянкою дороги, або визначення перехресть, для яких потрібне коригування світлофорного циклу [10].

Важливою перевагою OWL є підтримка логічного виведення. За допомогою спеціалізованих резонерів система може перевіряти узгодженість онтології, виявляти приховані зв'язки між об'єктами та автоматично класифікувати поточні дорожні ситуації. Наприклад, якщо інтенсивність руху є високою, швидкість знижується, а довжина черги перевищує допустимий рівень, система може інтерпретувати таку ситуацію як перевантаження певного напрямку. При цьому висновок формується не на основі одного параметра, а через сукупність логічно пов'язаних характеристик.

Для реалізації такого логічного аналізу можуть використовуватися резонери HermiT або Pellet. HermiT позиціонується як OWL-резонер, що базується на алгоритмі hypertableau та призначений для логічного виведення в OWL-онтологіях. Pellet, у свою чергу, є OWL DL-резонером, який підтримує перевірку несуперечності онтологій, класифікацію ієрархій, пояснення виведених тверджень та роботу з OWL API або Jena. Для запропонованої інформаційної технології такі засоби є важливими, оскільки дозволяють автоматизувати перевірку коректності знань і забезпечити більш надійну підтримку прийняття рішень [12], [13].

Однак OWL сама по собі не вирішує задачу прийняття рішень в умовах нечіткості. Вона забезпечує формальну структуру знань, логічні зв'язки та семантичний контекст. Проте реальні транспортні стани часто мають проміжний характер. Інтенсивність руху може бути не просто “низькою”

або «високою», а «помірно високою»; довжина черги може поступово переходити від прийнятної до критичної. Саме тому онтологічна модель у запропонованій технології поєднується з модулем нечіткого виведення.

Механізм нечіткого виведення використовує контекст, сформований онтологічною базою знань, для вибору релевантних лінгвістичних змінних, функцій належності та правил. На цьому етапі числові значення транспортних параметрів перетворюються у нечіткі оцінки, після чого застосовується база правил. Наприклад, якщо інтенсивність руху є високою, довжина черги значною, а поточна фаза не забезпечує достатнього пропуску транспортного потоку, система може сформувати рішення про збільшення тривалості зеленого сигналу. Якщо ж завантаженість є помірною, керувальний вплив може бути менш інтенсивним.

Така взаємодія OWL-онтології та нечіткої логіки є принциповою для запропонованої інформаційної технології. Онтологічна частина відповідає за структуроване представлення знань і визначення контексту, тоді як нечіткий модуль забезпечує оцінювання стану транспортного потоку в умовах невизначеності. У дослідженнях онтологічних підходів для використання в інтелектуальних транспортних системах також підкреслюється доцільність використання сенсорної інформації разом із семантичною моделлю для підтримки автоматизованих рішень у транспортному середовищі [3], [4], [8].

Динаміку взаємодії програмних компонентів доцільно подати через діаграму послідовності, показану на рис. 4, де відображено основні етапи роботи системи: надходження даних, їх попередню обробку, звернення до онтологічної бази знань, виконання логічного й нечіткого виведення, формування керуючого впливу та передачу команди до світлофорного контролера.

