

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ
«ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра транспортних технологій та засобів АПК

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**“РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ”**

Виконав:

здобувач вищої освіти освітнього ступеня
«Магістр» освітньо-професійної програми
«Транспортні технології (автомобільний
транспорт)» спеціальності 275 «Транспортні
технології (на автомобільному транспорті)»
заочної форми навчання

КУШНІР Андрій Миколайович

Керівник:

кандидат технічних наук, доцент

ФІРМАН Юрій Петрович

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕМАТИЧНОЇ СФЕРИ	11
1.1 Огляд задачі керування перехрестям	11
1.2 Огляд задачі магістрального керування дорожнім рухом	14
1.3 Постановка задачі керування дорожнім рухом	19
1.4 Огляд існуючих АСУДР	21
Висновки до розділу	26
2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕ- ЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ	27
2.1 Концептуальні основи нечіткої логіки	27
2.2 Архітектура нечіткого логічного виведення	32
2.3 Архітектура та принципи роботи нечітких регуляторів	37
Висновки до розділу	38
3 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ	39
3.1 Інтелектуальне керування ізольованим перехрестям	39
3.2 Синхронізація функціонування мережі перехресть	46
3.3 Методика розрахунку параметрів статичного світлофорного ре- гулювання	49
Висновки до розділу	52
4 РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІ- ТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ	54
4.1 Комп'ютерне моделювання адаптивної системи регулювання руху	54
4.2 Архітектура програмного забезпечення	60
4.3 Графічний інтерфейс та візуалізація	63
Висновки до розділу	66

5	ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	67
5.1	Загальна характеристика виробничого приміщення	67
5.2	Ідентифікація шкідливих та небезпечних виробничих факторів	69
5.3	Протипожежний захист	74
5.4	Оцінка стійкості до надзвичайних ситуацій техногенного характеру	76
	Висновки до розділу	78
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	80
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81
	ДОДАТКИ	83

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 83 с., 26 рис., 13 табл., 2 додатки, 21 джерело.

Актуальність теми. Транспортна інфраструктура є критично важливим елементом функціонування сучасного міста. Протягом останніх десятиліть спостерігається стрімке зростання попиту на транспортні перевезення та суттєве збільшення автомобільного парку. Водночас загострюється диспропорція між потребами у транспортних послугах та реальною пропускнуою спроможністю дорожньої мережі. Можливості розширення транспортної інфраструктури шляхом збільшення обсягів перевезень та нарощування кількості транспортних засобів практично вичерпані, особливо в умовах мегаполісів. Результатом цього є значні втрати часу учасників дорожнього руху через формування черг та заторів на транспортних вузлах.

Відповідно, нагальною є проблема оптимізації керування транспортними потоками з метою максимально ефективного використання існуючої дорожньої інфраструктури.

Мета та завдання дослідження – підвищення ефективності та якості розв’язання задачі регулювання транспортних потоків шляхом впровадження інтелектуальних систем керування на базі нечіткої логіки.

Для реалізації поставленої мети визначено такі **завдання**:

- виконати формалізацію задачі керування транспортними потоками;
- здійснити критичний аналіз існуючих підходів до розв’язання задачі регулювання руху;
- розробити нечіткий контролер для керування транспортним потоком на перехресті;
- виконати імітаційне моделювання функціонування розробленого контролера;
- провести порівняльний аналіз ефективності традиційних методів та запропонованого підходу.

Об’єкт дослідження – процес регулювання транспортних потоків на ізолюваному перехресті.

Предмет дослідження – застосування нечітких контролерів у системах керування дорожнім рухом.

Методи дослідження ґрунтуються на апараті нечіткої логіки та нечіткого виведення, методології проектування нечітких контролерів та технології імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці та експериментальній верифікації методу застосування нечітких контролерів для адаптивного керування транспортними потоками на регульованих перехрестях.

Апробація результатів. Основні положення роботи оприлюднено в матеріалах ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців [21].

Ключові слова: НЕЧІТКА ЛОГІКА, НЕЧІТКІ КОНТРОЛЕРИ, ТРАНСПОРТНИЙ ПОТІК, MATLAB

ABSTRACT

Master's thesis comprises 83 pages, 26 figures, 17 tables, 21 references, and 2 appendices.

Object of research – traffic regulation at signalized intersections. **Subject of research** – implementation of fuzzy logic controllers for traffic flow management at urban crossroads.

The aim of this research is to develop, implement, and evaluate the performance of fuzzy-based adaptive traffic control compared to conventional static signal timing.

Research methodology – fuzzy set theory and fuzzy inference systems, computer-based simulation modeling.

The thesis presents a formal statement of the traffic management problem for an isolated intersection and proposes a methodology for designing a fuzzy intersection controller based on real-time traffic intensity data.

A dedicated simulation environment was developed to validate the proposed approach. Multiple traffic scenarios typical for urban intersections were modeled and analyzed.

The simulation results confirm the effectiveness of the proposed method. The implementation of fuzzy control demonstrates an average reduction of total vehicle

delays by 10% compared to fixed-time signal control.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy controller, traffic signal, adaptive control, intersection, traffic flow, intelligent transportation systems.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУДР	– автоматизована система управління дорожнім рухом
НК	– нечіткий контролер
НМ	– нечітка множина
НЛВ	– нечіткий логічний вивід
СК	– статичний контролер
ТП	– транспортний потік
ФН	– функція належності

ВСТУП

Від моменту появи першого автомобіля кількість транспортних засобів на міських вулицях демонструє стійку тенденцію до зростання. Особливо інтенсивною ця динаміка стала у другій половині ХХ століття на тлі післявоєнного економічного піднесення. Водночас пропускна спроможність вуличної мережі більшості міст залишається обмеженою і розрахованою на значно менші транспортні навантаження. Інфраструктура міст пострадянського простору формувалася переважно у 50–80-х роках минулого століття, коли рівень автомобілізації населення був суттєво нижчим за сучасний.

Внаслідок цього сьогодні спостерігається критична невідповідність між інтенсивністю транспортних потоків та можливостями дорожньої мережі, що призводить до систематичного утворення заторів. Затори спричиняють значні втрати часу для всіх учасників руху, оскільки кожен водій у черзі змушений очікувати можливості продовжити рух. Крім втрат часу, затори обумовлюють надмірне споживання пального транспортними засобами, що підвищує вартість поїздок та негативно впливає на екологічну ситуацію в місті та здоров'я населення.

Проблема заторів визначається двома ключовими факторами: пропускною спроможністю дорожньої мережі та ефективністю функціонування перехресть. Пропускна спроможність доріг традиційно підвищують шляхом розширення проїзної частини, збільшення кількості смуг руху, покращення якості дорожнього покриття, оптимізації геометрії траси (усунення різких поворотів, звужень тощо).

Ефективність роботи перехресть можна суттєво покращити за рахунок оптимального розподілу світлофорного циклу між фазами регулювання.

Дана робота зосереджена саме на другому аспекті – підвищенні ефективності проїзду перехресть. Оскільки міські транспортні потоки характеризуються нестаціонарністю та значною варіативністю, система світлофорного регулювання має адаптуватися до поточних характеристик руху. Проте системи, що експлуатуються в більшості країн, зокрема в Україні, функціонують у статичному режимі з незмінними параметрами світлофорного циклу.

Безумовно, на світовому ринку представлені рішення від провідних компаній, що забезпечують адаптивну оптимізацію параметрів світлофорного регулювання для мінімізації транспортних затримок. Однак впровадження таких

систем у країнах з обмеженими фінансовими ресурсами є малоімовірним через високу вартість обладнання та інтеграції. Відтак актуальною є розробка альтернативних рішень, що забезпечують підвищення ефективності регулювання при значно менших витратах. Навіть незначне покращення ефективності роботи перехрестя здатне забезпечити суттєву економію часу та коштів у масштабах міста.

Застосування апарату нечіткої логіки не потребує значних капітальних вкладень та може базуватися на експертних знаннях фахівців з організації дорожнього руху. При цьому очікується суттєве підвищення ефективності порівняно зі статичним режимом керування. Саме тому було обрано напрям дослідження, пов'язаний із застосуванням нечіткої логіки для побудови інтелектуального контролера перехрестя.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕМАТИЧНОЇ СФЕРИ

1.1 Огляд задачі керування перехрестям

Потік транспортних засобів та пріоритетні маршрути руху можуть суттєво варіюватися залежно від конкретного часового періоду доби та днів тижня. Така варіативність обумовлює необхідність впровадження автоматизованих систем управління транспортними потоками. Перехрестя являє собою ключовий елемент для регулювання дорожнього руху.

Управління транспортними потоками на перехресних ділянках забезпечується через світлофорні установки. Алгоритмічне управління технічно втілюється за допомогою дорожніх контролерів, які здійснюють перемикання світлофорних сигналів відповідно до встановленої програми. У даному випадку контрольованим параметром для контролерів виступає тривалість фаз для відповідних напрямків руху на перехресті.

Розглянемо типове регульоване перехрестя, представлене на наступній схемі (рис. 1.1).

Щодо числової та якісної оцінки управління перехрестям застосовуються концепції такту, фази й циклу регулювання [2].

Такт регулювання (Interval) Такт являє собою часовий інтервал функціонування конкретної послідовності світлофорних індикацій. Розрізняють головні та перехідні такти. Протягом головного такту (активація зеленого сигналу світлофору) транспортним засобам надається дозвіл на переміщення. Водночас у протилежному напрямку (напрямок) активується червоний сигнал, що унеможливорює транспортний рух. Перехідні такти (жовта та комбінована червоно-жовта індикація світлофору) застосовуються з метою роз'єднання головних тактів.

Регульовальний етап (Signal Phase) Комплекс основного і подальшого перехідного періоду становить n . Найменше число фаз для транспортної розв'язки складає дві одиниці.

Цикл регулювання (Signal Cycle) – систематично відтворювана цілісність усіх етапів.

У математичному представленні регульовальний цикл можна виразити таким чином:

$$t_{\text{ц}} = t_{o1} + t_1 + \dots + t_{on} + t_n, \quad (1.1)$$

Рисунок 1.1 – Розподілення фаз для регульованого перехрестя
де $t_{\text{ц}}$ – тривалість циклічного процесу регулювання, с; t_{on} — тривалість базового такту i -ї стадії, с; t_i – протяжність перехідних періодів i -ї стадії, с; n – число фазових періодів.

Налаштування світлофорного управління на перетині доріг передбачає встановлення тривалості циклу, визначення кількості, послідовності чергування, а також тривалості відповідних інтервалів та фазових періодів.

Варіюючи відсоток тривалості фази, можливо регулювати продовжність дозвільного сигналу для найбільш інтенсивного транспортного потоку, що сприятиме скороченню часу очікування учасників руху.

1.1.1 Потоки автомобілів на перехресті

Рівень завантаження транспортного вузла визначається співвідношенням реальної щільності автомобільного потоку на під'їздах до вузла та граничної пропускної спроможності (насичених потоків) даних під'їздних шляхів.

Щільність транспортного руху та насичені потоки аналізуються індивіду-

ально для кожного векторного напрямку регулювальної фази.

Число транспортних засобів, які перетинають вузол у межах конкретної смуги, називається **інтенсивністю руху** для конкретної смуги N та відображається в одиницях на годину [2].

Магнітний потік насичення M_n – найбільша можлива пропускна спроможність транспортних засобів для конкретного руху певної фази перетину доріг. Даний параметр визначається габаритами дорожнього полотна (смуги для руху), якістю покриття автошляху, метеорологічними факторами, наявністю припаркованих транспортних засобів поблизу перетину доріг і т.д. [2]

Коефіцієнт фази – це відсоткове значення навантаження відповідної фази.

$$y_i = \max(y_{ij}) = \max(N_{ij}/M_{ij}), \quad (1.2)$$

де y_{ij} – показник фазового зсуву для відповідного напрямку;

N_{ij} – показник інтенсивності транспортного потоку, од/год.;

M_{ij} – інтенсивність насичення у відповідному напрямку зазначеної фази керування, од./год.;

i – позначення фази, j – ідентифікаційний код ТП.

Коефіцієнт заповнення для напрямку переміщення x Коефіцієнт завантаження – це співвідношення між усередненою кількістю транспортних засобів, які підходять до перетину в певному напрямку впродовж одного циклу ТЗ, та найбільшим обсягом автомобілів, що змогли проїхати перетин у відповідному напрямі під час функціонування дозвільного сигналу:

$$x = N_j T_{\text{ц}} / (M_{\text{H}j} t_{oj}), \quad (1.3)$$

де N_j и $M_{\text{H}j}$ – відповідно інтенсивність транспортного потоку та потік насичення в зазначеному напрямку, од/год.; t_{oj} – тривалість базового циклу в ідентичному напрямку, с; j – блокувальний режим у досліджуваному напрямку – номер напрямку [2] формується за умови $x > 1$ Для гарантування певного запасу провідності необхідно орієнтуватися на величину $x = 0,85 - 0,90$.

1.1.2 Показник ефективності управління

Характеристика дорожнього руху визначається динамічними показниками ТП та додатковими факторами, оптимізація котрих через застосування автоматизованих засобів та систем передбачає обчислення й впровадження управляючих алгоритмів, які покращують якісні характеристики та результативність транспортного процесу на визначених сегментах дорожньої інфраструктури протягом встановлених часових інтервалів.

Критерієм результативності управління світлофорними пристроями визначають загальні затримки ТЗ $T_{\text{зат}}$, що надходять до вузла перетину з різних сторін протягом одиничного часового інтервалу функціонування світлосигнального пристрою:

$$T_{\text{зат}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m t_{\text{зат}ij} \cdot N_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.4)$$

де $t_{\text{зат}ij}$ – середня тривалість очікування транспортних засобів j -того потоку протягом i -тої фази керування.

Середня тривалість очікування ТЗ на перетині можна обчислити за формулою Ф. Вебстера [10]:

$$t_{\text{зат}ij} = 0,9 \left[\frac{T_{\text{ц}}(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - \lambda_i \cdot x_{ij})} + \frac{x_{ij}^2}{2I_{ij}(1 - x_{ij})} \right], \quad (1.5)$$

де $\lambda_i = t_{oi}/T_{\text{ц}}$;

$T_{\text{ц}}$ – тривалість циклічного періоду;

t_{oi} – протяжність головного циклу відповідного (i -тої) фази;

I_{ij} – щільність транспортного потоку;

x_{ij} – показник завантаженості перетину транспортних шляхів, який підлягає вимірюванню.

