

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**“РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ АДАПТИВНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ”**

Виконав:

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

МАРТИНЮК Владислав Миколайович

Керівник:

кандидат технічних наук, доцент

ФІРМАН Юрій Петрович

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ	9
1.1 Еволюція принципів керування в транспортних системах	9
1.2 Транспортний потік як об'єкт керування: кількісний опис	10
1.3 Стохастична природа транспортних потоків	13
2 СТРАТЕГІЇ ЛОКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМИ ОБ'ЄКТАМИ	17
2.1 Режим постійної сигнальної програми	17
2.2 Адаптивне керування за принципом виявлення розривів	18
2.3 Багатопараметричні адаптивні алгоритми	21
2.4 Спеціалізовані стратегії розподілу фаз	22
3 МЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ	24
3.1 Адаптація до нестационарності попиту	24
3.2 Локальна корекція координованих програм	26
3.3 Методологія розрахунку програм координації	28
3.4 Керування в умовах перенасичення мережі	30
3.5 Динамічна організація руху	31
3.6 Кількісна оцінка транспортних затримок	33
4 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РУХУ	35
4.1 Технології дистанційного керування	36
4.2 Мікропроцесорні технології в автомобілебудуванні	46

5	МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АСУДР	57
5.1	Систематизація факторів ефективності	57
5.2	Психологічні аспекти взаємодії водіїв із системою регулювання	63
5.3	Методика розрахунку окупності інвестицій	64
5.4	Аналіз факторів, що впливають на показники ефективності	69
5.5	Узагальнені результати впровадження АСУДР	70
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	71
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
	ДОДАТКИ	77

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена комплексному аналізу автоматизованих систем керування дорожнім рухом як інтегрованих комплексів, що об'єднують дві функціональні підсистеми – інфраструктурну складову, розгорнуту на об'єктах вулично-дорожньої мережі, та бортові інформаційно-керуючі системи транспортних засобів. У роботі систематизовано теоретичні засади побудови систем та об'єктів керування транспортними потоками, виконано порівняльний аналіз локальних систем регулювання, вдосконалено методику координованого світлофорного керування, обґрунтовано принципи формування адаптивних схем організації руху, розроблено методику оцінювання транспортних затримок на регульованих перехрестях, проаналізовано архітектуру сучасних автоматичних систем керування рухом, визначено функціональні вимоги до бортових мікропроцесорних комплексів, виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження АСУДР. Сформульовано висновки та рекомендації, укладено бібліографічний перелік.

Ключові слова: інтелектуальна транспортна система, автоматизоване керування рухом, часові втрати транспорту, адаптивне світлофорне регулювання, дорожня інфраструктура, бортові інформаційні системи.

SUMMARY

The master's research focuses on a comprehensive analysis of automated traffic control systems as integrated complexes combining two functional subsystems – infrastructure components deployed on the road network and onboard vehicle information and control systems. The study systematizes theoretical foundations for building traffic flow control systems and objects, performs a comparative analysis of local control systems, improves the methodology of coordinated traffic signal control, substantiates principles for forming adaptive traffic organization schemes, develops a methodology for assessing traffic delays at signalized intersections, analyzes the architecture of modern automatic traffic control systems, defines functional

requirements for onboard microprocessor complexes, and provides a feasibility study for ASUDR implementation. Conclusions and recommendations are formulated, and a bibliography is compiled.

Key words: intelligent transportation system, automated traffic management, vehicle time losses, adaptive signal control, road infrastructure, onboard information systems.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЛП	– Арифметико-логічний пристрій
АСУДР	– Автоматизована система управління дорожнім рухом
БОП	– Бортовий обчислювальний пристрій
ДТЗ	– Дорожній транспортний засіб
ДТП	– Дорожньо-транспортна пригода
ЕОМ	– Електронно-обчислювальна машина
ІТС	– Інтелектуальна транспортна система
СРС	– Спеціалізований рухомий склад
ТЕП	– Техніко-економічні показники
ТЗ	– Транспортний засіб

ВСТУП

Стрімка динаміка розвитку автомобільної галузі в сучасних умовах актуалізує питання доцільності та ефективності впровадження автоматизованих і автоматичних систем керування дорожнім рухом (АСУДР). Лише шляхом раціональної інтеграції досягнень електроніки, інформаційних технологій та транспортної науки можливо в найближчій перспективі створити вітчизняну інтелектуальну транспортну систему, здатну перевершити існуючі світові аналоги за техніко-економічними показниками.

Для України характерна висока інтенсивність зростання рівня автомобілізації, який у багатьох містах уже досягає 300 і більше транспортних засобів на 1000 мешканців. Процес регулювання темпів автомобілізації залишається недостатньо опрацьованим, що створює передумови для формування критичних умов у сфері забезпечення безпеки руху транспортних та пішохідних потоків. На цьому тлі протяжність вулично-дорожньої мережі міст та населених пунктів залишається практично незмінною, а засоби регулювання руху здебільшого є морально та фізично застарілими. У випадках модернізації світлофорного обладнання відсутній системний підхід до його інтеграції, що пояснюється дефіцитом сучасних рішень у галузі організації дорожнього руху і є одним із факторів зростання аварійності.

Предметом дослідження є автоматична (автоматизована) система керування дорожнім рухом як комплекс, що інтегрує дві масштабні підсистеми – зовнішню інфраструктуру, розташовану на об'єктах вулично-дорожньої мережі, та бортові системи транспортних засобів. Такий комплексний підхід обумовлений необхідністю врахування взаємного впливу зазначених підсистем на рівень безпеки дорожнього руху.

Інформаційною базою магістерської кваліфікаційної роботи стали матеріали наукової періодики, довідкових видань, монографій, опублікованих результатів науково-дослідних робіт та інших джерел, присвячених проблематиці автоматизації процесів керування транспортними та пішохідними потоками.

1 КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

1.1 Еволюція принципів керування в транспортних системах

Сучасна концепція керування базується на ідеї цілеспрямованої трансформації стану керованого об'єкта задля реалізації визначених цільових показників. У контексті дорожнього руху такими об'єктами виступають сукупності транспортних засобів та пішоходів, що переміщуються вулично-дорожньою мережею [26, 28].

Історично склалося два взаємопов'язані вектори розвитку автоматизації у транспортній сфері. Перший охоплює інфраструктурні рішення — комплекси технічних засобів, інтегрованих у дорожню мережу для координації руху учасників. Другий стосується бортових систем транспортних засобів, покликаних розвантажити водія від частини когнітивних задач та підвищити безпеку маневрування. Обидва напрямки тісно взаємодіють: ефективність інфраструктурних систем значною мірою визначається здатністю водіїв адекватно реагувати на керуючі сигнали, тоді як бортова автоматика може використовувати дані від придорожнього обладнання [28].

Ступінь залучення людини-оператора до контуру керування дозволяє виокремити три принципово різні підходи. За повного ручного керування всі рішення приймає та реалізує людина. Автоматизований (напівавтоматичний) режим передбачає розподіл функцій: технічні засоби виконують збір даних, їх первинну обробку та реалізацію команд, однак ключові рішення залишаються прерогативою оператора. Повна автоматизація виключає людину з операційного циклу — її роль зводиться до налаштування алгоритмів, моніторингу та втручання у нештатних ситуаціях.

Тривалий час автомобільна техніка розвивалася шляхом удосконалення механічних систем за збереження ручного керування базовими функціями. Електронні компоненти виконували переважно допоміжну роль — контроль параметрів, сигналізацію, захист від аварійних режимів [30]. Типовим прикладом

служує термореле системи охолодження, що попереджає про перегрів двигуна, або струмове реле, що захищає електричні кола від перевантаження.

Якісний стрибок стався із впровадженням мікропроцесорної техніки, що уможливила створення складних багатопараметричних регуляторів. За функціональною ознакою їх поділяють на кілька категорій [19, 23, 24]. Стабілізатори утримують регульовану величину в околі заданого значення, компенсуючи зовнішні збурення. Програмні регулятори відпрацьовують наперед задану траєкторію зміни параметрів. Слідкуючі системи формують керуючий вплив як функцію від вимірюваних зовнішніх величин.

Найскладнішими є адаптивні системи, здатні модифікувати власну структуру або параметри залежно від умов функціонування. Такі системи особливо перспективні для транспортних застосувань, де умови експлуатації варіюються в широких межах [23, 24].

1.2 Транспортний потік як об'єкт керування: кількісний опис

Забезпечення безаварійного руху потребує своєчасного інформування учасників про дорожню обстановку. Спектр засобів передачі такої інформації еволюціонував від примітивних дорожніх знаків та жестів регулювальника до складних автоматизованих комплексів, здатних адаптуватися до поточної ситуації в реальному часі [25, 26].

Розрізняють два рівні організації керування рухом. Локальні системи оптимізують роботу окремих елементів мережі — перехресть, розв'язок, ділянок з обмеженою пропускною спроможністю. Глобальні (мережеві) системи координують функціонування множини локальних об'єктів, розглядаючи транспортну мережу як єдиний організм.

Математичний апарат опису транспортних потоків оперує трьома базовими величинами [20]. Інтенсивність q фіксує кількість одиниць транспорту, що перетинають контрольний переріз за одиницю часу (зазвичай — за годину). Густина k характеризує миттєве заповнення ділянки дороги — кількість транс-

портних засобів, що припадає на одиницю довжини. Швидкість v описує темп просування потоку.

Зазначені параметри не є незалежними — їх пов'язує базове рівняння гідродинамічної аналогії:

$$q = kv \quad (1.1)$$

Вимірювання швидкості може здійснюватися двома методично різними способами, що дають неоднакові результати. Просторова швидкість v_s обчислюється як середнє для всіх транспортних засобів, присутніх на контрольній ділянці у фіксований момент. Часова швидкість v_t усереднює швидкості транспортних засобів, що перетнули контрольний переріз протягом заданого інтервалу. Для потоку без зупинок ці величини пов'язані співвідношенням:

$$v_t = v_s + \frac{\sigma_s^2}{v_s} \quad (1.2)$$

Параметр σ_s кількісно характеризує неоднорідність швидкостей у потоці:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (v_t - v_s)^2}{n - 1}} \quad (1.3)$$

Фізичний зміст доданка σ_s^2/v_s у формулі (1.2) пояснюється тим, що швидші автомобілі частіше перетинають контрольний переріз, створюючи систематичне зміщення часової оцінки вгору відносно просторової.

Взаємозв'язок параметрів потоку наочно ілюструє фундаментальна діаграма (рис. 1.1), що відображає залежності $v_s(q)$ та $q(k)$ для ідеалізованого безперервного руху.

Діаграма виявляє існування якісно різних режимів руху. В області малих густин (вільний потік) транспортні засоби рухаються практично незалежно, обираючи комфортну швидкість. Збільшення густини до критичного значення k_c супроводжується зростанням інтенсивності до максимуму q_c , що відповідає пропускній спроможності. Подальше ущільнення потоку парадоксально знижує інтенсивність: автомобілі починають заважати один одному, формуються

Рисунок 1.1 – Базові залежності теорії транспортних потоків: а — швидкісна характеристика $v_s(q)$; б — діаграма стану $q(k)$
колони, виникають хвилі «стисло-розрідження». За граничної густини k_j (затор) рух припиняється повністю [22].

Перехідна зона поблизу k_c характеризується нестійкістю: незначні флуктуації здатні спровокувати лавиноподібну деградацію режиму руху. Насичений потік (область $k > k_c$) вирізняється пульсуючим характером руху та великим розкидом прискорень.

Натурні спостереження в міських умовах демонструють специфіку, зумовлену обмеженнями швидкості: залежність $v_s(k)$ залишається майже гори-

зонтальною аж до завантаження на рівні 70% пропускної спроможності [22]. Геометрична інтерпретація діаграми $q(k)$ дозволяє визначати швидкість як тангенс кута нахилу радіус-вектора відповідної точки.

1.3 Стохастична природа транспортних потоків

Світлофорна сигналізація радикально трансформує структуру потоку, породжуючи характерну пачкову (пульсуючу) організацію руху. Група автомобілів, що стартує на зелений сигнал, поступово розсіюється (дифузія) через неоднаковість швидкостей окремих учасників. Емпірично встановлено, що на відстані 800–1000 м від стоп-лінії первинна структура повністю розмивається, і потік набуває квазістаціонарного характеру.

Інтенсивність дифузії залежить від множини факторів: складу потоку за типами транспортних засобів, геометрії перегону, кількості смуг, стану покриття, поздовжнього профілю траси. Це суттєво ускладнює прогнозування моментів прибуття груп до наступного перехрестя — ключову інформацію для координованого керування.

Кількісною мірою нерівномірності руху слугує так званий шум прискорення [22]:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t) - a_{cp}]^2 dt} \quad (1.4)$$

Цей показник інтегрально характеризує відхилення миттєвих прискорень $a(t)$ від середнього значення a_{cp} за період спостереження T . Високий шум прискорення свідчить про некомфортний, енерговитратний режим руху з частими гальмуваннями та розгонами.

