



CHAPTER 5 / РОЗДІЛ 5

METHODOLOGY FOR NORMALIZING VALUES OF TRANSVERSE ROUGHNESS INDICATORS OF PAVEMENT

Постійне зростання автомобільного парку в Україні, є причиною збільшення інтенсивності транспортного руху, вантажообігу та обсягів пасажирських перевезень, що в свою чергу приводить до збільшення навантажень що діють на дорожній одяг та утворення колії на проїзній частині дороги. Питанню виникнення таких деформацій дорожнього покриття, як колія, в Україні не приділяється достатньої уваги, хоча утворення колій є проблематичною частиною загального погіршення стану автомобільних доріг та потребує вивчення та нормування [1, 2].

Згідно результатів досліджень стану дорожніх покриттів на автомобільних дорогах України, колійність є одним з найбільш поширеним дефектом. Наявність колії на покриттях доріг приводить до ускладнення управління транспортними засобами особливо для автомобілів з незначним кліренсом, можливе розгойдування автомобілів особливо застарілих моделей під час виконання маневрів, появи ефекту «аквапланування» що приводить до зниження комфортності та безпеки руху.

5.1. Причини виникнення поперечних деформацій

Під впливом транспортних навантажень і агресивних природних факторів на асфальтобетонному покритті виникають різні види деформацій і руйнувань, які знижують терміни служби покриттів і призводять до дорожньо-транспортних пригод. Рух по деформованим покриттям супроводжується ударами і вертикальними коливаннями коліс, кузова та інших частин автомобіля. Механізми автомобіля зношуються, водії і пасажери відчувають незручності. Середня швидкість руху автомобілів нерідко зменшується до 50 %, що знижує продуктивність і підвищує собівартість перевезень. Колієутворення в



асфальтобетонних шарах дорожніх одягів зменшує строк служби покриття та створює серйозну небезпеку користувачам автомобільних доріг.

Коля – це деформація повздожнього профілю проїзної частини з виникненням поглиблень і гребнів випору вздовж полос нахату через нерівномірний знос і накопичення пластичних деформацій у покритті, а також залишкових деформацій в шарах дорожнього одягу та земляного полотна, яке виникає при багаторазовому впливі коліс автомобілів. Причини утворення колії це наслідок появи комплексу різноманітних факторів, обумовлених властивостями матеріалів дорожньої конструкції, особливостями конструкцій дорожніх одягів, характером і режимом навантаження, впливом природно-кліматичних факторів (рисунок 1).

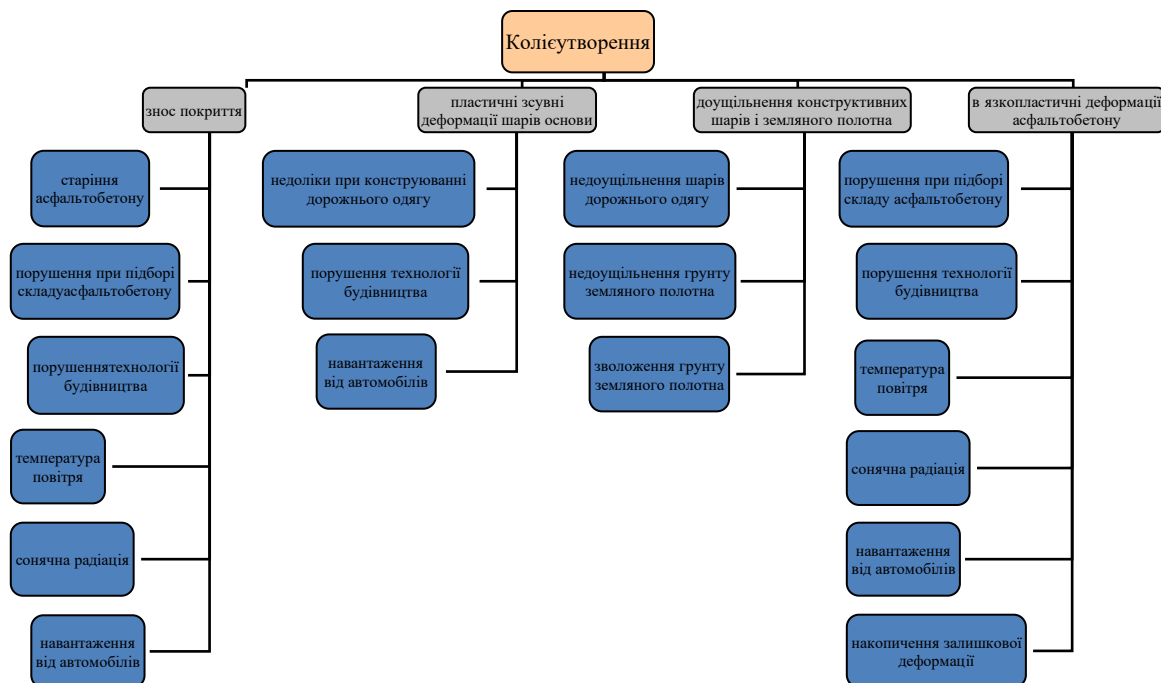


Рисунок 1 – Причини утворення колії на асфальтобетонних покриттях

Найбільш часто коля виникає на нежорстких дорожніх одягах з покриттям із асфальтобетону та інших бітумомінеральних сумішей, однак коля стирання може формуватися і на цементобетонних покриттях. Як і більшість інших деформацій, коля виникає при несприятливому поєднанні двох груп факторів:



– зовнішні фактори – вплив навантаження, кліматичні фактори, особливо температура повітря та сонячна радіація, а також умови зволоження ґрунту земляного полотна;

– внутрішні фактори – фізико-механічні характеристики дорожньої конструкції: зсувостійкість, структурне поєднання, міцність і ступінь ущільнення дорожнього одягу і земляного полотна, тип полотна та його властивості.

Вплив природно-кліматичних факторів, проявляється у зволоженні, перегріві або промерзанні конструкцій, що, у свою чергу, призводить до зниження міцності та погіршення деформаційних властивостей ґрунту, одягу в цілому та окремих її шарів, а також до втрати монолітності покриття.

Працездатність покриття багато в чому залежить від тривалості прикладень, тобто від швидкості руху автомобілів. З підвищенням швидкості руху дія напружень на розтяг в покритті зменшується, а разом з цим зменшуються питомі пошкодження, що виникають від руху транспортних засобів. Однак це відбувається тільки на рівних покриттях. При наявності нерівностей, руйнування виникають через динамічний вплив навантажень.

Горизонтальні (тангенціальні) стискаючі і розтягуючі напруги є причиною пластичних деформацій, а також і руйнувань у верхніх шарах дорожнього одягу у вигляді зрушень, хвиль, напливів, поперечних тріщин і колій по смугах накату. Такі деформації частіше спостерігаються на покриттях товщиною менше 8 см. При більшій товщині шарів покриття зсувні деформації спостерігаються рідше. Це пояснюється тим, що напруги, що виникають в дорожній конструкції тангенціальними зусиллями, прикладеними на поверхні покриття, порівняно швидко згасають за глибиною. Критичним періодом роботи дорожнього одягу є весняний, коли в результаті зниження міцності ґрунту земляного полотна прогин дорожніх одягів максимальний, а температура покриття часто коливається в межах від 0 °С до плюс 10 °С. При цьому особливого значення набуває повторний вплив на покриття навантажень від транспортних засобів, в результаті якого одяг багаторазово прогинається і піддається розтягуючим напруженням,



що нерідко призводить до появи тріщин, в тому числі втомних, в основному на смугах накату.