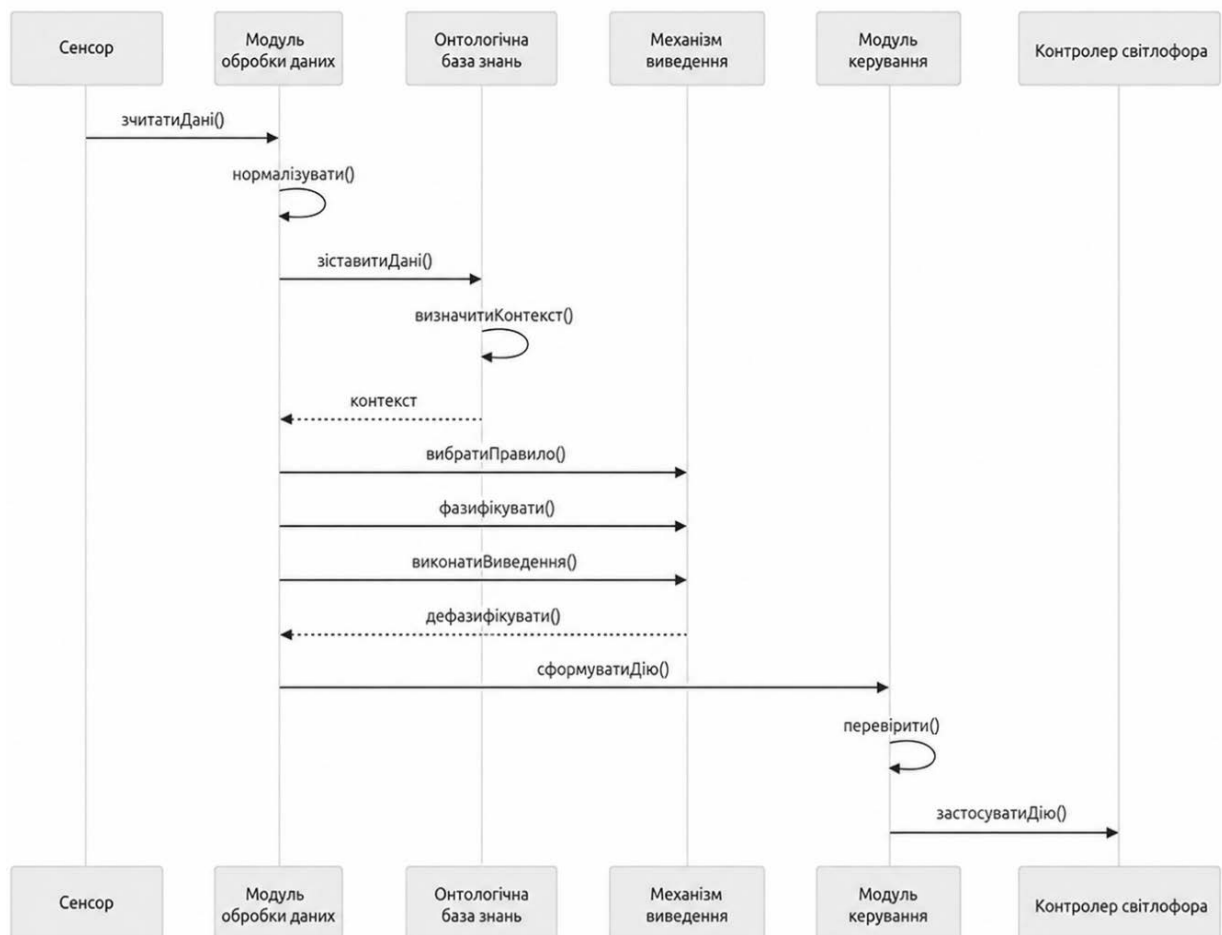


Рис. 4. Діаграма послідовності процесу роботи інформаційної технології керування транспортними потоками

У запропонованій послідовності обробки даних важливою є не лише черговість виконання операцій, а й логіка переходу між рівнями системи. Спочатку система працює з первинними даними. Далі ці дані проходять нормалізацію та співвідносяться з поняттями онтології. Після цього формується контекст транспортної ситуації, який передається до нечіткого модуля. На завершальному етапі результати нечіткого виведення трансформуються у керувальний вплив: зміну тривалості зеленого

сигналу, коригування фаз світлофорного циклу або надання пріоритету окремому напрямку руху.

Запропонована програмно-модульна реалізація має кілька важливих переваг. По-перше, вона забезпечує чіткий поділ функцій між компонентами системи. Дані збираються, очищуються, зберігаються, інтерпретуються через онтологію, аналізуються засобами нечіткої логіки та перетворюються у практичні керувальні рішення. По-друге, використання OWL підвищує формальну узгодженість моделі, оскільки структура транспортної системи описується через класи, властивості, відношення та обмеження. Це важливо для систем, які повинні працювати з різнорідними джерелами даних.

По-третє, така реалізація є придатною до розширення. За потреби до онтології можуть бути додані нові типи транспортних об'єктів, додаткові параметри руху, нові правила класифікації дорожніх ситуацій або інші типи керувальних впливів. При цьому загальна логіка функціонування системи залишається незмінною.

Отже, програмно-модульна реалізація інформаційної технології базується на поєднанні OWL-онтології, бази знань, механізмів логічного виведення та нечіткої логіки. Такий підхід забезпечує послідовне перетворення транспортних даних у семантично інтерпретовані знання, а знання — у керувальні рішення. Використання OWL дозволяє формалізувати предметну область транспортної системи, підтримувати логічну узгодженість знань і створює основу для інтеграції інтелектуальної технології з реальними системами світлофорного регулювання.