Альтернативним індикатором якості руху є коефіцієнт реалізації швидкості:

$$\eta = \frac{v_s}{v_{max}} \quad (1.5)$$

що співвідносить фактичну середню швидкість v_s з максимально допустимою v_{max} . Низькі значення η сигналізують про неефективне використання

пропускної спроможності.

Випадковість у поведінці окремих учасників руху породжує невизначеність на рівні потоку в цілому. Для її кількісного опису залучається апарат теорії інформації, зокрема поняття ентропії [22]. Якщо миттєва інтенсивність q_t розглядається як випадкова величина з густиною розподілу $f(q_t)$, міра невизначеності визначається виразом:

$$H = -M [\log_2 f(q_t)] \quad (1.6)$$

Світлофорне регулювання, групуючи транспортні засоби, фактично знижує ентропію потоку, вносячи елемент детермінованості у хаотичний процес. Це створює передумови для координації суміжних перехресть — організації так званої «зеленої хвилі».

Рисунок 1.2 – Декомпозиція процесу зміни інтенсивності: 1 — систематична компонента; 2 — флуктуації

Часова динаміка інтенсивності в довільній точці мережі являє собою нестационарний випадковий процес (рис. 1.2). Його можна представити сумою регулярної (прогнозованої) складової та випадкових флуктуацій [22]:

$$q_t = M_{det} + q_{sl} \quad (1.7)$$

Регулярна компонента M_{det} відображає добову, тижневу, сезонну циклічність попиту на переміщення, зумовлену ритмом життєдіяльності міста. Флуктуації q_{sl} охоплюють короткочасні коливання, спричинені випадковістю індивідуальних рішень учасників руху.

Аналогічна декомпозиція справедлива для густини:

$$k(t) = k_{det} + k_{sl} \quad (1.8)$$

Рисунок 1.3 – Імовірнісне узагальнення діаграми транспортного потоку

Стохастичність параметрів потоку зумовлює перехід від детермінованої фундаментальної діаграми до її ймовірнісного аналога (рис. 1.3): замість однозначних кривих отримуємо області розсіювання експериментальних точок.

Інтенсивність у конкретному перерізі формується під впливом транспортних кореспонденцій — потреб населення у переміщеннях між різними районами міста. Територіальний розподіл місць проживання, роботи, обслуговування генерує характерну добову хвилю попиту з ранковим та вечірнім піками. У центральних районах із розвиненою радіально-кільцевою структурою піковий період може «розмиватися» на 4–6 годин через накладання різноспрямованих потоків.

Вулична мережа великого міста функціонує як складна динамічна систе-

ма з множиною зворотних зв'язків. Локальне погіршення умов руху (аварія, ремонтні роботи, некоректне регулювання) здатне спровокувати каскадне поширення затримок на суміжні ділянки. Особливо вразливими є мережі, що працюють поблизу межі пропускної спроможності. Це диктує необхідність системного підходу до керування рухом, що враховує взаємозалежність елементів мережі.

Практичне впровадження автоматизованих систем керування потребує детального обстеження транспортної ситуації на конкретній ділянці мережі. Такі обстеження дозволяють ідентифікувати параметри регулярної та випадкової складових потоку, виявити критичні періоди та вузькі місця. Попри трудомісткість та витратність, цей етап є обов'язковою передумовою ефективного функціонування АСУДР.

2 СТРАТЕГІЇ ЛОКАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Специфіка автоматизації дорожнього руху полягає у неможливості застосування класичних методів теорії керування, розроблених для детермінованих технічних систем. Транспортний потік — принципово стохастичний об'єкт, поведінка якого визначається сукупністю незалежних рішень тисяч учасників руху. Це зумовлює домінування евристичних підходів, що спираються на накопичений практичний досвід та інженерну інтуїцію [21, 25].

Передумовою створення ефективного алгоритму керування є детальне вивчення закономірностей транспортних потоків на конкретній ділянці мережі. Виявлені патерни — добова динаміка інтенсивності, характерні співвідношення потоків за напрямками, статистика затримок — закладаються в основу правил формування керуючих сигналів.

Технічна реалізація алгоритмів здійснюється спеціалізованими дорожніми контролерами — мікропроцесорними пристроями, що забезпечують комутацію світлофорних груп відповідно до закладеної програми. Сучасні контролери підтримують гнучке програмування та можуть інтегруватися в мережеві системи керування вищого рівня.

Практика світлофорного регулювання сформувала кілька принципово різних підходів до побудови алгоритмів локального керування, що відрізняються ступенем адаптивності та складністю реалізації [26].

2.1 Режим постійної сигнальної програми

Найпростішою формою автоматичного керування є циклічне відтворення фіксованої послідовності сигналів із незмінними часовими параметрами. Для розуміння логіки побудови таких програм необхідно означити базові поняття [27].

Елементарною одиницею світлофорного регулювання є *такт* — інтервал часу, протягом якого комбінація сигналів на всіх світлофорах перехрестя залишається незмінною. Розрізняють такти двох типів. Основний такт відповідає

пропуску транспорту через перехрестя: на дозволених напрямках горить зелене світло, на заборонених — червоне. Проміжний такт забезпечує безпечну зміну дозволених напрямків: зелений сигнал замінюється жовтим, даючи можливість завершити розпочаті маневри.

Послідовність основного та проміжного тактів утворює *фазу* — завершений цикл обслуговування певної групи напрямків. Повна послідовність фаз, після якої система повертається до початкового стану, називається *циклом регулювання*.

Характерною рисою режиму постійної програми є розрахунок параметрів для найнапруженіших умов — години пік. Така стратегія гарантує задовільну роботу перехрестя в критичні періоди, проте виявляється неоптимальною рещту часу. У позапіковий період надмірна тривалість фаз породжує штучні затримки: транспорт очікує на червоний сигнал за відсутності конфліктуючого потоку [27]. Додатковим обмеженням є нездатність реагувати на короткочасні флуктуації попиту — випадкові сплески або спади інтенсивності.

2.2 Адаптивне керування за принципом виявлення розривів

Суттєвого підвищення ефективності досягають алгоритми, що динамічно коригують тривалість фаз на основі інформації про фактичний стан потоку. Класичним представником цього класу є метод пошуку розривів (*gap-seeking*).

Ключовим поняттям методу є *розрив* — часовий інтервал між послідовними транспортними засобами в потоці, що перевищує деяке порогове значення. Поява розриву сигналізує про тимчасове вичерпання попиту на даному напрямку, що створює можливість передати право проїзду конкуруючому потоку.

Технічна реалізація методу передбачає встановлення індуктивних петель або інших детекторів на відстані 20–50 м перед стоп-лінією кожного напрямку (рис. 2.1а). Логіка роботи алгоритму така. На початку фази вмикається зелений сигнал на мінімальний гарантований час $T_{.min}$, що зазвичай становить 7 с і визначається вимогами безпеки пішоходів (рис. 2.1б).

Рисунок 2.1 – Реалізація методу gap-seeking: а — розташування детекторів; б — гарантований мінімум зеленого; в — продовження при виявленні автомобіля; г — примусове завершення при досягненні максимуму

Кожна фіксація автомобіля детектором «перезапускає» таймер на величину екіпажного інтервалу Δt — розрахункового часу проїзду від детектора до стоп-лінії (рис. 2.1в). Якщо протягом Δt детектор не зафіксував наступного автомобіля, констатується розрив, і фаза завершується. Фактично, алгоритм відстежує момент, коли ділянка між детектором і стоп-лінією звільняється від транспорту.

Для запобігання «голодуванню» конкуруючих напрямків при інтенсивному потоці встановлюється верхня межа тривалості фази $T_{.max}$ (рис. 2.1г). Таким чином, фактична тривалість основного такту обмежена діапазоном [27]:

$$T_{.min} \leq t_{oi} \leq T_{.max} \quad (2.1)$$

Агрегуючи обмеження для всіх фаз, отримуємо допустимий діапазон три-

валості циклу:

$$T_{.min} \leq T \leq T_{.max} \quad (2.2)$$

Граничні значення циклу визначаються сумуванням відповідних меж по фазах із урахуванням проміжних тактів:

$$T_{.min} = \sum_{i=1}^n (T_{.min} + T_{.i}); \quad T_{.max} = \sum_{i=1}^n (T_{.max} + T_{.i}) \quad (2.3)$$

Тут n — кількість фаз у циклі, $T_{.i}$ — тривалість проміжного такту після i -ї фази.

Розвинені модифікації методу передбачають динамічне коригування параметрів залежно від поточної ситуації [27]. Зокрема, мінімальна тривалість зеленого може збільшуватися пропорційно довжині черги, що накопичилася за час червоного сигналу:

$$T_{.min} = f(n_k) \quad (2.4)$$

Максимальна тривалість може скорочуватися при зростанні черги на конкуруючому напрямку:

$$T_{.max} = f(n_i) \quad (2.5)$$

Екіпажний інтервал може адаптуватися до швидкісного режиму потоку:

$$\Delta t = f(v_i) \quad (2.6)$$

або до ступеня завантаження конкуруючих напрямків:

$$\Delta t = f(n_i) \quad (2.7)$$

Залежність (2.6) також використовується для динамічного коригування проміжного такту: при вищих швидкостях потрібен довший жовтий сигнал для безпечного завершення маневрів.

2.3 Багатопараметричні адаптивні алгоритми

Подальшим розвитком ідей адаптивного керування стали алгоритми, що оперують розширеним набором вхідних даних. Окрім миттєвої присутності автомобілів у зоні детектора, такі системи накопичують та аналізують статистику інтенсивності, оцінюють довжину черг, вимірюють час очікування. Особливого поширення ці підходи набули у США [20].

Типова логіка багатопараметричного алгоритму включає кілька механізмів адаптації, що діють паралельно:

1. **Компенсація накопиченої черги.** Базовий мінімум зеленого $T_{.min}$ збільшується на 1 с за кожен автомобіль у черзі понад перших десяти. Це забезпечує гарантований пропуск накопиченого попиту.
2. **Пріоритизація перевантажених напрямків.** Екіпажний інтервал скорочується при зростанні черги або тривалості очікування на конкуруючих підходах, прискорюючи передачу права проїзду.
3. **Адаптація до щільності потоку.** Система відстежує кількість проїздів через детектор за ковзні 10-секундні інтервали. Висока щільність спонукає до продовження зеленого, низька — до скорочення екіпажного інтервалу.
4. **Пріоритет організованих груп.** Прибуття компактної групи автомобілів (пачки) до червоного сигналу ініціює механізм прискореного перемикання. Додатково в логіку вводяться «фантомні» автомобілі на пріоритетному напрямку, що форсує завершення поточної фази.
5. **Захист від перевантаження.** Максимум фази обмежується залежністю (2.5), що запобігає критичному накопиченню черг.

Параметри функціональних залежностей підбираються експериментально для кожного конкретного перехрестя з урахуванням його геометрії, складу потоків та характеру добової динаміки.

2.4 Спеціалізовані стратегії розподілу фаз

Окремий клас становлять алгоритми, орієнтовані на досягнення специфічних критеріїв якості.

Еквалізація навантаження реалізує принцип справедливого розподілу ресурсу перехрестя між конкуруючими напрямками. Критерієм оптимізації слугує ступінь насичення фази [20, 30]:

$$x_i = \frac{q_i C}{S_i g_i} \quad (2.8)$$

Цей безрозмірний показник співвідносить фактичний попит q_i (інтенсивність прибуття) з пропускною спроможністю, що визначається добутком потоку насичення S_i та частки зеленого часу g_i/C . Значення $x_i < 1$ свідчить про резерв пропускної спроможності, $x_i > 1$ — про перевантаження та неминуче накопичення черги.

Потік насичення S_i являє собою теоретичний максимум інтенсивності, досяжний при безперервному русі нескінченної колони. Для типової смуги міської магістралі ця величина становить 1800–2000 авт./год.

Алгоритм еквалізації перерозподіляє тривалість фаз у межах фіксованого циклу таким чином, щоб мінімізувати розкид значень x_i . Це забезпечує збалансоване обслуговування всіх напрямків та запобігає ситуаціям, коли одні підходи працюють з великим запасом, тоді як інші перебувають на межі пропускної спроможності.

Стратегія повного розвантаження реалізує інтуїтивно зрозумілий принцип: тривалість зеленого сигналу має бути достатньою для проїзду всіх автомобілів, що накопичилися за час червоного [30]. Фактично, цей підхід відтворює логіку досвідченого регулювальника, який «на око» оцінює довжину черги та надає відповідний час для її розсіювання.

Довжина черги визначається як максимальне заповнення серед усіх смуг, що обслуговуються даною фазою. Такий консервативний підхід гарантує повний пропуск навіть найдовшої черги, хоча може призводити до недовикориста-

ння зеленого часу на менш завантажених смугах.