Особливістю дорожніх одягів, побудованих із застосуванням органічних в'язучих матеріалів, є те, що їх експлуатаційні характеристики протягом терміну служби схильні до безперервних змін, обумовлених не стаціонарністю температурного режиму і впливом транспортних навантажень, а також безперервною зміною властивостей в'язучого в процесі експлуатації, що носять оборотний і необоротний характер.

В залежності від температури, властивостей в'язучих і характеру впливу транспортних засобів покриття з органічними в'язучими будуть мати властивості пружних, пружно-в'язких або пружньо-в'язкопластичних середовищ. Чим нижче температура і менш тривала дія навантаження, тим вище пружні властивості покриття. З мірою підвищення температури і збільшення тривалості дії навантаження все більше починають переважати пластичні властивості покриття.

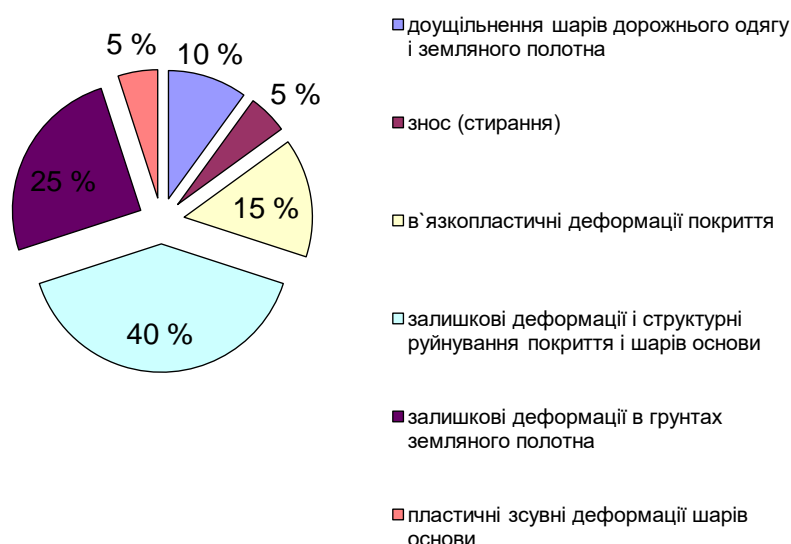


Рисунок 2 – Діаграма співвідношення різних причин утворення колії

Залишкові деформації в ґрунтах земляного полотна є причиною утворення колій в 20-30 % випадків.



Найважливішим технологічним процесом при будівництві земляного полотна є ущільнення ґрунту земляного полотна, яке забезпечує необхідну міцність і стійкість ґрунтів. Від якості робіт з ущільнення залежать фактичні значення модуля пружності, здатність конструкції дорожнього одягу зберігати міцність протягом заданого терміну служби.

У ґрунтах, що мають низьку щільність, при впливі транспортних навантажень накопичуються залишкові деформації. Недостатньо ущільнені ґрунти відрізняються неоднорідністю, меншою щільністю, мають просадки, що призводять до порушення поперечного профілю проїзної частини автомобільних доріг. Із збільшенням щільності ґрунту знижується його водопроникність.

Чим щільніше ґрунт, тим менше діапазон зміни вологості ґрунту під впливом атмосферних явищ і відповідно менша ймовірність морозного пучення взимку і виникнення колійності в інші пори року.

Обстеження та діагностика автомобільних доріг показують, що однією з причин передчасних пошкоджень є недостатня щільність ґрунту земляного полотна. Це відноситься до всіх ділянок доріг, розташованих на земляному полотні і в насипах, і в виїмках. З цих причин ущільненню підлягають як насипні ґрунти, так і основи насипів і поверхневі шари ґрунтових основ у виїмках. Ущільнення земляного полотна є обов'язковим, і ця вимога зафіксована діючими будівельними нормами, правилами і технологічними регламентами з будівництва земляного полотна автомобільних доріг.

Ущільнення ґрунтів окупається економією, що досягається за рахунок зменшення товщини дорожнього одягу, зменшення витрат на ремонт автомобільної дороги і зниження транспортних витрат. Принциповий підхід до визначення необхідної щільності ґрунту полягає в тому, щоб в результаті ущільнення щільність стала такою, при якій не буде відбуватися накопичення залишкових деформацій земляного полотна від діючих повторних розрахункових навантажень і змін вологості ґрунту. Збільшення щільності ґрунту до необхідних значень забезпечує стабільність основних параметрів



міцності ґрунту, робить його стійким до впливу сезонних коливань температури і вологості.

Насамперед колія може утворюватися за рахунок до ущільнення шарів дорожнього одягу, якщо вони не були достатньо ущільнені при будівництві. Колія з цієї причини утворюється в перший рік експлуатації. Досвід показує, що доущільнення дорожнього одягу завершується після проходу 300 тис. стандартних осей вантажного автомобіля.

5.2. Аналіз та узагальнення інформації щодо існуючих методів вимірювання параметрів поперечної рівності і колії на дорожніх покриттях

Рівність проїзної частини дорожнього покриття є одним з основних транспортно-експлуатаційних показників, що характеризує стан автомобільної дороги.

Встановлення істинних причин і характеру утворення колії, характер їх впливу на стан дороги і на умови руху автомобілів є дуже важливою задачею. Відомо, що на дорогах з колією дуже важко видалити сніг і лід з покриття, а погано очищене покриття збільшує ризик руху в декілька разів навіть при невисоких швидкостях руху автомобілів. Через те, що допустимі геометричні параметри колії повинні чітко нормуватись, необхідні попередні вимірювання цих самих параметрів.

Під час дощів вода збирається з покриття в колії і збігає вздовж дороги або наповнює колію повністю до величини $h_{в\ макс.}$, або частково до товщини шару води $h_v < h_{в\ макс.}$. В залежності від глибини колії $h_{макс.}$, ширини деформування поперечного профілю $l_{вн}$ і $l_{зовн}$ шар води при одній і тій же ширині, видимій водієм на покритті, може мати зовсім різну товщину (рисунок 3).

Слід відмітити, що вимірювання вручну ширини і глибини колії в реальних умовах на дорозі при рухомому потоці автомобілів надзвичайно важко. Тому



широкого розповсюдження набуло використання пересувних лабораторій для вимірювання глибини колії [4, 5, 7].