Оцінювання ефективності запропонованої інформаційної технології

Для перевірки досягнення поставленої мети та оцінювання результативності запропонованої інформаційної технології керування транспортними потоками сформовано критерій ефективності, що охоплює три основні характеристики: середній час очікування транспортних засобів, кількість рухомих транспортних засобів та кількість зупинених транспортних засобів. Такий підхід дає змогу оцінити не лише зміну окремих транспортних показників, а й здатність системи реагувати на зміну дорожньої ситуації та можливість її подальшого розширення для складніших фрагментів міської транспортної мережі.

У межах дослідження запропонована інформаційна технологія розглядається як інтелектуальна система підтримки керування транспортними потоками, яка на основі вхідних транспортних даних, онтологічної бази знань та нечіткого виведення визначає поточний стан дорожньої ситуації і формує відповідний керувальний вплив. На відміну від класичного фіксованого світлофорного керування, запропонований підхід враховує змінність транспортного середовища, наявність проміжних станів руху та контекстні умови, що впливають на якість керування.

Експериментальні дослідження виконано методом мікроскопічного імітаційного моделювання. Як середовище моделювання використано SUMO, а двосторонню взаємодію між транспортним симулятором і модулем керування реалізовано через інтерфейс TraCI. Програмні компоненти інформаційної технології розроблено мовою Python. Бібліотеку scikit-fuzzy застосовано для реалізації нечіткого виведення Мамдані, Owlready2 та RDFLib — для завантаження, оновлення й опрацювання онтології у форматі OWL 2 DL, NumPy і pandas — для накопичення та статистичного опрацювання результатів, scikit-learn — для обчислення метрик ROC-AUC і macro-F1, а Matplotlib — для побудови ROC-кривих. Структуру онтології попередньо сформовано та перевірено у середовищі Protégé.

Обчислення виконувалися на персональному комп'ютері з чотириядерним процесором архітектури x86-64, 16 ГБ оперативної пам'яті та твердотільним накопичувачем під керуванням 64-бітної операційної системи Windows 10. Графічний прискорювач під час моделювання не використовувався: симуляція, онтологічне опрацювання та нечітке виведення виконувалися на центральному процесорі. Для всіх порівнюваних підходів застосовувалася однакова програмна й апаратна конфігурація, що унеможливило вплив відмінностей обчислювального середовища на результати порівняння.

Об'єктом моделювання вибрано ізольоване чотиристороннє перехрестя з чотирма вхідними та чотирма вихідними напрямками руху. Кожна дорога містила три смуги, а на кожній смузі розміщено по два детектори для реєстрації інтенсивності, швидкості, кількості транспортних засобів, що наближаються, та довжини черги. У базовому варіанті застосовувався фіксований світлофорний цикл тривалістю 90 с. Для підходу на основі нечіткої логіки та інтегрованої інформаційної технології керувальне рішення оновлювалося з інтервалом 5 с. Нечіткий модуль містив три вхідні змінні: кількість транспортних засобів, що наближаються, кількість транспортних засобів у черзі та видимість, — і вихідну змінну, що визначала коригування тривалості зеленого сигналу; база знань охоплювала 27 нечітких правил.

Експериментальний набір охоплював п'ять типів дорожньої ситуації: нормальний рух, низьке навантаження, перевантаження, обмежену видимість і пріоритетний режим руху. Для кожного стану виконано по 100 незалежних запусків з різними початковими значеннями генератора випадкових чисел. Отже, для кожного з трьох досліджуваних підходів проведено 1000 запусків, а загальна кількість запусків становила 3000. Тривалість одного запуску дорівнювала 3600 с з кроком моделювання 1 с, тобто один запуск містив 3600 ітерацій симуляції. Перші 300 с розглядалися як період стабілізації та не враховувалися під час розрахунку підсумкових показників.

Інтенсивність вхідних потоків змінювалася у межах від 200 до 1000 авт./год на напрямок, що дозволило відтворити режими від низького навантаження до перевантаження. У сценаріях обмеженої видимості відповідний параметр змінювався у заданому діапазоні, а в пріоритетному режимі до потоку одного з напрямків додавалися транспортні засоби з ознакою пріоритету. Для коректного порівняння трьох підходів у парних запусках використовувалися однакові маршрути, розподіли часу появи транспортних засобів і початкові значення генератора випадкових чисел. Відрізнявся лише алгоритм формування керувального впливу.