3 МЕРЕЖЕВЕ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

Перехід від ізольованого керування окремими перехрестями до узгодженої роботи групи світлофорних об'єктів відкриває принципово нові можливості оптимізації транспортних потоків. Ключовою ідеєю координованого регулювання є формування так званої «зеленої хвилі» — режиму, за якого транспортний засіб, рухаючись з розрахунковою швидкістю, послідовно потрапляє на зелений сигнал кожного перехрестя маршруту [28].

Технічно координація досягається шляхом введення часових зсувів між моментами вмикання однойменних фаз на суміжних перехрестях. Величина зсуву визначається відстанню між перехрестями та заданою швидкістю координації. Сукупність параметрів — єдиної для всіх перехресть тривалості циклу, індивідуальних зсувів та розподілу фаз — формує *програму координації* (план координації).

Візуалізацією програми слугує *графік координації* (рис. 3.1) — діаграма в координатах «час–відстань», що наочно демонструє траєкторії руху транспортних засобів відносно періодів дозвільних сигналів.

Застосування обчислювальної техніки дозволило масштабувати координацію від лінійних ділянок до складних мережевих структур — *районів координації*. Природними межами таких районів слугують перегони завдовжки понад 800 м, на яких групи автомобілів практично повністю розсіюються внаслідок дифузії. За відсутності довгих перегонів межі визначаються експертно з урахуванням топології мережі та домінуючих транспортних кореспонденцій.

3.1 Адаптація до нестаціонарності попиту

Добова динаміка інтенсивності руху характеризується вираженою нерівномірністю з ранковим та вечірнім піками. Між піковими періодами та в нічний час параметри потоку суттєво відрізняються від розрахункових для години пік. Це породжує задачу адаптації програми координації до поточних умов [28].

Практичним підходом є виділення *квазістаціонарних інтервалів* — пері-

Рисунок 3.1 – Просторово-часова діаграма координованого регулювання: 1, 2, 3, ... — послідовні перехрестя магістралі (стрілки вказують напрямок руху координованого потоку)

одів тривалістю 15–20 хв, протягом яких характеристики потоку змінюються несуттєво. Для кожного такого інтервалу готується окрема програма координації, оптимізована під відповідні умови. Сукупність програм утворює *бібліотеку*, з якої система обирає актуальну на основі поточних вимірювань.

Перемикання між програмами супроводжується неминучими «втратами якості»: відмінності у тривалості циклів та зсувах фаз порушують синхронізацію на 1–2 цикли. Спеціальний алгоритм переходу мінімізує ці втрати шляхом «затягування» фази координованого напрямку до моменту її початку в новій програмі. Проміжок використовується для обслуговування другорядних напрямків.

Оптимальна кількість програм у бібліотеці визначається компромісом: збільшення числа програм покращує відповідність поточним умовам, але збільшує сумарні втрати на перемикання. Для знаходження оптимуму застосовується імітаційне моделювання на транспортних моделях типу TRANSYT. Варіюючи кількість та межі квазістаціонарних інтервалів, знаходять конфігурацію

з мінімальним сумарним показником затримок — як під час роботи програм, так і в перехідних режимах.

Стратегічний рівень керування реалізує автоматичний вибір програми з бібліотеки на основі порівняння поточних вимірювань з еталонними «образами» — наборами параметрів, для яких розраховувалися програми. Близькість до образу оцінюється метриками теорії розпізнавання, найпростішою з яких є сума квадратів відхилень. Вхідними даними слугують виміряні значення інтенсивності та швидкості з детекторів, розташованих на ключових ділянках мережі.

Суттєвою проблемою є інерційність системи: рішення про вибір програми базується на даних минулого періоду, тоді як умови могли змінитися. Компенсація досягається прогнозуванням: дані кінця поточного інтервалу екстраполюються на наступний період, і програма обирається превентивно.

Концепція бібліотек природно узагальнюється на інші аспекти керування: схеми організації руху (позиції керованих знаків), межі районів координації, навіть вибір між координованим та локальним режимами. Таким чином формується ієрархічна структура адаптивного керування [28].

3.2 Локальна корекція координованих програм

Навіть оптимально розрахована програма не може врахувати всіх випадкових флуктуацій потоку. Механізм *місцевої корекції* дозволяє адаптувати тривалість фаз на кожному перехресті в межах, що не порушують загальної координації (рис. 3.2).

Технічно корекція реалізується модифікованим алгоритмом пошуку розривів. Детектори на підходах до перехрестя фіксують наявність або відсутність транспортних засобів. При виявленні розриву в потоці фаза може бути завершена достроково (в межах мінімуму), звільняючи час для конкуруючих напрямків. Критичним обмеженням є гарантування мінімальної «ширини зеленої хвилі» для координованого напрямку — інтервалу, протягом якого зміна фази заборо-

Рисунок 3.2 – Механізми локальної адаптації в координованому режимі:
а — корекція головного напрямку; б — корекція другорядного напрямку;
в — комбінована корекція; ДТ — транспортні детектори; 1, 2 — суміжні
перехрестя; t — цикл; Δt — ширина «зеленої хвилі»; К — заборонний сигнал;
З — дозвільний сигнал; T_{min} , T_{max} — межі зеленого головного напрямку;
 T_{min} , T_{max} — межі зеленого другорядного напрямку; T_{min} — мінімум
червоного головного напрямку

нена.

Альтернативний підхід — детерміноване керування без зворотного зв'язку — базується на статистичній моделі добової динаміки, побудованій за результатами тривалих спостережень. Моменти перемикання програм призначаються примусово відповідно до типового профілю. Система втрачає адаптивність, але виграє в простоті та надійності [30].

Протилежним екстремумом є розрахунок програм у реальному часі на основі поточних вимірювань. Такий підхід теоретично забезпечує найкращу відповідність умовам, проте потребує високої обчислювальної потужності та швидкодії, що обмежує його практичне застосування.

3.3 Методологія розрахунку програм координації

Підготовка бібліотеки програм є критичною операцією, що визначає ефективність АСУДР. Традиційні графоаналітичні методи, орієнтовані на максимізацію ширини «зеленої хвилі», придатні лише для простих конфігурацій з невеликою кількістю перехресть. Їх головний недолік — ігнорування реальних характеристик потоку: інтенсивності, розкиду швидкостей, дифузії груп [30].

Сучасні комп'ютерні методи реалізують оптимізаційні процедури мінімізації транспортних затримок. Найбільшого визнання набули системи SIGOP (США), TRANSYT (Великобританія) та DASAM (Швеція). Порівняльні дослідження показують, що SIGOP забезпечує швидший розрахунок, проте програми TRANSYT та DASAM дають на 5–7% менші затримки.

Модель TRANSYT базується на гідродинамічній аналогії руху, де транспортний потік уподібнюється стисливій рідині. Варіації концентрації відстежуються з роздільною здатністю 1–2 с, групи автомобілів представляються періодами підвищеної густини тривалістю від 0,02 циклу [28, 30].

Ключовим елементом моделі є рекурентне співвідношення для прогнозу інтенсивності:

$$q'_i = Fq_{(i-t)} + (1 - F)q'_{(i+t-1)} \quad (3.1)$$

де q — інтенсивність на виході перехрестя; q' — інтенсивність у контрольному перерізі перегону; i — дискретний час у частках циклу; $t = 0,8 \cdot t_{\text{проїзду}}$ — зсув, пропорційний часу проїзду. Коефіцієнт згладжування F визначається емпірично:

$$F = 1 - 0,8 \cdot e^{-0,35/t} \quad (3.2)$$

Формула моделює процес дифузії: група автомобілів поступово «розмивається» у міру віддалення від перехрестя.

Цільова функція оптимізації враховує як затримки, так і кількість зупинок [30]:

$$D = \sum_{i=1}^n (d_i + K \cdot r_i) \quad (3.3)$$

де d_i — середня затримка на i -й секції (у частках циклу); r_i — середня кількість зупинок; K — ваговий коефіцієнт, що дозволяє балансувати між економією часу та зниженням зносу техніки й витрат пального; n — кількість напрямків.

Детермінована природа моделі компенсується введенням поправки на стохастичну складову затримок:

$$D_r = \frac{x^2}{4(1-x)} \quad (3.4)$$

де x — ступінь насичення фази (при $x \rightarrow 1$ поправка зростає необмежено, відображаючи наростання черг).

Оптимізація виконується ітераційною процедурою «сходження на пагорб» (hill climbing): послідовно варіюються зсуви фаз та їх тривалості, на кожному кроці обчислюється значення D , рух продовжується в напрямку спадання. Результатом є псевдоглобальний оптимум — рішення, близьке до найкращого, хоча формально може бути локальним мінімумом.

Модифікація TRANSYT-5 орієнтована на пріоритет громадського транспорту: цільова функція мінімізує сумарний час пасажирів, а не транспортних засобів. Це дозволяє скоротити час проїзду автобусів на 10% з урахуванням зу-

пинок.

3.4 Керування в умовах перенасичення мережі

Транспортні затори стали характерним явищем великих міст, що спричиняє катастрофічне падіння пропускної спроможності, зростання затримок та аварійності. Затор виникає, коли ступінь насичення x наближається до одиниці: найменше збурення здатне спровокувати лавиноподібне накопичення черг [29].

За характером виникнення розрізняють *випадкові* затори (спричинені раптовими подіями — ДТП, поломками) та *систематичні* (пов'язані з регулярним перевищенням попиту над пропускною спроможністю в години пік). Останні локалізуються у «вузьких місцях» мережі та прогнозовані в часі й просторі.

Еволюція затору проходить кілька стадій. *Первинний затор* формується на перехресті з недостатньою пропускною спроможністю: черга не встигає розсіятися за цикл і накопичується. При досягненні критичної довжини черга блокує суміжні перехрестя, породжуючи *вторинні затори*. За несприятливих умов процес охоплює значну територію — виникає *тотальний затор* [29].

Фактори, що сприяють ескалації:

- психологічний бар'єр водіїв щодо використання альтернативних маршрутів;
- ефект «перекидання» перевантаження на сусідні напрямки при спробах локальної оптимізації;
- вихід нерегульованих перехресть за межі впливу системи керування.

Формальна умова виникнення затору на ізолюваному перехресті з двофазним регулюванням [30]:

$$\frac{q_1}{S_1} + \frac{q_2}{S_2} > \frac{C - L}{C} \quad (3.5)$$

де q_1, q_2 — інтенсивності конкуруючих потоків; S_1, S_2 — потоки насичення; C — цикл; L — сумарний втрачений час (проміжні такти). Нерівність означає, що сумарний попит перевищує доступний «зелений час».

Діагностика заторів базується на вимірюванні *зайнятості* — частки часу, протягом якої детектор фіксує присутність транспортного засобу:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{T} \quad (3.6)$$

де t_i — тривалість перебування i -го автомобіля в зоні детектора; N — кількість зареєстрованих автомобілів; T — період вимірювання. Високі значення θ сигналізують про формування черги. Порогові значення визначаються емпірично для кожної конфігурації [28, 30].

Стратегії протидії заторам поділяються на дві категорії. *Стабілізація черг* спрямована на утримання їх довжини в допустимих межах шляхом координованого коригування фаз на суміжних перехрестях. Детермінованість руху в насиченій мережі полегшує розрахунок: поведінка черг прогнозується точніше, ніж у вільному потоці.

Мінімізація сукупних затримок реалізується оптимізацією тривалості фаз у реальному часі. Цільова функція пов'язує довжини черг із затримками; мінімум знаходиться градієнтними методами. Підхід потребує значних обчислювальних ресурсів і поки що обмежено застосовується на практиці.

На сучасному етапі основним залишається диспетчерське керування: оператор отримує інформацію про затори (автоматично, з телекамер або від патрульних служб) і вживає заходів — змінює режими світлофорів, активує керовані знаки для перенаправлення потоків [28].

3.5 Динамічна організація руху

Сучасні АСУДР включають не лише світлофори, а й керовані дорожні знаки, інформаційні табло та системи реверсивного руху. Це радикально розширює

можливості адаптації до поточних умов [26].

Реверсивні смуги — ефективний інструмент для магістралей із вираженою нерівномірністю зустрічних потоків, типовою для радіальних напрямків «центр–периферія». В години ранкового піку переважає рух до центру, ввечері — у зворотному напрямку. Виділення центральних смуг під реверсивний рух дозволяє динамічно перерозподіляти пропускну спроможність відповідно до домінуючого потоку [25].

Технічно реверсування реалізується спеціальними світлофорами над кожною смугою: зелена стрілка вниз дозволяє рух, червоний хрест — забороняє. При значних перегонах додаткові світлофори встановлюються в проміжних перерізах.

Концепція поширюється на цілі вулиці: в мережі паралельних односторонніх вулиць одна або кілька можуть змінювати напрямок залежно від періоду доби. Реалізація потребує керованих знаків на всіх в'їздах та перетинах (рис. 3.3).

