

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра економічної кібернетики та інформатики

ЛУКОМСЬКИЙ Олександр Сергійович

**Математичні моделі оптимізації пунктів пропуску
на платних автомобільних дорогах /Mathematical
models for optimization of pass points on toll roads.**

спеціальність: 124 - Системний аналіз
освітньо-професійна програма - Системний аналіз

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи САМ-21
О. С. Лукомський

Науковий керівник:
Бабала (Дума) Л.В.

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:

" 22 " 11 2022 р.

Завідувач кафедри
Л. М. Буяк

ТЕРНОПІЛЬ - 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗУ ДОСВІДУ БУДІВНИЦТВА ПЛАТНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ.....	5
1.1 Особливості функціонування платних автомобільних шляхів у світовій практиці.....	5
1.2 Аналіз досвіду будівництва автомобільних доріг на території України.....	11
1.3 Детермінація умов та факторів, що впливають на проєктування та будівництво платних автомобільних доріг.....	14
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ І ГЕОМЕТРІЇ ПУНКТИВ ПРОПУСКУ.....	22
2.1. Характеристика геометричних параметрів пунктів пропуску.....	22
2.2. Визначення оптимальних довжин зон пунктів пропуску.....	27
2.3. Врахування особливостей характеристик транспортного потоку.....	32
РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПУНКТИВ ПРОПУСКУ.....	37
3.1. Виявлення ключових факторів моделі.....	37
3.2 Застосування теорії масового обслуговування.....	40
3.3 Визначення оптимальної кількості вікон пунктів пропуску.....	53
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Актуальність теми. Реалізація розроблених останніми роками інвестиційних проєктів створення платних автомобільних доріг в Україні пред'являє підвищені вимоги до їх техніко-економічного обґрунтування, але вітчизняний досвід комерційного будівництва та експлуатації дорожніх споруд нашій країні ще недостатній.

Будівництво платних автомобільних доріг вимагає формування нових та адаптації існуючих регламентів та рекомендацій розміщення транспортних споруд та об'єктів супутньої транспортної інфраструктури: пунктів пропуску транспортних засобів та їх елементів.

«Будівництво платних автомобільних доріг на території України тільки починається і питання обліку специфіки регіону становлять значний інтерес для вироблення регіональних рекомендацій щодо будівництва пунктів пропуску дороги та підвищення ефективності функціонування дорожньої мережі. І тому необхідно проаналізувати особливості формування регіональних транспортних потоків, які впливають технічні нормативи платної дорожньої інфраструктури.

У тому числі це стосується питань створення та підвищення ефективності транспортних коридорів з урахуванням забезпечення економічних зв'язків із країнами Європейського Союзу»[44].

У зв'язку з цим актуальність та безперечну практичну значимість представляє дослідження питань підвищення ефективності об'єктів транспортної інфраструктури, їх розміщення, обґрунтування геометричних параметрів з урахуванням регіональних особливостей формування транспортних потоків.

«Проблема проєктування та будівництва платних автомобільних доріг складна та актуальна. Великий внесок у вирішення різних питань цієї проблеми зробили вчені: Алексіков С.В., Домбровський А.М., Бондар Н.М., Боровик В.С., Власов С.С., Гальперіна З.М., Дінгес Е.Г. Ст, Жаденова С.В., Леонтьєв Р.Г., Лобанов Є.М., Міротін Л.Б., Петров Ю.М., Полякова Г.А., Сільянов В.В., Хом'як Я.В. , Ярмолінський В.А. та інші» [1-5, 14, 22-25].

«За кордоном питаннями ефективності платних автомобільних доріг займалися Ієн Г. Хіггіє, П'єр Віскерс, Мацунобу Масаєсі, Су Лі, Ву Х., Фішер Дж., Сміт. Н., Айсін М., Клодзінській Дж. та ін» [3].

Разом з тим, у цих роботах не знайшли достатнього відображення питання, пов'язаного з особливостями оцінки ефективності, оптимального планування та проектування пунктів пропуску з будівництва, реконструкції, ремонту, а також технічної експлуатації платних дорожніх об'єктів та, зокрема, щодо проектування пунктів пропуску платних автомобільних доріг, що зумовило постановку наступної мети та завдань даного дослідження.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності пунктів пропуску на платних автомобільних дорогах із урахуванням регіональних особливостей формування транспортних потоків.

Для досягнення мети було поставлено **такі завдання**:

1. Виявити особливості формування транспортних потоків мережі автомобільних доріг України.
2. Оцінити вплив регіональних характеристик транспортного потоку на параметри пунктів пропуску транспортних засобів.
3. Розробити методику оптимізації геометричних параметрів пунктів пропуску з урахуванням специфічних характеристик транспортного потоку.
4. Розробити математичну модель підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску платних автошляхів України у з урахуванням специфічних особливостей транспортного потоку.

Об'єктом дослідження є мережа автомобільних доріг України.

Предметом дослідження є геометричні параметри пунктів пропуску та ефективність їх функціонування на платних автомобільних дорогах регіону.

Методи дослідження: загальнонаукові методи (порівняльний аналіз, елементи теорії масового обслуговування, транспортне моделювання, алгоритмізація, побудова баз даних), а також спеціальні методи обробки даних із використанням програмних засобів побудови імітаційних транспортних моделей.

Наукова новизна роботи полягає у розробці математичної моделі підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску платних автошляхів України, за допомогою методики визначення геометричних параметрів пунктів пропуску на платній автомобільній дорозі.

Практична значимість кваліфікаційної роботи полягає:

- у вирішенні оптимізаційних завдань щодо визначення оптимальної кількості пунктів пропуску та їх геометричних параметрів;
- у розробці математичної моделі оптимізації роботи пункту пропуску платної автомобільної дороги;
- у розробці рекомендацій щодо проектування та вибору оптимального розміщення пунктів пропуску транспортних засобів.

Апробація роботи. Основні положення дипломної роботи доповідалися та обговорювалися ІІ на міжнародній науково-технічній конференції «SCIENCE AND TECHNOLOGY: PROBLEMS, PROSPECTS AND INNOVATIONS» 17-19.11.2022 року, Осака, Японія.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів з висновками, списку використаних джерел та додатків. Основний текст роботи містить 61 сторінок, 21 рисунок та 12 таблиць. Список літератури містить 44 найменування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗУ ДОСВІДУ БУДІВНИЦТВА ПЛАТНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

1.1. Особливості функціонування платних автомобільних шляхів у світовій практиці

У сучасній Україні дорожнє будівництво базується на принципах та методах закладених у першій половині ХХ ст.

- будівництво дорожнього одягу виконується із суворим дотриманням температурних та погодних умов, технології виконання робіт та якості матеріалів;

- при проєктуванні дорожнього одягу прагнуть максимально використовувати місцеві будівельні матеріали;

- по можливості конструкції повинні бути економічно доцільні та прості у технологічному виконанні;

- дорожній одяг проєктує з урахуванням унікальних кліматичних та ґрунтово-геологічних умов, та транспортного навантаження.

У країні з кожним роком збільшувалася кількість автомобілів, а загальна протяжність автомобільних доріг з твердим покриттям з 2004 практично не змінювалася (рис.1.1).

Довжина мережі автомобільних доріг в Україні становить близько 170 тис. км¹ (з урахуванням Криму та тимчасово окупованих територій на Сході України), в тому числі 166 тис. км з твердим покриттям² і 3,6 тис. км — ґрунтових.

СТРУКТУРА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

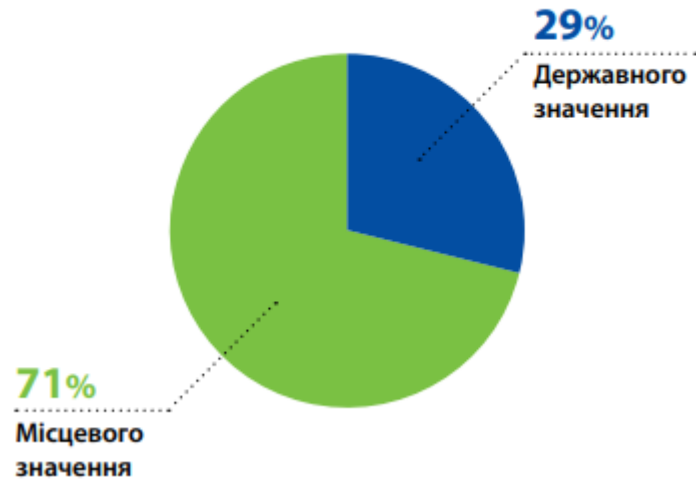


Рисунок 1.1 – Структура автомобільних доріг твердим покриттям в Україні

«Близько 52 тис. км складають дороги державного значення (міжнародні, національні, регіональні, територіальні), 117 тис. км — місцевого значення (обласні, районні).

Збільшення кількості автомобілів призвело до погіршення якості доріг, зростання навантаження на них, зростання кількості пробок, транспортних пригод, особливо у великих містах і на жвавих трасах».[3, 26].

У зв'язку зі складністю технологічних процесів, нестачею кваліфікованих фахівців і великою довжиною мережі доріг (при порівняно невеликій щільності доріг) темпи будівництва та ремонту доріг в Україні кілька разів нижчі, ніж у розвинених країнах Європи, США. (рис. 1.2).

«Щільність мережі автомобільних доріг в 5-7 разів нижче у порівнянні з країнами Західної Європи та США і становить 280 м на 1 кв.км. території.

На рис. 1.2 наведено дані про темпи та результати розвитку мережі доріг у України, США та Китаї. Порівняння ведеться лише дорогами з твердим покриттям.

Світова тенденція до збільшення щільності тремтіння з твердим покриттям та високими транспортно-експлуатаційними показниками на основних транспортних магістралях досягається за рахунок будівництва платних автомобільних доріг.

Платні автомагістралі використовують у понад 30 країнах світу. Загалом у світі налічується близько 25 млн км доріг, з яких приблизно 150 тис км — платні». [15].

Найбільш розвинена мережа платних автомобільних доріг (понад 3% від загальної протяжності всіх доріг у країні) мають Аргентина, Хорватія та Гонконг.

У таких країнах, «як Сербія, Швейцарія, Мексика, Італія, Словаччина, Малайзія, Корея, Колумбія, частка платних доріг становить від 1 до 3 %. Менше 1% посідає такі країни як Франція, Японія, Греція, Білорусь, Чехія, Іспанія, Норвегія, США, Китай, ПАР, Індонезія, Таїланд, Філіппіни. У Великій Британії, Чилі платних доріг менше 0,01% (у Великій Британії - 43 км). У Німеччині для легкового транспорту всі дороги безкоштовні, а плата стягується лише з вантажних автомобілів»[15].

Країна	Площа, тис. км ²	Довжина доріг, тис. км	Щільність доріг, км/км ²
 США	9 372 610	6 663	0,71
 Китай	9 596 960	4 577	0,48
 Японія	377 835	1 219	3,23
 Німеччина	357 022	645	1,81
 Великобританія	244 101	418	1,71
 Франція	547 030	1 050	1,92
 Італія	301 230	249	0,83
 Україна	603 700	170	0,28

Рис. 1.2 - Довжина автомобільних доріг із твердим покриттям у розвинених країнах

«Платні автомобільні дороги існували в тій чи іншій формі з давніх часів, з проїздом, що стягується з пасажирів, що проїжджають, але їх популярність зростає зі зростанням автомобіля. Перша платна дорога була запущена в Італії 1924 року, 1927-го – у Греції»[4, 12].

У масовому порядку впровадження платних доріг розпочалося у повоєнні роки, коли став очевидним розрив між пропускною спроможністю традиційних шосе та рівнем автомобілізації. У Франції нові траси проектувалися відразу як

платні, що становлять єдину мережу. За концесійною угодою інвестори отримували готову дорогу до управління на кілька десятиліть, протягом яких обслуговували її та збирали плату з користувачів. Після Францією цю модель стали освоювати Італія, Іспанія, Португалія.

«У першій половині XIX століття приватні платні дороги мали довжину понад 10 000 миль [8, 9], державний сектор надавав підтримку через земельні гранти і субсидії, а громадські дороги були побудовані переважно підтримки мережі приватних доріг.

У Норвегії, Угорщині та Хорватії також сформована мережа платних магістралей, у Великій Британії, Бельгії, Данії, Швеції, Ісландії платою оподатковуються переважно окремі завантажені ділянки: тунелі, мости, під'їзди до аеро- та морських портів» [2].

Багато країн з перехідною економікою вдалися до будівництва платних доріг, які повністю або частково фінансуються приватним капіталом. «Мексика менш ніж за п'ять років збудувала понад 4 тис. кілометрів платних доріг, Китай 18 тис. кілометрів чотири смугових швидкісних автомагістралей з обмеженим доступом збудував приблизно за десять років, в Індії до 2022 року планується збудувати 20 тис. км. платних доріг»[4, 10].

«Платні дороги у західній практиці є автомагістралі класу «expressway»: проїжджа частина мають 3-4 і більше смуг у кожному напрямку; всі перетину – у різних рівнях; відстань між послідовними примиканнями становить 25-30 і більше кілометрів; платні автомобільні дороги не беруть участь у місцевих транспортних зв'язках та, відповідно, у локальному розвитку території»[12-27].

Зарубіжний досвід створення платних автошляхів свідчить про можливість виникнення проблем, пов'язаних з експлуатацією платних автомобільних доріг, які говорять про те, що цей інструмент не можна вважати універсальним способом розвитку транспортної системи.

Часто будівництво платних доріг викликає невдоволення громадськості. Наприклад, у Німеччині подібна ініціатива уряду призвела до протестів з боку

населення (73% жителів висловилися категорично проти запровадження вартості за проїзд автошляхами).

У Великобританії проєкт створення шосе М6 «Toll» навколо Бірмінгема багато хто вважає провальним: лише 25% водіїв користуються платною магістраллю, решта віддає перевагу безкоштовним аналогам.

У Іспанії невдоволення концесійних компаній, своєю чергою, викликає розвиток магістралей- дублерів, куди уряд виділяє значні кошти; це призводить до скорочення кількості користувачів платними автошляхами, а, отже, і до зниження доходів, які отримують концесіонери (що скорочує зацікавленість приватного бізнесу в партнерських відносинах з державою)»[13].

Платні дороги повинні споруджуватися відповідно до найвищих вимог і, відповідно, відповідати або навіть перевищувати базові вимоги до автомобільних доріг у складі міжнародних мереж. Облаштування та технічні параметри платних доріг повинні забезпечувати користувачеві скорочення часу поїздки, підвищений комфорт.

При низькій інтенсивності руху по об'єкту, прийнятна для експлуатуючої організації плата за проїзд не буде справедливою з точки зору користувача, оскільки вона буде нижчою або тільки порівнянною з матеріальним вираженням тих вигод, які користувач отримає при проїзді платним автодорожнім об'єктом. З іншого боку, встановлення занадто низького розміру плати призведе до зростання пасажиро- та вантажопотоків по об'єкту до рівня, на який об'єкт не був розрахований, що спричинить у кращому разі зниження експлуатаційної швидкості на об'єкті, а в гіршому випадку — утворення заторів. Як в тому, так і в іншому випадку результатом буде зниження якісних характеристик платного автодорожнього об'єкта та зниження рівня ефективності його експлуатації.

«Основні параметри таких доріг надають користувачеві такі переваги як:

- підвищена безпека руху (висока якість покриття, оснащеність протягом усього, наявність розділових смуг, додаткових огорож тощо);
- високий швидкісний режим руху (до 150 км/год);
- рух за умов вільного потоку без затримки автомобілів;

- розвинена придорожня інфраструктура;
- оперативне реагування на дорожньо-транспортні пригоди (наявність камер відеоспостережень служб технічної допомоги);
- інформаційне забезпечення користувачів (наявність екстреного зв'язку інформаційних табло додаткових знаків тощо)»[19].

Основна проблема при проектуванні платних автомобільних доріг це прогнозування інтенсивності руху, відхилення фактичного обсягу руху від прогнозу на рік починається з $\pm 20\%$ за умови, що всі припущення є коректними та правильно сформульованими та умови, що впливають на прогноз враховані.