1.2 Огляд задачі магістрального керування дорожнім рухом

Залежно від періоду доби та днів тижня можуть відбуватися значні зміни основних векторів транспортного потоку в конкретній території (зокрема, в ранковий час до центральної частини міста, у вечірні години з центральної зони). З цієї причини для максимального ефективного управління система повинна в

реальному часовому режимі коригувати свої характеристики, пристосовуючись до трансформацій транспортного потоку.

Саме узгодженість в управлінні надасть можливість скоротити тривалість затримок транспортних засобів під час проходження комплексу перехресть, а також якнайбільше мінімізувати кількісні показники та масштаби транспортних заторів.

Узгодженим управлінням називають синхронізовану діяльність сукупності світлофорних установок з метою зменшення затримки транспортних засобів. Основа координації ґрунтується на активації на подальшому перехресті відносно попереднього дозвільного сигналу з певним часовим зсувом, тривалість якого визначається періодом переміщення транспортних засобів між даними перехрестями. У такий спосіб транспортні засоби рухаються по магістралі згідно з певним графіком, досягаючи наступного перехрестя в той час, коли на ньому в відповідному напрямку активується дозвільний сигнал. Дане явище отримало назву «зелена хвиля» і є надзвичайно зручним для автомобілістів, а також забезпечує зниження кількості необґрунтованих зупинень і сповільнень у потоці, і ступеня транспортних затримок.

Для створення узгодженого управління необхідне дотримання таких умов:

- присутність щонайменше двох проїжджих частин для транспортування в кожній із сторін;
- Дистанція між вузлами пересічення транспортних шляхів має не перебільшувати 800 м.

1.2.1 Взаємозв'язок між транспортними вузлами

Характеристику взаємодії між перетинами доріг визначаємо через концепцію зсуву (Offset) [2]. Дана величина являє собою відхилення (вимірюване в секундах або відсотках від регульовального циклу) між стартом регульовального циклу на обраному перетині та на суміжному перетині, що виступає опорним для даного розрахунку.

Рисунок 1.2 – Синхронізація функціонування двох транспортних вузлів

Встановимо, що інтервал між суміжними перетинами доріг становить l . Середня швидкість V на відрізку визначається шляхом застосування транспортних детекторів. Тривалість, потрібна для подолання транспортними засобами цього відрізка, обчислюється як:

$$t_l = \frac{l}{V} \quad (1.6)$$

Раціональний інтервал між перетинами сприятиме пропуску черги транспортних засобів, що вже перебувають перед перетином, і водночас забезпечить прибуття найінтенсивнішого руху автомобілів з попереднього перетину до даного перетину в момент, коли всі чи практично всі транспортні засоби з черги вже подолали перетин (рис. 1.2). Таким чином вдасться знизити до мінімуму втрати головного потоку транспорту на уповільнення перед перетином та розгін.

З цією метою визначимо часове зміщення як:

$$t_o = \frac{l}{V} - t_q, \quad (1.7)$$

де t_q — тривалість, потрібна для пропуску через перехрестя транспортних за-

собів, які накопичились у черзі перед ним внаслідок зупинки;

l – проміжок між пересіченнями доріг;

V – усереднена швидкість транспортних засобів у межах конкретного відрізка траєкторії.

1.2.2 Затримки транспортного потоку в мережі

Параметри транспортного потоку становлять фундамент для дослідження затримок та пропускну здатності вуличної мережі [2]. Для конкретної смуги проїжджої частини число автомобілів, які минають визначену точку впродовж тривалого періоду, визначатиметься середньою тимчасовою паузою між ними (у секундах). Зокрема, за умови середнього інтервалу 2 секунди отримуємо загальний об'єм руху 1800 од/годину (3600 сек/год. \times 1 год./ 2 сек).

Найбільш значущий вплив на тимчасові втрати ТЗ здійснюють зупинки на дорожніх перетинах. Це обумовлено тим фактом, що транспортний засіб втрачає час та енергетичні ресурси на:

- зниження швидкості руху при наближенні до перехрестя з поступовим уповільненням;
- очікування на перетині доріг при дозвільному світловому сигналі;
- період, потрібний для реагування автомобіліста на активацію зеленого сигналу світлофора з подальшим розгоном транспортного засобу до звичайної робочої швидкості.

Крім того, на тривалість затримок транспортних засобів можуть чинити вплив переміщення пішохідного потоку, розташування припаркованих транспортних засобів безпосередньо на проїзній частині, неприйнятні характеристики дорожнього покриття чи проведення ремонтно-будівельних операцій на дорогах. Зазначені чинники повинні враховуватися як при формуванні більш ефективною системи організації транспортного потоку, так і при запровадженні відповідних корегуючих коефіцієнтів у процесі управління світлофорними пристроями.

Водночас чинник тривалості затримок на дорожніх вузлах чинить найсуттєвіший вплив на продуктивність транспортної системи [2]. У зв'язку з цим центральним завданням магістрального управління транспортним рухом виступає

саме такий тип координації функціонування світлофорних установок, який забезпечить мінімізацію цього чинника.

1.2.3 Деструкція транспортного потоку автотранспорту в міжвузлових зонах

Під час відправлення колони транспортних засобів з перехрестя після подачі дозвільного сигналу світлофора, характер її диференціації значною мірою визначає ефективність синхронізації світлофорного обладнання [2].

Формування колони відбувається внаслідок розосередження накопиченої черги транспорту, що очікувала на ДС світлофора. На початковій ділянці проїзної частини безпосередньо за перехрестям щільність подібної колони наближається до показника потоку насичення. Під час подальшого переміщення колони розпочинається процес її дезінтеграції через відмінності у швидкісних режимах ТЗ, які входять до її складу. Варіативність швидкісних характеристик зумовлена неоднорідністю структури ТП, а також дією індивідуальних факторів поведінки водіїв. Транспортні засоби з підвищеними швидкісними показниками концентруються у передній частині колони, тоді як повільніші автомобілі – переміщуються до її завершення або залишаються позаду колони. Даний процес посилюється зі збільшенням дистанції колони від попереднього перехрестя, тривалість проходження колони повз стаціонарного спостерігача зростає, її усереднена інтенсивність транспортування знижується. Подібна колона цілковито дезінтегрується на довжині перегону 800–1000 м і більше. Надходження автомобілів до перехрестя, розташованого від попереднього на значній відстані, матиме стохастичний характер, кореляція за потоком із суміжним перехрестям втрачається [2].

Коректне визначення розрахункової швидкості, і відповідно, темпорального зміщення активації зелених сигналів на суміжних перехрестях чинить суттєвий вплив на результативність координованого управління. Як розрахункову обирають швидкість, яку не перевищують 85% автомобілів групи.

1.3 Постановка задачі керування дорожнім рухом

Сукупність взаємопов'язаних перетинів доріг утворює зону координованого керування. Дана область відображається через граф, де вузли A_{ij} – точка перетину. При цьому дугові елементи B_{ij} – ділянки доріг, розташовані між перетинами (рис. 1.3).

Рисунок 1.3 – Концепція координаційної зони

Щодо кожної вершини A_{ij} представлений набір смуг для векторів переміщення (включає орієнтацію (вліво, прямо, вправо) і величину потоку насичення M_n).

Для кожної дуги B_{ij} визначено її величину – дистанція між суміжними перетинами доріг L_{ij} . Крім того, для дугоподібної траєкторії визначається величина усередненої швидкості V_{ij} , яка фіксується транспортними детекторами на конкретному сегменті.

Використовуючи транспортні детектори для кожного сегмента B_{ij} щільність транспортного потоку автотранспортних засобів I_{ij} за годину в автомобільному еквіваленті. Крім того, рівень завантаження смуг руху θ_{ij} у відсотках.

Особливою рисою міських ТП є їхня мінливість. Фіксуються варіації їхніх параметрів протягом доби, тижня, відповідно до сезонних змін.

Сформулюємо завдання управління транспортними потоками таким способом:

Потрібно створити систему регулювання функціонування світлофорних об'єктів координованої зони, яка забезпечить мінімізацію періоду очікування ТЗ на перетинах вулиць.

З цією метою слід вирішити завдання управління рухом на індивідуальних перетинах A_{ij} , а також визначити найкращі часові інтервали зсуву фаз комутації світлофорних сигналів для суміжних перетинів доріг, тобто на усіх ребрах B_{ij} . Тривалість руху транспортних засобів через зазначену ділянку встановлюється за допомогою:

$$T_{Lij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (1.8)$$

Встановимо темпоральне зміщення у вигляді:

$$T_{Lij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} - t_{qij}, \quad (1.9)$$

де t_{qij} Тривалість, потрібна для транзитного руху транспортних засобів через перетин доріг після їх зупинки перед ним.

Оптимізація загальних часових втрат ТЗ $T_{\text{заг}}$, що надходять до перетину доріг з усіх сторін протягом одиниці часового інтервалу функціонування світло-сигнального пристрою:

$$T_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m t_{\text{заг}ij} \cdot N_{ij} \rightarrow \min, \quad (1.10)$$

де $t_{\text{заг}ij}$ – середньостатистична тривалість очікування транспортних засобів j -го транспортного потоку протягом i -ї фази керування рухом.

При обчисленнях середньостатистична тривалість затримування ТЗ на перетині вулиць може бути встановлена згідно з формулою [10]:

$$t_{\text{заг}ij} = 0,9 \left[\frac{T_{\text{ц}}(1 - \lambda_i)^2}{2(1 - \lambda_i \cdot X_{ij})} + \frac{X_{ij}^2}{2I_{ij}(1 - X_{ij})} \right], \quad (1.11)$$

де $\lambda_i = t_{oi}/T_{\text{ц}}$, X_{ij} – коефіцієнт завантаженості транспортного вузла.

1.4 Огляд існуючих АСУДР

Провідними способами регулювання транспортних потоків на перетинах доріг виступають контроль переміщення автомобільних та пішохідних потоків через застосування дорожніх знаків, розмічувальних ліній, направляючих елементів, а також СР. Застосування СР усуває значну частину конфліктних зон, проте спричиняє збільшення часу очікування транспорту. Отже, упровадження СР не завжди доцільне і залежить головним чином від показників насиченості потоків, що перетинаються, а також рівня їх взаємодії. Використання СР потребує оптимального управління світлофорними системами. З цією метою застосовуються програмно-технічні комплекси, що інтегруються в АСУДР. Практика розробки та функціонування АСУДР переконливо демонструє перспективи значного покращення результативності транспортного процесу і захисту учасників дорожнього руху при інтенсивних навантаженнях в умовах обмеженої пропускної спроможності міських доріг, тобто розв'язання транспортних проблем.

Основа функціонування АСУДР ґрунтується на мережевому адаптивному регулюванні. Інакше кажучи, в автоматизованому режимі через детектори здійснюється контроль комплексу параметрів ТП, після чого відбувається автоматичне обчислення показників функціонування світлофорної системи.

Упровадження АСУДР забезпечує:

- ефективного управління транспортними потоками із значним покращенням рівня безпеки; зменшення непередбачених простоїв транспортних засобів із одночасним зниженням ймовірності формування заторових ситуацій;
- скорочення традиційних фінансових затрат на обстеження периферійного обладнання, функціонуючого в зоні транспортних вузлів (оптимізація тривалості процедур з ідентифікації пошкоджень та їх ліквідації);
- автоматизована генерація найбільш раціональних управлінських рішень стосовно регулювання технологічних процесів;
- розширення інформаційних масивів (щодо навантаженості транспортних артерій), які стають доступними для звичайного споживача.

Реалізація першої в Україні автоматизованої системи контролю транспортного потоку відбулася у кінці 2007 р. на магістралі Київ-Бориспіль відповідно до технічного проекту ТП «Укргіпродор». Операційний потенціал даної

системи забезпечується парою метеорологічних дорожніх станцій та екологічними сенсорами, що постачають дані щодо атмосферних умов, рівня видимості, токсичних емісій і характеристик дорожнього полотна. Сенсори моніторингу покриття фіксують температурні показники, рівень вологості, концентрацію солі у водяній плівці та присутність снігового/льодового покриву. Двадцять сферичних відеокамер, розміщених на освітлювальних конструкціях, гарантують безперервний цілодобовий візуальний моніторинг траси. Функціонують інформаційні табло, що у реальному часі передають водієві потрібні дані, регулюють швидкісні обмеження при заторах, блокують рух під час ремонтних операцій.

Такі технології виявляються ефективними на магістралях, за відсутності транспортних перешкод (перетинів) і зустрічного автомобільного потоку. Системи регулювання транспортних потоків у великих населених пунктах повинні враховувати не лише характеристики дорожнього полотна, а й насиченість транспортного руху, число смуг у кожному векторі переміщення, вплив зустрічного транспортного потоку, пішохідний рух і, найсуттєвіше, дію регулювальних засобів дорожнього руху на перетинах.

1.4.1 ACS Lite

Система адаптивного замкненого управління ACS Lite представляє собою інноваційний підхід до регулювання процесів. Комплексне дослідження продуктивності експериментального зразка ACS Lite було закінчене у квітні 2007 р. Нижче представлено стислий огляд результатів даного проекту.

Конфігурація системи ACS Lite:

- Центральний процесор: концентрована структурна організація забезпечує скорочення первинних інвестиційних затрат порівняно з гнучкими мережевими рішеннями децентралізованого типу, що застосовують окремі обчислювальні пристрої для кожного транспортного вузла.
- регулятори: у кожному місці перехрещення розташовані регулятори модельних систем;
- Взаємодія між контролером та ACS Lite здатна функціонувати через IP-протокол з метою забезпечення сумісності з наявною мережевою архітектурою, побудованою на основі кабелю типу "витої пари";

- Для результативних адаптивних рішень управляючого впливу потрібні відповідні детекторні пристрої.

ACS Lite створено з метою застосування стандартних конфігурацій детекторних пристроїв, що зазвичай функціонують у режимі повноцінного операційного розгортання, застосовуючи поєднання механізмів припинення роботи транспортних детекторів.