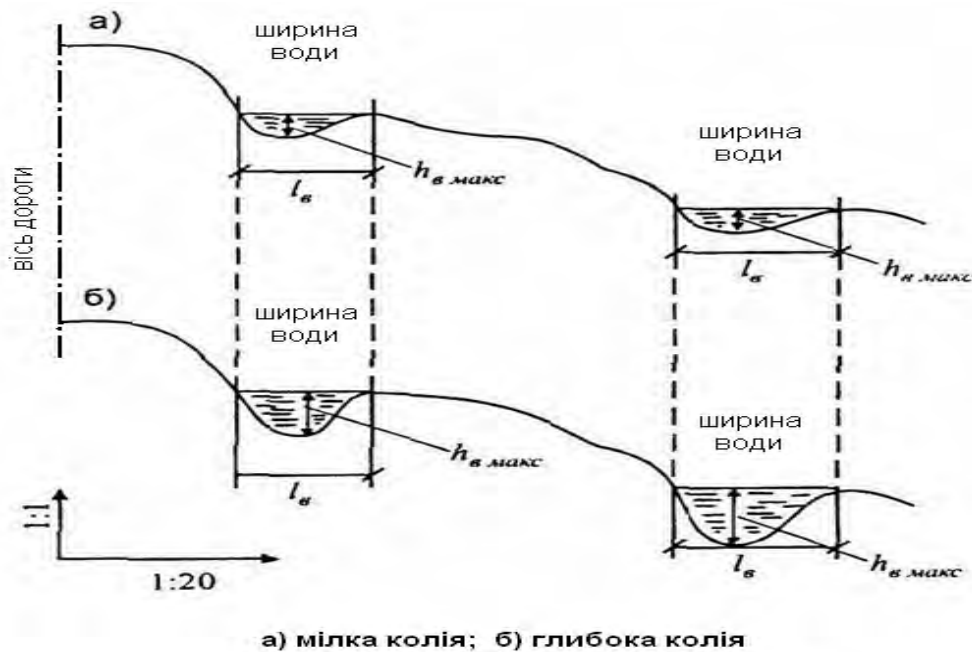


Рисунок 3 – Основні параметри колії при наявності шару води

Тому на дорозі вимірюють як правило лише геометричні параметри самої колії, а потім теоретично розраховують величину можливої товщини шару води в колії [1].

На даний час існує багато методів вимірювання параметрів колії із застосуванням різного обладнання і способу реалізації вимірювань (рисунок 4). Загалом всі існуючі методи можна розділити на:

- методи ручного вимірювання параметрів колії;
- автоматизовані методи вимірювання параметрів колії.

Задача полягає в тому, щоб розробити методи вимірювання найбільшої глибини колії $h_{макс}$ і допустимої товщини шару води в колії $h_{в.макс}$.

Це необхідно для того, щоб можна було визначити допустимий рівень колійності виходячи з безпеки руху легкових і вантажних автомобілів як при розробці нових складів сумішей, що укладаються при будівництві, реконструкції чи ремонті дорожніх покриттів, так і при організації дорожнього руху.

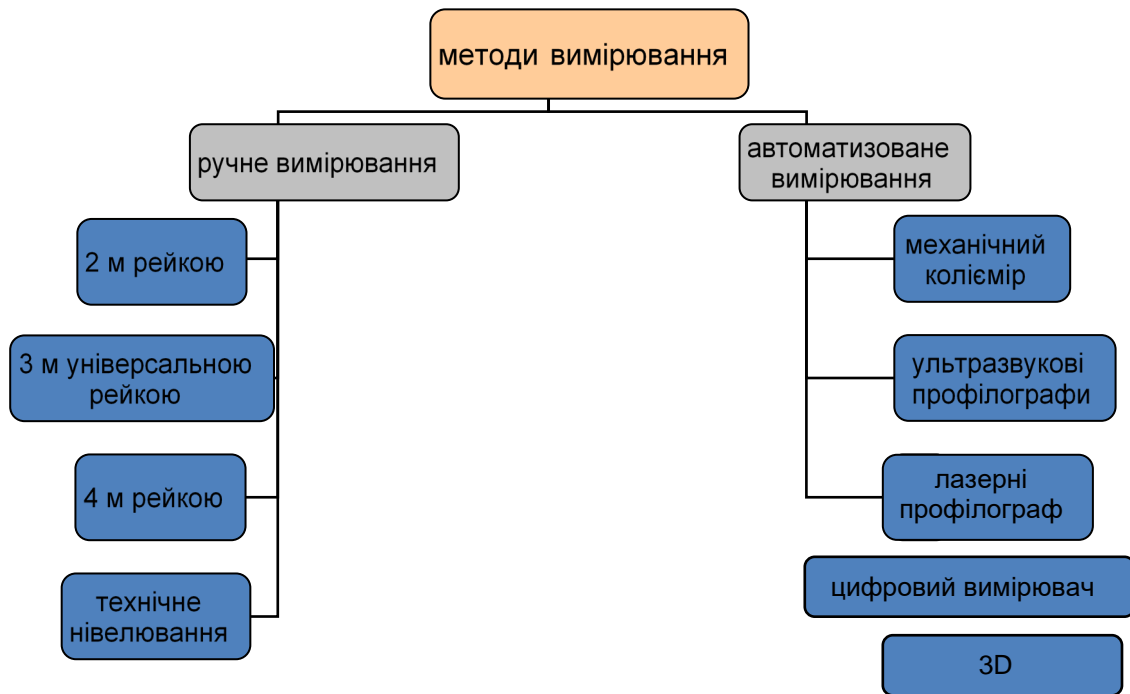


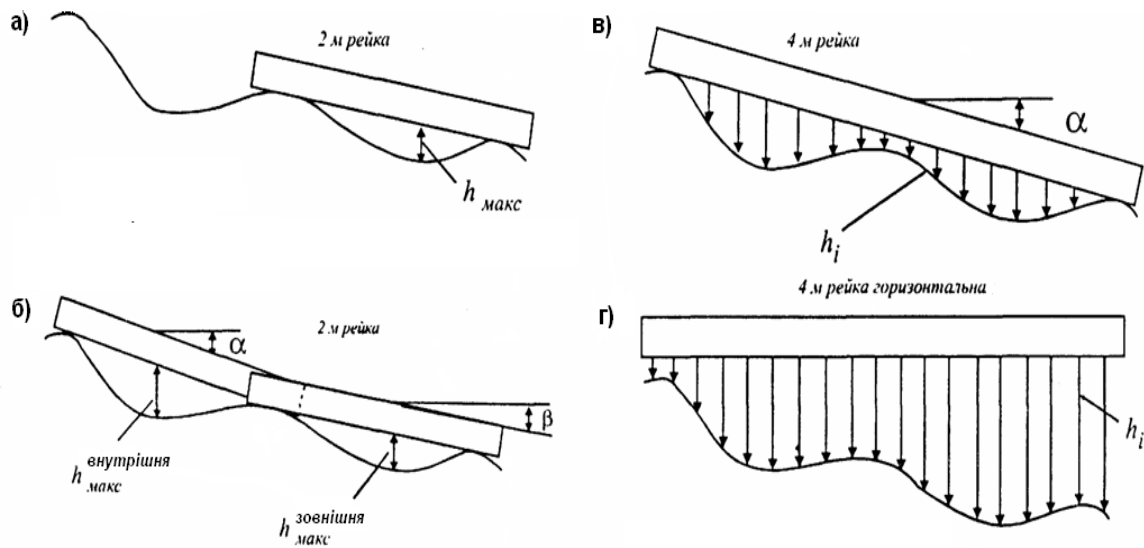
Рисунок 4 – Методи вимірювання глибини колії

Найпростішим приладом для оцінки рівності є рейка довжиною 2 м; 3 м або 4 м, яку прикладають до покриття. Під рейкою виявляють просвіти, які виміряють лінійкою або клином.

Всі методи ручного вимірювання глибини колії в поперечному перерізі можна розділити на чотири види [4, 5].

1. Вимірювання одною двохметровою рейкою. Слід мати на увазі, що цей метод дає лише загальну уяву про рівень колійності на дорозі, але не дає повної інформації про характер деформування всього перерізу. Однак з ручних методів вимірювання глибини колії він найбільш простий, доступний і найменш трудомісткий. Тому цей метод знаходить найбільш широке застосування для практичних вимірювань.