Наприклад, у деяких із дорожніх концесій у Мексиці обсяги руху становили лише п'яту частину від очікуваних. «В Угорщині помилки на стадії проектування призвели до націоналізації дороги та викликали заборгованість держави перед інвесторами у розмірі 300 млн. євро. Аналогічні невдачі траплялися й інших країнах, як розвиваються, і розвинених. Так, платна дорога у передмісті Вашингтона Даллес Грінвей залучила лише третину очікуваного руху автомобілів. Навіть після скорочення плати за проїзд на 40% густина потоку зросла незначно, не дотягнувши до проєктної величини 30%» [34].

Платні дороги розрізняються порядком збору коштів у пункті пропуску: бар'єрні, з прийомом готівки і перед шлагбаумом, що так і не вимагають зупинки (без бар'єрні), які на ходу списують кошти з транспондера.

За системою в'їзду/виїзду: «відкрита» - вільний в'їзд та виїзд на автомобільну дорогу, встановлення пунктів пропуску через рівні відстані та «закрита» - потрапити на платну дорогу можна лише через в'їзний/виїзний пункт.

Оплата може здійснюватися готівкою, карткою, зняттям оплати з транспондера, за допомогою абонементів (вінєток, стікерів), що кріпляться на лобове скло автомобіля.

1.2. Аналіз досвіду будівництва автомобільних доріг на території України

Велика кількість дорікань на незадовільні автомобільні дороги полягає у недоліках системи управління їх функціонуванням. Остання не побудована на принципах ринкових відносин, де в основі усього є складна цінова динаміка. Не існує чіткої оцінки послуг, що надають автомобільні дороги суспільству.

Видатки на утримання автомобільних доріг фінансуються із загальних податкових надходжень, крім того, дорожні організації не завжди виконують обов'язки, які вказані законами ринкової дисципліни. Усе це приводить до незадовільного управління.

«Управління функціонуванням автомобільних доріг здійснюється за аналогією із соціальними службами, що мають різні цілі. Користувачі автомобільних доріг платять прямі та непрямі податки, однак ці надходження практично завжди трактуються як загальні податкові надходження і зараховуються в державний бюджет»[8]. З іншого боку, автомобільні дороги замість того, щоб фінансуватися за рахунок платежів користувачів, фінансуються шляхом прямих бюджетних асигнувань.

«Користувачі не платять безпосередньо за користування автомобільними дорогами, через це вони не зацікавлені ані в особливому виборі свого маршруту, ані у контролі витрачених коштів дорожніми організаціями. Через поганий контроль і без тиску користувачів доріг, дорожні організації не прагнуть ефективно використовувати наявні ресурси. Уряд не визначає конкретні цілі, керівники не виявляють ініціативу в мінімізації витрат, тому що зниження витрат просто призводить до зниження рівня фінансування з державного бюджету».[7]

Відсутність санкцій, штатних співробітників складно привчити до дисципліни, тому керівництво дуже рідко карає їх за погану роботу. У зв'язку з перерахованим виникає задача прищепити ефективну етику використання продукції та усіх видів ресурсів. Великою проблемою управління є професійна незбалансованість. У дорожніх організаціях високим рівнем технічних знань

володіють зазвичай інженери, але вони недостатньо володіють політичними та управлінськими навичками для спостереження за цією, досить складною, системою.

Отже, потрібним є перегляд ролі держави в усіх секторах економіки, включаючи функціонування мережі автомобільних доріг. Ці зміни мають супроводжуватися професійним навчанням співробітників проектуванню та економічному аналізу, управлінню та нагляду за виконанням контрактів і визначенням пріоритетів у роботі. Також необхідним є ознайомлення з новими технологіями та технікою.

До зацікавлених сторін ринку будівництва та ремонту автомобільних доріг відносяться (Рис.1.3):

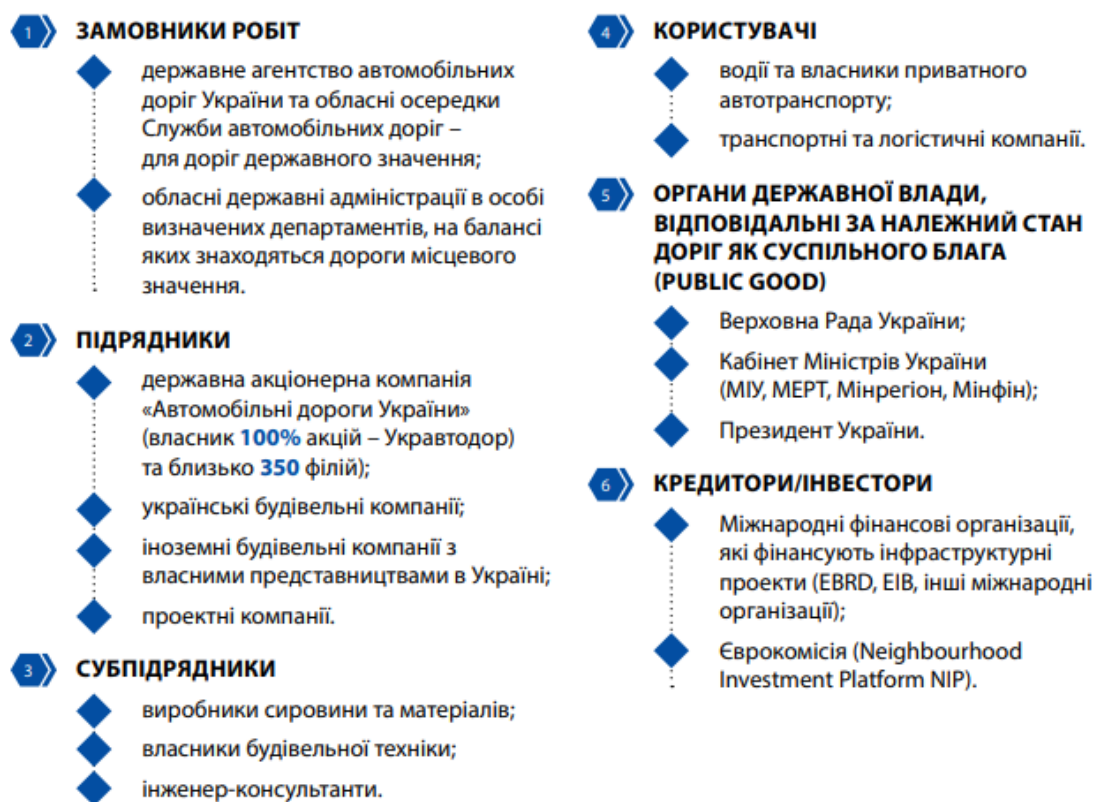


Рис.1.3. Зацікавлені сторони ринку будівництва та ремонту автомобільних доріг

Наслідки погано розвиненої дорожньої інфраструктури України серед ключових збитків для економіки України можна виділити наступні (рис.1.4):

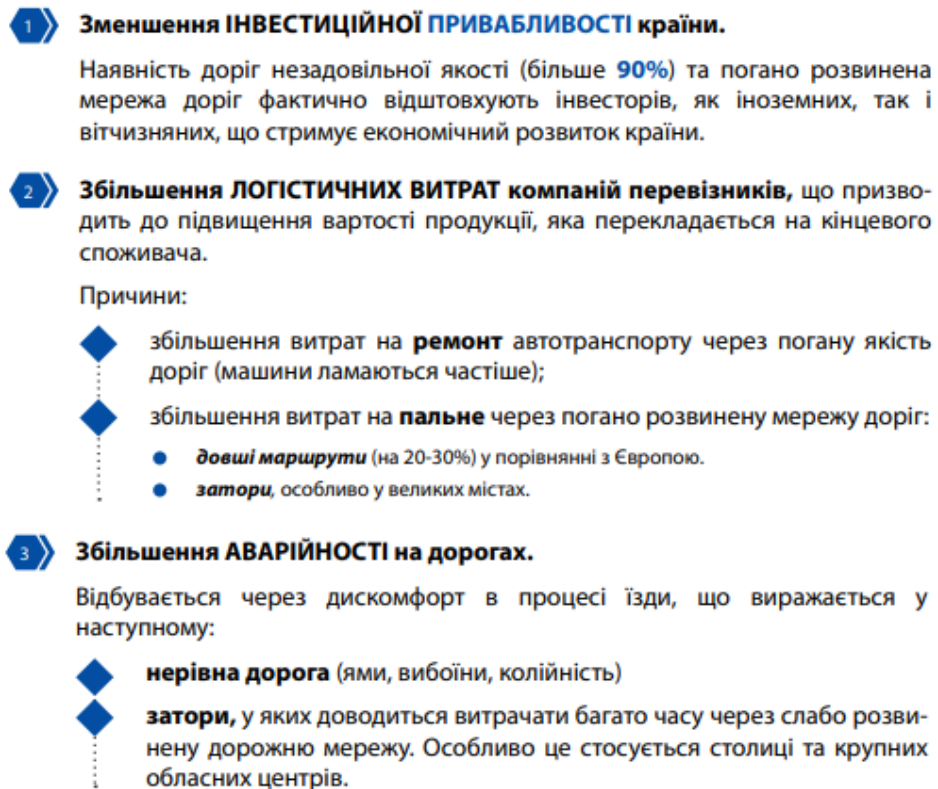


Рис.1.4. Наслідки погано розвиненої дорожньої інфраструктури України

Отже, «капіталовкладення у дорожню галузь — це перевірений світовим досвідом драйвер економічного розвитку держави. Будівництво нових доріг та покращення якості діючої мережі сприяє кращому розміщенню продуктивних сил, появі нових транспортних маршрутів, більш ефективному використанню ресурсів країни.

На сьогоднішній день зношена дорожня інфраструктура України є однією із перешкод у підвищенні конкурентоспроможності країни на зовнішньому ринку. Це пов'язано з тим, що тривалий час в Україні існувала практика фінансування автомобільних доріг за залишковим принципом, виходячи з можливостей бюджету. З 2019 року розвиток доріг став одним з пріоритетів українського Уряду і ми можемо щодня спостерігати реальні позитивні зміни у цьому напрямку».[15]

1.3. Детермінація умов та факторів, що впливають на проєктування та будівництво платних автомобільних доріг

Головною причиною низької ефективності функціонування пунктів пропуску платного транспортного об'єкта є допущені на стадії розробки проєкту будівництва платних дорожніх споруд помилки щодо оцінки очікуваної інтенсивності руху за ними. Істотний вплив на величину фактичних розмірів руху надають прорахунки, що виникають при проєктуванні, у визначенні раціональної кількості пунктів її стягування, їх розміщення, способів і технології збору плати за проїзд [2, 9].

Вихідними даними для проєктування пунктів пропуску є прогнозована інтенсивність дорожнього руху, яку формують транзитні та місцеві транспортні потоки. Доступність за вартістю проїзду та близькість до основних об'єктів тяжіння, що формують транспортний потік, впливають на інтенсивність транспортних засобів.

Тому після ухвалення рішення про будівництво платної дороги, приступають до наступного важливого етапу - визначення її оптимальної конфігурації. Для визначення оптимальної конфігурації платної автомобільної дороги в першу чергу на основі ситуаційного плану будівництва та передбачуваної траєкторії її проходження аналізуються розташовані по обидва боки вздовж неї великі райони, житлові масиви, промислові та торгові зони, а також транспортні вузли та розв'язки, які можуть бути кінцевими або проміжними пунктами призначення, що рухаються цією дорогою транспортних засобів [10].

Кількість пунктів пропуску (ПП) та їх розміщення по трасі платної автомобільної дороги визначається на основі техніко-економічних розрахунків з урахуванням чинних нормативно-технічних документів та вказівок щодо безпеки руху [14, 27].

«Існує ряд основних параметрів, які необхідно встановити до початку проєктування:

- односторонній або двосторонній пункт обслуговування;

- вимоги до пропускну́ї спроможності ПП та очікуваний обсяг трафіку;
- дозволені способи оплати проїзду;
- рівні та категорії транспортних засобів;
- можливе розташування площі ПП та доступна площа землі під розміщення ПП;
- пріоритетні вимоги: автобуси, транспортні засоби великої місткості, транспортні засоби екстреної допомоги, транспортні засоби, що звільнені від плати за проїзд;
- положення для автомобілів з лівостороннім/правостороннім керуванням;
- близькість до транспортних розв'язок на вході на платну дорогу;
- геометрія ПП;
- умови проїзду;
- можливість переведення окремих полос ПП на електронну систему оплати або перетворення на відкриту систему;
- спосіб розмежування платної дороги від безкоштовної;
- профіль та поперечний ухил;
- матеріали дорожнього покриття для мінімізації частоти ремонтів, у тому числі які забезпечують стійкість покриття до руйнування біля зони гальмування транспортних засобів;
- співвідношення кількості смуг на платній дорозі до кількості платних смуг на ПП;
- вимоги до зони очікування, що ґрунтуються на аналізі пропускну́ї спроможності запропонованої конфігурації ПП у періоди пікового навантаження;
- умови руху для негабаритних вантажівок» [8].

До факторів, що враховуються в процесі опрацювання проєктних рішень платних доріг, відносяться: вид руху - транзитне або місцеве, число перетинів на платній дорозі, доступність пунктів пропуску.

Пункти пропуску можна класифікувати з організації системи доступу на дорогу (закрита, відкрита та змішана системи) та за рівнем автоматизації

технології збору плати за проїзд (ручна, напівавтоматична та автоматична технології)[33].

Відкрита система стягнення плати за проїзд - спосіб оплати, при якому плата стягується при проїзді через єдиний ПП, розташований на в'їзді, виїзді або протягом платної дороги, ділянки дороги чи дорожнього об'єкта. При відкритій системі розмір плати не залежить від фактично пройденої відстані, а в'їзд на платну дорогу (дорожній об'єкт) з доріг, що примикають, і виїзд з платної дороги (дорожнього об'єкта) на сусідні дороги залишається вільним.

У відкритій системі ПП розташовуються на підходах до міст, де кількість транзитних поїздок максимально або на завантаженій ділянці дорожнього руху. Користувачі ідентифікуються за типом транспортних засобів та сплачують фіксовану плату за проїзд. Загальна схема відкритої системи збору платежів представлена на рис. 1.5.

Відкриті системи ефективні на платних дорогах із великою кількістю транзитних автомобілів та у випадках, коли необхідно звільнити від плати окремі місцеві транспортні зв'язки, що здійснюються без проїзду ПП.

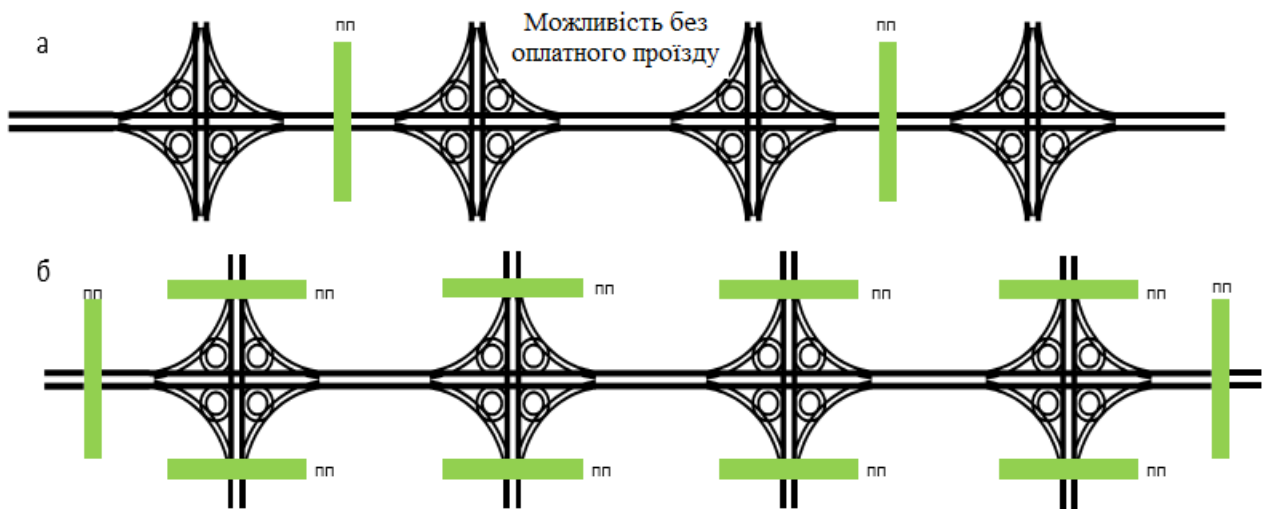


Рис. 1.5 – Системи стягування плати за проїзд: а – відкрита, б – закрита

Крім зазначеної переваги, дана система є найбільш економічною, оскільки передбачає, по-перше, створення контрольно-пропускних пунктів тільки на в'їзді на дорожню споруду і, по-друге, лише одну зупинку транспортних засобів, при їх русі платним дорожнім маршрутом.