Адаптивна логіка

Функціонування системи ACS Lite ґрунтується на моніторингу світлофорних сигналів, які встановлюються стандартними скоординованими темпоральними схемами. Система здійснює обчислення оновлених координаційних характеристик через інтервали 5–10 хв та передає ці додаткові корективи до керуючих пристроїв перехресть. Постійне щосекундне з'єднання з кожним перехрестям не вимагається для забезпечення інформаційного потоку та управління в реальному часі, оскільки кожен керуючий пристрій зберігає здатність автономного визначення фаз для пропуску або продовження тривалості зчитування, здійснюючи це в реальному часі згідно зі звичайною логікою координованого приводу.

Процес оптимізації координаційних характеристик реалізується наступним чином:

- Тривалість циклу розподіляється за спрощеними критеріями для досягнення рівномірного навантаження між усіма конфліктуючими фазами, враховуючи параметри налаштування: по-перше, найкоротші зелені фази та пішохідні проміжки; по-друге, найдовші зелені фази транспортних потоків (якщо вони не створюватимуть взаємних перешкод під час координації).

Таким чином, часові інтервали будуть перерозподілені з тієї фази, яка характеризується надмірною тривалістю (тобто невикористаним ресурсом), з метою забезпечення додаткового часу для руху транспортних засобів у перенавантаженої фазі. Стабілізаційний механізм викривляє принципи рівноваги на користь визначеної магістральної фази за умови наявності достатніх «резервних» можливостей для створення ширшої зеленої хвилі та істотного поліпшення послідовностей руху. ACS Lite відповідає на виникнення насичення на одному чи кількох напрямках перетину у «захисному» режимі, який намагається максимально зберегти транспортний потік за конкретними магістральними фазами, і

врешті-решт повертається до добового часового розподілу згідно з інженерними настановами при повному перенасиченні задля забезпечення послідовності.

1.4.2 UTOPIA

Архітектура системи адаптивного регулювання міського трафіку (UTOPIA) представляє собою технологію керування транспортними потоками, розробка якої розпочалася в Італії з 1980 р. з метою оптимізації характеристик дорожнього руху та забезпечення селективних переваг для громадського транспорту при збереженні ефективності руху індивідуального автотранспорту.

Безперервне втілення прогресивних концепцій та модернізація можливостей перетворили цю технологію на одну з найбільш досконалих автоматизованих систем управління дорожнім рухом на планеті. На сьогодні дана система ефективно експлуатується в численних столичних центрах, урбанізованих територіях та міських конгломератах.

Базова концепція UTOPIA ґрунтується на здійсненні управління у форматі реального часу – конфігурація виконується з метою мінімізації загальних соціально-економічних витрат транспортної інфраструктури з позицій попередження заторів та емісій, одночасно скорочуючи тривалість подорожі як для індивідуального транспорту, так і для руху засобів підвищеного пріоритету.

Багаторівнева та децентралізована структура UTOPIA включає верхній щабель (центральну частину), що забезпечує формування глобальних стратегій управління, та нижній щабель (контрольовані перехрестя), де регулювання світлофорного обладнання реалізується через програмний комплекс SPOT.

Підсистема верхнього щабля обчислює для цілісної мережі стратегії оптимізації та стратегії управління. Ключові функції, що реалізовані на центральному програмному щаблі включають:

- спостереження за потоками даних у комп'ютерній мережі;
- діагностика системи;
- керування рухом;
- спільне спостереження та нагляд;
- візуальний та динамічний інтерфейс взаємодії з користувачем.

Призначення підсистеми базового рівня зводиться до безпосереднього управління на транспортних магістралях, які обладнані промисловими обчислювальними системами та функціонують під контролем програмного продукту SPOT. Ключові можливості, реалізовані на фундаментальному програмному щаблі:

- керування світлофором;
- контроль перехресть;
- аналіз стану транспортних вузлів;
- переваги колективного пасажирського сполучення;
- діагностичні процедури на місцевому рівні.

Щоб функціонувати коректно, обладнання вимагає інформації від центральної системи та відомостей від суміжних пристроїв на автомагістралі. Водночас, на кожному локальному модулі інформація (інтенсивність транспортного потоку і планована методика управління) має передаватися між прилеглими пристроями на трасі та до центру управління.

Комплекс забезпечує винятковий рівень результативності, насамперед за умов зростаючої щільності транспортного потоку, а також у непрогнозованих обставинах. Він сприяє скороченню автомобільних заторів і транспортного забруднення довкілля в міських зонах, оскільки створює більш сприятливі умови для ТП навіть протягом години пік.

Комплекс УТОPIA надає різноманітні варіанти управлінських методик, створених для застосування до будь-якої структури транспортної мережі. В абсолютно адаптивному функціонуванні він безперервно аналізує актуальну дорожню обстановку і прогнозує її ймовірний розвиток, а базуючись на отриманих параметрах ТП чи інших дорожніх станах оптимізує управлінську методику. Це забезпечує значну результативність навіть за непрогнозованих дорожніх обставин.

Комплекс надає фахівцю з транспорту комплексний арсенал засобів для спостереження за дорожнім рухом у режимі реального часу і виявлення дорожньо-транспортних пригод.

Висновки до розділу

Дослідження транспортної ситуації в українських містах демонструє необхідність удосконалення управління автомобільними потоками, що передбачає таку синхронізацію світлофорних об'єктів, яка дозволить мінімізувати час очікування транспортних засобів та знизити ймовірність досягнення інтенсивності руху критичних показників пропускної спроможності.

Вивчення поточного функціонування національних і міжнародних транспортних мереж вказує на потребу створення інноваційної, більш адаптивної до специфічних обставин системи регулювання транспортних потоків, одночасно характеризуючись простотою монтажу та обслуговування для впровадження в умовах обмежених можливостей, що забезпечить скорочення часу затримки ТЗ при проходженні через транспортні вузли.

Для вирішення зазначеного завдання було обрано застосування регуляторів управління, базованих на нечіткій логіці, оскільки fuzzy-логіка систематизує людську здібність до приблизних умовиводів та надає можливість обґрунтовано ухвалювати рішення за умов невизначеності. Координування транспортного руху для певної зони координації з комплексом перехресть вимагає значних обчислювальних ресурсів для аналітичної обробки інформації, створення моделі ТП та прогнозування навантаження на перехрестя. Проте застосування НК дає змогу обійти ці труднощі. Крім того, інтуїтивний характер бази правил і параметрів у нечітких алгоритмах управління рухом робить їх порівняно доступними у проектуванні, перевірці та вдосконаленні.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Концептуальні основи нечіткої логіки

Математичний апарат нечітких множин (fuzzy sets) разом із нечіткою логікою (fuzzy logic) становлять розширення класичної теорії множин Кантора та традиційної формальної логіки. Фундамент цієї теорії було закладено американським математиком іранського походження Лотфі А. Заде (Lotfi A. Zadeh), який працював професором у Каліфорнійському університеті в Берклі. Його піонерська стаття «Fuzzy Sets», опублікована у 1965 році в науковому виданні *Information and Control* (випуск 8), започаткувала новий напрям у математичному моделюванні когнітивних процесів та стала відправною точкою для формування цілісної математичної дисципліни.

Головною передумовою виникнення цієї теорії стала необхідність формалізації приблизних, неточних суджень, які люди використовують при описі складних систем, явищ та об'єктів реального світу. Л. Заде запропонував радикальне узагальнення класичного поняття множини, допустивши, що функція належності елемента до множини може набувати довільних значень з неперервного інтервалу $[0; 1]$, а не лише дискретних значень 0 чи 1. Такі узагальнені множини отримали назву нечітких (fuzzy). Дослідник також сформулював базові операції над нечіткими множинами та розробив узагальнені версії класичних правил логічного висновку *modus ponens* і *modus tollens*.

Згодом Л. Заде впровадив концепцію лінгвістичної змінної, значеннями (термами) якої є нечіткі множини. Це дозволило створити потужний інструментарій для формалізації інтелектуальних процесів, що враховує властиву людському мисленню нечіткість та багатозначність висловлювань. Сьогодні нечітка логіка широко застосовується в системах штучного інтелекту, автоматичного керування, прийняття рішень та експертних системах.

2.1.1 Математичне визначення нечітких множин

Розглянемо універсум E (універсальну множину), елемент x цього універсуму та певну властивість R . У класичній теорії множин підмножина A універсуму E , що складається з елементів із властивістю R , задається сукупністю

впорядкованих пар

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \quad (2.1)$$

де $\mu_A(x)$ являє собою характеристичну функцію, яка дорівнює 1 для елементів, що володіють властивістю R , та 0 для решти елементів. Принципова відмінність нечіткої підмножини полягає у відсутності категоричної відповіді «належить/не належить» стосовно властивості R . Відтак нечітка підмножина A універсуму E також подається множиною впорядкованих пар

$$A = \{x, \mu_A(x)\}, \quad (2.2)$$

проте $\mu_A(x)$ тут є функцією належності (membership function), що відображає елементи в цілком упорядковану множину M (типово $M = [0, 1]$). Функція належності (ФН) визначає міру (ступінь) входження елемента x до підмножини A [1]. Множина M називається множиною належності. У граничному випадку $M = \{0, 1\}$ нечітка підмножина A редукується до звичайної (чіткої) множини.

2.1.2 Підходи до конструювання функцій належності

У практичних застосуваннях переважно використовуються прямі методи формування ФН, за яких експерт безпосередньо визначає значення $\mu_A(x)$ для кожного елемента $x \in E$ або задає функцію сумісності [1]. Прямі методи зазвичай застосовуються для кількісно вимірюваних характеристик: швидкості, часу, відстані, тиску, температури тощо, а також у ситуаціях з чітко визначеними граничними (полярними) значеннями.

Для багатьох прикладних задач характеристика об'єкта може бути декомпована на набір ознак, кожна з яких має полярні значення, що відповідають крайнім значенням ФН (0 або 1).

Непрямі методи визначення ФН застосовуються за відсутності безпосередньо вимірюваних характеристик, через які можна охарактеризувати нечітку множину. Найпоширенішим непрямим методом є метод попарних порівнянь. За умови відомих значень ФН $\mu_A(x_i) = w_i, i = 1, 2, \dots, n$, попарні співставлення утворюють матрицю відношень $A = \{a_{ij}\}$, де $a_{ij} = w_i/w_j$ [3].

На практиці експерт самостійно формує матрицю A , дотримуючись умов: діагональні елементи дорівнюють одиниці, а симетричні елементи пов'язані

співвідношенням $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Інакше кажучи, якщо один елемент оцінюється у α разів вагомішим за інший, то останній має бути в $1/\alpha$ разів вагомішим за перший.

У загальній постановці задача зводиться до знаходження власного вектора w , що задовольняє рівняння $Aw = \lambda_{\max} w$, де λ_{\max} – максимальне власне число матриці A . Оскільки матриця A за побудовою є додатною, розв'язок існує і є додатнім.

Додатково можна виділити такі підходи:

- застосування типових аналітичних форм (зокрема, функцій (LR) -типу) з подальшим налаштуванням параметрів за експериментальними даними;
- використання емпіричних відносних частот як наближень до значень належності [1].

2.1.3 Нечіткі змінні та лінгвістичні терми

Концепції нечіткої та лінгвістичної змінних є ключовими для опису об'єктів і процесів засобами нечітких множин [1].

Нечітка змінна формально описується трійкою (α, X, A) , де:

α – ідентифікатор (назва) змінної;

X – базова множина (область визначення змінної α);

A – нечітка множина на X , що специфікує обмеження (через $\mu_A(x)$) на допустимі значення змінної α .

Лінгвістична змінна (ЛЗ) визначається п'ятіркою (β, T, X, G, M) , де:

β – назва лінгвістичної змінної;

T – терм-множина, що містить назви нечітких змінних, визначених на спільній базовій множині X . Терм-множина T є базовою для даної ЛЗ;

G – синтаксичний механізм, що дозволяє маніпулювати елементами терм-множини T та породжувати нові терми. Об'єднання $T \cup G(T)$, де $G(T)$ – множина синтезованих термів, утворює розширену терм-множину ЛЗ;

M – семантичний механізм, що трансформує кожен новий терм, створений процедурою G , у відповідну нечітку змінну шляхом побудови асоційованої нечіткої множини.

Прикладом лінгвістичної змінної може слугувати «температура» з термами «низька», «середня», «висока», кожен з яких характеризується власною функцією належності на числовій шкалі температур.

2.1.4 Теорія нечітких чисел

Нечітке число – це нечітка змінна, визначена на множині дійсних чисел. Формально нечітке число являє собою нечітку множину A на R з функцією належності $\mu_A(x) \in [0, 1]$, де $x \in R$ [1].

Нечітке число A називається нормованим (нормальним), якщо виконується умова $\sup_x \mu_A(x) = 1$. Нечітке число A є опуклим, якщо для довільних $x \leq y \leq z$ справджується нерівність

$$\mu_A(y) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(z)). \quad (2.3)$$

α -зріз нечіткого числа A визначається як множина

$$A_\alpha = \{x \in R \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}, \quad \alpha \in (0, 1]. \quad (2.4)$$

Носій нечіткого числа A – це підмножина $\text{supp}(A) \subset R$, що складається з усіх точок із ненульовою належністю:

$$\text{supp}(A) = \{x \in R \mid \mu_A(x) > 0\}. \quad (2.5)$$

Нечітке число A є унімодальним, якщо рівність $\mu_A(x) = 1$ виконується лише в одній точці дійсної осі. Це означає, що існує єдина «найбільш типова» точка.

Опукле нечітке число A класифікується як нечіткий нуль, якщо

$$\mu_A(0) = \sup_x (\mu_A(x)). \quad (2.6)$$

Нечітке число A є додатним, якщо весь його носій лежить у додатній півосі: $\forall x \in \text{supp}(A) : x > 0$. Аналогічно, нечітке число від'ємне, якщо $\forall x \in \text{supp}(A) : x < 0$.

На практиці широко використовуються трикутні та трапецієподібні нечіткі числа завдяки їх простоті та обчислювальній ефективності.