Параметри руху реєструвалися з інтервалом 5 с. Середній час очікування визначався за даними SUMO для всіх транспортних засобів, які завершили проїзд перехрестя після періоду стабілізації. Транспортний засіб вважався рухомих за швидкості понад 0,1 м/с і зупиненим — за швидкості, що не перевищувала 0,1 м/с. Кількість рухомих і зупинених транспортних засобів спочатку усереднювали за часовими відліками кожного запуску, а потім — за десятьма повторами відповідного дорожнього стану. Відносну зміну показника X щодо базового керування визначали як $\Delta X = (X_{\text{запр}} - X_{\text{баз}}) / X_{\text{баз}} \cdot 100 \%$. Для показників, зменшення яких є бажаним, у тексті наведено абсолютне значення отриманого від'ємного приросту як відсоток зниження.

Для оцінювання класифікації результати моделювання агрегували у неперекривні 30-секундні інтервали. Еталонний клас задавався параметрами сформованого сценарію та перевірявся за сукупністю інтенсивності, середньої швидкості, довжини черги, видимості й ознаки пріоритету. Кожний підхід формував оцінки належності спостереження до п'яти класів, а кінцевий клас визначався за максимальною оцінкою. ROC-AUC розраховували за схемою «один клас проти решти» з подальшим макроусередненням за п'ятьма класами. Значення macro-F1 визначали як середнє арифметичне F1-міри, визначеної окремо для кожного класу.

Таблиця 4
Порівняння якості класифікації транспортних станів

Підхід	ROC-AUC	macro-F1
Класичний метод керування	0,74	0,68
Нечітка логіка	0,76	0,70
Онтологічна база знань + нечітка логіка	0,78	0,72

Ефективність запропонованої технології оцінювалася через зміну основних транспортних показників порівняно з базовим методом керування. До таких показників належать середній час очікування транспортних засобів, кількість рухомих транспортних засобів та кількість зупинених транспортних засобів. За результатами усереднення 1000 запусків для кожного підходу встановлено, що використання запропонованої технології дозволило зменшити середній час очікування транспортних засобів на 2,8 %, збільшити кількість рухомих транспортних засобів на 1,6 % та зменшити кількість зупинених транспортних засобів на 2,3 % порівняно з фіксованим світлофорним керуванням.

Ефективність запропонованої технології визначається також здатністю системи змінювати керувальні впливи відповідно до поточного стану транспортного потоку. Для цього здійснюється класифікація дорожньої ситуації за такими станами, як нормальний рух, перевантаження, низьке навантаження, обмежена видимість та пріоритетний режим руху. Якість визначення цих станів безпосередньо впливає на правильність вибору тривалості зеленого сигналу, зміну фаз світлофорного циклу або надання пріоритету окремому транспортному потоку.

Для оцінювання адаптивності використано метрики якості класифікації ROC-AUC та macro-F1. Перша метрика характеризує здатність системи розрізняти дорожні стани незалежно від вибраного порогу прийняття рішення, а друга одночасно враховує точність і повноту для кожного класу та не надає переваги класам з більшою кількістю спостережень. Застосування макроусереднення є принциповим для цього дослідження, оскільки критичні стани, зокрема перевантаження, обмежена видимість і пріоритетний режим руху, виникають рідше, проте потребують своєчасного та коректного

керувального впливу.

У процесі експериментальних досліджень порівнювалися три підходи: класичний метод керування, підхід на основі нечіткої логіки та запропонована інформаційна технологія, що поєднує онтологічну базу знань і нечітке виведення.

Для наочного порівняння здатності досліджуваних підходів розрізняти різні стани транспортної ситуації побудовано ROC-криві, що відображають співвідношення між часткою істинно позитивних та хибно позитивних класифікацій. Графічне представлення ROC-кривих для класичного методу керування, нечіткої логіки та запропонованого підходу на основі онтологічної бази знань і нечіткого виведення подано на рис. 5.

Як видно з табл. 4 та рис. 5, використання нечіткої логіки дозволяє дещо підвищити якість визначення станів транспортної ситуації порівняно з класичним методом керування. Це пояснюється здатністю нечіткої моделі працювати з невизначеними та проміжними станами транспортного потоку. Найкращі значення метрик отримано для інтегрованого підходу, який поєднує онтологічну базу знань і нечітке виведення. Значення ROC-AUC на рівні 0,78 та macro-F1 на рівні 0,72 свідчать про помірне, але стабільне підвищення якості класифікації дорожніх ситуацій.