Рисунок 3.3 – Схема керування вулицею з повним реверсуванням:
а — розташування багатопозиційних знаків

Керовані табло доповнюють систему рекомендаціями для водіїв: опти-

мальна швидкість, альтернативні маршрути, наявність місць на паркінгах, попередження про погодні умови.

Алгоритмічно керування знаками аналогічне світлофорному: формується бібліотека схем організації руху, кожній відповідає комбінація станів знаків та набір умов активації. Стратегічний рівень обирає базову схему, тактичний — вносить локальні корективи [25].

Психологічним бар'єром є звичка водіїв до статичності знаків. Досвід показує, що частина учасників руху ігнорує зміну позицій. Подолання потребує інформаційної роботи та поступового формування нової культури сприйняття адаптивних засобів регулювання.

3.6 Кількісна оцінка транспортних затримок

Затримки на регульованих перехрестях — головний показник ефективності керування рухом. Вони характеризують непродуктивні простої, що спричиняють економічні збитки та екологічне навантаження.

Для перехрестя з n напрямками сумарна затримка D_{Π} (приведена до одиниці часу) та середня затримка автомобіля \bar{d} визначаються через затримки окремих напрямків [30]:

$$D_i = q_i \cdot d_i \quad (3.7)$$

$$D_{\Pi} = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n q_i \cdot d_i \quad (3.8)$$

$$\bar{d} = \frac{D_{\Pi}}{\sum_{i=1}^n q_i} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (3.9)$$

де q_i — інтенсивність i -го напрямку; d_i — середня затримка автомобіля на i -му напрямку.

Для режиму фіксованого регулювання розроблено кілька аналітичних формул. *Формула Вебстера* найбільш поширена завдяки відсутності потреби

в додаткових вимірюваннях:

$$d = \frac{C(1 - g/C)^2}{2(1 - q/S)} + \frac{(q/S)^2}{2q(1 - q/S)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2}\right)^{1/3} \left(\frac{q}{S}\right)^{2+5g/C} \quad (3.10)$$

Формула Міллера враховує варіативність прибуття через коефіцієнт I :

$$d = \frac{C(1 - g/C)^2}{2(1 - q/S)} + \frac{I^2(q/S)^2}{2q(1 - q/S)} \quad (3.11)$$

Формула Ньюелла використовує інтегральну функцію Вінера-Хопфа Φ для точнішого моделювання:

$$d = \frac{R^2}{2C(1 - q/S)} + \frac{I^2(q/S)^2}{2q(1 - q/S)} \cdot \Phi\left(\frac{R}{\sigma}\right) \quad (3.12)$$

У формулах: C — цикл; g — ефективний зелений час; $R = C - g$ — ефективний червоний час; q — інтенсивність; S — потік насичення; I — коефіцієнт варіації інтенсивності (відношення стандартного відхилення до середнього); $\sigma = Iq/\sqrt{C}$.

Формула Вебстера дещо завищує затримки в зоні насичення, проте не потребує попереднього визначення I , що ускладнено до впровадження системи.

Для адаптивних режимів (пошук розривів, координоване регулювання) застосовується імітаційне моделювання з урахуванням дифузії груп та стохастичності.

Порівняння затримок «до» та «після» впровадження АСУДР дає оцінку ефективності системи. Практика показує зниження затримок на 15–30% порівняно з некоординованим режимом.

4 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РУХУ

Сучасні технології автоматизації охоплюють два взаємопов'язані рівні транспортної системи: інфраструктурний (засоби регулювання потоків на вулично-дорожній мережі) та бортовий (електронні системи окремих транспортних засобів). Їх спільне застосування спрямоване на підвищення безпеки руху, покращення комфорту водіїв та пасажирів, оптимізацію використання пропускнуєї спроможності доріг, а також забезпечення спеціальних режимів експлуатації [6, 7].

Архітектура систем керування рухом визначається розподілом функцій між бортовим та зовнішнім обладнанням (рис. 4.1).

Неавтономні (інфраструктурно-залежні) системи потребують взаємодії бортового обладнання із зовнішніми пристроями. Залежно від ступеня участі водія вони поділяються на повністю автоматичні (дублюють або заміщують оператора) та автоматизовані (залишають ключові рішення за людиною). Найширшого застосування набули автоматизовані системи регулювання транспортних потоків у межах визначених територій. Окремий клас становлять системи дистанційного пілотування з виносним пультом керування, що можуть функціонувати як в автоматичному, так і в напіваавтоматичному режимах.

Автономні (бортові) системи функціонують незалежно від зовнішньої інфраструктури, використовуючи лише власні сенсори та обчислювальні ресурси. Вони також градуються за рівнем автоматизації — від інформаційно-дорадчих до повністю автоматичних, що забезпечують часткове або повне керування рухом. У напіваавтоматичному режимі водій отримує дані від бортових датчиків та самостійно впливає на органи керування.

Як автономні, так і дистанційні системи можуть контролювати швидкість, напрямок руху або обидва параметри одночасно. *Комбіновані архітектури* поєднують різні методи керування, застосовуючи їх одночасно або послідовно залежно від дорожньої ситуації.

Рисунок 4.1 – Таксономія систем керування транспортними засобами

4.1 Технології дистанційного керування

Системи *телекерування* передбачають формування команд на виносному пульті з подальшою їх трансляцією на борт транспортного засобу радіоканалом. Бортова апаратура відпрацьовує отримані директиви, реалізуючи функції слідкуючого контуру [6].

Кодування команд здійснюється різними видами модуляції несучого сигналу: амплітудною, частотною, фазовою, широтно-імпульсною, часо-імпульсною та їх комбінаціями. Багатоканальна передача реалізується часовим або частотним мультиплексуванням — послідовною передачею команд із

часовим розділенням або одночасною трансляцією на різних частотах.

Рисунок 4.2 – Функціональна схема радіотелекерування

Архітектура радіоканалу телекерування (рис. 4.2) включає такі компоненти. Генератор команд, розташований на пульті керування, формує сигнали для регулювання параметрів руху (швидкості, напрямку) — автоматично за програмою або під керуванням оператора. Ці сигнали кодуються та модулюють коливання радіопередавача. Передавальна антена випромінює модульовані радіохвилі в напрямку транспортного засобу. Приймальна антена на борту вловлює сигнали, які підсилюються приймачем, декодуються та перетворюються на керуючі впливи відповідної фізичної природи. Виконавчі механізми, пов'язані з органами керування рухом, реалізують передані команди.

Залежно від наявності зворотного зв'язку розрізняють два типи систем. Розімкнені системи генерують команди без урахування фактичних параметрів руху — на основі програми або рішень оператора. Замкнені системи порівнюють виміряні параметри руху керованого транспортного засобу з еталонними значеннями, формуючи коригуючі впливи за результатами порівняння.

Рисунок 4.3 – Принцип теленаведення з амплітудною рівносигнальною зоною

Системи *теленаведення* з амплітудною рівносигнальною зоною (рис. 4.3) реалізують автоматичне утримання транспортного засобу на заданій траєкторії. Комутатор із визначеною частотою перемикає передавальні антени на пульті керування, формуючи в просторі рівносигнальний напрямок ОА. Коли транспортний засіб рухається точно цим напрямком, сигнал, що приймається бортовою антеною, має постійну амплітуду. При відхиленні від лінії ОА виникає амплітудна модуляція прийнятого сигналу, глибина якої пропорційна величині відхилення, а фаза вказує на його напрямок. Ця інформація використовується для автоматичного коригування курсу.

4.1.1 Мережеві автоматизовані системи

Зростання автомобілізації, збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод та зниження пропускної спроможності доріг стимулювали інтенсивну розробку автоматизованих систем керування рухом (АСКР) у всіх розвинених країнах. Такі системи здатні суттєво підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури та рівень безпеки. Різноманіття технічних рішень можна звести до двох базових концепцій [20]:

- **світлофорно-орієнтовані системи** — центральний обчислювальний комплекс, отримуючи дані про місцезнаходження всіх транспортних засобів у зоні контролю, оптимізує режими роботи світлофорів та керованих дорожніх знаків;
- **інформаційно-дорадчі системи** — центральний сервер транслює на кожен підключений транспортний засіб індивідуальні рекомендації щодо швидкості та маршруту.

У найповнішій реалізації центральна ЕОМ обробляє комплекс даних: унікальні ідентифікатори транспортних засобів, пункти призначення, поточні координати та швидкості, стан дорожнього покриття, метеорологічні умови.

4.1.2 Технології автомобільної навігації

Термін «навігаційні системи», запозичений з морської практики, охоплює широкий спектр технічних рішень для визначення місцезнаходження та оптимізації маршруту [7].

Рисунок 4.4 – Архітектура автономного маршрутного комп'ютера: 1 — одометр; 2 — приймальна антена; 3 — дисплей; 4 — панель керування; 5 — датчик курсу; 6 — датчик рівня пального; 7 — частотний діапазон прийому; 8 — обчислювальний модуль

Найпростішими є *автономні навігатори* (маршрутні комп'ютери), що не потребують зовнішньої інфраструктури (рис. 4.4). Їх апаратна частина включає: одометр 1 для вимірювання пройденого шляху; датчик рівня пального 6; датчик курсу (компас) 5; антену 2 для прийому радіосигналів у діапазоні 7 на частоті близько 6 кГц; мікропроцесорний модуль 8 для обробки даних у реальному часі; дисплей 3 із клавіатурою керування 4, інтегровані в приладову панель.

Рисунок 4.5 – Варіанти реалізації радіоінформаторів: а — базова конфігурація; б — з детекторами транспорту

Системи з одностороннім зв'язком (радіоінформатори) суттєво розширюють інформаційні можливості порівняно з автономними рішеннями завдяки каналу зв'язку з диспетчерським центром (рис. 4.5). Вони складніші та дорожчі,

проте здатні забезпечити водія актуальною дорожньою інформацією.

У базовій конфігурації (рис. 4.5, *a*) мережа радіомаяків 2, розгорнута на вуличній мережі, транслює на стандартні автомобільні радіоприймачі повідомлення про погодні умови, дорожньо-транспортні пригоди, обмеження швидкості на окремих ділянках — дані, що зберігаються в центральному банку 1 інформації. Суттєвим обмеженням є історичний характер інформації: вона відображає минулі події та може бути неактуальною на момент прибуття автомобіля до відповідної ділянки.

Розширена конфігурація (рис. 4.5, *б*) доповнюється детекторами транспорту 3, що дозволяють центру керування відстежувати поточну ситуацію на мережі: завантаження доріг, формування заторів тощо. Це уможлиблює оперативне оновлення інформації, на основі якої водій може самостійно обирати оптимальний маршрут.

Типовим представником радіоінформаторів є британська система CARFAX. Її головні обмеження, спільні для всього класу: неможливість персоналізованої адресації повідомлень та необхідність поділу ефірного часу з регулярним радіомовленням.

Рисунок 4.6 – Архітектура системи навігаційних маяків із двостороннім зв'язком

Системи з двостороннім зв'язком являють собою найдосконаліші на сьогодні рішення. Їх ключова перевага — можливість діалогу між конкретним водієм та диспетчерським центром. Водієві достатньо ввести код пункту призначен-

ня, після чого система забезпечуватиме маршрутне супроводження на кожному перехресті.

Технічна реалізація (рис. 4.6) базується на мережі навігаційних маяків, розташованих у вузлових точках транспортної мережі. Маяки представляють собою електромагнітні контури 7 або приймачі-передавачі інфрачервоного випромінювання 6, що безперервно збирають дані про дорожній рух. Інформація через радіостанцію 3 з клавіатурою 4 та супутник зв'язку 2 надходить до центрального обчислювального комплексу 1, де обробляється за спеціалізованими алгоритмами. Для кожного підключеного транспортного засобу розраховується оптимальний маршрут до заданого пункту. Результат тим самим ланцюжком у зворотному напрямку повертається до радіомаяка 5, а звідти — на дисплей водія. Останньому залишається лише дотримуватися вказівок, що оновлюються перед кожним перехрестям.

Окрім індивідуальних переваг для користувачів, системи з двостороннім зв'язком забезпечують загальносистемний ефект: рівномірніший розподіл потоків по мережі зменшує ймовірність заторів, покращує умови роботи громадського транспорту та знижує екологічне навантаження на міські райони. Парадоксально, але двосторонні системи можуть бути економічнішими за односторонні для кінцевого користувача: відпадає потреба у складному бортовому обчислювачі. Проте інфраструктурні витрати значні — маяк потрібен практично на кожному перехресті. Незважаючи на це, системи з двостороннім зв'язком уже впроваджуються на практиці.

Автономні системи керування функціонують без зовнішньої підтримки і можуть реалізовувати програмне керування, слідкування, стабілізацію або самоадаптацію (див. рис. 4.1). Принципово можливе застосування інерціальних, супутникових та інших методів позиціонування.