2.1.5 Бінарні нечіткі відношення

Нехай $E = E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$ є декартовим добутком універсальних множин, а M – множина належності (наприклад, $M = [0, 1]$). n -арне нечітке відношення визначається як нечітка підмножина R на E зі значеннями в M . У бінарному випадку ($n = 2$) при $M = [0, 1]$ нечітким відношенням R між множинами $X = E_1$ та $Y = E_2$ називається відображення $R : X \times Y \rightarrow [0, 1]$, яке кожній парі $(x, y) \in X \times Y$ ставить у відповідність ступінь зв'язку $\mu_R(x, y) \in [0, 1]$.

Нотація: нечітке відношення на $X \times Y$ позначається як $\forall x \in X, \forall y \in Y : xRy$.

Коли $X = Y$ (множини збігаються), нечітке відношення $R : X \times X \rightarrow [0, 1]$ називається нечітким відношенням на множині X . Такі відношення можуть характеризувати схожість, близькість або впорядкування елементів.

2.1.6 Механізми нечіткого виведення

В експертних та керуючих системах апарат нечіткого виведення спирається на базу знань, сформовану фахівцями у вигляді сукупності продукційних правил:

П1: якщо $x \in A_1$, тоді $y \in B_1$,

П2: якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$,

.....

П n : якщо $x \in A_n$, тоді $y \in B_n$,

де x – вхідна змінна (антецедент), y – вихідна змінна (консеквент); A_i та B_i – нечіткі множини з відповідними функціями належності на областях визначення x та y [1].

Експертне знання виду $A \rightarrow B$ моделює причинно-наслідковий зв'язок між передумовою та висновком, тому його можна інтерпретувати як нечітке відношення R :

$$R = A \rightarrow B, \quad (2.7)$$

де символ « \rightarrow » позначає нечітку імплікацію.

Відношення R є нечіткою підмножиною декартового добутку $X \times Y$, де X – простір передумов, Y – простір висновків. Процес отримання нечіткого

результату B' на основі конкретного спостереження A' та правила $A \rightarrow B$ описується композиційним правилом:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B), \quad (2.8)$$

де « \circ » – операція композиції (згортки) нечітких відношень.

Варто зазначити, що операції композиції та імплікації в алгебрі нечітких множин можуть реалізовуватися різними способами, що впливає на кінцевий результат виведення. Найпоширенішими є імплікації Мамдані, Ларсена, Лукасевича та Гьоделя.

2.2 Архітектура нечіткого логічного виведення

Процедура нечіткого логічного виведення в загальному випадку складається з чотирьох послідовних етапів (рис. 2.1) [1][4]:

Рисунок 2.1 – Структурна схема етапів нечіткого виведення

1. *Фазифікація (fuzzification)* – перетворення чітких входів у нечіткі. На цьому етапі вектор чітких входних сигналів $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)^T \in X$ трансформується у нечітку множину $A' \subseteq X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$. Оскільки нечіткий регулятор оперує нечіткими множинами, кожному чіткому входному значенню необхідно поставити у відповідність нечітку множину. Найчастіше застосовується синглетонна (singleton) модель фазифікації. Синглетон чіткого значення \bar{x} являє собою нечітку множину $A'(x, \mu'_A(x))$ з імпульсною ФН:

$$\mu'_A(x) = \delta(x, \bar{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = \bar{x}, \\ 0, & \text{якщо } x \neq \bar{x}. \end{cases} \quad (2.9)$$

У процесі фазифікації для кожного чіткого входу \bar{x}_i обчислюються ступені його відповідності всім лінгвістичним термам A_j з функціями належності

$\mu_{A_j}(x)$. Ці ступені становлять значення $\mu_{A_j}(\bar{x}_i)$, $j = 1, 2, \dots, m$.

2. *Агрегування та логічний висновок.* На цьому етапі для кожного правила обчислюється ступінь істинності антецеденту (передумови), який потім застосовується до консеквенту (висновку). Результатом є нечітка підмножина, призначена кожній вихідній змінній у кожному правилі. Типовими операціями агрегування є \min (МІНІМУМ) та prod (ДОБУТОК). При мінімумному виведенні функція належності консеквенту «зрізається» на рівні обчисленого ступеня істинності антецеденту (реалізація нечіткої кон'юнкції). При мультиплікативному виведенні ФН консеквенту масштабується пропорційно ступеню істинності.

3. *Акумуляція (композиція).* Усі нечіткі підмножини, отримані для кожної вихідної змінної з різних правил, об'єднуються в єдину результуючу нечітку множину. Стандартними операціями об'єднання є \max (МАКСИМУМ) та sum (СУМА). При максимумній композиції результуюча ФН формується як поточковий максимум по всіх нечітких підмножинах (реалізація нечіткої диз'юнкції). При сумарній композиції результуюча ФН є поточною сумою відповідних значень.

4. *Дефазифікація (defuzzification)* – перетворення нечіткого виходу в чітке значення. Цей етап необхідний, коли система керування вимагає конкретного числового значення керуючого впливу. Існує кілька методів дефазифікації: центроїдний (центр тяжіння), бісекторний, метод першого максимуму, метод середнього максимуму, висотна дефазифікація тощо [1]. Центроїдний метод, що є найпоширенішим, обчислює центр мас вихідної нечіткої множини:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_{B'}(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{B'}(y_i)}. \quad (2.10)$$

Для неперервного випадку формула набуває вигляду:

$$y^* = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{B'}(y) dy}{\int_Y \mu_{B'}(y) dy}. \quad (2.11)$$

У замкнених системах керування отримане чітке значення використовується в контурі зворотного зв'язку для формування керуючих сигналів.

2.2.1 Ілюстративний приклад нечіткого виведення

Розглянемо систему, що описується трьома нечіткими правилами:

П1: якщо $x \in A$, тоді $w \in D$,

П2: якщо $y \in B$, тоді $w \in E$,

П3: якщо $z \in C$, тоді $w \in F$,

де x, y, z – вхідні змінні, w – вихідна змінна, а A, B, C, D, E, F – задані функції належності (трикутної форми).

Припустимо, що вхідні змінні набули конкретних чітких значень x_0, y_0 та z_0 .

На першому етапі для заданих вхідних значень та відповідних ФН A, B, C визначаються ступені активації $\alpha_A(x_0), \alpha_B(y_0)$ та $\alpha_C(z_0)$ для антецедентів кожного правила.

На другому етапі виконується усічення ФН консеквентів (D, E, F) на рівнях $\alpha_A(x_0), \alpha_B(y_0)$ та $\alpha_C(z_0)$ відповідно.

На третьому етапі усічені ФН об'єднуються за допомогою операції максимуму, формуючи агреговану нечітку підмножину з ФН $\mu_{\Sigma}(w)$, що представляє логічний висновок для вихідної змінної w .

На четвертому етапі (за потреби) визначається чітке значення виходу, наприклад, центроїдним методом. Графічна ілюстрація цієї процедури наведена на рис. 2.2.

2.2.2 Метод нечіткого виведення Мамдані

Нехай база правил містить два нечіткі продукційні правила:

Правило 1: якщо $x \in A_1$ та $y \in B_1$, тоді $z \in C_1$,

Правило 2: якщо $x \in A_2$ та $y \in B_2$, тоді $z \in C_2$,

де x, y – вхідні змінні, z – вихідна змінна, $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – нечіткі множини з функціями належності $\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \mu_{B_1}(y), \mu_{B_2}(y), \mu_{C_1}(z), \mu_{C_2}(z)$. Задача полягає у визначенні чіткого виходу z_0 за відомими чіткими входами x_0, y_0 .

Крок 1. Фазифікація: обчислюються ступені належності вхідних значень до відповідних нечітких множин:

$$\mu_{A_1}(x_0), \mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_1}(y_0), \mu_{B_2}(y_0).$$

Рисунок 2.2 – Візуалізація механізму нечіткого логічного виведення

Крок 2. Агрегування антецедентів: визначаються ступені активації правил за допомогою операції мінімуму:

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)), \quad \alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)), \quad (2.12)$$

де операція мінімуму позначена символом \min (або « \wedge »).

Далі формуються модифіковані функції належності консеквентів:

$$\mu'_{C_1}(z) = \min(\alpha_1, \mu_{C_1}(z)), \quad \mu'_{C_2}(z) = \min(\alpha_2, \mu_{C_2}(z)). \quad (2.13)$$

Крок 3. Акумуляція: застосовуючи операцію максимуму (позначається

« \vee »), об'єднуємо модифіковані функції:

$$\mu_{\text{res}}(z) = \max(\mu'_{C_1}(z), \mu'_{C_2}(z)). \quad (2.14)$$

Крок 4. Дефазифікація: чітке значення z_0 визначається, як правило, центроїдним методом за формулою центра мас.

Алгоритм Мамдані є найпоширенішим у практичних застосуваннях завдяки інтуїтивній зрозумілості та ефективності.

2.2.3 Метод нечіткого виведення Такагі-Сугено

Нехай база правил містить два правила специфічної структури:

Правило 1: якщо $x \in A_1$ та $y \in B_1$, тоді $z_1 = a_1x + b_1y + c_1$,

Правило 2: якщо $x \in A_2$ та $y \in B_2$, тоді $z_2 = a_2x + b_2y + c_2$,

де консеквенти є лінійними функціями вхідних змінних (модель Такагі-Сугено першого порядку). При $c_i = 0$ маємо класичну форму Сугено.

Крок 1. Фазифікація: виконується аналогічно до алгоритму Мамдані.

Крок 2. Обчислення ступенів активації:

$$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)), \quad \alpha_2 = \min(\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)). \quad (2.15)$$

Обчислюються значення консеквентів (виходів окремих правил):

$$z_1^* = a_1x_0 + b_1y_0 + c_1, \quad z_2^* = a_2x_0 + b_2y_0 + c_2. \quad (2.16)$$

Крок 3. Зважене усереднення: чітке значення виходу обчислюється як середньозважене:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2.17)$$

Перевагою моделі Сугено є обчислювальна ефективність (відсутність етапу дефазифікації у традиційному розумінні) та можливість застосування методів адаптації та навчання (зокрема, нейро-нечітких методів типу ANFIS).

2.3 Архітектура та принципи роботи нечітких регуляторів

Однією з ключових сфер застосування теорії нечітких множин є розробка інтелектуальних систем автоматичного керування на базі нечіткої логіки (fuzzy logic controllers, FLC). Такі регулятори широко використовуються в промисловій автоматичній, робототехнічній, побутовій техніці та транспортних системах. Принципова відмінність нечітких регуляторів від класичних полягає у використанні замість математичних моделей об'єкта керування експертних знань, сформульованих у лінгвістичній формі за допомогою нечітких множин та правил виведення.

Узагальнена структура нечіткого контролера (рис. 2.3) включає такі функціональні модулі [4]:

- модуль фазифікації (перетворення чітких сигналів у нечіткі);
- база знань (сукупність лінгвістичних правил);
- механізм виведення (логічна обробка правил);
- модуль дефазифікації (перетворення нечіткого виходу в чіткий сигнал керування).

Модуль фазифікації здійснює перетворення вимірюваних чітких величин (сигналів зворотного зв'язку) у нечіткі лінгвістичні значення відповідно до заданих функцій належності.

Механізм виведення обробляє активовані правила бази знань, застосовуючи нечіткі логічні операції для формування нечіткого керуючого рішення.

Модуль дефазифікації конвертує агреговану нечітку множину у конкретне числове значення керуючого впливу, що подається на виконавчий механізм.

Серед мікроконтролерів із вбудованою підтримкою нечіткої логіки варто відзначити сімейства 68HC11 та 68HC12 компанії Motorola (нині NXP/Freescale), MCS-96 від Intel, а також спеціалізовані нечіткі процесори. Сучасні платформи на базі ARM Cortex та FPGA також ефективно реалізують алгоритми нечіткого керування.

Загальний принцип функціонування систем із нечіткою логікою є універсальним: вимірювані сигнали фазифікуються, обробляються механізмом виведення на основі бази правил, дефазифікуються та у вигляді стандартних аналогових або цифрових сигналів надходять до виконавчих пристроїв [1][4].

Рисунок 2.3 – Функціональна схема нечіткого регулятора

Висновки до розділу

Розробка інтелектуальних систем керування в умовах структурної та параметричної невизначеності вимагає створення людино-машинного інтерфейсу, заснованого на якісних, лінгвістичних категоріях. Такі категорії природно формалізуються засобами теорії нечітких множин. Відтак дослідження та вдосконалення методів нечіткого керування вбудованими системами залишається актуальною науково-технічною задачею.

Ефективне впровадження нечітких систем передбачає коректне визначення функцій належності для всіх змінних, формування адекватної бази правил виведення, вибір оптимальних методів агрегування та акумуляції, а також налаштування процедур фазифікації та дефазифікації.

Якість функціонування нечіткої системи критично залежить від повноти та несуперечливості бази правил. Оскільки правила формуються експертами, вони можуть бути неповними, суб'єктивними або внутрішньо суперечливими. Усунення цих недоліків та підвищення інтелектуального потенціалу системи досягається шляхом автоматичного навчання та адаптації бази правил.

Таким чином, у даному розділі викладено теоретичні засади нечіткої логіки, розглянуто ключові концепції нечітких множин, лінгвістичних змінних та нечітких відношень, а також детально описано алгоритми Мамдані та Такагі-Сугено як основні практичні методи нечіткого логічного виведення для систем інтелектуального керування.

3 МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ

Комплексне розв'язання проблеми оптимізації дорожнього руху передбачає вирішення двох взаємопов'язаних підзадач:

- автономне керування окремим перехрестям;
- синхронізація функціонування мережі суміжних перехресть.

3.1 Інтелектуальне керування ізольованим перехрестям

Алгоритм регулювання транспортного потоку на базі нечіткої логіки структуровано у вигляді послідовності кроків, що відповідають одному повному циклу світлофорного регулювання. Процедура моделювання охоплює такі стадії:

1. Збір вхідної інформації – реєстрація кількості транспортних засобів на різних напрямках руху, моніторинг поточного стану системи регулювання.
2. Фазифікація вхідних параметрів – трансформація числових показників у лінгвістичні терми.
3. Формування керуючого рішення – застосування бази продукційних правил до фазифікованих вхідних даних.
4. Дефазифікація результатів – зворотне перетворення лінгвістичних виходів у конкретні числові значення керуючих сигналів.