Додатково для детальнішого аналізу ефективності запропонованої технології використано матрицю помилок, яка відображає відповідність між реальними станами транспортної системи та станами, визначеними інформаційною технологією. Діагональні елементи матриці відповідають правильним класифікаціям, а позадіагональні — помилкам визначення стану дорожньої ситуації. Аналіз матриці помилок показав, що найбільша кількість правильних класифікацій припадає на діагональні елементи. Основні помилки виникають між суміжними станами, наприклад між нормальним рухом і низьким навантаженням або між перевантаженням і проміжними станами. Такий результат є очікуваним, оскільки ці стани мають близькі значення параметрів і можуть поступово переходити один в інший.

Важливим результатом є те, що для критичних станів, зокрема перевантаження, обмеженої видимості та пріоритетного режиму руху, система демонструє стабільніше визначення порівняно з базовим методом. Це підтверджує здатність запропонованої інформаційної технології ідентифікувати ситуації, які потребують зміни керувального впливу. Отже, ефективність технології проявляється не лише у зміні тривалості світлофорних фаз, а й у здатності коректніше визначати контекст дорожньої ситуації перед формуванням рішення.

Масштабованість запропонованої технології забезпечується її модульною структурою та використанням онтологічної бази знань. Окреме представлення транспортних об'єктів, параметрів руху, сенсорних даних, станів дорожньої ситуації та правил керування дає змогу розширювати систему без повної перебудови її архітектури. Зокрема, до онтологічної бази знань можуть бути додані нові типи транспортних вузлів, сенсорів, дорожніх умов, пріоритетних транспортних потоків або правил нечіткого виведення. Це дозволяє застосовувати запропонований підхід не лише для окремого перехрестя, а й для групи взаємопов'язаних перехресть або фрагмента міської транспортної мережі.

Отже, результати експериментальних досліджень підтверджують досягнення поставленої мети за трьома основними показниками критерію. За критерієм ефективності запропонована технологія забезпечила зменшення середнього часу очікування на 2,8 %, збільшення кількості рухомих транспортних засобів на 1,6 % та зменшення кількості зупинених транспортних засобів на 2,3 %. За критерієм адаптивності отримано підвищення якості класифікації транспортних станів: ROC-AUC до 0,78 та macro-F1 до 0,72. Отримані результати свідчать про доцільність поєднання онтологічної бази знань з нечітким виведенням для адаптивного керування транспортними потоками у містах.

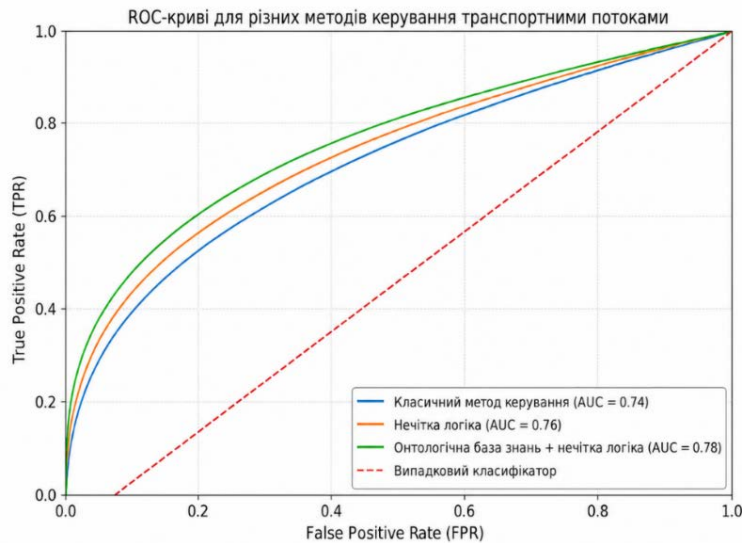


Рис. 5. ROC-криві для різних методів керування транспортними потоками

Висновки

Всі задачі дослідження виконані в повному обсязі. Проведений аналіз предметної області та наявних підходів до керування транспортними потоками показав, що класичні й адаптивні методи мають обмежені можливості щодо врахування змістовного контексту дорожньої ситуації, роботи з невизначеними даними та масштабування на більші фрагменти міської транспортної мережі. Це обґрунтовує доцільність використання онтологічного моделювання та нечіткого виведення як основи для побудови гнучкішої та адаптивнішої технології керування.