Однак відкрита система збору плати за проїзд має досить істотний недолік: вона може використовуватися тільки в тому випадку, якщо відстань руху всіх транспортних засобів, що пропускаються через кожен ПП, однакова[28].

Закрита система стягування плати за проїзд - спосіб оплати, при якому оплата провадиться на виїзді з платної дороги за талоном, отриманим користувачем на в'їзді на платну дорогу. При закритій системі стягування плати розмір плати залежить від фактично пройденної відстані, а ПП встановлюються на всіх в'їздах та виїздах із платної дороги, що дозволяє забезпечити повний контроль за рухом. Користувач робить лише дві зупинки для здійснення оплати, але така система вимагає встановлення більшої кількості ПП і відповідно витрат на будівництво та експлуатацію.

При закритій системі збору плати за проїзд виключається можливість в'їзду на платну дорожню споруду і виїзду з неї, минаючи проїзд через контрольні пункти, які розташовуються на розширеннях доріг, що спеціально створюються для цієї мети. У цьому випадку проїзд транспортного засобу платною спорудою реєструється на в'їзному контрольному пункті, а на виїзному здійснюється його оплата відповідно до фактично пройденної відстані.

Стягнення плати провадиться при виїзді за талонами, отриманими при в'їзді на платну автомобільну дорогу, виходячи з фактичного пробігу за відповідним тарифом.

У закритих системах контролюються всі в'їзди та виїзди з платної автомобільної дороги, причому закрыта система дозволяє здійснювати практично повний контроль за рухом.

Перша перевага цієї системи полягає у можливості проектування будь-якої кількості в'їздів на платну дорожню споруду та з'їздів з неї, скорочуючи тим самим час руху транспортних засобів, що проходять по ньому, до пунктів призначення.

Очевидним недоліком цієї системи є додаткові витрати на створення контрольно-пропускних пристроїв на виїзді з платної споруди, необхідність повторної зупинки транспортних засобів при її проходженні. Тому можна

констатувати, що ефективне функціонування закритої системи збору плати за проїзд може бути забезпечене лише тоді, коли відстані між в'їзними та виїзними контрольними пунктами є досить великими [28].

Принципова різниця між відкритою та закритою системами збору плати за проїзд полягає в тому, що відкрита система не передбачає жодних проміжних з'їздів на платній автомобільній дорозі або платній її ділянці.

У ряді випадків, як свідчить світова практика, може бути доцільним створення змішаних систем збору плати за проїзд у пункті перепустки, де окремі ділянки обслуговуються відкритою, інші – закритою системою, у своїй вартість відкритих систем майже вдвічі дешевше, ніж закритих.

Ряд дослідників при виборі системи збору плати у пункті пропуску орієнтуються на витрати, які слід враховувати під час проєктування відкритої та закритої систем (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Склад витрат, що підлягають обліку під час проєктування системи збору плати за проїзд

Найменування видів витрат та втрат, що підлягають обліку при виборі ПП	Склад витрат під час проєктування ПП			
	відкритий		закритий	
	на в'їзді	на виїзді	на в'їзді	на виїзді
На створення ПП	+	-	+	+
На експлуатацію ПП	+	-	+	+
На будівництво з'їздів	-		+	
Втрати часу автомобілів:				
у пунктів збору плати	+	-	+	+
на об'їздах	+		-	

За методом стягування плати ПП поділяються на бар'єрні, з необхідністю зупинки перед шлагбаумом для оплати, і на без бар'єрні, що не вимагають зупинки, ідентифікують і списують плату з транспортного засобу, що проходить.

Системи стягування оплати поділяються на ручну, напівавтоматичну, автоматичну чи електронну. При ручній технології збору передбачається оплата за проїзд готівкою або попередньо купленими талонами, а також кредитними картками, при автоматичній - використання різноманітних автоматів, при

електронній - використання спеціальних електронних систем без зупинки автомобілів. В одному вікні ПП можливе застосування кількох способів стягування плати.

Такі системи включають електронні пристрої, що розміщуються на автомобілях, що генерують сигнали, і приймають їх пристрої, що розміщуються на узбіччях дорожніх споруд. Зчитування інформації про автомобілі, що проходять по платних спорудах, може здійснюватися за будь-якої швидкості їх руху; при цьому одночасно фіксуються і допускаються порушення встановленого режиму руху транспортних потоків, якщо на нього накладаються обмеження.

Автоматичні системи збору плати за проїзд застосовуються нині у Норвегії, Франції, Італії та США [22].

Пропускна здатність ПП за автоматичної технології збору плати за проїзд становить 1500-1800 авт./год. на одну смугу. Автоматичні технології є гнучкими, тому що при їх використанні можна стягувати плату за будь-які види транспортних послуг, зокрема за проїзд у години «пік»[43].

Електронні системи оплати використовуються в багатьох країнах для оплати транспортних операцій, найчастіше для плати за користування доріг. Транспортними засобами певних категорій, наприклад, лише у разі вантажних автомобілів, маса яких перевищує певну межу.

Електронна система оплати дозволяє використовувати прогресивні тарифи, здійснювати проїзд цією ділянкою без зупинки, знизити трудомісткість розрахунків, можливість ідентифікувати плату за проїзд в залежності від часу доби, від дороги та типу автотранспорту, безперешкодно пропускати транспортний потік. Від технології збору у пункті пропуску залежить рівень обслуговування та привабливість даної дороги для користувачів.

Тарифи змінюються залежно від типу транспортного засобу, дня тижня та доби.

Технічні рішення, що приймаються в проектах, повинні забезпечувати користувачеві платних доріг скорочення часу на проїзд, підвищений комфорт та

створити зацікавленість у виборі проїзду платною дорогою за наявності альтернативного проїзду.

Висновки до розділу 1

Незважаючи на розвиток будівництва платних автомобільних доріг в Україні, залучення інвестицій у дорожню галузь, залишилося багато невивчених питань у їх проектуванні.

Вивчення зарубіжного та вітчизняного досвіду створення та проектування платних автомобільних доріг свідчить про те, що невирішеними залишаються питання:

- визначення та обґрунтування геометричних параметрів пунктів пропуску (ширина, довжина, конфігурація);
- оцінки ефективності обраних проектних рішень;
- визначення оптимальної кількості пунктів збору плати за проїзд.

Це підтверджується і наявністю на сьогодні дуже невеликої кількості нормативно-методичних документів, що регламентують ці питання[7].

Таким чином, метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності пунктів пропуску на платних автомобільних дорогах із урахуванням регіональних особливостей формування транспортних потоків.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Виявити особливості формування транспортних потоків мережі автомобільних доріг України.
2. Оцінити вплив регіональних характеристик транспортного потоку на параметри пунктів пропуску транспортних засобів.
3. Розробити методику оптимізації геометричних параметрів пунктів пропуску з урахуванням специфічних характеристик транспортного потоку.

4. Розробити математичну модель підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску платних автошляхів України з урахуванням специфічних особливостей транспортного потоку.

5. Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску на платних автомобільних дорогах України з урахуванням регіональних особливостей транспортних потоків.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ І ГЕОМЕТРІЇ ПУНКТІВ ПРОПУСКУ

2.1. Характеристика геометричних параметрів пунктів пропуску

Проектна схема площі пункту пропуску залежить від множини факторів, які будуть визначати кількість смуг і, отже, ширину та результуючу довжину площі пункту пропуску.

Для визначення геометричних параметрів площі пункту пропуску необхідно розглянути його структуру та конфігурації.

На даний момент проектування пунктів пропуску ведеться з урахуванням положень «Методичних рекомендацій щодо будівництва та розміщення пунктів справляння плати за проїзд». Згідно з методичними рекомендаціями система ПП за проїзд, що влаштовується на в'їзді або виїзді з платної ділянки дороги включає такі основні елементи:

- в'їзний та виїзний майданчики зі смугами руху;
- транзитні (пропускні) смуги руху транспортних засобів із розміткою;
- транзитну смугу для негабаритних транспортних засобів;
- острівці для розміщення кабін збору плати за проїзд, розмежування смуг руху та утворення контрольованих проїздів для транспортних засобів;
- кабінки ПП із робочим місцем касира-контролера;
- підйомні шлагбауми, з'єднані з контрольно-касовою апаратурою;
- світлофори, вказівні знаки та інформаційні табло;
- захисний дах (навіс);
- галерею, що з'єднує комплекс острівців та кабін з адміністративно-побутовою будівлею ПП;
- датчики та вимірювальні прилади для збору даних про пропуск транспортних засобів;
- обладнання для видачі квитків та талонів.

Встановлено і граничні характеристики площі: довжина робочої зони площі ПП приймається не менше 312 м, ширина визначається в залежності від кількості

смуг руху (ширина однієї смуги - 3,75 м), необхідної пропускної спроможності ПП та ширини проїзду негабаритного транспорту (не менше 6 м).

При цьому в'їзні та виїзні майданчики повинні мати довжину не менше 150 м. У результаті всі площі ПП мають однакову конфігурацію та розміри і найчастіше відрізняються між собою лише за кількістю вікон пункту пропуску [32].

Вибір системи стягування плати та місць розміщення ПП здійснюється на етапі розробки «Обґрунтування інвестицій» у створення платної дороги на основі оцінки економічної доцільності та з урахуванням розрахункової інтенсивності руху та структури транспортного потоку, кількості та розташування транспортних розв'язок, інтенсивності транзитного потоку та ступеня використання платної дороги (дорожнього об'єкта) для транспортних зв'язків. Основний критерій вибору системи стягування плати – максимізація прибутку від експлуатації платної автомобільної дороги.

Для того, щоб проаналізувати роботу пункту пропуску, його можна подати у вигляді площі, поділеної на зони, що проходять транспортний засіб від входу на пункт пропуску до в'їзду на проїзну частину автомобільної дороги. Цих зон можна виділити 4: зони входу, черги, виходу та злиття.

У **зоні входу** відбувається перебудова транспортного засобу у конкретне вікно ПП, у **зоні черги** – очікування оплати, у **зоні виходу** зміна швидкісного режиму та у **зоні злиття** – вхід до основного транспортного потоку. У зоні входу та зоні злиття відбувається зміна кількості смуг щодо основної проїжджої частини, конфігурація цих зон може бути різною (рис. 2.1).



Рис. 2.1 – Основні зони площі ПП

Площа пункту пропуску на вході складається із зони входу та зони черги, після проходження обслуговування із зони виходу та зони злиття. У зоні входу відбувається перебудова транспортного засобу у конкретне вікно ПП, у зоні черги – очікування оплати, у зоні виходу зміна швидкісного режиму та у зоні злиття – вхід до основного транспортного потоку.

У зоні входу та зоні злиття відбувається зміна кількості смуг по відношенню до основної проїжджої частини, конфігурація цих зон може бути різною.

Вхід на площу пункту пропуску (підхід до ПП) розташований на початку зони входу, що розширюється до проектної ширини площі. Швидкість руху в зоні входу знижується, оскільки водії вибирають смугу руху в залежності від методу оплати, класифікації тарифів або довжини черги. Наприкінці зони входу транспортний потік входить до зони черги.

Довжина зони черги має бути достатньою для розміщення розрахункового потоку. Протяжність зони черг при максимальному річному піковому потоці на годину повинна гарантувати, що черга з транспортних засобів не досягне проїзної частини підходу до ПП.

При виїзді з платної лінії потік входить у зону виходу, де автомобілі прискорюються, щоб набрати швидкість. За зоною виходу знаходиться зона злиття, ширина якої зменшується, щоб направити рух до поперечного перерізу проїзної частини. Кількість зон та його довжина залежить від конфігурації площі пункту пропуску.

Проаналізувавши існуючі схеми пунктів пропуску, що застосовуються в різних країнах на платних автомобільних дорогах можна виділити три основні схеми організації пунктів пропуску (рис. 2.2).

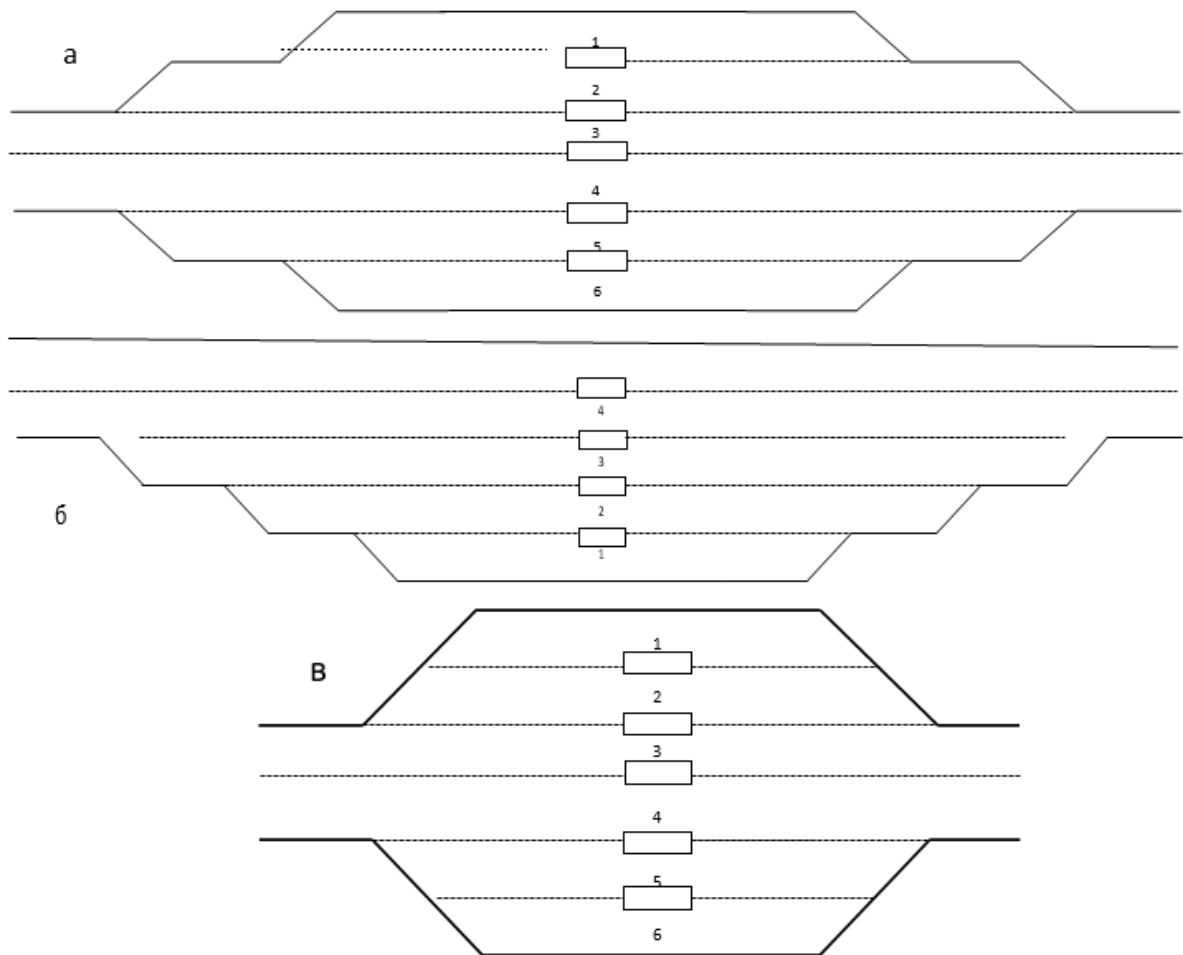


Рис.2.2. Схеми організації пунктів пропуску:

а - двостороннє злиття, б - одностороннє, в - злиття в одній точці

Схеми класифіковані за способом об'єднання та поділу транспортних потоків при перебудові на підході до вікон пункту пропуску: а - двостороннє злиття, б - одностороннє, в - злиття в одній точці.