Для реалізації контролера окремого перехрестя доцільно застосовувати метод Мамдані, оскільки цей алгоритм безпосередньо оперує експертними знаннями, характеризується відносною простотою реалізації та широким практичним поширенням. Його використання є обґрунтованим за відсутності потреби у спеціалізованих методах виведення.

Розглянемо як альтернативу метод Такагі-Сугено:

Ключова відмінність алгоритму Сугено від методу Мамдані полягає у структурі консеквенту правил: замість лінгвістичної змінної висновком є аналітична функція, що явно виражає залежність виходу від вхідних параметрів [3].

Така функціональна залежність має критичне значення для спеціалізованих задач оптимізації та керування. Проте у задачі регулювання перехрестям відсутня очевидна аналітична залежність, яку можна було б легко формалізувати.

Враховуючи вищезазначене, для розглядуваної задачі оптимальним є застосування методу Мамдані, який не потребує встановлення явного функціонального зв'язку між входами та виходами, а натомість використовує евристичні знання експертів у галузі організації дорожнього руху [3].

3.1.1 Специфікація вхідних параметрів

При виборі вхідних змінних необхідно керуватися двома критеріями: релевантністю до транспортної ситуації на перехресті та технічною можливістю їх достовірного вимірювання. Відповідно до цих вимог, для кожної фази регулювання визначено такі вхідні параметри:

1. Інтенсивність I_{ij} транспортного потоку на ділянці B_{ij} при наближенні до перехрестя (од./год.)
2. Довжина черги Q_{ij} транспортних засобів перед стоп-лінією на момент обчислення тривалості наступної фази.

Результати імітаційного моделювання мають визначити доцільність використання додаткових вхідних параметрів. Якщо розширення набору входів не забезпечує суттєвого покращення якості керування, таке ускладнення є невиправданим, оскільки збільшує структурну складність контролера, підвищує вартість розробки та впровадження системи.

3.1.2 Формат вихідних сигналів

Вихідними даними для кожної фази є результуючий керуючий вплив, що визначає оптимальну тривалість відповідної фази світлофорного циклу. Вихідний сигнал представляється числовим значенням в діапазоні від 0 до $T_{\text{ц}}$, де $T_{\text{ц}}$ – загальна тривалість циклу регулювання.

При формуванні результуючих керуючих сигналів для кожної фази необхідно враховувати взаємозалежність між фазами: при фіксованій тривалості циклу збільшення однієї фази автоматично призводить до скорочення інших.

Таким чином, збільшення тривалості однієї фази неминуче зменшує тривалість решти фаз. Відтак виникає задача оптимального розподілу фіксованої тривалості циклу між фазами з урахуванням проміжних тактів (жовтих сигналів) таким чином, щоб сумарна тривалість усіх складових дорівнювала тривалості циклу.

Для найпростішого випадку двофазного перехрестя достатньо виконати лінійну нормалізацію керуючих сигналів обох фаз для отримання результируючих значень.

Процедура нормалізації передбачає приведення суми керуючих сигналів до одиниці з подальшим масштабуванням відповідно до тривалості циклу.

Позначимо вихідні керуючі сигнали як x та y . Тоді нормалізовані значення обчислюються за формулами:

$$x' = \frac{x \cdot T_{\text{ц}}}{x + y}, \quad y' = \frac{y \cdot T_{\text{ц}}}{x + y} \quad (3.1)$$

Розглянемо числовий приклад: нехай контролер згенерував керуючі сигнали 46 с для першої фази та 29 с для другої при загальній тривалості циклу $T_{\text{ц}} = 60$ с. Після нормалізації отримуємо:

$$x' = \frac{46 \cdot 60}{46 + 29}, \quad y' = \frac{29 \cdot 60}{46 + 29} \quad (3.2)$$

$x' = 37$ с для першої фази,

$y' = 23$ с для другої фази.

3.1.3 Структура нечіткого алгоритму регулювання

Побудова нечіткого алгоритму для контролера охоплює три ключові етапи: фазифікацію вхідних змінних, логічне виведення на основі експертної бази правил та дефазифікацію для отримання чіткого керуючого сигналу.

Процедура фазифікації

Фазифікація вхідних даних передбачає визначення лінгвістичних змінних та побудову відповідних функцій належності (ФН). Найбільш практичним підходом є розбиття області визначення кожної змінної на зони, що відповідають окремим лінгвістичним термам.

Зокрема, область значень кожного входу та виходу поділяється на $2N + 1$ інтервалів, де параметр N визначається індивідуально для кожної змінної. Окремі зони позначаються таким чином:

M_N (ліва N), ..., M_1 (ліва 1), S (середня), D_1 (права 1), ..., D_N (права N).

Кожна зона асоціюється з конкретним значенням лінгвістичної змінної.

Функції належності мають трикутну форму [5], як проілюстровано на рис. 3.1:

Рисунок 3.1 – Графічне представлення функцій належності

Для параметра інтенсивності транспортного потоку визначено терм-множину: {«низька інтенсивність», «помірна інтенсивність», «висока інтенсивність», «критична інтенсивність»}. У даному випадку $N = 1$, що дає $2N + 1 = 3$ базових інтервалів та чотири лінгвістичних терми.

Припустимо, що інтенсивність потоку змінюється в межах від 0 до 1000 автомобілів на годину. Тоді виконуємо таке розбиття: інтенсивності до 200 од./год. відповідає терм «низька інтенсивність», діапазону 200–500 од./год. – «помірна інтенсивність», діапазону 500–850 од./год. – «висока інтенсивність», значенням понад 850 од./год. – «критична інтенсивність».

Аналогічно фазифікуємо параметр черги транспортних засобів перед перехрестям.

Нехай черга може складати від 0 до 15 автомобілів. Черги більшої довжини класифікуються як «понад 15 одиниць». Розбиття виконується так: черги до 3 од. відповідають терму «коротка черга», від 3 до 9 од. – «середня черга», від 10 од. – «довга черга».

За аналогічною методикою можна фазифікувати будь-які додаткові вхідні параметри, визначивши для них відповідні терм-множини.

Форма функції належності визначається семантикою лінгвістичної змінної [1][5].

Функція M_N моделює невизначеність типу «мала величина». Для такої семантики оптимальною є ФН класу L (рис. 3.2).

Функція D_N моделює невизначеність типу «велика величина». Тут найкраще підходить ФН класу γ (рис. 3.3).

Функція S моделює невизначеність типу «приблизно в інтервалі». Для

цього застосовується трикутна ФН класу t (рис. 3.4) [5].

Рисунок 3.2 – Функція належності L -типу

Рисунок 3.3 – Функція належності γ -типу

Рисунок 3.4 – Функція належності t -типу (трикутна)

При фазифікації вхідних параметрів керування перехрестям (наприклад, інтенсивності потоку) застосовуються всі три типи функцій: для мінімальних значень – функція класу L , для максимальних – функція класу γ , для проміжних – функція класу t .

На прикладі змінної «черга автомобілів»: терму «коротка черга» відповідає ФН класу L , терму «середня черга» – ФН класу t , терму «довга черга» – ФН класу γ .

Механізм формування рішення

Процес вироблення керуючого рішення базується на експертній базі пра-

вил, яка застосовується до фазифікованих вхідних даних для генерування нечітких виходів.

Структура бази правил

Механізм нечіткого виведення, що використовується в інтелектуальних системах керування, ґрунтується на базі знань, сформованій фахівцями відповідної предметної галузі. База знань має вигляд сукупності продукційних правил:

Правило 1: якщо $x \in A_1$, тоді $y \in B_1$

Правило 2: якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$

.....

Правило N: якщо $x \in A_n$, тоді $y \in B_n$,

де x – вхідна змінна (антецедент), y – вихідна змінна (консеквент); A та B – нечіткі множини з відповідними функціями належності.

Приклад правила: «Якщо інтенсивність потоку низька, тоді тривалість дозвільного сигналу встановити мінімальною.»

Правила формуються для всіх можливих комбінацій значень вхідних змінних. Для контролера з трьома градаціями змінної «інтенсивність» та чотирма градаціями змінної «черга» необхідно побудувати базу з 12 правил.

База правил формується на основі експертних знань, які не обов'язково мають бути абсолютно точними – достатньо приблизного відображення залежності виходу від входів.

Наприклад, очевидно, що при «низькій інтенсивності» та «короткій черзі» тривалість дозвільного сигналу має бути «мінімальною». Для «високої інтенсивності» та «довгої черги» тривалість сигналу має бути «максимальною».

Неоднозначні ситуації на кшталт «висока інтенсивність» при «короткій черзі» вирішуються на основі досвіду та інтуїції експерта.

Процедура нечіткого виведення

Нечітке виведення складається з двох послідовних операцій (рис. 3.5):

- логічний висновок (імплікація);
- агрегація (композиція).

Для логічного висновку застосовується операція prod (ДОБУТОК): функція належності консеквенту масштабується пропорційно обчисленому ступеню істинності антецеденту правила.

Рисунок 3.5 – Схема логічного виведення та композиції результатів

Для параметрів типу інтенсивності транспортного потоку такий підхід дозволяє підвищити точність за рахунок одночасної активації кількох правил з різними ваговими коефіцієнтами.

Наприклад, при черзі з 4 автомобілів активуються функції належності термінів «коротка черга» та «середня черга» з різними ступенями істинності.

Для композиції застосовується операція \max (МАКСИМУМ).

При максимумній композиції результуюча нечітка множина формується як поточковий максимум по всіх активованих нечітких підмножинах (реалізація нечіткої диз'юнкції «АБО»).

Таким чином, результати логічного виведення для всіх активованих правил об'єднуються шляхом вибору максимального значення функції належності для кожної точки області визначення виходу.

Процедура дефазифікації

Оскільки вихід блоку виведення нечіткого контролера представляє собою єдину агреговану нечітку множину, для отримання чіткого керуючого сигналу можна застосувати метод центра тяжіння (центроїдний) або метод максимуму функції належності.

У даній роботі використовується центроїдний метод (рис. 3.6). Суттєвим недоліком методу максимуму є ігнорування форми функції належності. Крім

того, центроїдний метод забезпечує вищу точність результатів і є стандартом *de facto* у сучасних системах нечіткого виведення.

Рисунок 3.6 – Графічна інтерпретація центроїдного методу дефазифікації

Результуюче чітке значення обчислюється як середньозважене по всіх активованих функціях належності.

Наприклад, якщо активувались два правила з різними ступенями істинності, результат визначається як зважена комбінація відповідних нечітких підмножин D , E та F , де вагами слугують ступені активації. Отримане значення є чітким керуючим сигналом для вихідної змінної.

3.2 Синхронізація функціонування мережі перехресть

Цей підрозділ присвячено принципам координації роботи суміжних перехресть та реалізації механізму часових зсувів між вузлами з найбільшим навантаженням.

3.2.1 Концепція координованого керування

Для організації узгодженої роботи мережі перехресть та формування «зеленої хвилі» на пріоритетних напрямках необхідно обчислювати часовий зсув початку дозвільного сигналу для послідовності перехресть на найбільш завантаженому маршруті. При однаковій тривалості циклів регулювання початок дозвільного сигналу на кожному наступному перехресті синхронізується з попереднім з урахуванням розрахованого зсуву.

При зміні пріоритетного напрямку контролери відповідних перехресть мають автоматично перераховувати часові зсуви для переналаштування «зеленої хвилі» на новий маршрут.

Таким чином, необхідними умовами формування «зеленої хвилі» є: ідентична тривалість світлофорних циклів для групи координованих перехресть та коректно обчислені часові зсуви між суміжними вузлами.

Розглянемо приклад: нехай найбільш завантаженим є маршрут (5,8), (8,9). У цьому випадку перехрестя №8 має подовжену фазу дозвільного сигналу для напрямку (5,8). Відповідно, дозвільний сигнал на перехресті №9 активується з часовим зсувом відносно сигналу напрямку (5,8). Це забезпечує «зелену хвилю» для маршруту (5,8), (8,9) (рис. 3.7).

Рисунок 3.7 – Організація «зеленої хвилі» для маршруту (5,8), (8,9)

Якщо з часом найбільш завантаженим напрямком на перехресті №8 стає маршрут (7,8), контролер перехрестя №8 інформує контролер перехрестя №9 про зміну пріоритету (зміну найтривалішої фази), після чого контролер перехрестя №9 перераховує часовий зсув відносно нового напрямку (7,8). Результатом є «зелена хвиля» для маршруту (7,8), (8,9) (рис. 3.8).

3.2.2 Алгоритм обчислення часового зсуву

Часовий зсув початку циклу для перехрестя відносно попереднього доцільно розраховувати локально, оскільки він залежить від часу проходження відповідної ділянки.

Час проходження ділянки визначається співвідношенням: $T_{Lij} = L_{ij}/V_{ij}$, де L_{ij} – довжина ділянки (константа), V_{ij} – середня швидкість руху. Для режиму «зеленої хвилі» середня швидкість приймається рівною максимально до-

Рисунок 3.8 – Переналаштована «зелена хвиля» для маршруту (7,8), (8,9) зволеній швидкості в населених пунктах – 60 км/год (або 50 км/год для деяких міських зон).

Оптимальне значення часового зсуву має забезпечити пропуск черги транспортних засобів, що очікують перед перехрестям, а також врахувати час прибуття основного потоку з попереднього перехрестя. Ідеально, коли цей потік прибуває після проїзду черги, що мінімізує втрати на гальмування та розгін.

Відповідно, часовий зсув визначається формулою:

$$T_{Oij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} - t_{qij} \quad (3.3)$$

де t_{qij} – час, необхідний для проходження черги транспортних засобів через перехрестя (рис. 3.9).

Рисунок 3.9 – Схема розрахунку часового зсуву між суміжними перехрестями

3.3 Методика розрахунку параметрів статичного світлофорного регулювання

У загальному випадку для перехресть зі стохастичним прибуттям транспортних засобів у багатьох країнах, включаючи Україну, застосовується класична формула Ф. Вебстера.

Формула Вебстера дозволяє визначити як оптимальну тривалість світлофорного циклу, так і раціональний розподіл часу між окремими фазами.