2. Вимірювання двома двохметровими рейками включає два вимірювання в кожному перерізі. Крім вимірювання глибини колій, при цьому способі необхідно обов'язково виміряти також ухили рейки для кожної колії окремо щоб потім визначити характер деформації всього перерізу.



- а) вимірювання глибини зовнішньої колії двометровою рейкою;
 б) вимірювання глибини колій двома двометровими рейками;
 в) вимірювання просвітів під чотирьохметровою рейкою;
 г) вимірювання просвітів під горизонтальною чотирьохметровою рейкою

Рисунок 5 – Методи та засоби ручного вимірювання глибини колії 2 м і 4 м рейками

Обробка отриманих даних на комп'ютері дає можливість визначити:

- максимальну глибину води в обох коліях, без необхідності вимірювання її на дорозі;
- площі просвітів під рейкою, які інформують про величину деформації поверхні дороги і товщини шару снігу, що залишається в коліях при очищенні доріг взимку;
- величину поперечних ухилів дороги для внутрішньої і зовнішньої колії;
- відстані між гребенями кожної колії окремо і місцеположення впадин колії про багатократних коліях.

Недоліки цього методу полягають в значному збільшенні трудомісткості і необхідності вимірювати і фіксувати кути нахилу кожної рейки. Тому такий метод застосовується в основному при дослідницьких роботах.

3. При застосуванні однієї чотирьохметрової рейки, яка спирається на поверхню покриття, вимірювання просвітів під рейкою виконується в декількох місцях через задані відстані вздовж рейки по всій ширині смуги руху. Крім



вимірювання просвітів під рейкою при цьому способі необхідно вимірювати один кут нахилу рейки для визначення характеру деформації всього перерізу дороги. Обробка даних вимірювання дає тіж самі можливості, що й при вимірюванні двома двоохметровими рейками.

4. Спосіб вимірювання одною чотирьохметровою рейкою включає всі вимірювання просвітів для кожної колії під горизонтальною рейкою, яка може спиратися одним кінцем на дорогу чи спиратися обома кінцями на спеціальні опори. При обробці даних вимірювань на комп'ютері можна отримати тіж самі результати, що й при вимірюванні двома двоохметровими рейками. Просвіти між рейкою і поверхнею дороги можуть вимірюватись безперервно вздовж всієї рейки шляхом про кочування вимірювального колеса з вертикальною лінійкою, на якій нанесені ділення. Переваги і недоліки цього методу в основному ті ж, що й при вимірюванні одною чотирьохметровою рейкою, покладеною на поверхню дороги. Додаткові ускладнення пов'язані з необхідністю встановлення рейки чітко в горизонтальне положення.

У світовій практиці відмовилися від ручних методів з вимірювання рівності проїзної частини в поперечному напрямку з застосуванням рейок.

Вимірювання параметрів поперечної рівності і колії виконують з використанням механічних коліємірів, систем з ультразвуковими і лазерними датчиками, які розміщують на несучій балці, прикріпленій до передньої частини автомобіля.

На даний час великого значення набуває розвиток автоматизованих методів обстеження та оцінки стану автомобільних доріг, до яких пред'являються насамперед такі вимоги, як:

- оперативність отримання інформації;
- об'єктивність інформації, швидкість і простота її обробки;
- застосування високопродуктивних приладів і обладнання;
- можливість обробки отриманої інформації із застосуванням ЕОМ.

Автоматизований спосіб вимірювання глибини колії полягає у визначенні просвіта по вертикалі між вимірювальною балкою або рейкою і поверхнею



покриття в декількох точках поперечного перерізу, розташованих на визначеній відстані одна від одної. Поперечники, на яких виконують вимірювання розташовуються на невеликій відстані один від одного вздовж дороги. Обробка результатів вимірювань (відліків) дозволяє побудувати обриси поверхні покриття і обчислити глибину колії.

Основною позитивною рисою автоматизованих вимірювальних пристроїв є дуже висока продуктивність і працездатність при великій частоті вимірювань. Результати вимірювань автоматичними пристроями характеризуються значно кращою точністю, ніж при ручному способі вимірювання, для якого похибка вимірювання найбільшої глибини колії складає 11 % [5].

Недоліком автоматичних відліків просвітів під рейкою або балкою є неминучість фіксування в процесі систематичних вимірювань не випадкових поглиблень в якості поверхні покриття, до яких відносяться локальні нерівності у вигляді уступів, ямковості, обломів кромки, а також різного роду забруднення на поверхні покриття.



Рисунок 6 – Цифровий вимірювач поперечного профілю VEC450

З початку 90-х років широкого розповсюдження набули лазерні профілометри, які вивели якість вимірювань параметрів поверхні дорожнього покриття на новий рівень [5, 7].

При використанні більшості лазерних профілографів – просвіти вимірюються через кожні 5 м вздовж дороги з точністю 0,1 м. В результаті обробки даних



вимірювань отримують попередній банк усереднених даних для кожного поперечного перерізу через 0,1 м вздовж дороги для кожного датчика, а при подальшій обробці попередніх усереднених значень отримують кінцевий банк середніх даних глибини $h_{сер}$ для кожної ділянки дороги довжиною 1 м вздовж дороги.

Швидкість руху лазерних профілографів в процесі вимірювання може змінюватися в межах 20-80 км/год.

В США існує цілий ряд фірм, які займаються розробкою та виробництвом профілометрів. Останнім часом окрім профілометрів на базовий автомобіль також встановлюють відео камери для запису поверхні покриття та облаштування, прилади для оцінки шорсткості покриттів та інші. (рисунки 7, 8).

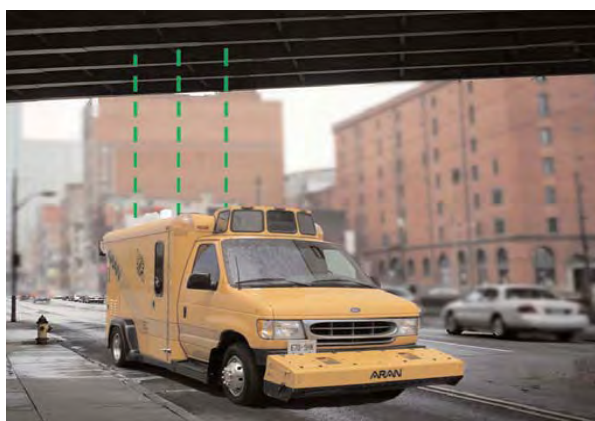


Рисунок 7 – Комплексна лабораторія фірми ARAN (США)

Джерело: [4]