При схемі організації пункту пропуску на кшталт «а» відбувається поступове перебудова транспортних потоків із двох сторін у зоні входу - кількість смуг поступово збільшується до необхідної кількості вікон ПП, але в виході, після проходження вікна оплати - знову зменшується кількість смуг платної автомобільної дороги.

При схемі за типом «б» поділ та злиття транспортних потоків відбувається за рахунок поступового та одностороннього їх перестроювання вправо на вході ПП та вліво на виході.

При схемі на кшталт «в» поділ і злиття транспортних потоків відбувається у одній точці, однакою відстані після зони виходу, довжина зони злиття у своїй мінімальна.

Тип схеми впливає на довжину площі пункту пропуску, кількість можливих конфліктів під час проходження пункту пропуску, розміри та геометрію земельної ділянки, яку необхідно виділити під будівництво ПП.

Тому щодо довжини ПП необхідно визначити конфігурацію площі і довжини їх окремих зон.

«Для визначення ширини пункту пропуску необхідно знати конфігурацію площі пункту пропуску, число вікон в ПП, необхідні пропуску транспортного потоку з розрахунковою інтенсивністю. Ширина площі ПП залежить від кількості смуг, класу автомобіля, його габаритів, а також кількості необхідного обладнання для обслуговування смуги та обраної системи оплати. Як показує досвід будівництва пунктів пропуску, для забезпечення максимальної експлуатаційної гнучкості платні смуги мають бути однакою ширини, за винятком смуг для негабаритних транспортних засобів, для яких необхідно виділити окрему смугу»[25].

2.2. Визначення оптимальних довжин зон пунктів пропуску

Для визначення довжини площі ПП необхідно розрахувати довжини 4 зон: входу (L_A), черги (L_O), виходу (L_B) та злиття (L_C) (рис. 2.3.). Довжина технологічного острова, де розташовані вікна оплати ПП (ЛП), визначається параметрами технологічного обладнання необхідно для здійснення пропуску та стягування плати.

Зона входу та черги - це ділянки на яких відбувається поділ транспортних потоків з подальшим його уповільненням при наближенні до зони ПП, зони виходу та злиття – ділянка на якій відбувається прискорення транспортного потоку, пошук розриву та злиття транспортних потоків. Зона черги та зона виходу повинні мати достатню довжину, щоб, в'їхавши на смугу зі швидкістю руху на прямій ділянці, водії могли без інтенсивного гальмування знизити швидкість до допустимої для цієї системи оплати та в зоні виходу набрати швидкість, більшу швидкість транзитного потоку, і деякий час рухатися з нею в очікуванні можливості включитися в потік.

Довжина зони черги визначається виходячи з кількості транспортних засобів, що очікують оплати, та їх типу. Кількість транспортних засобів у зоні очікування визначається інтенсивністю, кількістю вікон у пункті пропуску.

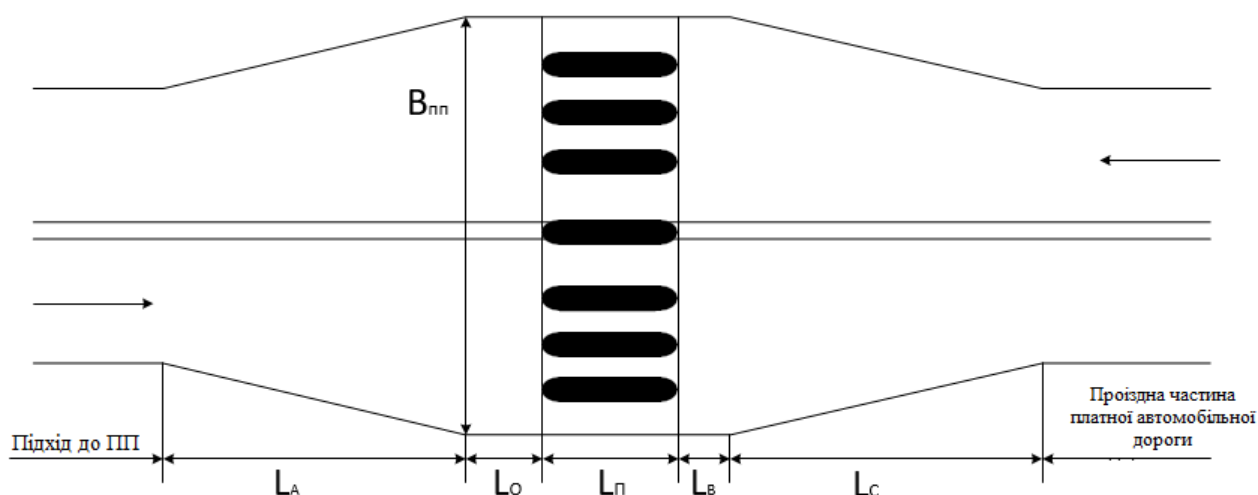


Рис.2.3. Рисунок 3.4 - Геометричні параметри площі ПП

Довжина зони черги не повинна бути меншою динамічного габариту транспортного засобу, для якого призначена дана полоса руху. У динамічний

габарит автомобіля входить: відстань між автомобілями та габаритна довжина самого автомобіля [66]:

$$L = l_p + S_T + l_a + l_0, \quad (2.1)$$

де l_p - шлях, що проходить автомобіль, м; S_T - гальмівний шлях, м; l_a – довжина автомобіля, м; l_0 - зазор безпеки до автомобіля, що йде попереду, м.м.

У таблиці 3.1 подано мінімальні значення довжини зони очікування для легкових автомобілів та автопоїздів.

Таблиця 2.1

Мінімальна довжина зони очікування, L

Довжина, м	Швидкість руху, км/ч		
	20	40	60
Автопоїзд	30	50	80
Легковий автомобіль	16	35	60

Черга перед вікном ПП залежить від інтенсивності прибуття транспортних засобів, кількості вікон ПП, інтенсивності обслуговування на ПП. Знаючи максимальну кількість автомобілів, що очікують обслуговування на ПП ($N_{оч}$), можна визначити ефективну довжину зони очікування:

$$L_0 = L \cdot N_{оч} \quad (2.2)$$

Оптимальні довжини зони виходу та злиття дозволяють транспортному засобу набрати швидкість і влитися у загальний потік без втрати часу в точці конфлікту. Довжина зони злиття дозволяє змінити швидкісний режим та перебудуватися для виходу із площі ПП.

Існує кілька підходів у міжнародній практиці до визначення довжин зони входу та злиття, «наприклад, в англійських – довжини зон входу та злиття визначають, як довжину конусного переходу для доріг, де встановлено обмеження за швидкістю менше 70 км/год та для швидкості понад 70 км/год», які визначаються за формулами:

менше 70 км/год

$$L_{дз} = 0,62WS, \quad (2.3)$$

більше 70 км/год

$$L_{дз} = 2WS/155, \quad (2.4)$$

де W - зміщення дороги (поширення/звуження) дороги, м; S - швидкість 85% забезпеченості, км/год.

В інших дослідженнях найменшу довжину зон злиття або перебудови транспортних потоків (у зарубіжній літературі – зона переплетення) приймають $L_{дз} = 4V$, за середнього розрахункового часу для зміни смуги - 4с (V – швидкість руху, км/год).

При існуючому різноманітті міжнародних стандартів і практик [11], для однієї і тієї ж швидкості руху (20 км/год) та величини розширення проїжджої частини (4 м), розмір зон входу та злиття може змінюватись від 40 до 280 м. Проаналізувавши міжнародні підходи до розрахунку довжини ПП було прийнято рішення підходити до визначення довжин зон як до параметрів перехідно-швидкісних смуг (рис. 2.5).

Смуги гальмування дають можливість без перешкод для основного потоку знизити швидкість руху перед виїздом з дороги, смуги розгону - підвищити швидкість і, не зупиняючись у процесі руху ділянкою маневрування, вибрати переважно потоці прийнятний інтервал для в'їзду (рис. 2.6).

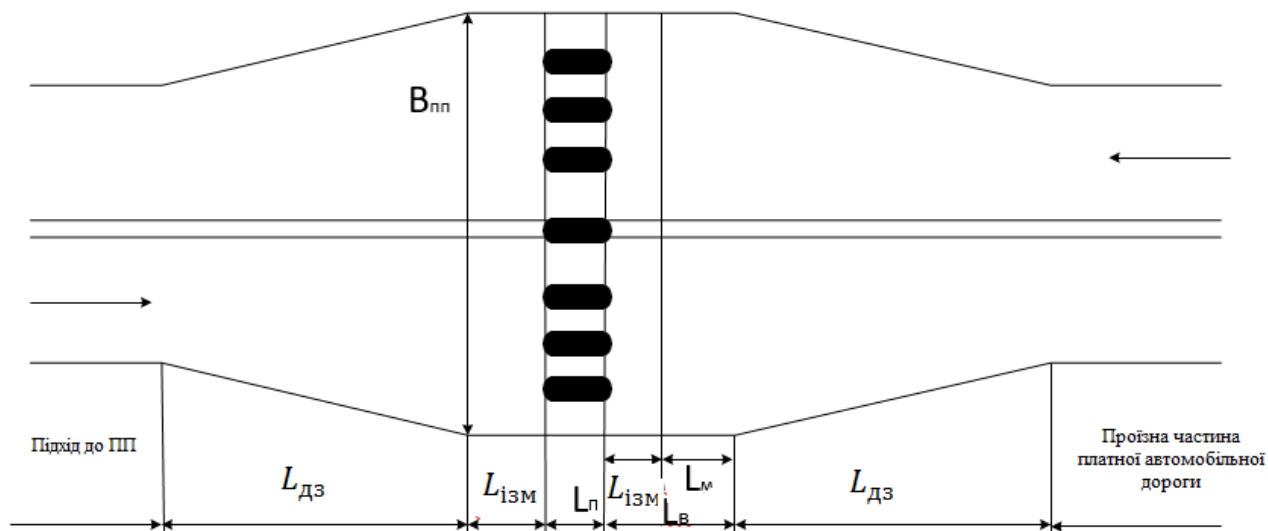


Рис. 2.5 - Розрахункова схема геометричних параметрів ПП

Враховуючи вимоги та дослідження параметрів перехідно-швидкісних смуг [20, 47] довжини зон злиття та зон входу повинні задовольняти умови безпеки.

Зона злиття та зона входу повинні бути не менше довжини смуги відгону, а довжини зон черги та виходу не менше довжини ділянки зміни швидкості.[55]. Зона злиття буде представлена як дві ділянки: на першій відбувається зміна швидкості ($L_{ізм}$); на другому – маневрування (L_M).

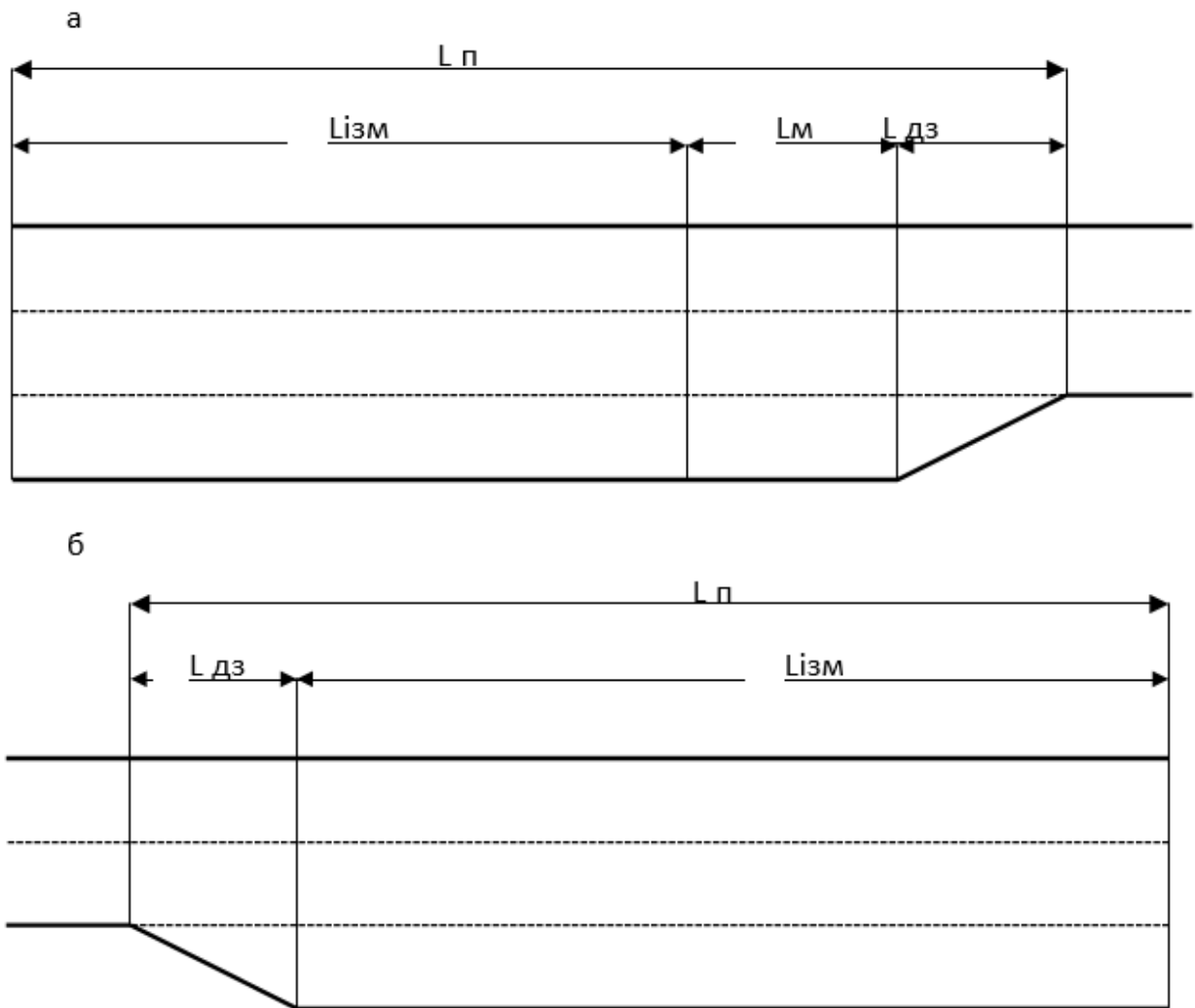


Рис. 2.6 – перехідно-швидкісні смуги (а – розгону, гальмування)

Тоді довжину зон пунктів пропуску як суму перехідно-швидкісних смуг можна розрахувати з урахуванням швидкості організації руху дороги та розрахункової швидкості руху з'їзду за формулою.

$$L_p = L_{дв} + L_{ізм} + L_M, \quad (2.5)$$

де $L_{дв}$ - Довжина відгону ширини перехідно-швидкісної смуги, м; L_M – довжина ділянки маневрування при виході на праву смугу головної дороги, м; $L_{ізм}$ - довжина зміни швидкості руху, м.

У зоні черги та в зоні виходу відбувається зміна швидкості руху, довжина ділянки зміни швидкості залежить від різниці швидкостей на початку та в кінці ділянки і може орієнтовно визначена за формулою:

$$L_{\text{ізм}} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2a_{\text{ср}}} \quad (2.6)$$

де V_1 - швидкість наприкінці розгону або на початку уповільнення, км/год;
 V_2 - швидкість на початку розгону або наприкінці уповільнення, км/год; $a_{\text{ср}}$ - середнє прискорення автомобіля, м/с². Значення $a_{\text{ср}}$ варіюється від 0,8 - 1,2 м/с² для розгону та 1,75-2,5 м/с² для уповільнення.

Зона черги та зона виходу повинні мати достатню довжину, щоб, в'їхавши на смугу зі швидкістю руху на прямому ділянці, водії могли без інтенсивного гальмування знизити швидкість до допустимої для даної системи оплати і в зоні виходу набрати швидкість, більшу за швидкість транзитного потоку, і деякий час рухатися з нею в очікуванні можливості включитися в потік.

Довжини зон L_M і $L_{\text{дв}}$ представлені у таблицях 2.2 – 2.3.