Рисунок 4.7 – Структура бортової системи програмного керування

У системах програмного керування (рис. 4.7) до бортового обчислювального пристрою (БОП) заздалегідь завантажується програма, що визначає курс та швидкісний режим на окремих ділянках маршруту. БОП може бути реалізований на аналоговій або цифровій елементній базі; останнім часом домінують мікропроцесорні рішення, що генерують команди керування швидкістю як функцію часу або пройденої дистанції.

У загальному випадку БОП формує директиви на зміну напрямку руху, перемикання передач, керування системою живлення двигуна, активацію гальм. Команди перетворюються на сигнали відповідної фізичної природи для впливу на виконавчі механізми.

Програмне керування знаходить застосування при полігонних випробуваннях автомобілів, керуванні спеціалізованим рухомим складом (СРС) тощо. Елементи програмного підходу присутні у багатьох АСУДР.

Рисунок 4.8 – Принцип активного самонаведення

Слідкуючі системи забезпечують утримання заданого курсу або рух по дорозі. При самонаведенні сигнал керування напрямком формується на борту відповідно до відхилення поточного курсу від напрямку на орієнтир (маяк), забезпечуючи виведення транспортного засобу до цільової точки.

Нерухомий маяк задає прямолінійну траєкторію; рухомий маяк відстежується безперервно. За розташуванням передавача розрізняють активне самонаведення (передавач на борті) та пасивне (передавач на маяку).

При активному самонаведенні (рис. 4.8) курс визначається за відбитим від маяка сигналом. Сканування приймально-передавальної антени в горизонтальній площині формує рівносигнальний напрямок. Зміщення відбивача від-

носно осі руху викликає модуляцію відбитого сигналу. Глибина модуляції пропорційна величині відхилення, фаза — напрямку. Фазовий детектор з опорною напругою перетворює цей сигнал на керуючий вплив для електромеханічного або гідравлічного приводу рульового керування. Корекція продовжується до вирівнювання курсу з напрямком на маяк, коли модуляція зникає.

Рисунок 4.9 – Принцип пасивного самонаведення

При пасивному самонаведенні (рис. 4.9) бортовий передавач відсутній; приймальна апаратура аналогічна. Система приймає сигнали від маяка, забезпечуючи рух у його напрямку.

Технології самонаведення, як і теленаведення, застосовуються для керування сільськогосподарською технікою, дорожньо-будівельними машинами, спеціальним рухомим складом.

При автоматичному русі по дорозі датчики розпізнають контрастні характеристики проїзної частини (або спеціальної розмітки) та узбіччя. Отримані сигнали формують керуючі впливи для утримання на смузі.

Рисунок 4.10 – Функціональна схема круїз-контролю

До **стабілізуючих систем** належить круїз-контроль — система підтримання заданої швидкості (рис. 4.10). Принцип дії: задавач формує напругу U , про-

порційну бажаній швидкості. Ця напруга разом із сигналом U' , пропорційним вимірній швидкості, надходить до компаратора (наприклад, мостової схеми), що формує сигнал розузгодження $\Delta U = k(U - U')$. Цей сигнал керує приводом дросельної заслінки для стабілізації швидкості.

Самокеровані (адаптивні) системи використовують датчики зовнішньої обстановки для виявлення небезпечних об'єктів у зоні руху. Аналізуються: наявність перешкод, їх швидкість та напрямок руху, дистанція, динаміка зближення тощо.

Головне призначення бортових адаптивних систем — підвищення активної безпеки, тобто зниження ймовірності дорожньо-транспортних пригод (ДТП).

Масова автомобілізація супроводжується зростанням аварійності, що стимулює прискорену розробку засобів підвищення безпеки руху — як на рівні інфраструктури, так і на рівні конструкції транспортних засобів.

Комплекс заходів включає: розробку автоматизованих систем керування рухом, покращення ергономіки робочого місця водія, підвищення надійності та ефективності гальмівних систем, рульового керування тощо. Автономні системи можуть функціонувати самостійно або інтегруватися з іншими — у такому разі йдеться про комбіноване керування.

Комбіновані архітектури керування. Більшість експертів визнає, що лише поєднання різних методів дозволить забезпечити надійне керування у складних дорожніх умовах.

Найефективнішим є комбінування мережевих АСУДР з автономними бортовими системами. Розроблено численні варіанти таких інтегрованих рішень.

Зокрема, у США впроваджено комбіновану систему, що поєднує принципи мережевого та програмного керування. При виїзді з початкового пункту дані про пункт призначення завантажуються до бортового комп'ютера. При проїзді контрольних перехресть через індуктивні петлі в дорожньому покритті до бортового обчислювача надходить актуалізована маршрутна інформація від центральної ЕОМ, що враховує поточну дорожню ситуацію.

Системи «Secoma» (Париж) та «Hani Prolectron» (Цюріх) використовують для локалізації громадського транспорту боларди — компактні радіопередавачі, розташовані вздовж маршруту з інтервалом 1–3 км. Боларди безперервно випромінюють кодовані сигнали, що приймаються бортовими приймачами на дистанції до 100 м. Кодовий сигнал разом з ідентифікатором транспортного засобу та іншими даними з бортового програмного блоку надходить до центральної ЕОМ (диспетчерського поста). Центр аналізує обстановку, формує коригуючі команди щодо маршруту та швидкості, які повертаються до бортової системи. Актуальна маршрутна інформація відображається на дисплеї водія.

Такі комбіновані системи, однак, не забезпечують реагування на раптові аварійні ситуації — ця функція залишається за водієм.

Сучасні розробки спрямовані на створення повністю автоматичних комбінованих систем, здатних керувати транспортним засобом без участі водія. Такі системи є надзвичайно складними і поки що обмежено застосовуються з економічних міркувань.

Безпілотне керування потребує комбінованої системи зі спеціалізованою апаратурою.

Інфраструктурне обладнання:

- засоби маршрутної розмітки на дорогах, включаючи позначення смуг руху, зон перестроювання, поворотів та розворотів; розмітка має бути кодованою для автоматичного розпізнавання заданого маршруту; рух по маршруту зводиться до слідування заданій траєкторії з можливістю вимірювання відхилень;
- кодовані ідентифікатори адрес для розпізнавання пунктів призначення;
- засоби регулювання черговості проїзду на одноуровневих перетинах;
- датчики стану дорожнього покриття (коефіцієнта зчеплення) на поточній та наступних ділянках;
- знаки обмежень (заборони обгону тощо);

- засоби передачі команд на зміну маршруту при виникненні непереборних перешкод або втраті орієнтування.

Бортове обладнання:

- модуль введення маршруту, закодованого як послідовність траєкторних сегментів із зонами перестроювання;
- система повернення на задану траєкторію при відхиленнях, з вимірювачем відхилень за зовнішніми сигналами;
- система розпізнавання типу перешкод та вимірювання відносної швидкості зближення (функціонал «свій–чужий»);
- обчислювач гальмівного шляху з урахуванням стану покриття, профілю дороги та стану гальмівної системи;
- вимірювачі швидкості та пройденого шляху від контрольних точок;
- система оцінки безпеки обгону;
- індикатори непереборних перешкод та втрати орієнтування;
- модуль комутації режимів керування відповідно до заданого маршруту та програм реагування на непередбачені ситуації.

4.2 Мікропроцесорні технології в автомобілебудуванні

Тривалий час розвиток автоматичних бортових систем стримувався масо-габаритними характеристиками та вартістю апаратури, особливо обчислювальних блоків. Революція в мікроелектроніці кардинально змінила ситуацію.

Сучасна промисловість випускає мікропроцесори та мікроЕОМ, що за продуктивністю наближаються до малих ЕОМ минулих поколінь, проте вирізняються компактністю, низькою вартістю, високою надійністю та економічним енергоспоживанням. У сферах, що не потребують обробки великих масивів даних, мікропроцесори повністю витіснили традиційні ЕОМ.

Застосування мікропроцесорної техніки уможливило створення компактних та доступних автоматичних бортових систем.

Рисунок 4.11 – Узагальнена архітектура обчислювальної системи

Функціональна архітектура будь-якої обчислювальної машини, включаючи мікропроцесори та мікроЕОМ (рис. 4.11), включає чотири базові блоки: арифметико-логічний пристрій (АЛП); пам'ять; блок керування; інтерфейс введення-виведення.

АЛП виконує арифметичні та логічні операції над числами, представленими у визначеному кодуванні. Числа відображають як команди (інструкції для процесора), так і оброблювані дані. Інформація представляється електричними сигналами; найпоширенішою є двійкова система, де будь-яке число кодується послідовністю нулів та одиниць.

Пам'ять забезпечує прийом, зберігання та видачу інформації: вхідних даних, програм, проміжних та кінцевих результатів. Пам'ять організована як масив однотипних комірок; порція інформації в комірці становить машинне слово, номер комірки — її адресу. Ключові характеристики пам'яті — ємність та швидкодія.

За функціональним призначенням розрізняють:

- постійну пам'ять (ПЗП) — для зберігання незмінної інформації (програм, констант); забезпечує швидке читання;
- оперативну пам'ять (ОЗП) — для зберігання даних, що оновлюються в

процесі роботи; має більшу ємність, проте може поступатися ПЗП у швидкодії.

Блок керування забезпечує послідовне виконання операцій за програмою та координацію роботи окремих вузлів.

Інтерфейс введення-виведення перетворює вхідні дані у внутрішнє кодування, передає їх до пам'яті та фіксує результати обчислень для зовнішніх пристроїв.

У керуючих ЕОМ, що обробляють сигнали від датчиків параметрів контрольованих об'єктів, інтерфейси введення-виведення сполучають пам'ять та АЛП з аналого-цифровими (АЦП) та цифро-аналоговими (ЦАП) перетворювачами.

За архітектурою розрізняють універсальні ЕОМ з програмним керуванням, здатні виконувати довільні алгоритми, та спеціалізовані з жорсткою логікою, оптимізовані під конкретні задачі.

Мікропроцесори та мікроЕОМ зазвичай використовують жорстке програмне керування. Кожна операція ініціюється командою — структурованою послідовністю символів. Частина команди (код операції) визначає тип дії; решта вказує адреси операндів та результату. Команди, як і дані, кодуються числами та зберігаються в пам'яті.

Послідовність команд утворює програму, що разом із даними завантажується в пам'ять. За кожною командою АЛП отримує операнди з пам'яті, виконує операцію та записує результат за вказаною адресою. Окрім обчислювальних, АЛП виконує службові операції для автоматичної роботи машини.

Сучасні мікропроцесори та мікроЕОМ базуються на великих інтегральних схемах (ВІС) — кристалах, що містять понад сотню елементів. Напівпровідникові технології забезпечують густину десятків тисяч транзисторів на кристалі при високій швидкодії та низькому енергоспоживанні.

Мікропроцесор реалізується на одній або кількох ВІС, містить АЛП та виконує обробку інформації за заданою адресною програмою.

МікроЕОМ являє собою мініатюрну дискретну систему на базі мікропроцесора, змонтовану на одній або кількох друкованих платах. Включає ОЗП, ПЗП, інтерфейси введення-виведення, пульт керування тощо.

Сучасні мікроЕОМ містять десятки ВІС. Мікропроцесорний набір є ядром системи; інші ВІС (модулі пам'яті, інтерфейси) комбінуються залежно від призначення.

Переваги мікропроцесорів:

- висока технологічність виробництва, що забезпечує низьку вартість та надійність;
- широке застосування мікропрограмного керування, що дозволяє реалізувати апаратно функції, які раніше потребували програмного забезпечення;
- можливість створення автономних мініатюрних обчислювальних систем.

Ключові параметри мікропроцесорів — густину інтеграції, швидкодію, розсіювану потужність — визначає технологія виготовлення. Існує понад 20 схемотехнічних підходів до виробництва ВІС. Мініатюрні ВІС реалізують функції АЛП, пам'яті, АЦП, ЦАП або їх комбінації. Базовим елементом сучасних ВІС є транзистор.

Більшість мікропроцесорів є однокристальними — повністю реалізованими на одній ВІС (рис. 4.12). Вони економічні, проте мають обмежену гнучкість. Для розширення можливостей застосовують додаткові інтегральні схеми.

Основні характеристики мікропроцесора — розрядність машинного слова та час виконання команди. Додаткові параметри: технологія виготовлення,

кількість та тип ВІС, потреба в допоміжних схемах, густина інтеграції, тактова організація, методи зв'язку із зовнішніми пристроями, кількість виводів, тип корпусу, напруга живлення тощо.

Складність та архітектура мікропроцесора визначаються насамперед розрядністю.

Найпростіші — одно-, дво- та чотирирозрядні мікропроцесори. Через обмежену довжину слова адресація ОЗП здійснюється непрямо або за допомогою «подовжених команд». Для розширення зовнішніх зв'язків застосовують мультиплексні шини: одна фізична шина в різні моменти передає функціонально різні сигнали, що, однак, знижує швидкість обміну. Окрім даних, зовнішні виводи приймають тактові сигнали, переривання, живлення тощо.