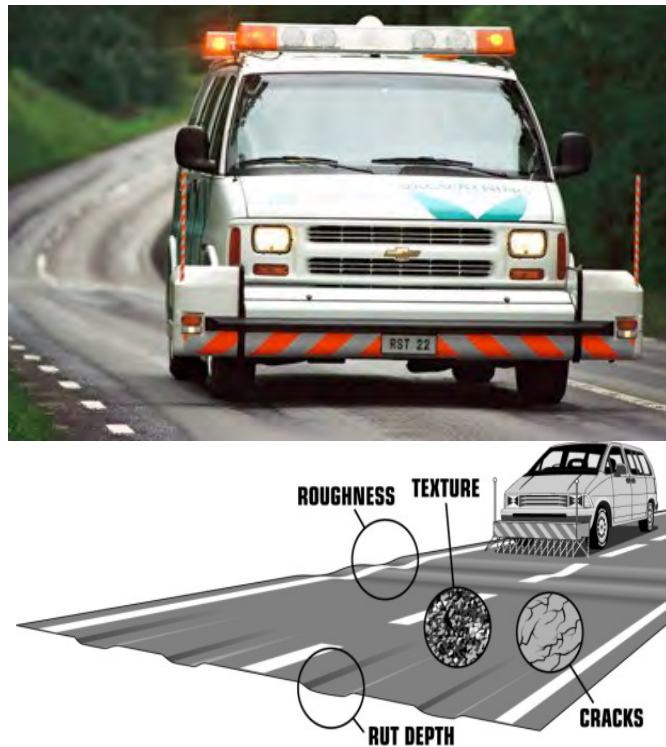
Рисунок 8 – Лабораторія фірми ІСС з лазерним сканером та обладнанням для запису поверхні та облаштування дороги

Джерело: [4]



Фірма „Selcom” одна з перших у світі у 1979 р. почала виробництво датчиків для безконтактного вимірювання відстані, що отримали назву „Optocator”. Сьогодні у світі для сканування поверхні дорожніх покриттів щоденно використовується близько 2500 лазерних датчиків „LMI laser” (рисунок 9).

Сучасні прилади цієї фірми здатні: оцінювати рівність, виявляти колії та тріщини на покритті, оцінювати текстуру. Фірмою „GREENWOOD ENGINEERING” перший прилад на базі датчиків такого типу був створений у березні 1993 р. (рисунок 10) для Датського дорожнього інституту. Прилад має наступні характеристики: кількість лазерних датчиків – 25, ширина вимірювання – 3,5 м, базовий автомобіль – VW Transporter.



**Рисунок 9 – Прилад сканування покриттів на базі датчиків
«LMI laser»**

Внаслідок недосконалості датчиків супутнє обладнання мають досить великі габарити. Більш сучасні зразки мають істотно менші розміри (рисунок 11).



Рисунок 10 – Установка сканування покриттів датського дорожнього інституту



Рисунок 11 – Прилад сканування покриттів фірми „GREENWOOD ENGINEERING” зразка 2000 року

Швидкість та інтенсивність руху на автомобільних дорогах всього світу постійно збільшуються, у зв'язку з цим вимоги до покриттів постійно підвищуються. Це спонукає виробників постійно покращувати свої прилади.

Прилади з лазерними датчиками використовується двічі на рік для контролю рівності автомобільних доріг в багатьох країнах Світу (рисунок 12).

Таких контроль дозволяє вчасно виявляти ділянки, де погіршується рівність, з'являється колійність та інші деформації та руйнування.

Надсучасні прилади фірми „GREENWOOD ENGINEERING” оснащені 48 лазерними датчиками, та додатковим обладнанням, що дозволяє будувати високоточні 3-вимірні моделі поверхні для більш детального їх аналізу (рисунок 13, 14).

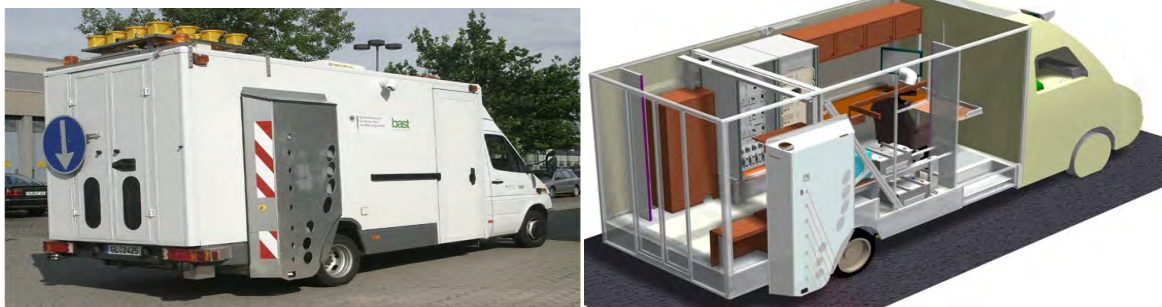


Рисунок 12 – Лазерні дорожні профілометри, які використовують в світовій практиці

В Україні також активно ходові дорожні лабораторії. Наприклад, на базі автомобілів «Ford Transit» фахівцями ХНАДУ створено лазерні профілографи ЛВС-3 (рисунок 15).



Рисунок 13 – Прилади фірми „GREENWOOD ENGINEERING”



**Рисунок 14 – Новітня система лазерного сканування покриттів фірми
«GREENWOOD ENGINEERING»**



**Рисунок 15 – Загальний вигляд ЛВС-3 змонтованого на автомобілі
«Ford Transit»**

Основними вимірювальними елементами системи ЛВС-3 залишилися лазерні датчики відстані, але у порівнянні з попередньою системою, укомплектована датчиками з покращеними характеристиками: частота роботи збільшена у 5 разів, збільшений діапазон вимірювання до 500 мм. Покращення діапазону вимірювання лазерних датчиків позитивно вплинуло на експлуатаційні якості системи – балка з всіма вимірювальними приладами розташована значно вище від поверхні покриття, тому під час паркування «до бордюру» її неможливо пошкодити, оскільки вона знаходиться достатньо вище.

За результатами вимірювання системи ЛВС-3 можливо отримувати тривимірний графік (рисунок 16) поверхні проїзної частини, за яким додатково



можна візуально оцінити: наявність колій, локальних деформацій, умови руху автомобілів під час виконання маневрів та т.ін.

Моніторинг стану дорожніх покриттів та виявлення формування колії на ранніх етапах експлуатації дозволить вживати заходів, що попередять подальший її розвиток і, як наслідок, дозволить заощадити фінансові ресурси.

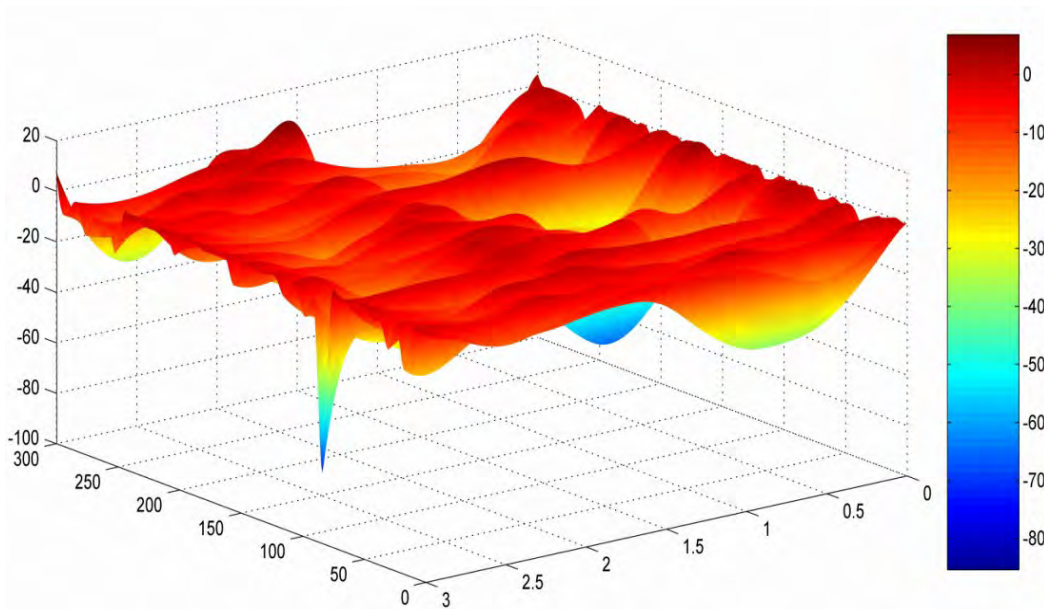


Рисунок 16 – Тривимірний графік ділянки автомобільної дороги довжиною 300 м, за результатами вимірювання установкою типу ЛВС