Таблиця 2.2

Довжина відгону перехідно-швидкісних смуг

Швидкість 85% забезпеченості, км/ч	Довжина відгону перехідно-швидкісних смуг, $L_{\text{дв}}$, м	
	гальмування	розгону
60	50	50
50	30	50
40	30	30

Таблиця 2.3

Довжина маневрування

Інтенсивність руху авт./ч.	200	400	600	800	1000 і більше
Довжина участку маневрування (L_M), м	20	30	40	50	60

Довжини зон входу, виходу та злиття повинні забезпечувати такі умови руху на дорозі, за яких не відбувається зниження швидкості автомобілів, що рухаються без зміни смуги так і перебудовуються смугами, і не виникає ситуацій,

що сприяють дорожньо-транспортним пригодам. Так як площа пункту пропуску - це місце поділу найчастіше двох смуг руху в шість і більше відповідно до кількості вікон пункту пропуску, а також місце злиття транспортних потоків, то довжина площі пропуску залежить від схеми злиття і розділення потоків.

2.3. Врахування особливостей характеристик транспортного потоку

Найбільш поширені схеми пунктів пропуску: злиття в одній точці, поступове одностороннє злиття, поступове двостороннє злиття транспортних потоків (див. рис. 2.3). «За першим варіантом всі злиття можуть відбуватися в одній точці, але це означає, що весь транспортний потік збирається в одній точці конфліктної і заважає один одному при перебудові. Для більш плавного переходу використовуються рішення, що включають лише злиття пар смуг. Один із поширених - другий варіант полягає в тому, щоб завжди зливати саму праву (або ліву) смугу, доки не буде досягнуто бажану кількість смуг руху. Ця схема дуже вигідна для забезпечення високої пропускної спроможності для тих смуг, де не відбувається злиття, але водіям потрібно перебудувати багато разів. Третій варіант - це «збалансована» модель, при якій пари суміжних смуг уздовж усієї проїжджої частини зливаються кілька разів, поки не буде досягнуто бажаної ширини дорожнього полотна. Це розподіляє злиття рівномірніше по проїжджій частині». [2, 8, 11].

Кількість можливих конфліктів залежить від розподілу інтенсивності руху смугами, тому якщо припустити, що весь потік потрапляють у пункт пропуску (N) розподіляється рівномірно на всі смуги пункту пропуску, то інтенсивність конфліктуючих потоків для двосторонньої схеми злиття можна уявити, як показано рис. 2.7.

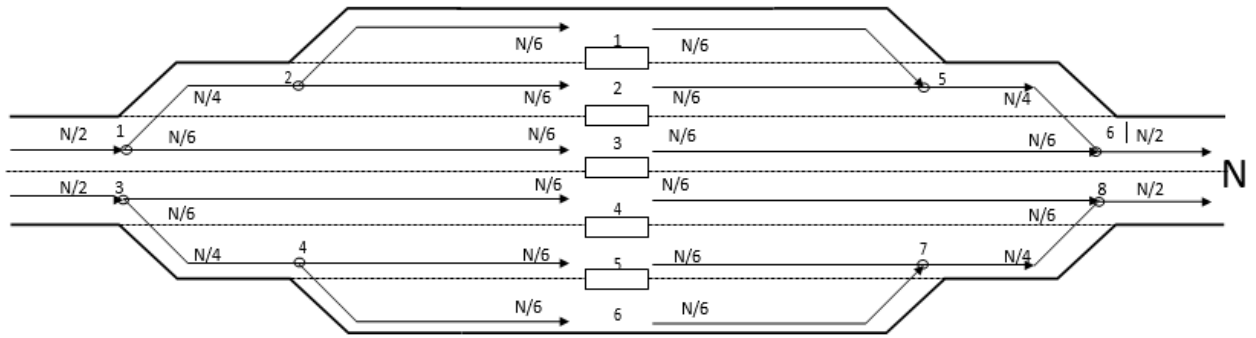


Рис. 2.7 – Розподіл інтенсивності транспортних потоків у конфліктній точці за двосторонньої схеми ПП

Для кожної схеми злиття виконано розрахунок ваги конфліктної точки з урахуванням кількості смуг, за сумою конфлікуючих транспортних потоків, так при схемі руху в 2 смуги та 6 вікон ПП кількість та вага конфліктних точок представлений у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Вага конфліктних точок

Тип схеми злиття	Кількість полос проїзної платної дороги	Кількість вікон ПП	Конфліктні точки		
			Злиття	Відхилення	Вага
Варіант 1	2	6	4	4	3,32N
Варіант 2	2	6	4	4	4,66N
Варіант 3	2	6	3	3	6N

Кожен конфлікт – це час, загублений водієм транспортного засобу при перебудові в зонах пункту пропуску. Тому, щоб підвищити ефективність пункту пропуску, необхідно мінімізувати час на очікування маневру, оскільки маневр у точці злиття транспортних потоків є складнішим, при виборі оптимальної схеми планування площі пунктів пропуску платної автомобільної дороги достатньо розглянути ефективність зони виходу та злиття транспортних потоків. Аналіз конфліктності показав, що при схемах з поступовим одностороннім (Схема 1) та двостороннім (Схема 2) злиттях, ймовірність виникнення аварійності менша, відповідно для подальшої оцінки ефективності розглядаються саме ці схеми (рис. 2.8 – 2.9).

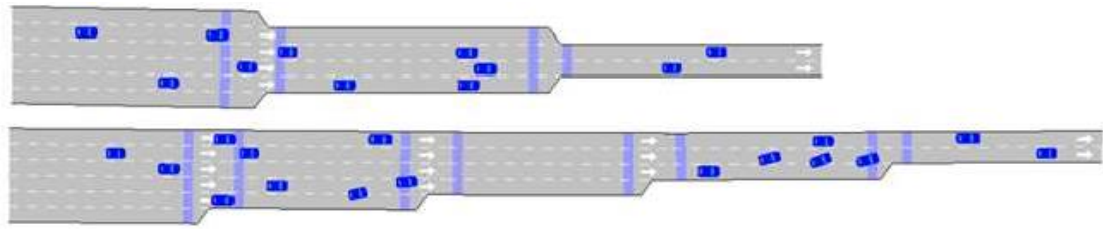


Рис.2.8– Місця встановлення датчиків

За допомогою програмного продукту Visio 5.0 для моделювання транспортних потоків оброблялися дві схеми проектування. Для оцінки схем використовувалися такі параметри: максимальна швидкість, мінімальна швидкість, максимальне прискорення, мінімальне прискорення, кількість транспортних засобів, що може пропустити площу через зони виходу та злиття, втрата часу при проходженні площею [7, 25].

За даними, зібраними з датчиків у моделі, встановлених на початку та в кінці зон злиття та виходу можна проаналізувати зміну швидкості та розподіл кількості транспортних засобів, що проїжджають через кожну точку злиття (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5

Порівняльні характеристики руху транспортних засобів

Схема	Затримка, с	Час в дорозі, с	Кількість транспортних засобів, авт.
1	4,8	12,9	356
2	4,9	13,4	352

Перша схема має найменшу затримку та час проходження, а також найбільшу пропускну здатність, але оцінюючи різницю швидкостей у сусідніх смугах та прискорення, друга схема руху є безпечнішою з урахуванням проходження сліпих зон.

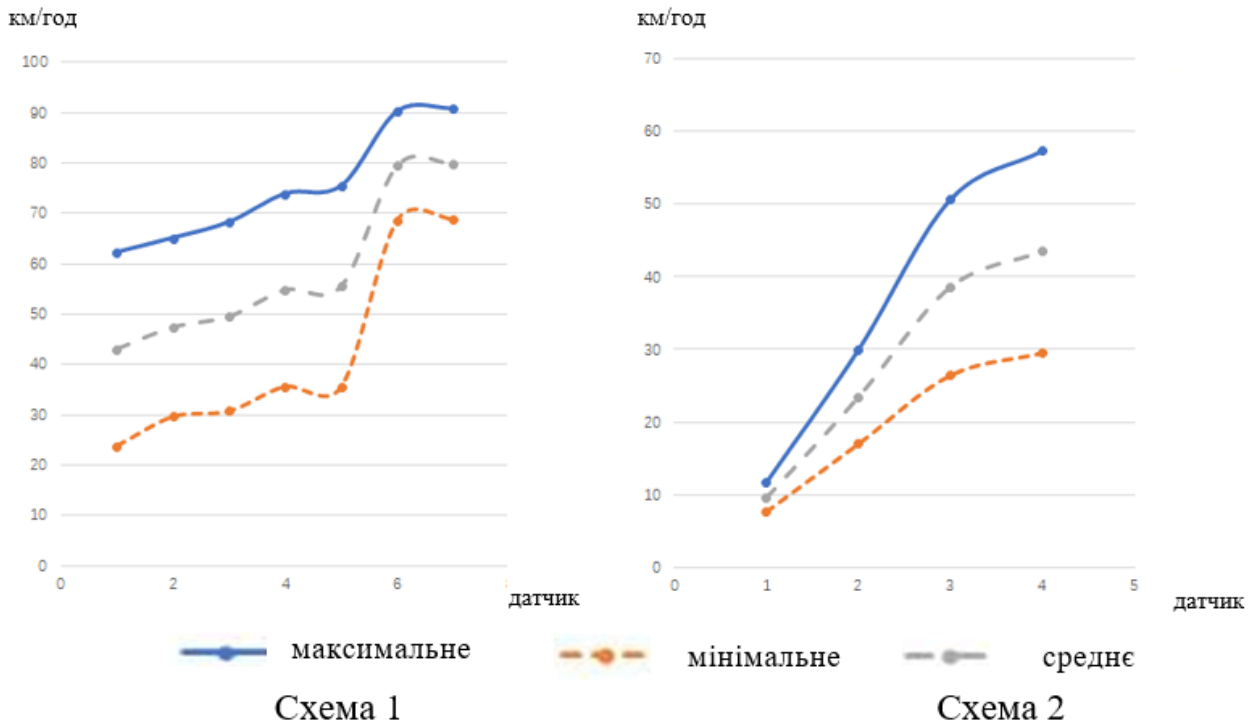


Рис. 2.8 – Розподіл швидкості руху сусідніми смугами

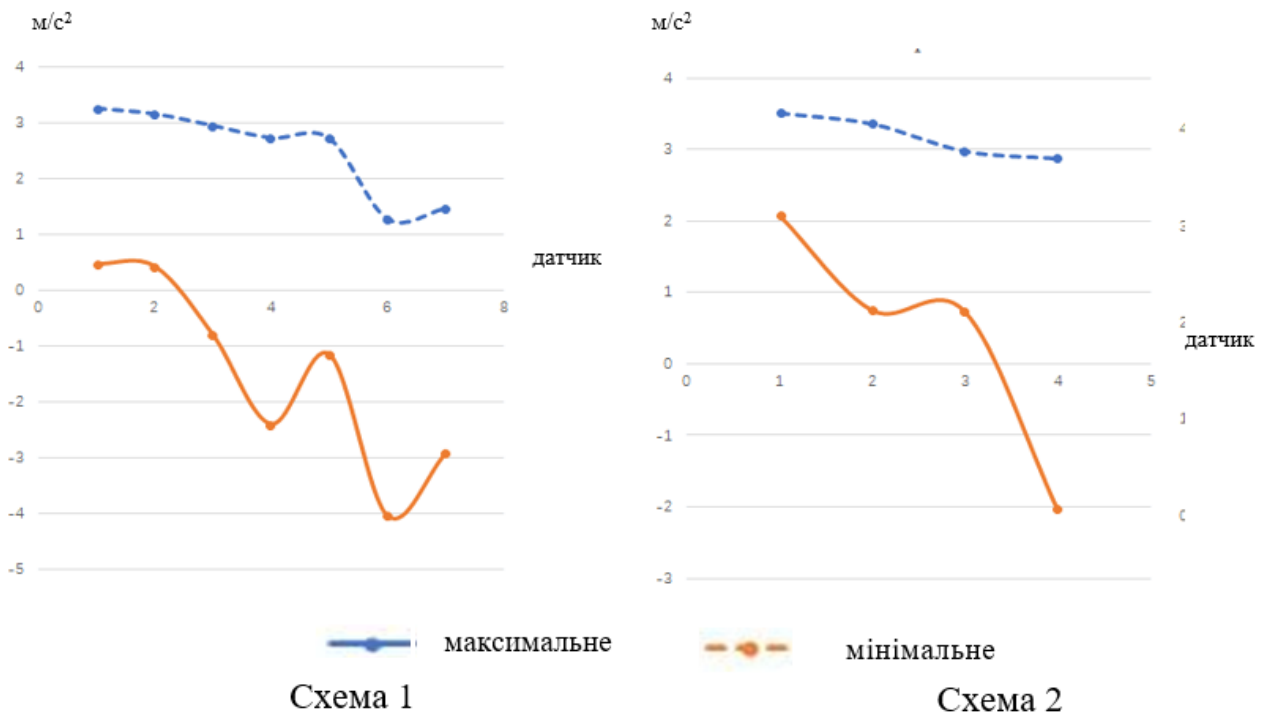


Рис.3.10 – Розподіл прискорення руху сусідніми смугами

Чим менше відносна швидкість між двома сусідніми смугами руху та дисперсія швидкості та прискорення в одному поперечному перерізі, тим безпечніша схема руху.

Схема руху з двостороннім злиттям транспортних засобів дозволяє розподіляти транспортний потік смугами при проході через ПП, перенаправляючи право рульові транспортні в пункті пропуску з лівого боку, щоб підвищити безпеку злиття потоків з урахуванням «сліпих зон».

Висновок до розділу 2

1. Геометричні характеристики пункту пропуску залежать від схеми розподілу транспортного потоку, кількості смуг та інтенсивності руху смугами. При цьому встановлено, що найбільш ефективними є схеми з послідовним злиттям транспортних потоків, при односторонньому і двосторонньому злитті.

2. Встановлено мінімальні значення протяжності зон ПП залежно від швидкості та інтенсивності руху.

3. Для кожної схеми розподілу транспортних потоків на ПП виправлено кількість конфліктних точок та вага конфлікту, що залежить від числа смуг руху та інтенсивності руху на смузі.

На основі імітаційної моделі для варіантів 1 і 2 виконано порівняльний аналіз характеристик руху транспортних потоків (затримка, час у дорозі, кількість транспортних засобів на смузі) при проходженні зон виходу та злиття для різних схем пункту пропуску.

4. Встановлено, що схема руху з двостороннім злиттям транспортних засобів дозволяє розподіляти транспортний потік смугами при проході через ПП. Перенаправляючи праворульні транспортні засоби у пункті пропуску з лівого боку, можна підвищити безпеку злиття потоків з урахуванням «сліпих зон».

РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПУНКТИВ ПРОПУСКУ

3.1. Виявлення ключових факторів моделі

Загальна ширина площі розраховується після визначення необхідної кількості смуг, ширини технологічних островів та ширини смуг.

При визначенні ширини смуги руху необхідно враховувати склад та особливості транспортного потоку.

Для визначення ширини смуги руху на межах ПП розглянуто різні методи розрахунку, запропоновані Н.Ф. Хорошіловим, С. М. Замахаєва та ін [20, 29-30, 34,]. В основі розрахунку ширини смуги руху для багатосмугових проїжджих частин лежать дані про ширину кузова автомобіля та зазорів безпеки між сусідніми транспортними засобами, а для односмугових – враховується відстань до кромки проїзної частини.

Встановлення ширини проїжджої частини та земляного полотна, на підставі формули М.С. Замахаєва [30] залежно від способу пропуску транспортних засобів для однієї смуги визначається за формулами:

для односмугової дороги:

$$П_1 = c + 1.0 + 0.01v \quad (3.1)$$

для двосмугової дороги з двостороннім рухом:

$$П_2 = \frac{a+c}{2} + 1,0 + 0,01v \quad (3.2)$$

де a – ширина кузова автомобіля, м; c – ширина колії, м; v – швидкість руху автомобіля, км/год.

При розрахунку ширини смуги руху багатосмугової проїжджої частини слід враховувати, що водій, перебуваючи на багатосмуговій проїжджій частині на внутрішніх смугах, змушений дотримуватись рядності руху, не виходити за межі смуги руху та витримувати безпечні зазори до попутних автомобілів, що рухаються праворуч і ліворуч.

Залежно від розташування керма водієві важко контролювати зазор або праворуч (для ліворульових) або ліворуч (для праворульових). Тому, під час руху

у змішаному транспортному потоці, водії, при випередженні транспортних засобів, що рухаються сусідніми смугами, витримують різні зазори безпеки. З огляду на це, ширину смуги руху доцільно призначати виходячи з умов безпеки та забезпечення комфортабельності руху та психологічної впевненості водія. Зазор безпеки між автомобілями залежить від типу автомобіля. Найбільш чутливим до зміни складу потоку є легковий автомобіль, а найбільший вплив на розташування автомобілів на сусідніх смугах надають вантажні автомобілі великої вантажопідйомності.