Операції можуть виконуватися як у двійковому, так і в двійково-десятковому кодуванні. Складні операції (множення, ділення) реалізуються підпрограмами або мікропрограмою. Для зменшення звернень до пам'яті широко використовуються регістри.

Восьмирозрядні мікропроцесори є універсальнішими, з розвиненішою системою команд. Зазвичай мають роздільні шини даних та адрес. Для гнучкого керування використовується значна кількість регістрів загального призначення (десятки), що можуть виконувати арифметичні та логічні операції, слугувати адресними регістрами, лічильниками команд та швидкодійною локальною пам'яттю. За потреби частина ОЗП використовується як регістри.

Дванадцяти- та шістнадцятирозрядні мікропроцесори за архітектурою наближаються до малих ЕОМ.

Зазначені мікропроцесори мають фіксовану архітектуру, що ускладнює модифікацію. Цього недоліку позбавлені секційні мікропроцесори, побудовані з кількох ВІС різного призначення. Використовуючи набори таких ВІС, можна будувати процесори з довільною розрядністю, кратною базовому модулю.

Важливим елементом є інтерфейс введення-виведення, що характеризується способом обміну даними, форматом команд, структурою магістралі, методами доступу до пам'яті.

Застосовуються три способи обміну із зовнішніми пристроями.

Програмний обмін без переривань використовується в простих системах. Програмний канал включає шини введення-виведення даних, адресні шини та лінії стробування. Для передачі даних АЛП надсилає команду, яка декодується селектором зовнішнього пристрою. Якщо дані готові, вони надходять до АЛП; якщо ні — процесор очікує.

Програмний обмін з перериваннями дозволяє процесору виконувати поточну програму, поки зовнішній пристрій не готовий. При надходженні запиту на переривання виконання поточної команди припиняється, стан зберігається, і керування передається підпрограмі обслуговування. Після її завершення робота продовжується.

Прямий доступ до пам'яті (ПДП) забезпечує обмін масивами даних. Програмний канал активує канал ПДП, що зв'язує ОЗП безпосередньо із зовнішнім пристроєм. Обмін відбувається автоматично.

Підключення зовнішніх пристроїв реалізується трьома способами.

Послідовне (гурляндне) підключення: єдиний вхід та вихід, до яких ланцюжком підключаються пристрої. Пріоритет визначається близькістю до процесора.

Радіальне підключення: кожен пристрій має індивідуальну лінію зв'язку.

Магістральне підключення: єдина шина, до якої паралельно підключаються всі блоки (ОЗП, АЛП, периферія). Усі учасники можуть звертатися один до одного та до пам'яті, керуючись єдиним набором сигналів.

Широкого поширення набули мікропроцесори корпорації Atmel (серія AVR, з 1996 р.), що включають сімейства «tiny», «classic» та «mega».

Мікропроцесори «tiny» застосовуються в інтелектуальних автомобільних давачах, материнських платах ПК, пультах дистанційного керування тощо. Сімейство «classic» використовується в супутникових навігаційних системах для локалізації транспортних засобів, складній побутовій техніці, мережному обладнанні, мобільних телефонах нових поколінь та промислових системах автоматизації.

Обмеженням продукції Atmel є відсутність моделей для розширеного температурного діапазону ($-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$), характерного для автомобільних умов.

Активно розвиваються лінійки PIC-контролерів Microchip, мікроконтролерів H8/300 Hitachi та Dallas Semiconductor, що забезпечують високу продуктивність при економному енергоспоживанні.

Провідними виробниками автомобільних мікропроцесорів є Analog Devices, Texas Instruments, Motorola, NEC, AT&T. Ці компанії випускають цифрові сигнальні процесори (DSP — Digital Signal Processor).

Рисунок 4.13 – Компонування мікропроцесорної системи легкового автомобіля: а — розміщення модулів: 1 — керування двигуном; 2 — антиблокувальна система; 3 — трансмісія; 4 — контроль навантаження та пам'ять; 5 — діагностика; б — організація приладової панелі: 6 — цифровий дисплей; 7 — мультиплексор; 8 — аудіосистема; 9 — клімат-контроль та діагностика; 10 — круїз-контроль

Некоординоване впровадження автономних електронних пристроїв, кожен з яких виконує обмежені функції, призводить до зростання обсягу та вартості обладнання, зниження надійності та дублювання компонентів.

Поява доступних компактних мікропроцесорів уможливила комплексну електронізацію автомобіля — об'єднання окремих систем у централізовану керовану платформу, адаптовану до різних моделей. У такій архітектурі окремі модулі, давачі та блоки можуть використовуватися для вирішення різних задач.

Розвиток єдиних мікропроцесорних систем відбувається у двох напрямках. Перший передбачає розподілену архітектуру: окремі мікропроцесори, відповідальні за конкретні функції (керування двигуном, АБС, екстрене гальмування, діагностику тощо), розташовуються поблизу керованих агрегатів. Коорди-

націю забезпечує центральний процесор, що також обслуговує інформаційний інтерфейс водія.

Другий напрямок — централізована архітектура: єдиний процесор з програмами для всіх функцій послідовно керує системами автомобіля.

Централізація здешевлює систему та зменшує обсяг обладнання; ці переваги зростають зі збільшенням кількості функцій.

На практиці домінує розподілена архітектура завдяки вищій надійності та гнучкості модернізації.

Однією з перших мікропроцесорних автомобільних систем стала Alpha I компанії General Motors (США). Вона включала центральний та чотири периферійні процесори для керування вприскуванням палива, АБС, автоматичною коробкою передач та моніторингом стану водія. Перші версії будувалися на дискретних елементах.

Остання модифікація Alpha V на восьмирозрядних мікропроцесорах додатково керує круїз-контролем, коректором фар, регулятором напруги, таксометром, подушками безпеки, склоочисниками, протиугінною системою. Резерв пам'яті дозволяє розширювати функціонал. Уся система Alpha V реалізована на п'яти ВІС.

Японська система для MAZDA RX-4 побудована за розподіленою архітектурою: центральний процесор та локальні модулі поблизу виконавчих механізмів та давачів. Кожен локальний модуль включає мікропроцесор, підсилювачі, блок обробки давачів та систему діагностики. Окрім базових функцій керування двигуном та АКПП, система забезпечує 10 додаткових: контроль токсичності відпрацьованих газів, переривчастий режим склоочисників, самодіагностику тощо.

Випробування систем Alpha I—V та аналогів підтвердили, що мікропроцесори не є обмежуючим фактором за вартістю, надійністю, точністю, швидкістю, можливостями паралельної роботи та резервування.

В американських автомобільних системах найпоширеніші восьмирозрядні процесори 8048 та 8049-б. Модель 8049-б має вдвічі більшу пам'ять та інте-

грує до 30000 транзисторів. Включає АЛП, ПЗП, ОЗП з довільним доступом, інтерфейси введення-виведення, контролер переривань та таймер-синхронізатор.

Зовнішня шина забезпечує високошвидкісний зв'язок із периферією або додатковою пам'яттю до 2 кбіт. Процесор витримує відхилення напруги $\pm 10\%$ та працює в широкому температурному діапазоні, що робить його придатним для автомобільних застосувань, що потребують швидких та точних обчислень.

Процесор 8049-б використовується для керування двигуном, цифрових дисплеїв, побудови АЦП тощо.

При керуванні двигуном з АЦП надходять дані про тиск, температуру повітря, температуру двигуна тощо. За допомогою табличного пошуку та інтерполяції обчислюються оптимальні параметри для керування моментом запалювання та співвідношенням паливо-повітря.

Поряд із високопродуктивними застосовуються і прості процесори з меншою пам'яттю та вартістю, наприклад 8021 з програмованим ПЗП. Він містить восьмирозрядне АЛП, ОЗП на 64 біти, ПЗП на 1 кбіт, 21-канальний інтерфейс введення-виведення та таймер. Працює при напрузі 4,5—6,5 В.

Програмований ПЗП дозволяє використовувати одну ВІС для різних задач та моделей автомобілів. Процесор 8021 успішно застосовується для обчислення витрати палива, контролю затримки запалювання, протиугінних систем, профілактичної діагностики.

Перелічені мікропроцесори є універсальними та застосовуються в різних галузях.

З огляду на масове споживання автомобільною промисловістю доцільна розробка спеціалізованих автомобільних мікропроцесорів для конкретних задач. Це дозволить мініатюризувати електронні системи до рівня мікромодулів з мінімумом зовнішніх компонентів.

Аналіз показує доцільність випуску трьох типів мікропроцесорів для автомобільної галузі:

- високопродуктивні з великою пам'яттю та широкими обчислювальними можливостями, але з простим універсальним інтерфейсом;

- економічні зі збереженням універсальної архітектури, але з малою пам'яттю;
- спеціалізовані з інтерфейсом, оптимізованим під конкретну задачу.

Ці типи можуть використовуватися як окремо, так і спільно.

У ранніх розробках мікропроцесори розташовували в салоні за приладовою панеллю. Це збільшувало довжину кабелів та знижувало надійність з'єднань.

У сучасних моделях (рис. 4.13) місце встановлення обирається з урахуванням температурного режиму, мінімізації довжини кабелів та кількості з'єднань.

Зростання автомобілізації супроводжується збільшенням обсягу інформації, яку має обробляти водій, що негативно впливає на безпеку. Це зумовило створення бортових інформаційних терміналів, що включають мікрокомп'ютери.

Інформаційні термінали (рис. 4.14) включають центральний дисплей (монітор) з органами керування, інтегровані з підсистемами: асистування водієві, зв'язку, контролю тощо.

Для мінімізації наслідків відмов електроніки автовиробники дотримуються принципу: при виході з ладу мікропроцесора або іншого блоку автомобіль має залишатися працездатним. За такого підходу надійність мікропроцесорів, перетворювачів, давачів та підсилювачів виявляється цілком достатньою.

Конкурентна боротьба стимулює автовиробників до інтенсивного впровадження обчислювальної техніки. Поточний етап характеризується освоєнням та дослідною експлуатацією: мікропроцесори встановлюються на окремих моделях, оцінюються їх технічні та експлуатаційні параметри в реальних умовах, виявляються непередбачені проблеми.

Запорукою масового впровадження обчислювальної техніки в перспективних автомобілях є спрощення керування, підвищення ефективності базових систем та безпеки руху на тлі стійкої тенденції до зниження вартості, мініатюризації та зростання надійності електронних компонентів.

Рисунок 4.14 – Архітектура бортового інформаційного терміналу

5 МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АСУДР

Обґрунтування інвестицій у створення автоматизованих систем керування дорожнім рухом потребує комплексного аналізу очікуваних ефектів та витрат. Складність такого аналізу зумовлена багатоаспектністю впливу АСУДР на транспортну систему міста: поряд із безпосередніми транспортними ефектами (скорочення затримок, підвищення швидкості) виникають опосередковані соціальні, екологічні та містобудівні наслідки, кількісна оцінка яких є методологічно складною задачею.

Світовий досвід експлуатації АСУДР накопичив значний масив емпіричних даних, що дозволяють із достатньою достовірністю прогнозувати ефекти впровадження. Водночас кожна система є унікальною: її ефективність визначається не лише технічними характеристиками обладнання та якістю алгоритмів, але й специфікою транспортної мережі, рівнем попередньої організації руху, інституційними факторами. Це вимагає індивідуального підходу до техніко-економічного обґрунтування кожного проекту.

5.1 Систематизація факторів ефективності

Техніко-економічна результативність АСУДР формується комплексом взаємопов'язаних ефектів, що можуть бути класифіковані за характером впливу на транспортну систему [20].

5.1.1 Транспортно-експлуатаційні ефекти

Скорочення затримок на регульованих перехрестях є первинним і найбільш очевидним результатом оптимізації світлофорного регулювання. Механізм формування ефекту полягає в адаптації тривалості фаз до фактичної структури транспортних потоків, що забезпечує раціональніший розподіл «зеленого часу» між конкуруючими напрямками. Додатковий внесок забезпечує коорди-

нація суміжних перехресть («зелена хвиля») та оперативний перерозподіл потоків за допомогою керованих дорожніх знаків та інформаційних табло.

Величина скорочення затримок залежить від початкового рівня організації руху. На перехрестях із неоптимальними режимами жорсткого регулювання ефект може сягати 30–40%; на ділянках із попередньо налаштованою координацією приріст ефективності буде скромнішим — 10–15%. Статистика діючих систем свідчить про типове зниження затримок на 15–30% у масштабах контрольованого району.

Підвищення швидкості сполучення є інтегральним показником, що відображає сукупний ефект скорочення затримок на перехрестях та зменшення довжини черг. При оптимізованому регулюванні черги розсіюються швидше, звільняючи проїзну частину перегону для руху з допустимою швидкістю. Зменшення кількості вимушених зупинок та уповільнень додатково підвищує середню швидкість.