Нове покоління систем лазерного сканування доріг Road – Scanner – 3 є одним з найкращих завдяки застосування лазерного 3D сканеру Faro Focus. Використовуючи технологію лазерного сканування, лазерний сканер Faro Focus 3D створює тривимірну цифрову модель навколишнього простору і предметів, що включає в себе геопросторові дані в лічені хвилини. Лазерний 3D Faro Focus оснащений сенсорним екраном для управління параметрами сканування. Отримане зображення представляє з себе хмару з мільйонів 3D точок у кольоровому форматі, що створює точну кольорову цифрову 3D модель існуючої обстановки.



Перша система мобільного лазерного сканування та картографування Road - Scanner почала випускатися в 2009 році з використанням лазерного 3D сканера Faro Photon.



Рисунок 17 – Система мобільного картографування Road – Scanner

Компоненти системи лазерного сканування і мобільного картографування Road – Scanner (рисунок 18).



Рисунок 18 – Компоненти системи Road – Scanner

Мобільна система сканування (моніторингу) доріг «TERRA» – система моніторингу стану автодоріг, розроблена спеціально для дорожніх служб та державних адміністративних органів (рисунок 19).



Рисунок 19 – Система моніторингу автодоріг TERRA для дорожніх служб

Система TERRA включає в себе:

- бази даних для зберігання всієї інформації про дорогу, дорожніх та придорожніх ресурсах;
- картографічну базу даних, схеми і карти. Дорожня схема представлена, як основний елемент маршруту;
- дорожню інформацію і додатки з управління дорожніми активами;
- ГІС програми для картографічного представлення дослідженої інформації і подальшої інтеграції з ГІС;
- вертикальні програми (прикладні спеціалізовані програми) для автоматичного керування елементами дорожньої мережі;
- дорожню інформацію і додатки з управління дорожніми активами;



- ГІС програми для картографічного представлення дослідженої інформації і подальшої інтеграції з ГІС;
- вертикальні програми (прикладні спеціалізовані програми) для автоматичного керування елементами дорожньої мережі;
- RDBMS (система управління базами даних) для зберігання інформації, зокрема Oracle і Microsoft SQL Server / MSDE;
- набір інтерфейсів для з'єднання з базою даних, заснований на технологічному стандарті COM (об'єктна модель компонентів) компанії Microsoft, які дозволяють програмам звертатися до даних, що зберігаються в різних джерелах або сховищах даних.

Інтеграція з найбільш поширеними web-системами дозволяє всім користувачам швидко і недорого отримати доступ до даних дорожньої системи.

У програмне забезпечення TERRA входять різні модулі бази даних, в тому числі що містить інформацію про якість дорожнього покриття, як необхідний для дотримання безпеки на дорозі.

Графічний редактор дозволяє здійснювати калібрування дороги і ефективно управляти відхиленнями між зазначеними відстанями і справжньої довжиною дороги.

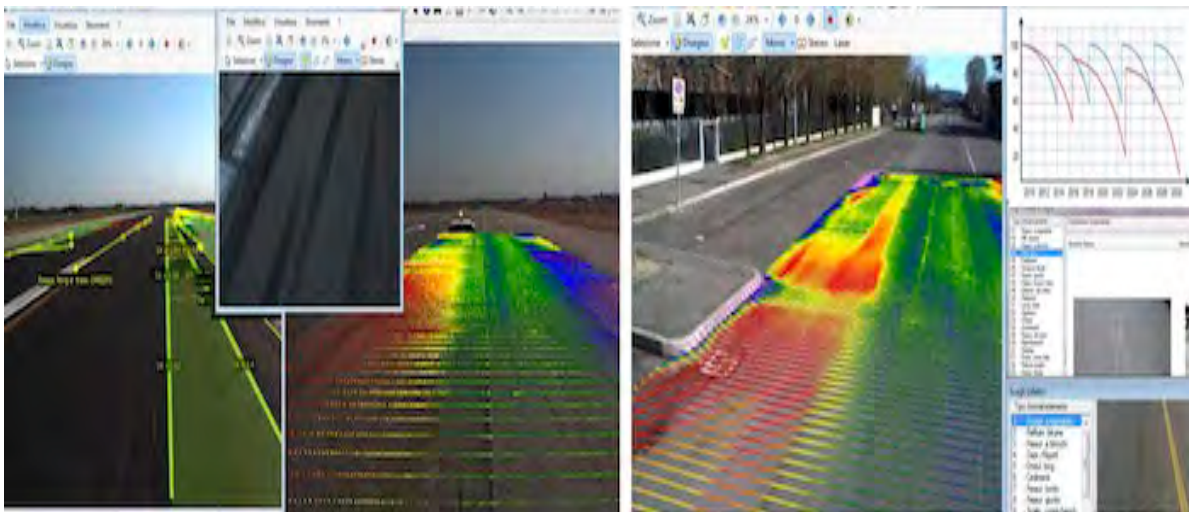


Рисунок 20 – Аналіз отриманих даних стосовно покриття дорожнього одягу



5.3. Нормування поперечної рівності дорожніх покриттів в світовій практиці

Одним з важливих рішень щодо нормування рівності дорожніх покриттів є вибір обґрунтованого критерію нормування.

Проведений аналіз нормативних документів, які пропонують шкалу оцінки поперечної рівності, що діють в інших країнах світу. Аналіз закордонних вимог, щодо нормування показників поперечної рівності поверхні дорожніх покриттів, які використовують в Світовій практиці виявив потребу в адаптації та обґрунтуванні базової та гранично-допустимої глибини колії. Насамперед з аналізу інформаційних джерел незрозуміло за яким критерієм відбувалось нормування поперечної рівності закордоном, як враховувався тип дорожнього одягу та на що необхідно орієнтуватися при нормуванні в залежності від категорії автомобільних доріг або на рівень експлуатаційних вимог. В таблицях 1, 2 наведені нормативні значення за глибиною колії в різних країнах Світу.

На теперішній час поперечна рівність дорожніх покриттів в Україні не нормується. Відбувається робота з переробки та затвердження ДСТУ 3587 «Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану», в якому запропоновані гранично-допустимі величини глибин колії в залежності від рівня експлуатаційних вимог (таблиця 3). Фундаментальні дослідження з нормування поперечної рівності до даного часу в Україні не проводились, тому запропоновані гранично-допустимі величини значень показників глибини колії, практично один в один перекачували з аналогічного нормативного документа республіки Білорусь СТБ-1291 який набув чинності в 2007 році. Також незрозуміло за яким критерієм було прийняті запропоновані показники.