Ширина смуги руху визначається різними методами, у тому числі за формулами розрахунку динамічного коридору автомобіля при прямолінійному русі. Для обліку регіональних особливостей складу транспортного потоку на основі методики представленої в роботах О.М. Лобанова [47], розрахована ширина смуги руху для змішаного та розділеного транспортного потоку. Результати розрахунку ширини смуги руху для швидкості руху 20 км/год представлені таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахунковий метод	Ширина полоси, м	
	Для вантажного автомобіля	Для легкового автомобіля
Динамічний габарит на швидкості 20 км/год.	3,39	2,63
Метод Н.Ф. Хорошилова	3,55	2,79
Ширина для змішаного потоку	4,35	3,25
Ширина під час поділу потоків	3,37	2,89

Ширина технологічного острівця залежить від технології обслуговування у вікні пункту пропуску, технологічного обладнання та елементів облаштування. Ця характеристика є унікальною для кожного технологічного рішення, що визначається за погодженням із замовником та не враховується при оцінці ефективності роботи пункту пропуску.

Ефективна робота пунктів пропуску є одним із пріоритетних завдань при проектуванні платних автомобільних доріг [24, с. 98-100].

У дослідженнях, «які представлені у роботах з платних автомобільних доріг Жаденової С.В., Степанова А.В., запропоновано методи оцінки систем стягнення плати та повернення капітальних вкладень у будівництво пунктів стягування плати та платних автомобільних доріг»[28].

У чинних стандартах відсутні вимоги до рівня обслуговування на пунктах справляння плати та методика розрахунку. Зарубіжні стандарти в даний час так само не містять будь-яких вказівок щодо оцінки ефективності ПП, і немає стандартизованого аналітичного методу для оцінки його продуктивності.

Середні значення часу обслуговування автомобілів залежно від прийнятої системи плати за проїзд наведено у таблиці 3.2.

Для моделювання роботи ПП їх функціонування доцільно розглядати як систему масового обслуговування, що здійснює багаторазове виконання однотипних операцій з її стягування плати з водіїв транспортних засобів, які проїжджають платною дорожньою спорудою.

Таблиця 3.2

Середні значення часу обслуговування автомобілів залежно від прийнятої системи плати за проїзд

Тип системи оплати	Приєм платежів	Оплата проводиться	Пропускна здатність ПП авт./хв
Ручний	Здійснюється оператором ПП	Готівкою	6
		Безготівковий	8
Автоматичний	Здійснюється через автомат із купюро приймачем	Тільки купюрами чи монетами певної гідності	8
		Змішаний тип (готівковий та безготівковий)	10
Електронний	Здійснюється на смузі автоматичного обслуговування за допомогою використовуваної технології зв'язку	Зупинка в умовному порталі з бар'єром	20
		Безперервно	30

Геометричні параметри та інтенсивність руху на вході до пункту пропуску є ключовими елементами підвищення ефективності роботи пункту пропуску.

3.2 Застосування теорії масового обслуговування

Для моделювання оптимальної роботи ПП їх функціонування доцільно розглядати як систему масового обслуговування, яка здійснює багаторазове виконання однотипних операцій із її стягування з водіїв транспортних засобів, які проїжджають платною дорожньою спорудою.

Об'єктивними передумовами функціонування такої системи, як будь-якої іншої системи масового обслуговування (СМО), є наявність наступних її елементів (рис. 3.1):

- деякої кількості обслуговуючих пристроїв - вікон для прийому плати в пункті пропуску, які теоретично СМО прийнято називати каналами обслуговування;

- вхідного потоку заявок - потоку транспортних засобів, що надходять до системи обслуговування пункту пропуску (за точку її початку в просторі зазвичай приймається місце виїзду на площу пункту пропуску) та обслуговуються на цих пунктах;

- черги заявок, що утворюється з автомобілів, які чекають на обслуговування на пунктах пропуску;

- вихідного потоку заявок - потоку обслужених автомобілів, що пройшли через пункти пропуску [40, 44].

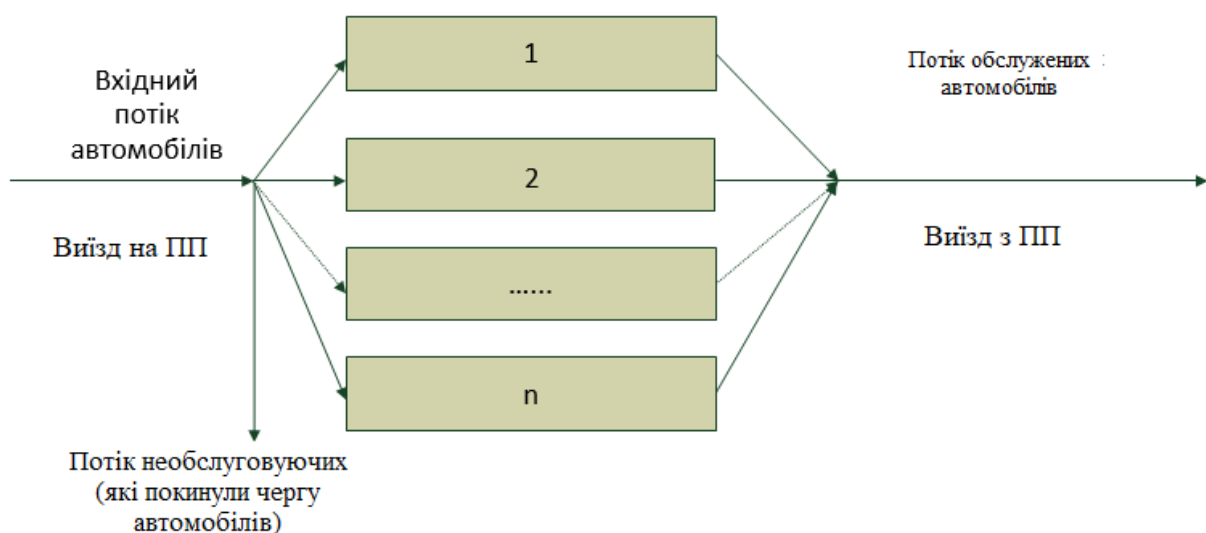


Рис. 3.1 – Схема системи масового обслуговування потоку транспортних засобів на пунктах пропуску

Система обслуговування в зоні пункту пропуску розглядається як система масового обслуговування і може класифікуватися за декількома ознаками: кількістю вікон обслуговування, дисципліною обслуговування, схемою обслуговування заявок та кількістю етапів обслуговування.

За кількістю каналів (вікон обслуговування) всі системи збору плати за проїзд поділяються на одноканальні та багатоканальні (кількість вікон ПП більше або дорівнює 2).

Наявність одиночного пункту пропуску може розглядатися при влаштуванні спеціальних смуг для платного пропуску великовантажних автомобілів або при будівництві окремих смуг на ПП, обладнаних автоматичною системою оплати для автомобілів із транспондерами, у загальній системі збору плати.

«Використання одноканальної системи обслуговування є ефективним тільки при відносно невеликій інтенсивності руху платною дорожньою спорудою, яка не перевищує 120 авт./год. навіть при найвищій середній швидкості їх обслуговування на пункті пропуску за проїзд, що дорівнює 5 с. на один автомобіль.

За наявності одиночного вікна обслуговування починаючи з інтенсивності руху понад 120 авт./год, має місце різке збільшення витрат, пов'язаних з організацією платного проїзду, за наявності лише вікна пункту пропуску порівняно з двома, що зумовлено суттєвим зростанням вартості простоїв автомобілів у черзі на обслуговування до цього пункту»[7].

Зі зниженням інтенсивності раціональна область використання одноканальної системи стає ще меншою. Так, наприклад, при швидкості обслуговування 6 авт./хв її доцільно застосовувати при інтенсивності руху, що не перевищує 60 авт./год, а при швидкості обслуговування 4 авт./хв – при інтенсивності руху не більше 40 авт./год.

Для учасників транспортного потоку, які проходять ПП, необхідно передбачати багатоканальні системи збору плати за проїзд. Оптимальна кількість каналів обслуговування на ПП розраховується за умови, що розглядається СМО

з очікуванням. У цьому випадку передбачається, що автомобіль, який приїхав на ПП в момент зайнятості всіх каналів (вікон пунктів пропуску), стає в чергу і чекає на звільнення каналу, який прийме його до обслуговування. При цьому кожна заявка, яка надійшла на вхід СМО або кожний автомобіль, обов'язково буде обслужена.

Система масового обслуговування змішаного типу є такою системою, в якій на перебування заявки в черзі накладаються деякі обмеження, наприклад, на довжину черги. Іншими словами, ця система масового обслуговування може бути названа системою з обмеженим очікуванням або з обмеженою чергою.

Передбачається, що потік автомобілів надходить на пункти пропуску не регулярно (через певні проміжки часу), а випадковим чином (у заздалегідь невідомі моменти часу), при цьому час їх обслуговування на цих пунктах також має випадковий характер, оскільки залежить від багатьох не факторів, що піддаються точному обліку.

Згідно з умовами руху за площею пункту пропуску, затримка руху викликана збором плати та злиттям потоку автомобілів. Тому необхідно розбити завдання на дві частини: затримка в ПП та у точках злиття при виході з площі пункту пропуску. У ПП, водії чекають на обслуговування зі збору плати, поки не доходять до точки злиття, де водіям необхідно зупинитися для того, щоб отримати шанс на вливання в потік.

Адаптуючи теорію масового обслуговування, розглянемо кожну частину як систему масового обслуговування.

Для вирішення завдань СМО необхідною умовою є наявність марківського потоку і для вирішення завдання необхідною та достатньою умовою також є, що переходи системи з одного стану в інший описуються експоненціальним (показовим) розподілом ймовірностей, окремим випадком якого є закон Пуассона.

Експонентний розподіл має один параметр, який зазвичай позначається λ . Воно, як та інші розподілу безперервних випадкових величин, описується функцією густини та функцією розподілу.

Функція щільності експонентного розподілу $f(x)$ має вигляд:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{якщо } x \geq 0, \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases} \quad (3.3)$$

Функція щільності розподілу випадкових величин має ту властивість, що для всіх x $f(x) \geq 0$ та:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (3.4)$$

Функція розподілу $F(x)$ – це ймовірність того, що випадкова величина набуде значення, яке менше або дорівнює x . Функція розподілу випадкової величини за експоненційним законом має вигляд:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & \text{якщо } x \geq 0, \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Функція розподілу є результатом інтегрування густини розподілу в межах від $-\infty$ до x .

Система пункту пропуску як система масового обслуговування може класифікуватися за кількома ознаками: кількістю каналів обслуговування, дисципліною обслуговування, схемою обслуговування заявок та кількістю етапів обслуговування.

По дисципліні обслуговування СМО зазвичай поділяються на три класи: з відмовами, з очікуванням та змішаного типу.

Система масового обслуговування з відмовими передбачає, що заявка, яка надійшла до неї в момент, коли всі канали зайняті, отримує «відмову» і залишає СМО.

У системах масового обслуговування з очікуванням передбачається, що заявка в момент зайнятості всіх каналів стає в чергу і чекає на звільнення каналу, який прийме її до обслуговування. При цьому кожна заявку, яка надійшла на вхід СМО, врешті-решт буде обов'язково обслужена. Система масового обслуговування змішаного типу є такою системою, в якій на перебування заявки в черзі накладаються деякі обмеження, наприклад, на довжину черги. Іншими словами, ця система масового обслуговування може бути названа системою з обмеженим очікуванням чи з обмеженою чергою.

З розгляду наведених вище класів обслуговування очевидно, що для проектування системи пункту пропуску на автомобільній дорозі можливою є дисципліна обслуговування з очікуванням, коли транспортні кошти з прибуття до пунктів пропуску стають у чергу, якщо всі канали обслуговування зайняті.

Для моделювання роботи пунктів пропуску платної автомобільної дороги для різних умов їх функціонування вводяться такі позначення:

λ – середня інтенсивність надходження автомобілів на ПП, авт./год;

μ – середня інтенсивність обслуговування автомобілів у ПП;

m – кількість транспортних засобів у черзі;

k – номер стану системи збирання транспортних засобів

$(k = 0, 1, 2 \dots, m + 1)$;

s_k - стан системи, що характеризується наявністю k -го числа автомобілів у системі (у черзі та на обслуговуванні в ПП);

p_k - ймовірність k -го стану системи;

p_0 – можливість простоювання всієї системи, тобто. ймовірність того, що всі пункти пропуску є вільними;

ρ – показник завантаження одноканальної системи обслуговування (одного пункту пропуску);

ψ – показник завантаження багатоканальної системи обслуговування для одного канал;

B – кількість смуг проїжджої частини платної автомобільної дороги;

N – інтенсивність прибуття автомобілів на пункт пропуску;

\overline{N}_c – середня кількість автомобілів у системі пункту пропуску;

\overline{N}_q – середня кількість автомобілів у черзі;

$\overline{N}_{об}$ – середня кількість автомобілів, що знаходяться на обслуговуванні в пункти пропуску;

\overline{T}_q – середній час очікування автомобілів у черзі;

$\overline{T}_{об}$ – середній час перебування автомобілів на обслуговуванні у пунктах

\overline{T}_c – середній час перебування автомобілів у системі;

$\lambda_{зл}$ – інтенсивність прибуття автомобілів у точку злиття, авт./год;

μ_A – інтенсивність обслуговування у вікні ПП, авт./год;

μ_B – інтенсивність обслуговування у точці злиття, авт./год;

μ_0 – інтенсивність обслуговування безконфліктного проходження смуги, авт./год;

n – кількість вікон пункту пропуску;

K – кількість точок злиття.

Побудова моделі функціонування пунктів пропуску для одноканальної системи передбачає, що на єдине вікно обслуговування на платній дорожній споруді надходить потік автомобілів із середньою інтенсивністю λ . При цьому середня інтенсивність обслуговування автомобілів на цьому пункті становить μ автомобілів за одиницю часу. Якщо автомобіль надходить у СМО в той момент, коли вікно зайняте, він стає чергою для очікування обслуговування.

Можливі стани СМО за кількістю автомобілів, що перебувають у системі пункту пропуску (на обслуговуванні та в черзі), поділяються на:

s_0 – черги немає (отже, ПП вільний);

s_1 - ПП зайнятий, але черги немає, тобто в пункті пропуску знаходиться на обслуговуванні один автомобіль;

s_2 - ПП зайнятий і в черзі стоїть один автомобіль. Тоді для будь-якого k -го стану системи:

s_k – ПП зайнятий та в черзі $k - 1$ автомобіль.

При стані системи, що характеризується наявністю у черзі m автомобілів:

S_{m+1} – ПП зайнятий й у черзі m автомобілів.