3.3.1 Розрахунок оптимальної тривалості циклу

В умовах міського руху прибуття транспортних засобів до перехрестя має випадковий (стохастичний) характер. Для визначення оптимальної тривалості світлофорного циклу $T_{\text{ц}}$ за критерієм мінімуму сумарних затримок використовують емпіричну формулу Вебстера [8]:

$$T_{\text{ц}} = \frac{1,5 \cdot T_{\text{пр}} + 5}{1 - Y}, \text{ с}, \quad (3.4)$$

де $T_{\text{пр}}$ – сумарна тривалість проміжних тактів (жовтих сигналів) у циклі, с; Y – сумарний фазовий коефіцієнт. Ці параметри обчислюються за формулами [8]:

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^k t_{\text{пр}i}; \quad (3.5)$$

$$Y = \sum_{i=1}^k y_i, \quad (3.6)$$

де k – кількість фаз регулювання у світлофорному циклі.

Формула Вебстера забезпечує оптимальну тривалість циклу за критерієм мінімізації сумарних транспортних затримок на перехресті з усіх напрямків під'їзду.

Тривалість основних тактів (фаз) розраховується за формулою [8]:

$$t_{oi} = \frac{y_i}{Y} (T_{\text{ц}} - T_{\text{пр}}), \text{ с}. \quad (3.7)$$

3.3.2 Визначення фазових коефіцієнтів

Фазовий коефіцієнт y_{ij} являє собою відношення фактичної інтенсивності руху в i -тій фазі по j -тій смузі до потоку насичення цієї смуги [8]:

$$y_{ij} = \frac{I_{ij}}{I_{nij}}. \quad (3.8)$$

Як розрахункове значення фазового коефіцієнта для кожної фази приймається максимальне серед усіх смуг даної фази [8]:

$$y_i = \max_j y_{ij} \quad (3.9)$$

Потік насичення визначається експериментально для кожного напрямку кожної фази шляхом натурних спостережень у періоди формування достатньо довгих черг на підході до перехрестя. Методика вимірювання потоку насичення [7]:

1. Одночасно з увімкненням зеленого сигналу запустити секундомір та фіксувати транспортні засоби, що рухаються по обраній смузі.
2. Зупинити секундомір у момент перетину стоп-лінії останнім автомобілем черги.
3. Зафіксувати показання секундоміра та підрахувати кількість автомобілів, що проїхали за цей час.
4. Провести серію з 10 вимірювань для підвищення статистичної достовірності.

Потік насичення обчислюється як середнє значення інтенсивності проїзду черги, виражене в автомобілях на годину.

3.3.3 Практичний розрахунок параметрів циклу

Застосуємо формулу Вебстера для визначення параметрів світлофорного регулювання модельованого перехрестя.

Розглядуване перехрестя має дві фази: для пропуску транспорту в напрямку захід-схід та в напрямку північ-південь (рис. 3.10).

Рисунок 3.10 – Схема фаз регулювання модельованого перехрестя

Вихідні дані щодо інтенсивності транспортних потоків:

- напрямок захід-схід: $I_1 = 500$ авт./год.;
- напрямок північ-південь: $I_2 = 200$ авт./год.

Визначення потоків насичення:

Для обох фаз модельованого перехрестя потік насичення визначено експериментально за описаною методикою. Обидва напрямки характеризуються однаковою пропускною спроможністю: за 12 с через перехрестя проїжджає 32 автомобілі з черги. Звідси потік насичення:

$$32 \text{ авт.} = 12 \text{ с.}$$

$$X \text{ авт.} = 3600 \text{ с.}$$

$$\text{Отже, } I_H = 1300 \text{ авт./год.}$$

а) Фазовий коефіцієнт для першої фази (з урахуванням запасу 100 авт.):

$$y_1 = \frac{600}{1300} = 0,462;$$

б) Фазовий коефіцієнт для другої фази (з урахуванням запасу 50 авт.):

$$y_2 = \frac{250}{1300} = 0,192;$$

Підсумкові розрахункові фазові коефіцієнти:

$$y_1 = 0,462; y_2 = 0,192.$$

Приймаємо тривалість проміжного такту (жовтого сигналу) $t_{\text{пр}} = 4$ с. Сумарна тривалість проміжних тактів за формулою (3.5):

$$T_{\text{пр}} = 4 + 4 = 8 \text{ с.}$$

Сумарний фазовий коефіцієнт за формулою (3.6):

$$Y = y_1 + y_2 = 0,462 + 0,192 = 0,654.$$

Оптимальна тривалість циклу за формулою (3.4):

$$T_{\text{ц}} = \frac{1,5 \cdot 8 + 5}{1 - 0,654} = 48 \text{ с.}$$

Тривалість основних тактів за формулою (3.7):

$$t_{o1} = \frac{0,462}{0,654}(48 - 8) = 28 \text{ с;}$$

$$t_{o2} = \frac{0,192}{0,654}(48 - 8) = 12 \text{ с;}$$

Верифікація: повна тривалість світлофорного циклу:

$$T_{\text{ц}} = t_{o1} + t_{\text{пр}} + t_{o2} + t_{\text{пр}} = 28 + 4 + 12 + 4 = 48 \text{ с.}$$

Отримані параметри забезпечують оптимальний режим регулювання за критерієм мінімуму сумарних затримок транспортних засобів.

Висновки до розділу

У рамках розв'язання задачі оптимізації дорожнього руху на регульованих перехрестях розглянуто дві взаємопов'язані підзадачі: автономне керування окремим перехрестям та координацію роботи мережі перехресть.

Керування ізольованим перехрестям реалізується виключно засобами нечіткого контролера, що базується на алгоритмі Мамдані.

Координація мережі перехресть здійснюється без застосування апарату нечіткої логіки – шляхом обчислення та корекції часових зсувів початку відповідних фаз світлофорного регулювання для забезпечення режиму «зеленої хвилі».

Для ефективного функціонування нечіткого контролера розроблено повну систему нечіткого логічного виведення. У розділі детально описано всі компоненти алгоритму: специфіковано вхідні та вихідні змінні, сформульовано принципи побудови бази продукційних правил, визначено механізми логічного виведення та дефазифікації.

Додатково наведено методику розрахунку параметрів статичного світлофорного регулювання за формулою Вебстера, що слугує базовим орієнтиром для оцінки ефективності адаптивного нечіткого керування.

4 РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

4.1 Комп'ютерне моделювання адаптивної системи регулювання руху

Імітаційне моделювання виконувалось у середовищі Matlab із застосуванням спеціалізованого пакета Fuzzy Logic Toolbox [6].

Додатково до раніше визначених параметрів для відтворення реалістичної динаміки транспортних потоків використовувались стохастичні моделі на основі розподілу Пуассона. Пуассонівський процес найбільш адекватно описує випадкове прибуття автомобілів до перехрестя [2].

Тривалість світлофорного циклу для досліджуваної групи перехресть, обчислена у розділі 3, становить 48 секунд.

Експериментальне дослідження проводилось для двох режимів роботи:

1. Фіксоване (статичне) регулювання:

- Тривалість фаз та часові зсуви є константними протягом усього періоду моделювання.

2. Адаптивне регулювання з динамічним розподілом фаз:

- Тривалість фаз обчислюється на основі вхідних параметрів нечіткого контролера;
- Додатково можуть враховуватись чіткі вхідні дані для підвищення точності керування.

Критерієм ефективності обрано мінімізацію сумарних транспортних затримок на перехресті, що обчислюються як добуток кількості автомобілів у черзі на час їх очікування:

$$T_{\text{зат}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m t_{\text{зат}ij} \cdot N_{ij} \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де $t_{\text{зат}ij}$ – індивідуальна затримка транспортного засобу j -того потоку в i -тій фазі; N_{ij} – кількість транспортних засобів у черзі відповідного напрямку.

4.1.1 Опис розробленого алгоритму

Вхідними лінгвістичними змінними алгоритму є інтенсивність транспортного потоку та довжина черги на відповідному напрямку. Терм-множина для інтенсивності: {«низька», «помірна», «висока», «критична»}. Терм-множина для черги: {«коротка», «середня», «довга»}.

Функції належності (ФН) для вхідних лінгвістичних змінних представлено на рис. 4.1. Обрано трикутну форму ФН з чітким розмежуванням областей визначення термів.

Прийнято такі граничні умови: інтенсивність до 200 авт./год. однозначно класифікується як «низька», інтенсивність понад 800 авт./год. – як «критична». Для проміжних значень активуються кілька нечітких термів одночасно.

Аналогічно, черга до 3 автомобілів беззастережно вважається «короткою», черга понад 15 автомобілів – «довгою». Проміжні значення описуються комбінацією двох суміжних термів.

Вихідна змінна – тривалість дозвільного сигналу – характеризується терм-множиною: {«мінімальна», «нижче середньої», «вище середньої», «максимальна»}.

Графік функцій належності для вихідної змінної наведено на рис. 4.2.

Мінімальна тривалість дозвільного сигналу прийнята рівною 15 секундам (відповідає центру першого терму).

Рисунок 4.1 – Функції належності вхідних змінних

База продукційних правил містить дванадцять правил нечіткого виведення (табл. 4.1).

Поверхня відгуку системи, що ілюструє залежність тривалості дозвільно-

Рисунок 4.2 – Функції належності вихідної змінної
Таблиця 4.1 – Структура бази продукційних правил

Інтенсивність	Черга	Тривалість сигналу
низька	коротка	мінімальна
низька	середня	нижче середньої
низька	довга	вище середньої
помірна	коротка	нижче середньої
помірна	середня	вище середньої
помірна	довга	максимальна
висока	коротка	вище середньої
висока	середня	максимальна
висока	довга	максимальна
критична	коротка	максимальна
критична	середня	максимальна
критична	довга	максимальна

го сигналу від вхідних параметрів, представлена на рис. 4.3.

Алгоритм нечіткого керування реалізовано у середовищі MATLAB з використанням інструментарію Fuzzy Logic Toolbox [6].

Концептуальна основа алгоритму полягає в наступному: тривалість дозвільного сигналу має пряму залежність від інтенсивності потоку. Оскільки моменти прибуття автомобілів є випадковими, доцільно вважати їх рівномірно розподіленими у часі. Відповідно, вища інтенсивність вимагає більшої тривалості дозвільного сигналу.

Для параметра черги застосовується інша логіка: при черзі до 3 автомобілів корекція тривалості сигналу не потрібна, оскільки така кількість гарантовано встигає перетнути перехрестя. При черзі від 4 до 10 автомобілів необхідне помірне збільшення часу для забезпечення повного пропуску. Така ситуація ха-

Рисунок 4.3 – Поверхня залежності вихідної змінної від вхідних параметрів характерна для помірної інтенсивності, і додатковий час суттєво покращує показники проїзду. При черзі понад 10 автомобілів констатується перевантаження перехрестя при поточних параметрах регулювання, що вимагає значного збільшення тривалості дозвільного сигналу для розвантаження накопиченої черги.

Відповідно, у базі правил тривалість вихідного сигналу не може бути меншою за «рівень» інтенсивності. При високій та критичній інтенсивності довжина черги стає другорядним фактором: навіть при короткій черзі безпосередньо за нею може рухатися щільний потік, що є високоймовірним при великій інтенсивності. Тому для таких режимів визначальним є саме показник інтенсивності.

4.1.2 Експериментальне дослідження

Тривалість проміжного такту (період жовтого та підготовчого сигналів) становить 4 с. Досліджуване перехрестя (див. підрозділ 3.3.3) має двофазну схему регулювання (рис. 4.4). Інтенсивність у напрямку захід-схід перевищує інтенсивність напрямку північ-південь. Модель не враховує склад транспортного потоку за типами транспортних засобів, а також пішохідний рух (припускається, що тривалість дозвільного сигналу достатня для безпечного переходу пішоходів).

Експериментально встановлено, що найбільш реалістичні результати забезпечує експоненціальний розподіл інтервалів між послідовними прибуттями

Рисунок 4.4 – Схема пофазного пропуску транспортних засобів автомобілів [2]. Цей розподіл обрано для всіх подальших досліджень.

Ефективність розробленої нечіткої системи порівнювалась із статичними режимами керування: існуючим на перехресті та розрахованим за стандартною методикою [7].

Досліджено 7 характерних сценаріїв транспортної ситуації [6, 9]:

- стабільна інтенсивність обох потоків протягом 40 хв. (сценарій 1);
- помірне зростання одного з потоків протягом 20 хв. (сценарії 2 та 4);
- різке зростання одного з потоків протягом 20 хв. (сценарій 3);
- монотонне зростання одного з потоків протягом 40 хв. (сценарій 5);
- монотонне спадання одного з потоків протягом 40 хв. (сценарій 6);
- періодичні коливання одного з потоків при сталому середньому значенні (сценарій 7).

Профілі інтенсивності транспортних потоків за 10-хвилинними інтервалами наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Профілі інтенсивності на підходах до перехрестя (авт./год.)

Сценарій	Напрямок захід-схід	Напрямок північ-південь
1	500-500-500-500	200-200-200-200
2	500-600-600-500	200-200-200-200
3	500-900-900-500	200-200-200-200
4	500-500-500-500	200-400-400-200
5	400-500-600-700	200-200-200-200
6	500-500-500-500	400-300-200-100
7	300-700-300-700	200-200-200-200

4.1.3 Аналіз результатів моделювання

Результати імітаційного моделювання роботи перехрестя протягом години (по 5 реалізацій для кожного сценарію) при різних режимах керування узагальнено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняльні результати моделювання

Сценарій	Режим	Затримки захід-схід, с	Затримки північ-південь, с	Сумарні затримки, с
1	статичний	2025	2116	4141
	нечіткий	1576	2257	3833
2	статичний	2406	2369	4775
	нечіткий	1866	2473	4339
3	статичний	3832	2048	5880
	нечіткий	2747	2507	5254
4	статичний	2360	4002	6362
	нечіткий	2463	2543	5006
5	статичний	2500	2175	4675
	нечіткий	2063	2718	4781
6	статичний	2351	2059	4410
	нечіткий	1843	1906	3749
7	статичний	2803	1878	4681
	нечіткий	1911	2335	4246

Аналіз таблиці 4.3 демонструє, що практично в усіх сценаріях (за винятком сценарію 5) нечітке керування забезпечує кращі показники порівняно зі статичним регулюванням. Модель нечіткого контролера оптимізувалась переважно для сценарію 3 із значним стрибком інтенсивності. Для цього випадку зафіксовано суттєвий вигреш у затримках: 626 секунд або 11%.