Ефект особливо відчутний на магістралях із координованим регулюванням, де транспортний засіб, рухаючись із розрахунковою швидкістю, послідовно потрапляє на зелений сигнал кожного перехрестя. Це мотивує водіїв дотримуватися швидкісного режиму, що додатково сприяє безпеці та рівномірності руху.

Зменшення кількості непродуктивних зупинок має комплексний економічний ефект. Кожен цикл «гальмування–зупинка–розгін» супроводжується підвищеним зносом вузлів та агрегатів транспортного засобу (гальмівна система, трансмісія, підвіска), прискореним зношуванням шин, надмірною витратою пального. Крім того, концентрація гальмувань та розгонів у зоні перехресть спричиняє локальне руйнування дорожнього покриття — утворення колійності, тріщин, вибоїн.

Скорочення числа зупинок на 20–30% (типовий показник для АСУДР) трансформується у відчутну економію експлуатаційних витрат автоперевізників та зменшення потреби в ремонті дорожнього покриття.

Економія часу користувачів є, мабуть, найвагомішою складовою сукупно-

го ефекту, хоча її грошова оцінка залишається дискусійною. Скорочення часу проїзду контрольованою мережею безпосередньо впливає на продуктивність праці водіїв комерційного транспорту, вивільняє час пасажирів для продуктивної діяльності, знижує втомлюваність учасників руху.

Для вантажних перевезень економія часу прямо конвертується у збільшення оборотності рухомого складу: за незмінного парку зростає обсяг перевезень або, за сталого обсягу, з'являється можливість скорочення парку. Для пасажирських перевезень ефект проявляється у підвищенні привабливості громадського транспорту та потенційному скороченні використання приватних автомобілів.

5.1.2 Ефекти у сфері безпеки руху

Зниження аварійності є критично важливим соціальним ефектом АСУДР. Механізм впливу на безпеку руху є багатофакторним.

По-перше, оптимізація режимів регулювання усуває провокуючі фактори. Неадекватно довгі цикли (понад 120 с) та затягнуті проміжні такти (понад 8–9 с) психологічно провокують водіїв до проїзду на заборонний сигнал: виникає враження несправності світлофора. Надто короткі такти (основний менше 7 с, проміжний менше 3 с) не забезпечують безпечного завершення маневрів. Адаптивне регулювання підтримує параметри циклу в оптимальному діапазоні.

По-друге, усувається невідповідність режиму регулювання реальним умовам руху. Ситуація, коли водій очікує на червоний сигнал за відсутності транспорту на конфліктуючому напрямку, є потужним стимулом до порушення правил. АСУДР, реагуючи на фактичні потоки, мінімізує такі ситуації.

По-третє, координоване регулювання формує чіткі групи автомобілів із розривами між ними. Це підвищує безпеку пішоходів: перехід вулиці у розривах між групами є значно безпечнішим, ніж у хаотичному потоці.

По-четверте, скорочення кількості гальмувань та прискорень зменшує ймовірність наїздів ззаду та бічних зіткнень при перестроюванні.

Статистика діючих АСУДР фіксує зниження кількості ДТП на 8–15% у

контрольованих районах. З урахуванням високої соціальної та економічної «ціни» кожної аварії цей ефект часто виявляється домінуючим у структурі сукупних вигод [20].

5.1.3 Екологічні ефекти

Поліпшення якості атмосферного повітря досягається через зменшення обсягу шкідливих викидів автотранспорту. Емісія забруднювачів (оксиди вуглецю, азоту, вуглеводні, тверді частинки) суттєво залежить від режиму руху. Максимальні питомі викиди характерні для режимів холостого ходу (очікування на перехрестях), розгону та руху з малими швидкостями. Рівномірний рух із середніми швидкостями є найекологічнішим.

АСУДР, скорочуючи час очікування та кількість циклів «зупинка–розгін», безпосередньо знижує валові викиди. Додатковий ефект забезпечує підвищення середньої швидкості: час перебування транспортного засобу в контрольованому районі скорочується, а режим руху наближається до оптимального.

Досвід експлуатації діючих систем свідчить про зниження рівня забруднення повітря на 15–20% у контрольованих районах.

Зниження шумового навантаження є супутнім ефектом скорочення кількості гальмувань та прискорень. Акустичний вплив автомобіля при рівномірному русі суттєво нижчий, ніж при інтенсивному маневруванні. Особливо відчутним є зменшення пікових рівнів шуму, пов'язаних із різким гальмуванням та інтенсивним розгоном.

Для кількісної оцінки зниження шумового навантаження застосовується емпірична залежність:

$$\Delta W = A \cdot \frac{r \cdot n_0}{q} \quad (5.1)$$

У цій формулі ΔW позначає зниження рівня шуму в децибелах за шкалою А; r — відносне скорочення кількості зупинок після впровадження АСУДР (безрозмірна величина від 0 до 1); n_0 — базова інтенсивність зупинок (кількість за секунду) до впровадження системи; q — інтенсивність потоку на досліджува-

ній смузі (авт./с); $A = 0,04$ — емпірична константа, що відображає різницю акустичного впливу рівномірно рухомого та маневруючого автомобіля.

Формула демонструє, що ефект шумозниження є найвідчутнішим на ділянках із високою базовою кількістю зупинок та відносно невисокою інтенсивністю — типова ситуація для другорядних вулиць із неоптимальним регулюванням.

5.1.4 Ефекти для громадського транспорту

Підвищення ефективності наземного пасажирського транспорту досягається через загальне скорочення затримок (від якого виграють усі учасники руху) та спеціальні механізми пріоритезації. Сучасні АСУДР можуть ідентифікувати транспортні засоби громадського транспорту (за допомогою радіомаяків, GPS-позиціонування або спеціальних детекторів) та надавати їм пріоритет — продовжувати зелену фазу до проїзду автобуса або прискорювати її настання.

Скорочення часу проїзду маршруту підвищує швидкість сполучення, що робить громадський транспорт привабливішим для пасажирів. Стабілізація інтервалів руху (завдяки зменшенню випадкових затримок на перехрестях) покращує регулярність сполучення та знижує час очікування на зупинках.

З операційної точки зору, підвищення швидкості сполучення дозволяє або скоротити парк рухомого складу за незмінних інтервалів, або підвищити частоту сполучення за незмінного парку.

5.1.5 Інформаційно-аналітичні ефекти

Автоматизований збір транспортної статистики є цінним побічним продуктом функціонування АСУДР. Розгалужена мережа детекторів транспорту генерує безперервний потік даних про інтенсивність, швидкість, склад потоків у ключових точках мережі. Обчислювальний комплекс системи забезпечує накопичення, систематизацію та первинну обробку цієї інформації.

Отримані дані мають багатоцільове застосування. Оперативна інформа-

ція використовується для адаптивного керування в реальному часі. Накопичена статистика слугує основою для: планування розвитку транспортної інфраструктури; проектування реконструкції вулично-дорожньої мережі; розробки схем організації руху; маршрутизації пасажирського транспорту; оцінки ефективності впроваджених заходів; прогнозування транспортного попиту.

Вартість окремого проведення таких обстежень традиційними методами (ручний підрахунок, відеофіксація з подальшою обробкою) є значною. АСУДР забезпечує їх безкоштовно як супутній продукт основної діяльності.

5.1.6 Ефекти підвищення технічної надійності

Централізований моніторинг периферійного обладнання кардинально змінює підходи до технічного обслуговування світлофорних об'єктів. У традиційній (децентралізованій) моделі несправність контролера або лампи виявляється або випадково (патрульними службами, зверненнями громадян), або за фактом аварії. Час від виникнення несправності до її виявлення може становити години, іноді — дні.

АСУДР забезпечує автоматичний контроль справності всіх компонентів периферії. Відхилення від нормального режиму роботи (відсутність відгуку контролера, невідповідність стану виходів командам, аномалії в показаннях детекторів) фіксуються центральним комплексом і негайно сигналізуються диспетчеру. Час виявлення несправності скорочується до секунд-хвилин.

Це має подвійний ефект. По-перше, скорочується час непрацездатності об'єкта, а отже — період підвищеного ризику аварій та затримок. По-друге, з'являється можливість превентивного обслуговування: аналіз трендів (поступове збільшення часу відгуку, зростання частоти збоїв) дозволяє прогнозувати відмови та проводити заміну компонентів до їх виходу з ладу.

5.2 Психологічні аспекти взаємодії водіїв із системою регулювання

Окремої уваги заслуговує вплив режимів регулювання на поведінку водіїв. Рух через мережу регульованих перехресть неминуче породжує конфліктні ситуації, частина яких ескалюється до ДТП. Дослідження показують, що певна частка конфліктів спричинена саме невідповідністю режиму регулювання реальним умовам руху [20].

Неоптимальні параметри циклу — завелика або замала тривалість тактів, нерациональний розподіл фаз, відсутність координації — збільшують кількість вимушених зупинок, прискорень та гальмувань. Кожна така подія є потенційною точкою конфлікту: водій, що різко гальмує, створює ризик наїзду ззаду; водій, що інтенсивно розганяється, може не встигнути зупинитися при несподіваній зміні сигналу.

Особливо небезпечним є психологічний вплив неадекватного регулювання. Тривале очікування на червоний сигнал (понад 90–120 с) за відсутності транспорту на конфліктуючому напрямку сприймається водієм як дискримінація, несправедливість або навіть несправність обладнання. Накопичене роздратування знижує пильність та провокує ризиковані рішення — проїзд на жовтий або навіть червоний сигнал.

Аналогічно, надмірно короткі такти (основний менше 7 с) не дають водієві часу для впевненого проїзду перехрестя, особливо при старті з черги. Виникає стрес через необхідність «встигнути», що провокує небезпечно інтенсивні прискорення.

АСУДР, забезпечуючи адаптацію режимів до фактичних умов, усуває більшість таких провокуючих факторів. Водій, що послідовно потрапляє на зелений сигнал при дотриманні швидкісного режиму («зелена хвиля»), перебуває у комфортному психологічному стані та схильний дотримуватися правил.

Результати транспортних обстежень до та після впровадження АСУДР фіксують зменшення кількості гальмувань на 5–30%, скорочення кількості зупинок біля перехресть, зниження шуму прискорень. Ці показники корелюють зі

статистикою аварійності: типове зниження кількості ДТП у контрольованому районі становить 8–15% [20].

5.3 Методика розрахунку окупності інвестицій

Економічна оцінка доцільності створення АСУДР базується на порівнянні очікуваних вигод із необхідними витратами. У вітчизняній практиці застосовується методика, що враховує два основні компоненти економії: скорочення транспортних затримок та зниження збитків від ДТП. Решта ефектів (екологічні, інформаційні тощо) вважаються супутніми та не монетизуються безпосередньо [20].

Такий консервативний підхід має обґрунтування: транспортні затримки та ДТП є найбільш достовірно вимірюваними показниками, тоді як оцінка інших ефектів потребує значних припущень. Відповідно, результати розрахунку слід інтерпретувати як нижню межу реального економічного ефекту.

5.3.1 Показники ефективності інвестицій

Річний економічний ефект $E_{\text{еф}}$ визначається як різниця між сукупною економією та витратами на досягнення цієї економії:

$$E_{\text{еф}} = E - C - E_{\text{н}} \cdot K \quad (5.2)$$

У цьому виразі E позначає річну економію у вартісному вимірі, що досягається завдяки скороченню затримок та аварійності; C — поточні (експлуатаційні) витрати на функціонування системи; K — капітальні вкладення на створення системи; $E_{\text{н}}$ — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, що відображає альтернативну дохідність інвестицій (обернена величина до нормативного терміну окупності).

Доданок $E_{\text{н}} \cdot K$ представляє альтернативний дохід, який міг би бути отриманий при інвестуванні капіталу K у стандартний проект із нормативною ефе-

ктивністю. Віднімання цього доданка забезпечує порівнянність проектів із різною капіталомісткістю.

Простий термін окупності капітальних вкладень:

$$T = \frac{K}{E - C} \quad (5.3)$$

Цей показник визначає період, протягом якого кумулятивна економія перевищить початкові інвестиції. Знаменник $(E - C)$ представляє чистий річний грошовий потік від експлуатації системи.

5.3.2 Структура капітальних витрат

Повний обсяг капітальних вкладень на створення АСУДР включає кілька компонентів:

$$K = C_0 + K_{\text{см}} + K_{\text{п}} + K_{\text{и}} \quad (5.4)$$

Вартість обладнання C_0 охоплює: центральний обчислювальний комплекс (сервери, робочі станції, мережеве обладнання); периферійні контролери світлофорних об'єктів; детектори транспорту (індуктивні петлі, відеодетектори, радарні датчики); керовані дорожні знаки та інформаційні табло; комунікаційне обладнання (модеми, маршрутизатори, медіаконвертери); системне та прикладне програмне забезпечення; допоміжне обладнання (джерела безперебійного живлення, кліматичне обладнання).