Таким чином, робота системи пункту пропуску для одноканальної СМО може бути представлена у вигляді графа (схеми) можливих станів, взаємозв'язок яких показано на рис. 3.2

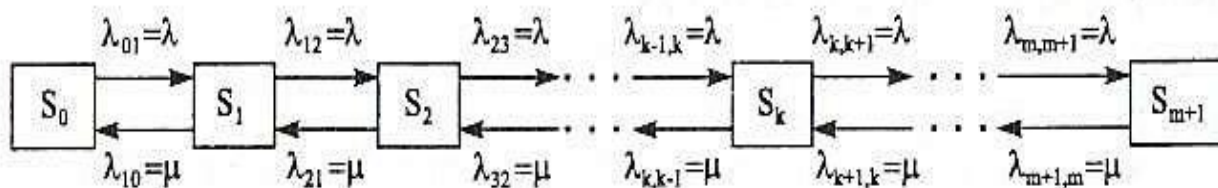


Рис. 3.2 – Граф станів одноканальної системи масового обслуговування потоку транспортних засобів з очікуванням

Основні граничні параметри одноканальної системи обслуговування у пункті пропуску за проїзд з очікуванням наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Граничні характеристики ефективності функціонування одноканальної системи обслуговування з очікуванням

Найменування граничних показників	Розрахункові формули
Середній час обслуговування одного автомобіля	$1 / \mu$
Показник завантаження вікна пункту пропуску	$\rho = \lambda / \mu$
Можливості станів	$p_k = \rho^k (1 - \rho)$
Ймовірність відмови	$\rho_B = 0$
Імовірність того, що автомобіль буде обслужений системою	$\rho_C = 0$
Середня кількість автомобілів у черзі	$\rho^2 / (1 - \rho)$
Середня кількість автомобілів, що знаходяться в обслуговуванні	ρ
Середня кількість автомобілів, що знаходяться в системі	$\rho / (1 - \rho)$
Середній час очікування автомобілем у черзі	$\rho^2 / [\lambda (1 - \rho)]$
Середній час перебування автомобіля у системі	$\rho^2 / [\lambda (1 - \rho)]$

Для багатоканальної системи пункту пропуску, що складається з $n > 1$ вікон, моделюються такі умови. Автомобіль, що надійшов до цієї системи момент, коли вікна ПП зайняті, стає в чергу і чекає на своє обслуговування, яке в будь-якому

випадку обов'язково відбудеться. Така система пропуску може перебувати у різних станах залежно від кількості автомобілів, що у СМО як у черзі, і на обслуговуванні:

s_0 – у пунктах пропуску немає автомобілів, отже, всі вікна ПП вільні;

s_1 – зайнято лише одне вікно ПП, решта пунктів у пунктах пропуску вільні;

s_k – у системі ПП перебуває k автомобілів ($k < n$), які зайняті k вікон пункту пропуску, інші $(n - k)$ – вільні;

s_n – у системі перебуває n автомобілів ($k < n$), тобто. зайняті всі вікна у пунктах пропуску, але черги немає;

s_{n+1} – у системі перебуває $n + 1$ автомобілів, тобто. зайняті всі вікна пунктів пропуску та один автомобіль перебуває у черзі;

s_{n+r} – у системі перебуває $n + r$ автомобілів, тобто. зайняті всі вікна пунктів пропуску та в черзі знаходяться r автомобілів;

s_{n+m} – у системі перебуває $n + m$ автомобілів, тобто. зайняті всі вікна пункту пропуску та в черзі знаходяться m автомобілів.

Таким чином, робота системи пункту пропуску може бути представлена одним з $n + m + 1$ станів, з яких стани s_0, s_1, \dots, s_k характеризуються тим, що при їх настанні відсутня будь-яка черга автомобілів.

Усі можливі умови функціонування багатоканальної системи ПП як графа представлені на рис.3.3, та її основні характеристики – у таблиці 3.4.

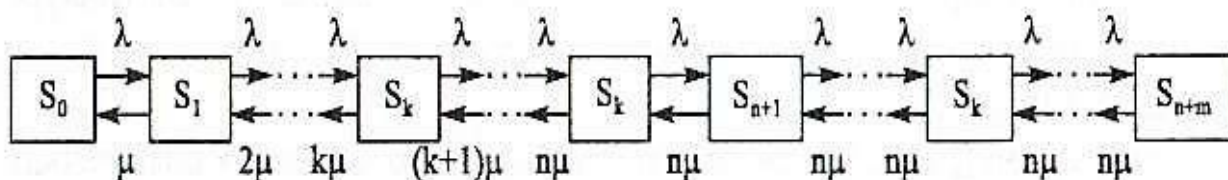


Рис. 3.3 – Граф станів багатоканальної системи масового обслуговування потоку транспортних засобів з очікуванням

Тепер необхідно розглянути процес злиття, коли автомобілі з двох смуг переміщуються в одну, яка називається точкою злиття. Коли водій на одній смузі прибуває в точку злиття, час затримки залежить від того, чи є інший автомобіль

на іншій смузі. Якщо інша смуга руху порожня, водій може здійснити маневр, інакше він повинен зупинитись та почекати. Для спрощення дві вхідні лінії розглядаються як одна черга. Час обслуговування автомобіля визначається як час, який він витрачає на проходження через злиття.

Відповідно до цього визначення швидкість обслуговування дорівнює μV , коли в системі знаходиться більше одного автомобіля, і $\mu 0$, коли в системі є тільки один автомобіль, де $\mu 0$ і μV є константами, що становлять час очікування, коли водій зупиняється в точці злиття або навпаки, рухається без зупинки і не повинен поступатися іншому автомобілю при злитті.

Таблиця 3.4

Граничні характеристики функціонування багатоканальної системи пункту пропуску з очікуванням

Найменування граничних показників	Розрахункові формули
Показник завантаження системи	$\rho = \lambda / \mu$
Показник завантаження системи з розрахунку на один канал	$\psi = \rho / n$
Імовірність того, що всі канали вільні	$p_0 = \left(\sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!} \psi^k + \frac{n^n}{n} \frac{\psi^{n+1}(1 - \psi^n)}{1 - \psi} \right)^{-1}$
Імовірність станів	$p_k = \begin{cases} (n^k/k!) \psi^k p_0, & k = 1, \dots, n \\ (n^n/n!) \psi^k p_0, & k = n + 1, \dots \end{cases}$
Імовірність відмови	$p_B = 0$
Імовірність того, що автомобіль буде прийнято системою	$p_C = 1$
Середня кількість автомобілів, що знаходяться на обслуговування	ρ
Середній час очікування автомобіля у черзі	$\bar{N}_q = \frac{n^n}{n!} \frac{\psi^{n+1}}{(1 - \psi)^2} p_0$
Середня кількість автомобілів, що знаходяться на вході до СМО	$N_{СМО} = \bar{N}_0 + \bar{N}_q$
Середній час очікування автомобіля в черзі	$\bar{T}_{оч} = \bar{N}_q / \lambda$
Середній час обслуговування одного автомобіля	$\bar{T}_0 = 1 / \mu$
Середній час перебування автомобіля на вході та обслуговуванні в системі	$\bar{T}_{СМО} = \bar{N}_{СМО} / \lambda$

Робота пункту обслуговування сприймається як одноканальна система масового обслуговування. Загальний процес злиття на площі ПП розглядається як кілька точок злиття в одну. Якщо є кілька n вікон ПП після яких потоки об'єднуються назад у B смуг проїжджої частини, загальна кількість точок злиття при двосторонньому злитті дорівнюватиме $n - B$, але інтенсивність потоку в точці злиття різна. Інтенсивність прибуття в точку злиття дорівнює інтенсивності транспортного потоку, який вона отримує. Якщо точка злиття отримує потік трафіку, що йде від k -го ПП, що має загальний потік трафіку N , його частота прибуття буде:

$$\lambda_{зл} = \frac{k}{n} N \quad (3.6)$$

Значення інтенсивності у точці злиття залежить від компонування злиття. У площі ПП з двостороннім компонуванням злиття, яка має n вікон ПП, перша точка злиття приймає потік, що йде від 2 вікон ПП, а друга точка злиття буде приймати потік від 3 вікон ПП, тощо.

Загальний середній витрачений час - це зважена сума всіх усереднених витрачених марно часу в кожній точці злиття, де відповідна вага - це ймовірність того, що водій досягне цієї точки, яка дорівнює K / n .

Припустимо, що платна площа має n вікон ПП, B смуг на виході та отримує загальний потік трафіку N . Тоді частота прибуття та відповідна ймовірність у кожній точці злиття показані у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Частота прибуття та ймовірність у кожній точці злиття

Точка виміру	1-ша	2-га	3-тя	...	$(n - B)$
Частота прибуття	$2N/n$	$3N/n$	$4N/n$...	$(n-B)\lambda N/n$
Ймовірність	$2/n$	$3/n$	$4/n$...	$(n-B)/n$

«Інтенсивність обслуговування в точці злиття, коли злиття не відбувається - це швидкість обслуговування, за умови, що в системі точок злиття є лише один автомобіль. Швидкість руху на платній автомобільній магістралі становить 110 км/год» [24], але практично вона обмежується до 20 км/год протягом усього

площі пункту пропуску. Довжина злиття без конфлікту – це динамічний габарит транспортного засобу, середня довжина автомобіля плюс безпечна відстань, яка становить близько 32 метрів. Таким чином, середній час обслуговування 1,2 сек, а швидкість обслуговування $\mu_0 = 3600/1,2 = 3000$ авт./год.

«Для оцінки інтенсивності обслуговування в точці злиття при конфлікті потоків - μB необхідно враховувати час проходження транспортного засобу з початковою нульовою швидкістю. При цій швидкості безпечна відстань складатиме одну довжину автомобіля, а середнє прискорення транспортного засобу – 2,0 м/с². Середній час обслуговування складає 6,15 (с), а швидкість обслуговування $\mu B = 3600/6,15 = 585$ авт./год.»[27].

Таким чином якщо є n вікон ПП, які об'єднуються в кількість смуг, то кількість конфліктних точок визначається як різниця $(n - B)$.

Пункт пропуску з двосторонньою схемою злиттям (рис. 3.4) має n кількість вікон ПП, у першій точці злиття відбувається об'єднання транспортного потоку, що надходить з двох смуг, а в другій точці злиття об'єднується транспортний потік від 3 смуг, у третій точці від чотирьох смуг, точки 1', 2', 3' відповідають точкам 1, 2, 3.

Точка злиття змодельована як Марківська система, як показано на малюнку, де кожен стан становить кількість транспортних засобів у системі (рис. 3.5).

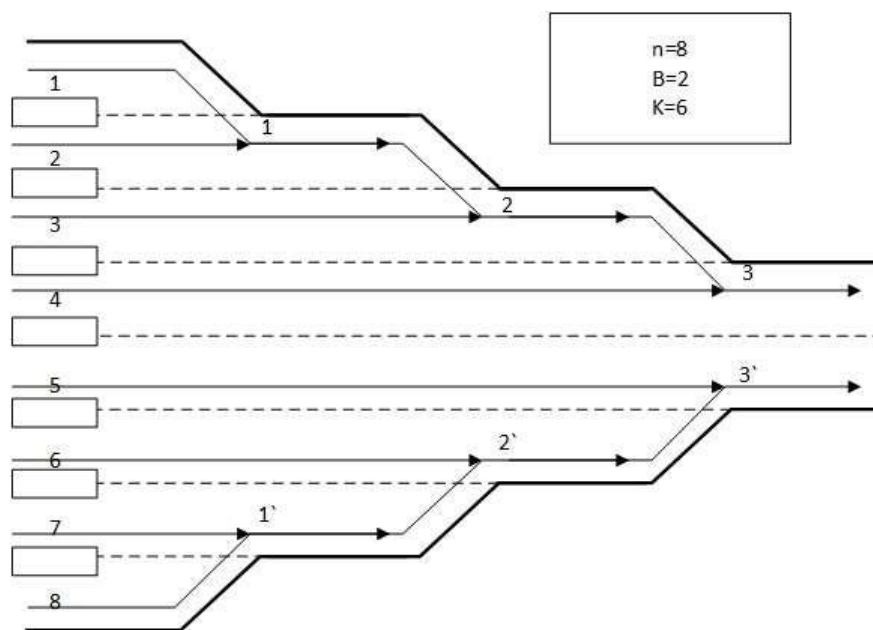


Рис. 3.4 - Точки злиття та конфліктуючі смуги

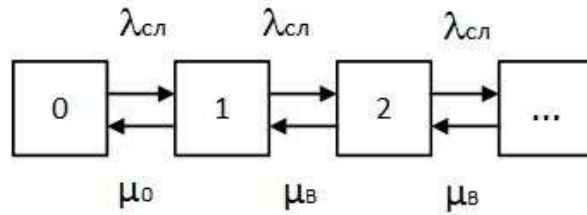


Рис. 3.5 - Граф станів одноканальної системи масового обслуговування потоку транспортних засобів з очікуванням у точці злиття

Швидкість прибуття - деяке значення $\lambda_{зл}$, середній час затримки - $t_{diff}(\lambda)$ після першого обчислення середнього часу очікування в системі $t_{sys}(\lambda)$. Нехай P_n – ймовірність наявності у системі n водіїв. Коли система досягає рівноваги, чиста ймовірність злиття дорівнює нулю кожного стану. Крім того, сума всіх P_n повинна дорівнювати одиниці:

$$\begin{cases} \lambda P_0 = \mu_0 P_1 \\ \lambda P_1 + \mu_0 P_1 = \lambda P_0 + \mu_B P_2 \\ \lambda P_n + \mu_B P_n = \lambda P_{n-1} + \mu_B P_{n+1}, n \geq 2 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\sum_0^{\infty} P_i = 1$$

Вирішуючи отримані рівняння, виходить:

$$\begin{cases} P_0 = \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_0} + \frac{2\lambda^2 \mu_B}{\mu_0(\mu_0 + \lambda)(\mu_B - \lambda)} \right) - 1 \\ P_0 = \frac{\lambda}{\mu_0} P_0 \\ P_n = \frac{2\lambda^2}{\mu_0(\mu_0 + \lambda)} \left(\frac{\lambda}{\mu_B} \right)^{n-2} P_0, n \geq 2 \end{cases} \quad (3.8)$$

Очікувана кількість водіїв у системі:

$$L(\lambda) = \sum_0^{\infty} i P_i = \frac{\lambda}{\mu_B - \lambda} + \frac{\lambda(\mu_B - \mu_0)}{\lambda(\mu_B - \mu_0) + \mu_B \mu_0} \quad (3.9)$$

За теоремою Літтла середній час очікування в системі $t_{смо}(\lambda)$:

$$t_{\text{СМО}}(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{\lambda} = \frac{1}{\mu_B - \lambda} + \frac{\mu_B - \mu_0}{\lambda(\mu_B - \mu_0) + \mu_B \mu_0} \quad (3.10)$$

Середній час, що витрачається водієм у точці злиття - це різниця між $t_{\text{СМО}}(\lambda)$: та часом, який витрачається на прямій смузі. Очікуваний час, що витрачається водієм, коли не відбувається злиття $1/\mu_0$. Отже, середній витрачений час задається рівнянням:

$$t_{\text{СМО}}^B(\lambda)t_{\text{СМО}}(\lambda) - \frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_B - \lambda} + \frac{\mu_B - \mu_0}{\lambda(\mu_B - \mu_0) + \mu_B \mu_0} - \frac{1}{\mu_0} \quad (3.11)$$

де μ_B – інтенсивність обслуговування при злитті транспортних засобів, авт./год; μ_0 – інтенсивність обслуговування за відсутності злиття транспортних засобів, авт./год; λ – інтенсивність прибуття транспортних засобів $(K/n) * N$, авт./год.

Загальний час, витрачений на злиття:

$$\overline{T_{\text{СМО}}^B} = \sum_{i=1}^{(n-B)} \frac{i+1}{n} * t_{diff} \left(\frac{i+1}{n} * N \right) \quad (3.12)$$

Відповідно до оптимальної конфігурації зони ПП необхідно забезпечити мінімальний час затримки. Загальна втрата часу ($\overline{T_{\text{зар}}}$) для транспортного засобу визначається рівнянням:

$$\overline{T_{\text{зар}}} = \overline{T_{\text{СМО}}} + \overline{T_{\text{СМО}}^B} = \frac{\overline{N_{\text{СМО}}}}{\lambda} + \sum_{i=1}^{(n-B)} \frac{i+1}{n} * t_{diff} \left(\frac{i+1}{n} * N \right) \quad (3.13)$$

Величина втрати часу є характеристикою, яка залежить від змінюваних параметрів, регулюючи які можна мінімізувати час поїздки.

3.3 Визначення оптимальної кількості вікон пунктів пропуску

Допустима величина часу, витраченого на обслуговування користувачем платної автомобільної дороги, повинна відповідати часу, який споживач готовий витратити на цю дорожню послугу на ПП. Тому кількість вікон пункту пропуску має відповідати умові: якщо час очікування у системі перевищує $T_{ож}$, необхідно збільшити кількість вікон ПП та змінити конфігурацію пункту пропуску.

Кількість вікон пункту пропуску визначається за такою формулою:

$$N_{\Pi} = \frac{N_{рч} \cdot t_0}{3600} + 1 \quad (3.14)$$

де N_{Π} – кількість вікон ПП; t_0 – час обслуговування одного автомобіля; $N_{рч}$ – розрахункова годинна інтенсивність руху на ПП.