Розглянемо детальніше інші сценарії. При стабільних інтенсивностях, що використовувались для розрахунку параметрів статичного режиму, нечітка си-

стема забезпечує помітний виграш: 308 секунд або 7%. При помірному зростанні інтенсивності на більш завантаженому напрямку захід-схід також спостерігається перевага нечіткого керування: 436 секунд або 9%.

На підставі аналізу сценаріїв 1, 2 та 3 можна констатувати: нечіткий контролер є ефективнішим навіть при стабільних інтенсивностях. При зростанні інтенсивності на пріоритетному напрямку перевага нечіткого керування збільшується.

Особливо показовим є сценарій 4, що характеризується значним зростанням інтенсивності на менш завантаженому напрямку. У цьому випадку нечіткий контролер демонструє найвищу адаптивність та ефективність: виграш становить 1356 секунд або 21%.

Сценарії з монотонною зміною інтенсивності (5 та 6) показують неоднорідні результати. При поступовому зростанні інтенсивності на пріоритетному напрямку статичний режим виявляється дещо кращим: різниця —106 секунд або —2%. Натомість при поступовому спаданні інтенсивності на другорядному напрямку нечітке керування має суттєву перевагу: 661 секунда або 15%.

Сценарій 7 з періодичними коливаннями інтенсивності навколо базового значення (500 авт./год.) демонструє задовільну ефективність нечіткого підходу: виграш 435 секунд або 9%.

Усереднений виграш від застосування нечіткого керування по всіх сценаріях становить 531 секунду або 10%.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати: нечіткий контролер не погіршує ефективності регулювання транспортного потоку порівняно зі статичним режимом, а при значних коливаннях інтенсивності забезпечує суттєвий виграш. Оскільки реальні транспортні потоки характеризуються постійними флуктуаціями інтенсивності, впровадження нечіткої системи керування дозволить підвищити ефективність роботи перехрестя та скоротити час очікування для учасників руху.

4.2 Архітектура програмного забезпечення

4.2.1 Обґрунтування вибору інструментальних засобів

На етапі підготовки було проаналізовано кілька спеціалізованих середовищ моделювання транспортного руху. Однак усі розглянуті програмні проду-

кти мали суттєві обмеження: комерційна ліцензія, відсутність необхідної функціональності або вимога обов'язкової реєстрації.

З огляду на зазначені обмеження було прийнято рішення про розробку власного середовища імітаційного моделювання для дослідження простого перехрестя з нечітким керуванням.

Платформою розробки обрано Matlab, оскільки це середовище містить повнофункціональний пакет для роботи з нечіткою логікою, надає засоби для програмування динаміки транспортного руху та має розвинені можливості візуалізації [6, 9].

У розробленому програмному продукті для реалізації нечіткого контролера використовувався модуль Fuzzy Logic Toolbox. Візуалізація процесу моделювання реалізована засобами стандартної графічної підсистеми Matlab. Логіка роботи контролерів та динаміка руху запрограмовані мовою Matlab.

4.2.2 Структура алгоритму моделювання

Узагальнену блок-схему алгоритму моделювання представлено на рис. 4.5. Схема відображає верхньорівневу архітектуру без деталізації внутрішнього алгоритму нечіткого виведення, оскільки останній реалізовано вбудованими засобами Matlab та інкапсульовано у модулі нечіткої логіки.

Процес керування транспортним потоком структуровано у вигляді послідовності тактів моделювання. Кожен такт включає такі операції:

1. Оновлення позицій транспортних засобів – перерахунок координат усіх автомобілів з урахуванням дистанції до попереднього транспортного засобу та стану світлофорних сигналів (для автомобілів у зоні перехрестя).
2. Генерація нових транспортних засобів – додавання автомобілів до моделі відповідно до поточної інтенсивності та заданого ймовірнісного розподілу.
3. Акумуляція затримок – на кожному такті обчислюються поточні затримки на основі кількості автомобілів, що очікують на заборонний сигнал.
4. Обчислення параметрів наступного циклу та перемикання сигналів – визначення тривалості фаз наступного циклу за допомогою модуля нечіткої

логіки та відповідна зміна стану світлофора. У режимі статичного регулювання тривалість фаз залишається константною.

4.3 Графічний інтерфейс та візуалізація

4.3.1 Опис інтерфейсу користувача

При запуску програми відкривається вікно з графічним відображенням перехрестя та початковими маркерами позицій.

У нижній частині екрана розміщено інформаційну панель та кнопки керування моделюванням. Перший числовий індикатор відображає поточний модельний час.

Для запуску моделювання слід натиснути кнопку 'Start Animation...' (рис. 4.6). Зупинка моделювання виконується кнопкою 'Stop'. Для завершення роботи програми призначена кнопка 'Close' (рис. 4.7).

Рисунок 4.6 – Початковий стан вікна моделювання

Після завершення моделювання результати відображаються в інформаційній панелі (рис. 4.8):

Перше значення у верхньому рядку – сумарні транспортні затримки за період моделювання для напрямку «Захід - Схід» (з точністю до десятих часток секунди).

Друге значення у верхньому рядку – сумарні транспортні затримки для

Рисунок 4.7 – Вікно моделювання у процесі симуляції

Рисунок 4.8 – Фінальний стан після завершення моделювання

напрямку «Північ - Південь» (з точністю до десятих часток секунди).

Значення у другому рядку – загальна тривалість періоду моделювання.

4.3.2 Візуальна діагностика затримок

На рисунку 4.9 зафіксовано характерну ситуацію при статичному режимі керування. Моделюється сценарій 3: на напрямку захід-схід щойно увімкнувся дозвільний сигнал. Візуально спостерігається значна черга на цьому напрямку. Черги такого масштабу (близько 20 автомобілів) генерують критичні затримки на перехресті. При цьому черга не встигає повністю проїхати за одну фазу дозвільного сигналу, внаслідок чого автомобілі в кінці черги затримуються на два послідовні цикли заборонного сигналу – вкрай негативний сценарій. Розроблене програмне забезпечення дозволяє у реальному часі відстежувати формування затримок на різних напрямках при різних профілях інтенсивності та за потреби коригувати параметри контролера.

Рисунок 4.9 – Візуалізація черги на підході до перехрестя

Висновки до розділу

У даному розділі представлено розроблений алгоритм нечіткого керування транспортним рухом на регульованому перехресті. Детально описано структуру алгоритму, проаналізовано результати його функціонування. Експериментальні дані отримано шляхом імітаційного моделювання у спеціально розробленому програмному середовищі на платформі Matlab. Результати моделювання підтвердили, що адаптивне нечітке регулювання забезпечує менші транспортні затримки порівняно зі статичним режимом.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок: нечіткий контролер є ефективнішим при будь-яких варіаціях інтенсивності транспортного потоку, а особливо – при піковому зростанні інтенсивності на одному з напрямків.

Для налаштування нечіткого контролера достатньо експертних знань для формування бази правил, яка може бути оптимізована для найбільш типових транспортних ситуацій за результатами імітаційного моделювання.

Таким чином, регулювання на основі нечіткої логіки суттєво скорочує сумарний час транспортних затримок на перехресті та є доцільним для впровадження на перехрестях з варіативними режимами інтенсивності руху.

5 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Процес створення програмних продуктів та технічних засобів вимагає ретельного аналізу умов експлуатації розроблених систем, оскільки охорона праці є невід'ємною складовою виробничого процесу. Для забезпечення належних умов трудової діяльності необхідно провести комплексний аналіз робочого простору на предмет виявлення потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів. За результатами такого обстеження розробляються заходи та засоби, спрямовані на повну ліквідацію або мінімізацію негативного впливу виявлених факторів на здоров'я працівників.

Відповідно, у даному розділі виконується комплексний аналіз робочого місця інженера-програміста, який працює з розробленим у рамках даної дисертації програмним забезпеченням на персональній ЕОМ. Аналіз охоплює питання організації робочого простору, освітлення, пожежної безпеки, параметрів мікроклімату, акустичного середовища та електробезпеки.

5.1 Загальна характеристика виробничого приміщення

5.1.1 Параметри робочого простору

Трудова діяльність за комп'ютером супроводжується впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Характерною особливістю такої роботи є значне інтелектуальне напруження та нервово-емоційне навантаження на оператора.

Планувальна схема приміщення представлена на рис. 5.1.

Геометричні параметри приміщення:

- висота (H) – 2,9 м;
- ширина (W) – 8 м;
- довжина (L) – 6,5 м.

Габарити віконних прорізів:

- висота (H_B) – 2 м;

- ширина (W_B) – 2,6 м.

Габарити дверного прорізу:

- висота (H) – 2.4 м;
- ширина (W) – 1.3 м.

Загальна площа приміщення становить: $S = L \cdot W = 52 \text{ (м}^2\text{)}$.

Об'єм приміщення: $V = S \cdot H = 150,8 \text{ (м}^3\text{)}$.

Віконні прорізи орієнтовані на північну сторону, їх загальна площа складає $10,4 \text{ м}^2$.

Кількість організованих робочих місць: 7.

Кількість одиниць комп'ютерної техніки: 7.

Враховуючи комп'ютерне оснащення приміщення, відповідно до вимог [11], мінімальна площа на одне робоче місце має становити не менше 6.0 м², а об'єм – не менше 20.0 м³. У розглядуваному приміщенні на кожного працівника припадає 7.42 м² площі та 21.54 м³ об'єму, що відповідає нормативним вимогам.

Приміщення оснащене централізованою системою опалення та кондиціонування повітря.

Суміжні приміщення мають офісне призначення і не містять обладнання, що генерує шум або вібрацію понад допустимі рівні.

Оздоблення стелі та стін виконано з матеріалів, що забезпечують дифузне відбиття світла: коефіцієнт відбиття стелі становить 0,7, стін – 0,5.

Підлогове покриття – лінолеум (для приміщень з комп'ютерною технікою не допускається застосування синтетичних покриттів, здатних виділяти шкідливі речовини в повітря робочої зони).

Стіни оброблені світлою фарбою. Середньозважений коефіцієнт відбиття оздоблювальних поверхонь становить 0,6.

Згідно з [19] для робіт категорії 1а (легкі фізичні роботи) рекомендується середня насиченість кольору основних поверхонь інтер'єру.

5.1.2 Організація робочого місця

Режим роботи – постійний. Кожне робоче місце укомплектоване робочим столом та ергономічним поворотним кріслом. Конструктивні рішення робочого стола відповідають сучасним ергономічним стандартам та забезпечують раціональне розташування на робочій поверхні комп'ютерного обладнання (монітори, клавіатури) та робочої документації. Вимоги до організації робочого місця регламентуються п. 4.5 [12].

5.2 Ідентифікація шкідливих та небезпечних виробничих факторів

5.2.1 Параметри мікроклімату

Виконувані роботи класифікуються як фізичні роботи категорії «легка 1а» [13], оскільки виконуються у сидячому положенні без значних фізичних навантажень.

З огляду на постійний характер роботи, аналізуються оптимальні показники мікроклімату (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Нормативні показники мікроклімату робочої зони

Сезон	Температура повітря, $t^{\circ}\text{C}$	Відносна вологість, φ , %	Швидкість руху повітря, V , м/с
Холодний	22–24	60–40	0.1
Теплий	23–25	60–40	0.1

Для забезпечення оптимальних параметрів у холодний період використовується централізоване водяне опалення низького тиску, у теплий період – настінна спліт-система кондиціонування з холодопродуктивністю 5,5 кВт, розташована над робочою зоною.

Потенційним джерелом забруднення повітря робочої зони можуть бути леткі речовини, що виділяються з лінолеумного покриття підлоги.

Для мінімізації негативного впливу передбачається систематичне природне провітрювання приміщення.

5.2.2 Аналіз фізичних факторів

Основними джерелами шуму в приміщенні є комп'ютерне обладнання та друкувальний пристрій. Сумарний рівень шуму від усіх ЕОМ становить $L_1 = 35$ дБА, шум принтера – $L_2 = 50$ дБА.

Режим роботи комп'ютерної техніки – безперервний (8 годин на добу у робочі дні).

Режим роботи принтера – періодичний (сумарно близько 1 години на добу).

Для коректної оцінки необхідно визначити еквівалентний рівень звуку.

Застосовуємо розрахункову формулу:

$$L = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \cdot 10^{0,1L} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{8} \cdot 10^5 \right) = 41 \text{ дБА.} \quad (5.1)$$

Обчислюємо сумарний рівень шуму:

$$L = 10 \lg (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2}) = 10 \lg (10^{3,5} + 10^{4,1}) = 42 \text{ дБА.} \quad (5.2)$$

Нормативний еквівалентний рівень звуку [14]: для програміста ЕОМ гра-

ничний рівень звукового тиску становить 50 дБА.

Результати аналізу:

- а) фактичний максимальний рівень шуму у приміщенні – 42 дБА – не перевищує нормативного значення;
- б) джерела вібрації у виробничому приміщенні відсутні;
- в) потужні джерела інфрачервоного випромінювання (верстати, силові трансформатори, нагріті металеві поверхні тощо) відсутні. Джерелами теплового випромінювання є персональні комп'ютери та периферійне обладнання. Кожен ПК виділяє в повітря приміщення до 0,3 кВт теплової енергії разом із потоком повітря від системи охолодження. Інтенсивність теплового опромінення не перевищує 100 Вт/м^2 , що відповідає нормативам для робіт категорії 1а [15]. Для підтримання комфортних умов рекомендується провітрювання кожні 1–2 години;
- г) джерелами електромагнітних полів є комп'ютерна техніка та периферійні пристрої. Для зменшення електромагнітного впливу всі металеві корпуси обладнання підключено до контуру захисного заземлення.

5.2.3 Аналіз освітлення

Система природного освітлення – одностороннє бокове. Система штучного освітлення – загальна рівномірна.

Для природного освітлення табличне значення коефіцієнта природної освітленості (КПО) становить 1,0%. Нормоване значення КПО з урахуванням поправочного коефіцієнта: $= \cdot m = 1,0 \cdot 0,9 = 0,9\%$; де $m = 0,9$ для приміщень, розташованих у м. Києві, з вікнами північної орієнтації.