Таблиця 1 – Допустима глибина колії та шару води (Швейцарія)

Швидкість, км/год	Параметри	Оцінка покриття в залежності від глибини колії, мм				
		добра	середня	достатня	критична	погана
До 80	h_k	$\leq 6,0$	6 – 12	12 – 25	25 – 40	> 40
	h_v	$\leq 2,5$	2,5 – 4	4 – 5,5	5,5 – 8	> 8
Більш 80	h_k	≤ 4	4 – 8	8 – 16	16 – 25	> 25
	h_v	$\leq 1,5$	1,5 – 2	2 – 3	3 – 4	> 4

Таблиця 2 – Середня глибина колії та величина її стандартного відхилення згідно НДМ – 4

Показники	Стан поверхні покриття				
	новий	добрий	задовільний	незадовільний	поганий
Середня глибина колії, мм	0	2	5	15	25
Стандартне відхилення, мм	0	1	2	5	8

Таблиця 3 – Гранично-допустима величина колії (ДСТУ 3587:2022, Україна)

Дефект покриття	Гранично допустима величина дефекту за рівнями експлуатаційних вимог			
	1, А	2, Б	3, В	4, Г
Колійність асфальтобетонного покриття, глибина, мм, не більше ніж	20/30	25/35	30/40	40

За даними попередніх досліджень при оцінці поперечної рівності дорожніх покриттів та нормуванні глибини колії пропонується використовувати критерій забезпечення безпечних умов транспортного руху за недопущенням або максимальним зниженням ефекту аквапланування при проїзді транспортних засобів з умов забезпечення розрахункової швидкості руху в залежності від категорії автомобільної дороги.



Результатом даного дослідження має бути запропонована шкала оцінки стану дорожніх одягів за базовими та гранично – допустимими значеннями глибини колії для різних категорій доріг в залежності від умов транспортного руху.

5.4. Закономірності впливу колії на безпеку дорожнього руху

При поганому стані дорожнього покриття значно погіршуються умови руху: з'являються шкідливі для водія та автомобіля вібрації, істотно погіршуються умови роботи водія, так як йому доводиться відслідковувати стан проїзної частини, часто змінювати траєкторію руху, виконувати маневри гальмування і розгону.

Таким чином увага водія відволікається від інших важливих, з точки зору безпеки дорожнього руху елементів дороги і автомобіля, тому погіршення рівності дорожнього покриття призводить до підвищення аварійності. Крім того, суттєве погіршення рівності покриття може привести до втрати стійкості транспортного засобу.

Рівність дорожнього покриття є одним із основних показників, які надають вирішальний вплив на швидкість руху автомобілів і транспортну роботу в цілому, та характеризують зручність руху по дорозі.

Під впливом транспортних навантажень і агресивних природних факторів на асфальтобетонному покритті виникають різні види деформацій і руйнувань, які знижують терміни служби покриттів і призводять до дорожньо-транспортних пригод. Рух по деформованим покриттям супроводжується ударами і вертикальними коливаннями коліс, кузова та інших частин автомобіля. Механізми автомобіля зношуються, водії і пасажери відчувають незручності. Середня швидкість руху автомобілів нерідко зменшується до 50 %, що знижує продуктивність і підвищує собівартість перевезень. Колієутворення в



асфальтобетонних шарах дорожніх одягів зменшує строк служби покриття та створює серйозну небезпеку користувачам автомобільних доріг.

Колійність на проїзній частині дорожнього одягу становить небезпеку з таких причин:

– якщо поверхня є водонепроникною, у колії збирається вода та можливе виникнення явища аквапланування коліс автомобіля, при якому ускладнюється можливість його гальмування;

– із збільшенням глибини колії, ускладнюється управління транспортним засобом, що становить додаткову небезпеку;

– в зимовий період року при переході температури вище нуля в смузі накату збирається вода, а при зворотному циклі вона замерзає і таким чином виникає велика небезпека руху автомобільного транспорту.

Таким чином, для теоретичного обґрунтування допустимої глибини колії слід використовувати наступні основні критерії забезпечення безпечних та комфортних умов дорожнього руху:

1. недопущення або максимальне зниження ймовірності виникнення ефекту аквапланування;

2. недопущення ймовірності втрати стійкості транспортним засобом при виконанні маневрів;

3. обмеження рівня динамічного впливу на транспортний засіб та водія при виконанні маневру в залежності від вимог щодо комфорту руху;

4. врахування особливостей утримання автомобільних доріг в зимовий період.

Комплексне врахування наведених критеріїв вимагає окремого аналізу таких основних процесів як аквапланування та реакція в динамічній підсистемі автомобіль-дорога.

Додаткового вивчення вимагають також процеси утворення водної плівки на поверхні покриття, форми можливих поперечних деформацій, можливі траєкторії та швидкості руху транспортних засобів при маневрах, інш.



Комплексний підхід до вирішення поставленої задачі має передбачати окрім теоретичних напрацювань також проведення експериментальних досліджень. Також обов'язково необхідно обґрунтувати вибір параметрів колії, що нормуються.

5.5. Аналіз впливу товщини водної плівки на ймовірність виникнення ефекту аквапланування

Ефект аквапланування вперше відкритий вченими-розробниками фірми Dunlop у 1960 році [12]. Аквапланування – це процес, суть якого полягає у втраті контакту пневматика з покриттям внаслідок утворення під колесом водяної плівки товщиною в кілька міліметрів. Автомобіль в цей момент стає некерованим.

Із зростанням швидкості руху протектор шини не в змозі виводити велику кількість води з плями контакту з дорогою. У цей момент канавки протектора, що діють як відвідні канали, переповнюються і не справляються зі своєю функцією. Вода утворює під шинами клин, через що втрачається зчеплення. Керуюча сила і сила гальмування зникають, і автомобіль виходить з-під контролю.

Вітчизняні та зарубіжні вчені займаються проблемою оцінки впливу води, що знаходиться на покритті, на умови руху автомобіля [13-17]. В результаті проведених досліджень були визначені умови виникнення аквапланування, та визначено емпіричні залежності швидкості, при якій виникає аквапланування; визначено залежності глибини стоку води від шорсткості, виміряні значення коефіцієнтів зчеплення при різних швидкостях і різних товщинах плівки води.

Основним результатом проведених досліджень стало теоретичне і практичне обґрунтування величини поперечного ухилу, що використовується для чинних нормативних документів.



Однак, в результаті не було розроблено єдиних вимог до глибини допустимих нерівностей на покритті. Вимоги до глибини колій, виходячи з умови скупчення в них води, істотно розрізняються. У деяких країнах нормується не глибина колії, а максимальна товщина шару води на поверхні під час дощу (Німеччина), проте немає чітких рекомендацій, наприклад: при якій інтенсивності дощу необхідно проводити вимірювання.

Серед основних факторів, що впливають на ймовірність виникнення аквапланування слід відмітити якість шини та товщину водної плівки на покритті. За даними Dunlop (таблиця 4) висота протектору шини в значній мірі впливає на ймовірність виникнення ефекту аквапланування.

Таблиця 4 – Залежність швидкості початку аквапланування від висоти протектора при товщині шару води на дорозі 3,5 мм (за даними Dunlop)

Висота протектора	Швидкість початку аквапланування км/год
1,6	55
3,0	60
5,0	68
8,0	100

Згідно положення «Правил дорожнього руху України», п.31.4.5. «Колеса і шини»: а) шини легкових автомобілів та вантажних автомобілів з дозволеною максимальною масою до 3,5 т мають залишкову висоту малюнка протектора менше 1,6 мм, вантажних автомобілів з дозволеною максимальною масою понад 3,5 т – 1,0 мм, автобусів – 2,0 мм, мотоциклів і мопедів – 0,8 мм.