У межах дослідження створено онтологічну модель транспортної системи, яка враховує об'єкти дорожньої інфраструктури, параметри транспортного потоку та умови функціонування перехрестя. Запропонована модель забезпечує формалізоване подання знань про транспортну систему, її основні сутності, властивості та взаємозв'язки. На її основі сформовано онтологічну базу знань, призначену для подання, збереження та використання знань про транспортні потоки й поточну дорожню ситуацію.

Запропоновано метод керування транспортними потоками на основі динамічної онтологічної бази знань та нечіткого виведення. Наукова новизна методу полягає у тому, що він, на відміну від аналогів, має суттєві відмінності опрацювання транспортної інформації, такі як: семантична інтерпретація вхідних даних, визначення контексту дорожньої ситуації на основі динамічної онтологічної бази знань, передавання цього контексту до модуля нечіткого виведення та формування керувального впливу з урахуванням недостатньої визначеності транспортного середовища. На відміну від підходів, що використовують лише фіксовані правила або лише нечітку логіку, запропонований метод дозволяє враховувати взаємозв'язки між елементами транспортної системи, умови функціонування конкретного перехрестя та зміну дорожньої ситуації в часі. За рахунок цих відмінностей досягається підвищення ефективності керування транспортними потоками.

Розроблено та програмно реалізовано інтелектуальну інформаційну технологію керування транспортними потоками, яка використовує запропонований метод і включає етапи збору та попередньої обробки даних, динамічну онтологічну базу знань, етап формування контексту дорожньої ситуації, етап нечіткого логічного виведення, етап формування керувальних впливів та виконавчий компонент. Запропонована технологія має суттєві відмінності порівняно з відомими аналогами, оскільки в ній керувальний вплив формується не лише на основі поточних числових параметрів транспортного потоку, а й з урахуванням семантично описаного динамічного контексту дорожньої ситуації. Саме це призводить до підвищення ефективності та визначає її наукову новизну.

Для перевірки ефективності запропоновано критерій оцінювання ефективності та проведено експериментальні дослідження. Отримані результати показали перевагу інтегрованого підходу, що поєднує онтологічне моделювання та нечітке виведення, порівняно з класичним методом керування і підходом на основі лише нечіткої логіки. Зокрема, підвищення значень ROC-AUC та macro-F1 підтверджує підвищення якості визначення станів транспортної системи й обґрунтованість формування керувальних впливів.

Отже, поставлену мету дослідження (підвищення ефективності) досягнуто.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] CIVITAS, "Intelligent Transport Systems and Traffic Management in Urban Areas," *CIVITAS Policy Note*, 2015. [Online]. Available: <https://civitas.eu/content/civitas-policy-note-intelligent-transport-systems-and-traffic-management-urban-areas-0>.
- [2] V. Gandrybida, D. Bondarenko, and V. Sevastyanov, "Advancements in Automated Traffic Management Using Fuzzy Logic: Prospects and Challenges," *Information Technologies and Computer Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 86-95, 2024. <https://doi.org/10.63341/itce/3.2024.86>.
- [3] В. Варнава, і О. Сілагін, «Інтеграція онтологічних моделей і нечіткої логіки для керування транспортними потоками у містах», *Наука і техніка сьогодні*, no. 4(58), pp. 2980-2994, 2026. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-4\(58\)-2980-2994](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-4(58)-2980-2994).
- [4] S. Fernandez, R. Hadfi, T. Ito, I. Marsa-Maestre, and J. R. Velasco, "Ontology-Based Architecture for Intelligent Transportation Systems Using a Traffic Sensor Network," *Sensors*, vol. 16, no. 8, article 1287, Aug. 2016. <https://doi.org/10.3390/s16081287>.
- [5] T. D. Chala, and L. T. Kóczy, "Agent-Based Intelligent Fuzzy Traffic Signal Control System for Multiple Road Intersection Systems," *Mathematics*, vol. 13, no. 1, article 124, Jan. 2025. <https://doi.org/10.3390/math13010124>.
- [6] I. Tunc, A. Y. Yesilyurt, and M. T. Soylemez, "Different Fuzzy Logic Control Strategies for Traffic Signal Timing Control with State Inputs," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 2, pp. 265-270, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.06.032>.
- [7] Y. Wu, "Enhancing Urban Traffic Flow Through Fuzzy Logic-Based Signal Light Control Optimization," *International Journal of e-Collaboration*, vol. 20, no. 1, pp. 1-13, Nov. 2024. <https://doi.org/10.4018/IJeC.358746>.
- [8] V. Varnava, and O. Silagin, "Application of Fuzzy Logic to Manage Traffic Flows in Cities," *Вісник Черкаського*