При визначенні граничної величини функціонування пунктів пропуску обслуговування було встановлено, що для визначення максимально можливої кількості автомобілів у черзі $\overline{T_{заг}}$ для платної автомобільної дороги час очікування обслуговування не повинен перевищувати $0,135 T_e$.

При цьому гранична ситуація (пов'язана з відмовою від використання платної дорожньої споруди) могла мати місце тоді, коли економія користувача від проїзду нею дорівнювала нулю.

У математичній формі зазначена умова надавалася в наступному вигляді:

$$C_{\Pi} T_{оч} = h C_e T_e \quad (3.15)$$

де C_{Π} – середня вартість 1 год простою автомобіля, р.; $T_{оч}$ – середній час очікування автомобілем обслуговування, год; C_e – середня вартість 1 год експлуатації автомобіля, р.; T_e – середній час руху по платному дорожній споруді, год; h – частка економії від зниження собівартості пробігу платною дорожньою спорудою порівняно з альтернативною (безкоштовною).

Вважаючи, що відношення C_e/C_{Π} для транспортного потоку, що розглядається, є постійним і прийнятим рівним b , відношення часу очікування автомобіля в цьому потоці до часу руху виражалось наступним чином:

$$\frac{T_{оч}}{T_e} = h \frac{C_e}{C_{\Pi}} = hb \quad (3.16)$$

При визначенні діапазонів граничних характеристик функціонування багатоканальної системи пункту пропуску здійснено розрахунок ефективності роботи ПП та визначено основні параметри її функціонування (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6

Діапазони граничних характеристик функціонування роботи пункту пропуску

Найменування параметру	Стан параметрів функціонування багатоканальної системи (рівень завантаження ПП)			
	Щільне	Завантажене	Частково завантажене	Вільне
Коефіцієнт завантаження ділянки дороги, N/P	> 0,7	0,7-0,4	0,4-0,2	< 0,2
Максимально можливий час проходження ПП	> 0,135 T _э	0,135 T _э	0,1 T _э	0,08 T _э

На основі алгоритму моделювання роботи ПП була визначена ймовірність знаходження автомобілів у пункті пропуску на кожному транспортному вузла автомобільної дороги «Київ-Чоп» (рис. 3.6).

Планування пункту пропуску має забезпечувати коефіцієнт завантаження не вище 0,7.

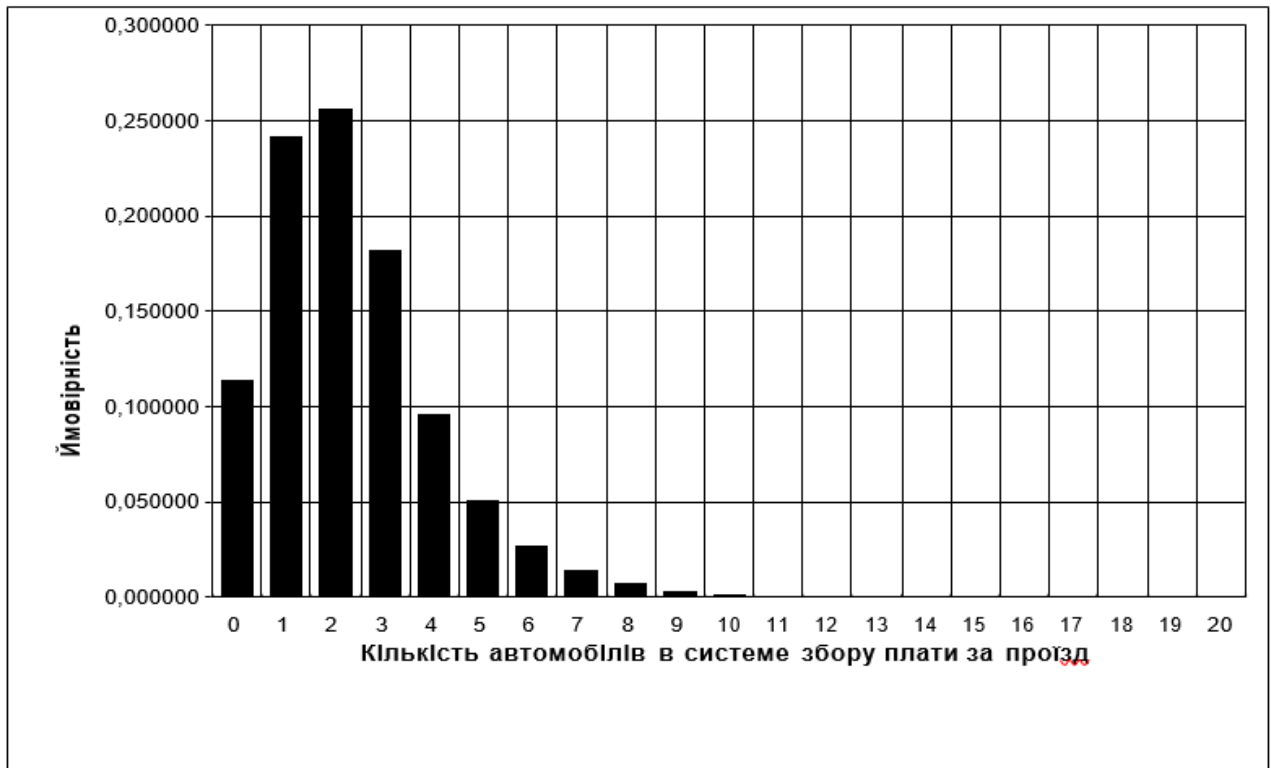


Рис. 3.6 – Імовірність перебування автомобілів до системи пункту пропуску як багатоканальну СМО потоку транспортних засобів з очікуванням

Таким чином відрегулювавши оптимальну кількість вікон пунктів пропуску можна визначити основні геометричні параметри та ширину площі ПП. Ширина площі ПП розраховується за такою формулою:

$$V_{ПП} = V_E \cdot b_E + V_A \cdot b_A + V_B \cdot b_B + V_H \cdot b_H \quad (3.17)$$

де: V_E, V_A, V_B – кількість смуг електронної, автоматичної, ручної системи оплати відповідно; b_E, b_A, b_H – ширина смуг електронної, автоматичної, ручної системи оплати, м; V_H і b_H – кількість та ширина смуги руху для негабаритного транспорту, м.м.

$$b = П + Пто, \quad (3.18)$$

де $Пто, П$ - ширина технологічних острівців для розміщення кабін та систем збору плати за проїзд.

Загальна ширина технологічних островів з обладнанням та кабінами для стягування плати визначається розміром кабіни та встановленим бічним. Зазором між лицьовою стороною бордюру острова та лицьовою стороною

кабіни. Ширина технологічних островів на існуючих об'єктах варіюється від 1,2 до 3,0 м і залежить від обладнання оператора [9; 10].

Висновок до розділу 3

1. Ширина смуги руху в пункті пропуску залежить від динамічних характеристик транспортних засобів і, при русі транспортного потоку зі швидкістю 20 км/год, становить, для легкового автомобіля від 3,0 до 3,25 м, для вантажного від 3,5 до 4, 5м.

2. Розроблено математичну модель підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску платних автомобільних доріг.

3. Визначено оптимальну кількість вікон пункту пропуску, з урахуванням використовуваної системи збору плати за проїзд та час, що витрачається водієм на проходження зон пункту пропуску та схеми площі пункту пропуску на основі теорії масового обслуговування.

4. Встановлено критерії та умови функціонування пунктів пропуску: коефіцієнт завантаження ділянки дороги та максимально можливий час проходження пункту пропуску. При цьому максимально можлива кількість автомобілів у черзі для платної автомобільної дороги та час очікування обслуговування не повинен перевищувати 0,135 Те.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено організаційно-технічні рішення та рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску на платних автомобільних дорогах з урахуванням регіональних особливостей формування транспортних потоків.

Основні наукові висновки та практичні рекомендації полягають у наступному:

1. Регіональною особливістю формування транспортного потоку є переважання автомобілів з правим розташуванням керма, для легкового транспорту частка праворульових становить – 70%, для вантажного – 50% (від 42% до 84% по областях). На основних транзитних напрямках спостерігається тенденція збільшення кількості вантажних транспортних засобів у складі транспортного потоку.

2. Розташування керма з правого боку, впливає формування «сліпих зон» руху автомобіля, його зміщення вправо смузі руху, що знижує безпеку маневрів під час проходження пунктів пропуску. Зміщення автомобіля щодо правого краю смуги руху складає для праворульових автомобіля – 0,36 м, для ліворульового автомобіля - 0,79 м. Наявність змішаного транспортного потоку та розміщення «сліпих зон» обумовлює необхідність збільшувати ширину смуги руху (при русі транспортного потоку зі швидкістю 20 км/год - до 4,5 м) і розподіляти транспортні смугами відповідно до розташування керма .

3. Розроблено методику, засновану на методі конфліктних точок, що дозволяє визначити оптимальну схему пункту пропуску як схему з двостороннім злиттям, з урахуванням безпечного проходження «сліпих зон» та формування динамічного коридору транспортних засобів з правим розташуванням керма.

4. Розроблено математичну модель підвищення ефективності функціонування пунктів пропуску платних автомобільних доріг України, яка дозволяє визначити оптимальну кількість вікон пунктів пропуску з урахуванням використовуваної системи збору плати за проїзд та час, що витрачається водієм на проходження зон пункту пропуску на основі теорії масового обслуговування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванченко А.М. Зарубіжний досвід розвитку платних автомобільних доріг / А.М. Іванченко, М.М. Дубровський // Вісник НУВГП. – Рівне : НУВГП – 2021. – №2 (54). – С. 92-100.
2. Прокопенко В. Г. Закордонний досвід у розбудові платних доріг // Дорожня галузь України. – 2019. – № 2. – С. 22.
3. Дослідження і аналіз світового досвіду концесійної діяльності та розробка пропозицій щодо її удосконалення в дорожньому господарстві України // Укравтодор, УДВТП —Укрдортехнологія». – К., 2019.
4. Пінішко В. С. Ціни і ціноутворення. Навчальний посібник. – Львів: Інтелект-Захід, 2016. – 488 с.
5. Бабков, В. Ф. Проектування автомобільних доріг/В. Ф. Бабков, О. В. Андреев. Вид. друге, перероб. та дод. - К. Транспорт, 2017, - т. 2. - 415 с.
6. Бондар, Н. Н. Оцінка очікуваного транспортного потоку в обґрунтуванні інвестиційних проектів дорожнього будівництва на умовах концесії / Н. Н. Бондар // Економічний аналіз: теорія та практика. – 2019. – Т. 13, № 19. – С. 19–24.
7. Боровик, В. С. Визначення параметрів підходів до мостових споруд на автомобільних дорогах при обґрунтуванні інвестицій / В. С. Боровик, Т. В. Піджарна; Держ. освітня установа вищої. проф. освіти Волгоградський держ. архітектурно-будує. ун-т. - Волгоград: ВолгДАСУ, 2009. - 110 с.
8. ЗУ "Про концесії" Відомості Верховної Ради Ук! раїни (ВВР), 1999, № 41, ст.372). Зі змінами, внесеними згідно із Законами N 2921!III
9. Прейгер Д. Актуальні питання будівництва доріг і розбудови мережі вантажних автоперевезень в Україні / Д. Прейгер // Економіка України. — №7. — 2008. — С. 15—27.
10. Шеремет М.Я. Україна в системі міжнародних транспортних коридорів / М.Я. Шеремет // Регіональна економіка. — №1. — 2008. — С. 219—225.

11. Электронный ресурс: <http://www.odessa.ua/news/5525/> 5. Электронный ресурс: <http://www.ukravto!dor.gov.ua/>
12. The German Way & More. URL: <https://www.german-way.com/travel-and-tourism/driving-in-europe/driving/autobahn/> (дата звернення 09.06.2019).
13. Eliseev, S.Yu. (2008) Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo v transportnom sektore. Zarubezhnyy opyt [Public-private partnership in the transport sector. Foreign experience] VKSS Connect. No2.
14. Moiseev, G.A. (2004) Chastnoe finansirovanie transportnykh infrastruktur za rubezhom [Private financing of transport infrastructures abroad] Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. No 6. S. 35-43.
15. https://cdn.regulation.gov.ua/58/78/d8/82/regulation.gov.ua_Будівництво%20та%20ремонт%20автомобільних%20доріг%20web.pdf
16. Aycin, M. Simple Methodology for Evaluating Toll Plaza Operation. In Transportation Research Record 2008, National Research Council, Washington, D.C., 2016, pp. 92–101.
17. Bergamo M. Il dialogo strada-veicola // Autostrade. 2020. – № 32. – S. 15 - 16.
18. Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington, D.C., 2000. 1189 pages.
19. Fisher, G. Private Financing of Toll Roads [Электронный ресурс] / Gregory Fisher, Suman Babbar // RMC Discussion paper series 117. – 1996. – [Режим доступа : <http://www.rhd.gov.bd/Documents/ExternalPublications/WorldBank/TransSectPub/contents/documents/B22.pdf>] (дата обращения 14.10.2022)
20. Klodzinski, J., and H. Al-Deek. Transferability of a Stochastic Toll Plaza Computer Model. In Transportation Research Record 1811, National Research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 40–49.
21. Li Xun. Research on Multi-lane Induction and Control. Northwestern Polytechnical University, 2019.
22. Pan Yiwei. Study on the Mechanism and Characteristics of Bottleneck in the Confluence Zone of Expressway. Southeast University. 2019.

23. Patrick Denny. Automotive Blind-Zones: A Review of Legislation and the Use of Close-Range Camera Systems, Dublin, 2018.
24. Su Li. Study on Design of Toll Station of Expressway, Changan University, 2018.
25. Woo H, Hoel L. An investigation of toll station capacity and level of service. Virginia (USA): Virginia Department of Transportation; June 1991
26. Wong, R.B. Plan Study. Abridgment Golden Gate Bridge Toll Plaza Master Ammann and Whitney, New York, 2012.
27. Establishment and Development of United States Numbered Highways. American Association of State Highway and Transportation Officials. (дата звернення 17.10.2022).
28. Funding For Highways and Disposition of Highway-User Revenues, All Units of Government, 2016 Highway Statistics 2016. Federal Highway Administration (26 September 2018) (дата звернення 20.06.2022).
29. Finnish Road Statistics. URL: https://www.stat.fi/meta/til/tiet_en.html (дата звернення 20.06.2022).
30. Закон України від 18.09.1991 № 1562-XII «Про джерела фінансування дорожнього господарства України»
31. Закон України від 14.12.1999 № 1286-XIV «Про концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг»
32. Закон України від 17.11.2016 № 1763-VIII «Про внесення змін до Бюджетного кодексу України щодо удосконалення механізму фінансового забезпечення дорожньої галузі»
33. Закон України від 17.11.2016 № 1762-VIII «Про внесення змін до Закону України «Про джерела фінансування дорожнього господарства України»
34. Закон України від 17.11.2016 № 1764-VIII «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо реформування системи управління автомобільними дорогами загального користування»
35. Постанова Кабінету Міністрів України від 10 вересня 2014 р. № 439 «Про затвердження Положення про Державне агентство автомобільних доріг

України».

36. Аналітичний звіт. Закупівлі служб автомобільних доріг областей України 2017 р. Ремонт доріг у 2017 році. Частина I: проведення торгів

37. Аналітичний звіт «Публічні закупівлі поточного, середнього, капітального ремонту та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, оголошені обласними службами автомобільних доріг протягом першого півріччя 2018 р.»

38. Зелена книга «Системний перегляд якості державного регулювання ринків «Проектування об'єктів будівництва», BRDO.

39. Les services routiers de l'État [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-des-services-routiers.html>.

40. Financement des infrastructures routières [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-financement-desinfrastructures.html>.

41. Consistance et cartes du réseau routier national [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Consistance-et-cartes-dureseau.html>.

42. Décret n° 2006-304 du 16 mars 2006 portant création et organisation des directions interdépartementales des routes [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2006/3/16/EQUX0500317D/jo/texte>.

43. Polish Roads Projects Financing [Електронний ресурс] // GDDKiA. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2015/TEM/Poland_iHEEP_June_15_16_Gdansk_Poland.pdf.

44. Ustawa z dnia 27 października 1994 r. o autostradach płatnych oraz o Krajowym Funduszu Drogowym [Електронний ресурс] // Kancelaria Sejmu. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://isap.sejm.gov.pl/Download?id=WDU20120000931&type=3>.