Розрахунок природного освітлення

Природне освітлення здійснюється через віконні прорізи у зовнішніх стінах (одностороннє бокове). Загальна площа світлопрозорих конструкцій становить $10,4 \text{ м}^2$. Вікна обладнані регульованими жалюзі.

Розрахунок достатності природного освітлення при односторонньому боковому освітленні полягає у визначенні необхідної площі світлових прорізів за

формулою:

$$100 \cdot \frac{S}{S} = \frac{K K K K}{W r_1}, \quad (5.3)$$

де S – площа підлоги = 52 м²; – нормоване значення КПО = 0.9; K – коефіцієнт запасу (для виробничих приміщень $K = 1,5$); K – світлова характеристика вікон = 15; K – коефіцієнт затінення сусідніми будівлями = 1; W – загальний коефіцієнт світлопропускання = 0.6; r_1 – коефіцієнт підвищення КПО за рахунок світла, відбитого від внутрішніх поверхонь = 2.

$$S = \frac{S K K K K}{100 \cdot W \cdot r_1} = \frac{52 \cdot 0,9 \cdot 1,5 \cdot 15 \cdot 1}{100 \cdot 0,6 \cdot 2} = 8,775 \text{ м}^2. \quad (5.4)$$

Висновок: фактична площа віконних прорізів (10,4 м²) перевищує розрахункову мінімальну площу (8,775 м²), що забезпечує достатній рівень природного освітлення.

Розрахунок штучного освітлення

Робота в приміщенні передбачає розпізнавання об'єктів розміром 0,3–0,5 мм, що класифікується як робота високої точності [16]. Нормативний рівень освітленості на робочій поверхні становить 300–500 лк. Освітлення приміщення забезпечується комбінацією природного та штучного загального освітлення.

Оздоблення стін виконано світло-жовтою фарбою, що сприяє зниженню зорового напруження при роботі з монітором.

Приміщення обладнане 12 дволамповими світильниками типу ЛПО 2x40-001 габаритами 1230x194x75 мм, змонтованими у два ряди. У кожному світильнику встановлено люмінесцентні лампи типу ЛБ потужністю 40 Вт. Рівень освітленості від штучного освітлення визначається за формулою:

$$E = \frac{N n K}{S K z}, \quad (5.5)$$

де – світловий потік однієї лампи = 3000 лм; N – кількість світильників = 12; n – кількість ламп у світильнику = 2; K – коефіцієнт використання світлового потоку = 0.5; S – площа приміщення = 52 м²; K – коефіцієнт запасу = 1,5; z – коефіцієнт нерівномірності освітлення = 1,1.

Визначаємо індекс приміщення:

$$i = \frac{L \cdot W}{H(L + W)} = \frac{8 \cdot 6,5}{2,9 \cdot (8 + 6,5)} = 1,23. \quad (5.6)$$

Для світильників типу ЛПО 40 при даному індексі приміщення коефіцієнт використання світлового потоку становить 45%.

$$E = \frac{3000 \cdot 12 \cdot 2 \cdot 0,45}{52 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 377 \text{ лк.} \quad (5.7)$$

Висновок: розрахований рівень освітленості (377 лк) знаходиться в межах нормативного діапазону (300–500 лк).

5.2.4 Електробезпека

Електропостачання приміщення здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50 Гц, з максимальним струмом споживання 24 А. Головний комутаційний апарат розташований в електрощитовій.

Електроспоживачами є система освітлення, друкувальний пристрій та 7 персональних комп'ютерів.

Усе комп'ютерне обладнання відповідає класу захисту від ураження електричним струмом – «І». Клас І передбачає, що при підключенні обладнання до електромережі первинно забезпечується з'єднання корпусу із захисним заземленням (нульовим захисним провідником), а при відключенні – роз'єднання відбувається в останню чергу.

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення класифікується як «без підвищеної небезпеки».

Приміщення характеризується нормальною вологістю, відсутністю струмопровідного пилу та хімічно агресивних речовин.

Заходи безпеки, що забезпечують безпечну експлуатацію електрообладнання у штатному режимі:

- все обладнання експлуатується виключно із закритими корпусами; принтери обладнані системою блокування живлення при відкритому корпусі;
- з'єднувальні кабелі мають подвійну ізоляцію;
- струмопровідні елементи обладнання ізольовані від випадкового дотику пластиковими коробами з важкогорючих матеріалів з помірною димоутворювальною здатністю.

Обладнання підключено до контуру захисного заземлення через кабель живлення. Конструкція роз'єму передбачає, що контакт заземлення має більшу довжину порівняно з фазним та нульовим контактами, що забезпечує його першочергове з'єднання при підключенні та останнє роз'єднання при відключенні.

5.3 Протипожежний захист

Пожежі на виробничих об'єктах та в побуті становлять загрозу життю і здоров'ю людей та можуть спричинити значні матеріальні збитки. Пожежа в офісному приміщенні є особливо небезпечною через присутність значної кількості персоналу, наявність цінного обладнання та важливої інформації.

Приміщення належить до категорії В за пожежною безпекою [17], оскільки містить горючі матеріали:

- а) волокнисті матеріали (папір): робоча документація, витратні матеріали для друку;
- б) тверді горючі матеріали (деревина): меблі (столи, стелажі, шафи);
- в) полімерні матеріали: корпуси телефонних апаратів, принтерів, моніторів, оздоблювальні матеріали.

Вибухонебезпечні речовини в приміщенні відсутні.

Для даної категорії пожежної безпеки будівлі з комп'ютерним обладнанням мають відповідати не нижче III ступеня вогнестійкості. Несучі конструкції – залізобетонні, внутрішні перегородки – цегляні.

Потенційними джерелами займання є короткі замикання та перевантаження в електрообладнанні та електропроводці.

Ймовірними причинами загоряння можуть бути несправності комп'ютерного обладнання або побутових електроприладів, що призводять до перевантаження електромережі.

Можливі класи пожежі: клас А – горіння твердих речовин органічного походження, що супроводжується тлінням (деревина, тканини, папір); клас Е – горіння електроустановок під напругою.

5.3.1 Система запобігання пожежам

Система профілактики пожеж реалізується комплексом заходів:

- приміщення обладнано автоматичними вимикачами, що відключають електромережу при виникненні короткого замикання;
- електричні кабелі мають мінімальну необхідну довжину та прокладені без перетинів на підлозі;
- щоденно проводиться вологе прибирання для запобігання накопиченню горючого пилу.

5.3.2 Система протипожежного захисту

Система активного протипожежного захисту включає:

- автоматичну пожежну сигналізацію з димовими сповіщувачами на стелі та звуковим оповіщувачем у коридорі;
- первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники), що пройшли своєчасну перевірку та опломбування.

Для раннього виявлення пожежі встановлено 3 оптико-електронні димові сповіщувачі марки ДПП-43М (ІП-212-43М), вмонтовані у стелю.

Для ліквідації пожеж у коридорах передбачені пожежні шафи з внутрішніми пожежними кранами. Шафи з кнопкою виклику пожежної тривоги розташовані на висоті 1,5 м від підлоги у легкодоступних місцях.

Для гасіння пожежі в початковій стадії приміщення укомплектовано 6 вуглекислотними вогнегасниками ОУ-5 (діапазон робочих температур: $-20... + 50^{\circ}\text{C}$).

Організаційно-технічні заходи пожежної безпеки включають:

- первинний інструктаж кожного працівника перед початком трудової діяльності;
- обов'язковий щорічний повторний інструктаж з документальним оформленням у журналі;

- наявність інструкцій з пожежної безпеки, обов'язкових для ознайомлення всім персоналом;
- призначення відповідальної особи за пожежну безпеку.

5.4 Оцінка стійкості до надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Після ідентифікації потенційних небезпечних та шкідливих факторів на робочих місцях необхідно проаналізувати захищеність працівників у надзвичайних ситуаціях, оскільки збереження життя та здоров'я людей є пріоритетним завданням охорони праці.

Враховуючи, що на відстані 100 м від будівлі, де розташований офіс, знаходиться виробничий цех заводу полімерних виробів із запасом 1 т зрідженого вуглеводневого газу, виконано аналіз можливих наслідків аварії з вибухом [18].

5.4.1 Прогнозування наслідків вибуху

Вихідні параметри:

- відстань від виробничого приміщення до епіцентру можливого вибуху $r_0 = 100$ м;
- тип вибухової речовини – зріджений вуглеводневий газ;
- маса вибухової речовини $q = 1$ т.

Характеристики конструктивних елементів:

- тип будівлі: виробнича, одноповерхова, цегляна;
- межа вогнестійкості несучих стін – 1 год., перекриттів – 0,25 год.;
- обладнання: комп'ютерна техніка, наземні кабельні комунікації;
- категорія пожежної небезпеки будівлі – В;
- щільність забудови території = 35%.

Визначення зон ураження та можливого попадання об'єкта в зону руйнувань:

Розрахунок величини надмірного тиску ударної хвилі (ΔP).

Обчислюємо радіус зони детонаційної хвилі (зона I):

$$r_1 = 17,5 \sqrt[3]{q} = 17,5 \sqrt[3]{1} = 17,5 \text{ м} \quad (5.8)$$

Обчислюємо радіус зони дії продуктів вибуху (зона II):

$$r_{II} = 1,7r_1 = 1,7 \cdot 17,5 = 30 \text{ м} \quad (5.9)$$

Порівняння відстані до об'єкта ($R_0 = 100 \text{ м}$) з радіусами зони I (17,5 м) та зони II (30 м) показує, що об'єкт знаходиться за межами цих зон і може потрапити в зону повітряної ударної хвилі (зона III).

Визначаємо надмірний тиск у зоні III на відстані $R_0 = 100 \text{ м}$:

$$\Delta P = \frac{700}{3 \left(\sqrt{1 + 2,98 \cdot 0,24 \frac{r_{max}}{r_0}} - 1 \right)} = \frac{700}{3 \left(\sqrt{1 + 2,98 \cdot 1,37^3} - 1 \right)} = 30 \text{ кПа.} \quad (5.10)$$

Висновок: у точці розташування виробничого приміщення прогнозований максимальний надмірний тиск становить 30 кПа, що відповідає зоні середніх руйнувань.

Оцінка ступеня руйнувань та очікуваних збитків:

Визначаємо прогнозований ступінь руйнувань конструктивних елементів за величиною надмірного тиску $\Delta P = 30 \text{ кПа}$.

Очікувані збитки визначаються за таблицею 5.2 залежно від ступеня руйнувань.

Таблиця 5.2 – Співвідношення ступеня руйнувань та обсягу збитків

Ступінь руйнувань	Слабкі	Середні	Сильні	Повні
Очікувані збитки, %	10–30	30–50	50–90	90–100

Прогнозування втрат серед персоналу.

При надмірному тиску $\Delta P = 30 \text{ кПа}$ очікувані травми:

- на відкритій місцевості – легкого ступеня (легка контузія, часткова втрата слуху);

- всередині будівлі при середньому ступені руйнувань – до 50% персоналу можуть отримати додаткові травми від уламків будівельних конструкцій, розбитого скла та предметів інтер'єру.

Прогнозування пожежної обстановки:

З урахуванням наступних факторів:

- категорія виробництва за пожежною безпекою – В;
- очікуваний надмірний тиск $\Delta P > 20$ кПа;
- щільність забудови = 35%;
- ступінь вогнестійкості будівель – III,

прогнозується виникнення окремих осередків пожеж з можливим переходом у суцільні через 1–2 години.

Зведені результати прогнозування наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати оцінки наслідків можливої аварії

Зона руйнувань. Надмірний тиск	Елементи об'єкта	Ступінь руйнуван- ня	Очікувані збитки, %	Пожежна обста- новка	Ураження персоналу
Зона середніх руйнувань, $\Delta P = 30$ кПа	Будівля	середні	30–50	Окремі осередки з переходом у суцільну пожежу через 1–2 год.	Легкі травми. До 50% персоналу всередині будівлі – ураження уламками скла та конструкцій
	Кабельні комуні- кації	середні	30–50		
	Комп'ютерна те- хніка	сильні	50–90		

Висновки до розділу

За результатами аналізу встановлено, що у разі аварії з вибухом виробниче приміщення може опинитися в зоні середніх руйнувань. Комп'ютерна техніка зазнає сильних руйнувань, що свідчить про недостатню стійкість об'єкта до впливу ударної хвилі.

Для підвищення захищеності виробничого приміщення рекомендовано комплекс заходів:

- посилення несучих конструкцій будівлі встановленням додаткових колон, ферм та підкосів;

- прокладання інженерних комунікацій та кабельних мереж підземним способом;
- створення 50%-ного резервного фонду комп'ютерного обладнання із зберіганням у захищеному місці;
- монтаж захисних металевих сіток на вікнах для запобігання травмування персоналу уламками скла;
- ініціювання питання щодо перенесення вибухонебезпечного об'єкта на безпечну відстань або зменшення обсягу зберігання вибухової речовини до безпечної кількості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами комплексного дослідження сучасних систем світлофорного регулювання сформульовано науково-технічну задачу оптимізації керування транспортними потоками на регульованих перехрестях.

Досліджено методологію побудови інтелектуального контролера перехрестя із застосуванням апарату нечіткої логіки, що включає розробку математичної моделі контролера та створення спеціалізованого програмного середовища для імітаційного моделювання.

Розроблено поетапний алгоритм проектування нечіткого контролера. Методика передбачає послідовний вибір та обґрунтування параметрів системи нечіткого виведення на кожному етапі проектування.

Запропонований підхід є універсальним і може застосовуватись як для створення нових контролерів, так і для адаптації існуючих систем керування до нових типів перехресть або при модифікації схеми пофазного роз'їзду.

У рамках кваліфікаційної роботи магістра реалізовано програмний комплекс для імітаційного моделювання та аналізу процесів регулювання транспортних потоків. Ефективність застосування нечіткої логіки продемонстровано на основі моделювання типових транспортних ситуацій, що відповідають реальним умовам функціонування міських перехресть.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження нечітких контролерів у системи керування дорожнім рухом. Дисертаційна робота може слугувати науковим обґрунтуванням для практичного застосування інтелектуальних систем регулювання перехресть, а також методологічною основою для подальших досліджень у даному напрямку.