Будівельно-монтажні витрати $K_{\text{см}}$ включають: спорудження або реконструкцію будівлі диспетчерського центру; монтаж периферійного обладнання на вулично-дорожній мережі (встановлення контролерних шаф, прокладання петлевих детекторів, монтаж опор знаків та табло); прокладання кабельних ліній електроживлення та зв'язку (у разі використання провідних каналів); виконання дорожніх робіт, пов'язаних із встановленням обладнання.

Проектні витрати $K_{\text{п}}$ охоплюють: передпроектні дослідження (транспортні обстеження, аналіз існуючого стану, техніко-економічне обґрунтування); розробку проектної документації; науково-дослідні роботи (за потреби адаптації

алгоритмів до специфічних умов); дослідно-конструкторські роботи (за потреби нестандартного обладнання); розробку математичного та програмного забезпечення.

Пусконаладжувальні витрати $K_{\text{и}}$ включають: монтаж та налагодження обладнання; інтеграційне тестування; дослідну експлуатацію; навчання персоналу; розробку експлуатаційної документації.

5.3.3 Структура експлуатаційних витрат

Поточні витрати на функціонування АСУДР:

$$C = C_3 + C_{\text{т}} + C_{\text{а}} + C_{\text{е}} + C_{\text{ар}} \quad (5.5)$$

Витрати на персонал C_3 включають заробітну плату (основну та додаткову) з нарахуваннями на соціальне страхування для: диспетчерського персоналу центру керування; інженерно-технічного персоналу (системні адміністратори, програмісти, фахівці з експлуатації); ремонтно-обслуговуючого персоналу (техніки, електрики, монтажники); адміністративного персоналу (за наявності).

Витрати на технічне обслуговування та ремонт $C_{\text{т}}$ охоплюють: вартість запасних частин та витратних матеріалів; вартість послуг спеціалізованих організацій (за аутсорсингу окремих функцій); витрати на поточний ремонт будівель та споруд.

Амортизаційні відрахування $C_{\text{а}}$ розраховуються на основі первісної вартості обладнання та споруд за встановленими нормами амортизації. Термін корисного використання для обчислювальної техніки зазвичай становить 3–5 років, для периферійного обладнання — 7–10 років, для будівель та споруд — 20–30 років.

Витрати на електроенергію $C_{\text{е}}$ визначаються встановленою потужністю обладнання та тарифами на електроенергію. Основними споживачами є: центральний обчислювальний комплекс; периферійні контролери та детектори; освітлення та кліматичне обладнання приміщень.

Витрати на оренду каналів зв'язку $C_{ар}$ виникають при використанні орендованих ліній (виділені канали телефонної мережі, оптоволоконні лінії провайдерів). При побудові власної кабельної інфраструктури цей компонент відсутній, натомість зростають капітальні витрати та витрати на обслуговування.

5.3.4 Розрахунок річної економії

Величина економічного ефекту від впровадження АСУДР:

$$E = (3' - 3'') \cdot c_3 + N' \cdot k_N \cdot c_N \quad (5.6)$$

Перший доданок представляє економію від скорочення затримок: $3'$ та $3''$ — сумарні транспортні затримки на контрольованій мережі відповідно до та після впровадження системи (у авт.-год/рік); c_3 — вартісна оцінка однієї години затримки автомобіля.

Другий доданок відображає економію від зниження аварійності: N' — кількість ДТП на контрольованій мережі до впровадження (за рік); k_N — коефіцієнт відносного зниження аварійності (типово 0,08–0,15); c_N — усереднена вартість одного ДТП (включає матеріальні збитки, витрати на лікування потерпілих, виплати за втрату працездатності).

Значення затримок $3'$ та $3''$ обчислюються підсумовуванням по всіх перехрестях системи. Для кожного перехрестя виконується детальний розрахунок із урахуванням: фактичних режимів світлофорного регулювання; сезонної та добової варіації інтенсивності; алгоритмів адаптивного керування та ймовірності їх активації. На стадії проектування значення $3''$ визначається моделюванням; для діючих систем — натурними вимірюваннями.

На рис. 5.1 наведено номограму, що застосовується у США для оцінки вартості однієї зупинки транспортного засобу. Вартість залежить від двох факторів: швидкості, з якої розпочалося гальмування (визначає витрати енергії на зупинку та подальший розгін), та тривалості простою (визначає втрати часу). Номограма наочно демонструє, що вартість зупинки зростає нелінійно зі збіль-

Рисунок 5.1 – Номограма для визначення питомої вартості зупинки транспортного засобу залежно від початкової швидкості руху та тривалості простою (за методикою США)

шенням початкової швидкості та тривалості очікування.

Таблиця 5.1 – Порівняльні дані щодо вартісної оцінки транспортних затримок у різних країнах

Країна	Вартість однієї години затримки автомобіля, \$	Вартість однієї зупинки автомобіля, \$
США	1,0 ÷ 1,5	—
Німеччина	7,0	0,02 ÷ 0,03
Великобританія	0,75	0,002
Франція	1,5 ÷ 2,0	—
Швейцарія	4,0	0,04

У таблиці 5.1 наведено нормативні вартісні оцінки затримок та зупинок, що застосовуються в різних країнах для техніко-економічних розрахунків. Значний розкид значень (майже на порядок) пояснюється відмінностями в методиках розрахунку, рівні заробітних плат, структурі транспортних потоків (частка комерційного транспорту), паливних цінах тощо.

Слід зазначити, що наведені дані є історичними; для актуальних розрахунків необхідне коригування з урахуванням інфляції та зміни економічних умов.

5.4 Аналіз факторів, що впливають на показники ефективності

Зіставлення показників економічної ефективності АСУДР, впроваджених у різних містах та на різній технічній базі, потребує врахування численних контекстних факторів. Формально ідентичні системи можуть демонструвати суттєво різну ефективність залежно від умов впровадження.

Рівень попередньої організації руху є, мабуть, найвпливовішим фактором. Якщо до впровадження АСУДР на мережі функціонувала добре налагоджена система координованого регулювання, приріст ефективності буде значно меншим, ніж при заміні хаотичного набору неузгоджених контролерів. Парадоксально, але «гірший» початковий стан забезпечує «кращі» показники проекту.

Ступінь використання існуючої інфраструктури суттєво впливає на капіталомісткість. Якщо на мережі вже встановлено сучасні контролери з можливістю віддаленого керування та детектори транспорту, витрати на периферійне обладнання будуть мінімальними. Навпаки, повна заміна застарілого обладнання кратно збільшує бюджет проекту.

Спосіб організації каналів зв'язку може радикально змінити структуру витрат. Використання орендованих ліній телефонної мережі мінімізує капітальні витрати, але генерує значні поточні платежі. Побудова власної кабельної інфраструктури потребує великих початкових інвестицій, проте усуває орендні платежі та забезпечує кращі характеристики каналів.

Методика вимірювання ефективності може суттєво впливати на результати оцінки. Різні підходи до визначення базового рівня («до впровадження»), різний перелік врахованих ефектів, різна точність вимірювань призводять до непорівнянності результатів.

Топологія та масштаб контрольованої мережі впливають на питомі показники. Великі системи зазвичай демонструють кращу питому ефективність завдяки економії на масштабі (один центральний комплекс обслуговує більшу кількість перехресть). Водночас складність керування зростає нелінійно, що може нівелювати цей ефект.

5.5 Узагальнені результати впровадження АСУДР

Попри зазначені застереження щодо порівнянності, накопичений світовий досвід дозволяє зробити узагальнені висновки щодо економічної ефективності АСУДР.

Техніко-економічні розрахунки для численних введених в експлуатацію систем демонструють привабливі показники окупності. Типовий термін повернення інвестицій не перевищує 2–3 років, що є винятково коротким періодом для інфраструктурних проектів. Для порівняння: термін окупності дорожнього будівництва зазвичай становить 10–20 років, транспортних розв'язок — 5–10 років.

Висока ефективність АСУДР пояснюється кількома факторами. По-перше, система впливає на великий обсяг транспортної роботи: навіть невеликий відносний ефект (5–10% скорочення затримок), застосований до мільйонів авт.-год на рік, трансформується у значну абсолютну економію. По-друге, ефект є постійним та кумулятивним: система працює 24/7, генеруючи економію щодня протягом усього терміну експлуатації. По-третє, вартість обладнання постійно знижується завдяки прогресу мікроелектроніки, тоді як транспортні потоки та, відповідно, потенційна економія — зростають.

Слід підкреслити, що наведені оцінки базуються на консервативній методиці, що враховує лише монетизовані ефекти (затримки та ДТП). Повний соціально-економічний ефект, що включає екологічні, інформаційні та інші компоненти, є суттєво вищим. Це підтверджує стратегічну доцільність інвестицій у розвиток АСУДР як інструменту підвищення ефективності та безпеки міської транспортної системи.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

На підставі проведеного дослідження сучасних методів та технічних засобів керування дорожнім рухом сформульовано такі висновки та рекомендації щодо їх практичного застосування:

1. Фундаментальні закономірності теорії транспортних потоків, насамперед залежності типу «інтенсивність–щільність–швидкість», відображені в основній діаграмі потоку, забезпечують надійну теоретичну базу для проектування систем керування. Урахування стохастичної природи транспортного потоку через імовірнісні інтерпретації цих залежностей дозволяє коректно визначати вхідні параметри розрахункових моделей та оцінювати діапазони їх можливих значень, що є необхідною передумовою адекватного моделювання реальних транспортних процесів.
2. Перехід від традиційного жорсткого однопрограмного регулювання до адаптивних алгоритмів на основі детектування розривів у транспортному потоці (*gap-seeking*) створює принципово нові можливості для оптимізації роботи ізольованих перехресть. Автоматичне відстеження фактичної інтенсивності та динамічне коригування тривалості фаз забезпечують безперервну адаптацію режиму регулювання до поточних умов руху. За результатами моделювання та досвіду впровадження аналогічних систем, очікуване скорочення сумарних транспортних затримок становить 25–35% порівняно з базовим сценарієм фіксованого регулювання.
3. Інтеграція механізмів локальної корекції в системи координованого (мережевого) регулювання дозволяє поєднати переваги магістральної координації з гнучкістю адаптивного підходу. Динамічне регулювання ширини «зеленої смуги» відповідно до миттєвих значень інтенсивності на підходах до кожного перехрестя усуває надлишкові затримки, що виникають при невідповідності фіксованих параметрів координації реальній структурі потоків. Прогнозоване зниження затримок у межах координованої ді-

лянки становить 24–38%, причому максимальний ефект досягається на магістралях зі значною добовою варіацією інтенсивності.

4. Застосування схем динамічної організації руху, зокрема реверсивного регулювання смуг, є ефективним інструментом адаптації пропускнуої спроможності до нерівномірності транспортного попиту за напрямками. Гнучкий перерозподіл ширини проїзної частини між зустрічними потоками дозволяє максимально використати наявну інфраструктуру в пікові періоди, уникаючи капіталомістких заходів з розширення доріг. Економічний ефект проявляється у суттєвому скороченні потреби в реконструкції існуючих та будівництві нових транспортних артерій.
5. Розроблений методичний апарат оцінювання транспортних затримок на регульованих перехрестях інтегрує всі суттєві фактори впливу: параметри світлофорного циклу, інтенсивність та склад потоків, геометричні характеристики перехрестя, умови руху пішоходів. Комплексний характер методики забезпечує можливість не лише транспортної, але й економічної та екологічної оцінки варіантів проектних рішень, що є необхідною передумовою обґрунтованого вибору оптимальної стратегії регулювання.
6. Інтелектуальні бортові системи, функціонуючи як компонент інтегрованої (комбінованої) архітектури керування рухом, відкривають перспективи суттєвого підвищення ефективності використання вулично-дорожньої мережі. Індивідуальна оптимізація маршрутів на основі актуальної інформації про завантаження мережі, автоматичний перерозподіл потоків на менш навантажені напрямки, інформування водіїв про дорожню обстановку — ці функції в сукупності здатні знизити нерівномірність завантаження мережі та зменшити сумарний пробіг транспорту при незмінному обсязі перевезень.
7. Запропонований підхід до комплексної оцінки економіко-екологічної результативності проектів у сфері керування рухом охоплює ключові аспекти ефективності: кількісну оцінку зниження акустичного навантаження

на прилеглі території, калькуляцію необхідних капітальних вкладень з деталізацією за статтями витрат, розрахунок терміну окупності інвестицій з урахуванням дисконтування грошових потоків. Методика забезпечує порівнянність альтернативних варіантів та обґрунтований вибір пріоритетних напрямків інвестування.

Отримані результати підтверджують високу ефективність сучасних методів автоматизованого керування дорожнім рухом та доцільність їх широкого впровадження на вулично-дорожній мережі міст України.