державного технологічного університету, т. 30, №. 3, с. 61-69, 2025. <https://doi.org/10.62660/bcstu/3.2025.61>.

[9] W3C, "OWL 2 Web Ontology Language Document Overview," W3C Recommendation, Dec. 2012. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>.

[10] W3C, "SPARQL 1.1 Query Language," W3C Recommendation, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.

[11] В. Ю. Варнава, О. В. Сілагін, «Онтологічне моделювання бази знань для керування транспортними потоками у містах,» у *Матеріали LV Всеукраїнської науково-технічної конференції факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, секція Комп'ютерних наук*, Вінниця, Україна, 2026. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2026/paper/view/28282>.

[12] B. Glimm, I. Horrocks, B. Motik, G. Stoilos, and Z. Wang, "HermiT: An OWL 2 Reasoner," *Journal of Automated Reasoning*, vol. 53, no. 3, pp. 245-269, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10817-014-9305-1>.

[13] E. Sirin, B. Parsia, B. C. Grau, A. Kalyanpur, and Y. Katz, "Pellet: A practical OWL-DL reasoner," *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, vol. 5, no. 2, pp. 51-53, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2007.03.004>.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних наук ВНТУ

Дата надходження 13.05.2026

Дата прийняття після доопрацювання 20.06.2026

Дата прийняття до друку після рецензування 10.07.2026

Дата публікації 2.10.2026

Варнава Владислав Юрійович — аспірант кафедри комп'ютерних наук, e-mail: vladyslav.varnava@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7922-3639>;

Сілагін Олексій Віталійович — канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, e-mail: avsilagin@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-0089-4800>.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. Yu. Varnava¹

O.V. Silagin¹

Intellectual Information Technology for Adaptive Control of Traffic Flows in Urban Environments

¹Vinnitsia National Technical University

The paper considers the development of an intelligent information technology for traffic flow management in urban areas, aimed at improving the efficiency of traffic regulation at city intersections. The relevance of the study is determined by the increasing intensity of traffic flows, the growing complexity of road infrastructure, and the need for adaptive responses to changes in traffic conditions. Traditional approaches to traffic light control often do not provide sufficient flexibility, since they are usually based on fixed control modes or a limited set of numerical traffic parameters. Therefore, the proposed technology is aimed at extending the functional capabilities of traffic management systems by combining ontological modeling and fuzzy logic.

The proposed intelligent information technology is based on a modular principle and provides a complete cycle of traffic information processing: from collecting data from the sensors, video cameras, GPS devices, and traffic light controllers to preprocessing, semantic interpretation, fuzzy inference, and generation of control actions. The ontological knowledge base is used for the formal representation of the transport system structure, including traffic flows, intersections, traffic directions, traffic light objects, sensors, traffic parameters, and possible control actions. As a result, numerical data are not considered separately, but are interpreted within the meaningful context of the current traffic situation.

The fuzzy module is designed to assess the state of traffic flows under conditions of uncertainty, incompleteness, and ambiguity of input information. It makes it possible to take into account intermediate traffic states that are difficult to describe using strict logical rules or fixed threshold values. The result of the technology is the formation of adaptive control decisions, including changing the duration of traffic light signals, adjusting the phases of the traffic light cycle, and giving priority to specific traffic directions. The proposed approach increases the adaptability of traffic management compared with the existing technologies, since it takes into account not only the numerical parameters of traffic flows, but also the semantic meaning of the current road situation.

Keywords: intelligent information technology, traffic flows, traffic flow management, urban intersection, ontological modeling, ontological knowledge base, fuzzy logic, fuzzy inference, semantic data interpretation, control actions, traffic light regulation.

Varnava Vladyslav Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Sciences, e-mail: vladyslav.varnava@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7922-3639>;

Silagin Olexiy V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Computer Sciences, e-mail: avsilagin@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0006-0089-4800>