Виходячи зі значного впливу на ймовірність виникнення ефекту аквапланування швидкості руху транспортних засобів, контактного тиску на покриття зі сторони пневматика, переважного складу руху на автомобільних дорогах загального користування та інших факторів для подальшого



обґрунтування прийнято мінімально допустиму залишкову висоту малюнка протектора для легкового автомобіля а саме – 1,6 мм.

З урахування проведеного аналізу сукупності факторів, що впливають на ймовірність виникнення ефекту аквапланування, основним фактором на який може впливати дорожньо-експлуатаційна служба є товщина плівки води, що застоюється на покритті внаслідок погіршення поперечного водовідведення. Таким чином, основою для подальшої теоретичної розробки має стати залежність критичної швидкості з точки зору високої ймовірності аквапланування від товщини водної плівки на покритті. В основу побудови такої залежності мають бути покладенні переважно натурні дослідження. Потужним експериментальним наробком в цьому напрямі володіють світові лідери галузі виробництва автомобільних шин. Тому прийнято рішення за основу побудови зазначеної залежності прийняти результати експериментальних досліджень таких виробників. Опрацьовано та узагальнено результати досліджень виконаних фірмами: Dunlop, Continental, Nokian Tyres, Michelin, Maxxis, Pirelly, Goodyear та дослідників Staughton, Williams, Horne, Leland та інш [12, 18-19].

Для узгодження результатів різних досліджень обробка експериментальних даних виконувалась з урахуванням сталих вихідних умов, а саме: стандартна покришка легкового автомобіля з нормативним тиском та залишковою висотою протектора 1,6 мм; мінімальні значення коефіцієнту зчеплення колеса з покриттям та шорсткості (цементобетон, зношений дрібнозернистий асфальтобетон); транспортний засіб без електронних систем курсової стабілізації. Результати наведено на рисунку 21.

Аналіз графічної залежності ймовірності виникнення ефекту аквапланування від швидкості руху та товщини шару води на покритті (рисунок 21) дозволяє виділити основні характерні зони:

– безпечна зона з умови швидкості руху – згідно з дослідженнями Dunlop [12] орієнтовно до швидкості 50 км/год аквапланування не виникає внаслідок продавлювання шару води вагою транспортного засобу;

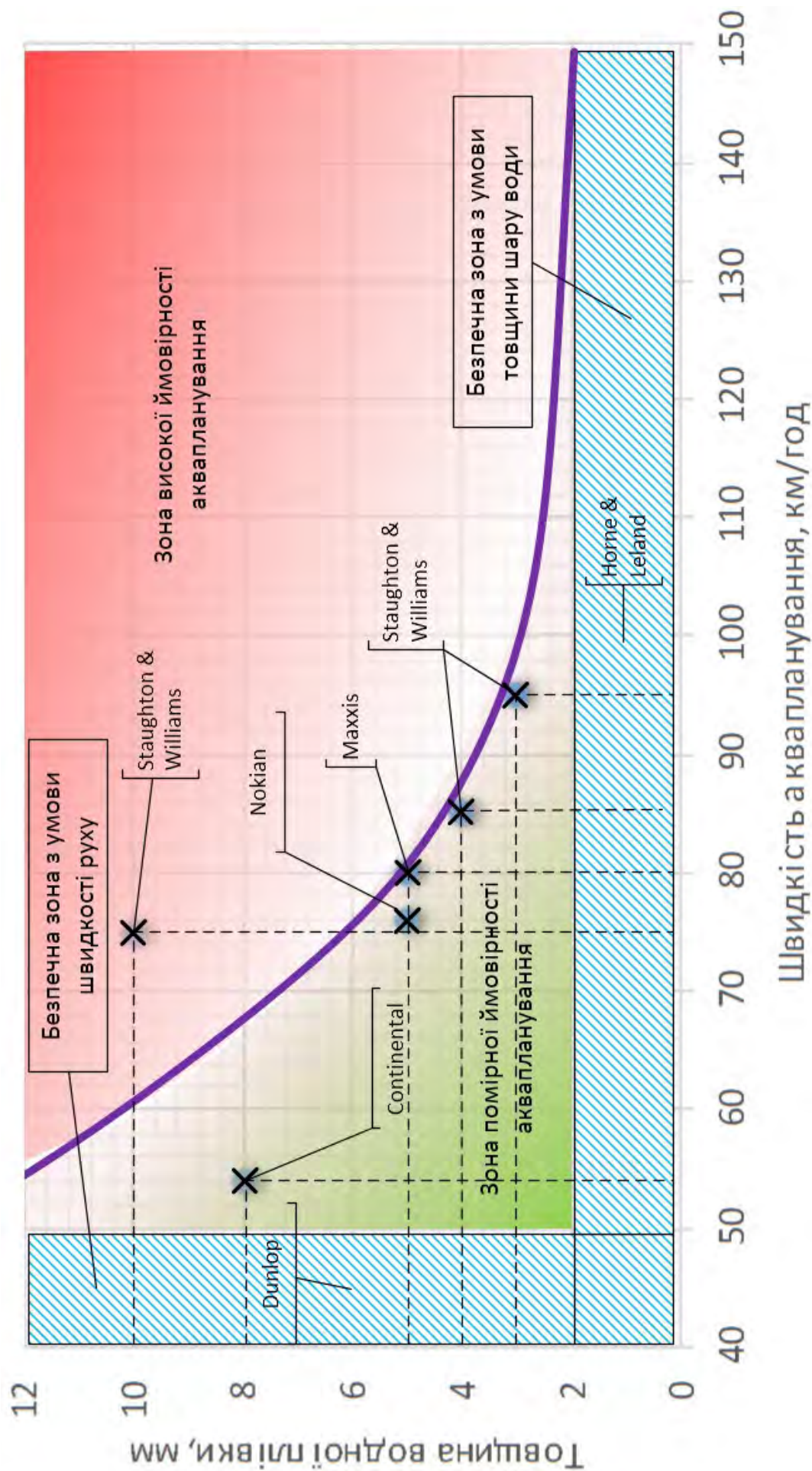


Рисунок 21 – Графічна залежність ймовірності виникнення ефекту аквапланування від швидкості руху та товщини шару води на покритті



– безпечна зона з умови товщини шару води – згідно з дослідженнями Horne & Leland [20] при товщині шару води до 1,5-2 мм рідина відводиться з зони контакту пневматика з покриттям в усьому діапазоні експлуатаційних швидкостей руху;

– зона високої ймовірності аквапланування – комбінація параметрів швидкості руху та товщини шару води в колії руху, що з великою ймовірністю можуть привести до виникнення ефекту аквапланування;

– зона помірної ймовірності аквапланування – комбінація параметрів швидкості руху та товщини шару води в колії руху, для якої ймовірність виникнення ефекту аквапланування є не високою.

Залежність, наведену на рисунку 21, прийнято в якості базової для подальших обґрунтувань допустимої товщини шару води, що застоюється на покритті через колійність, з точки зору впливу на безпеку руху ефекту аквапланування.

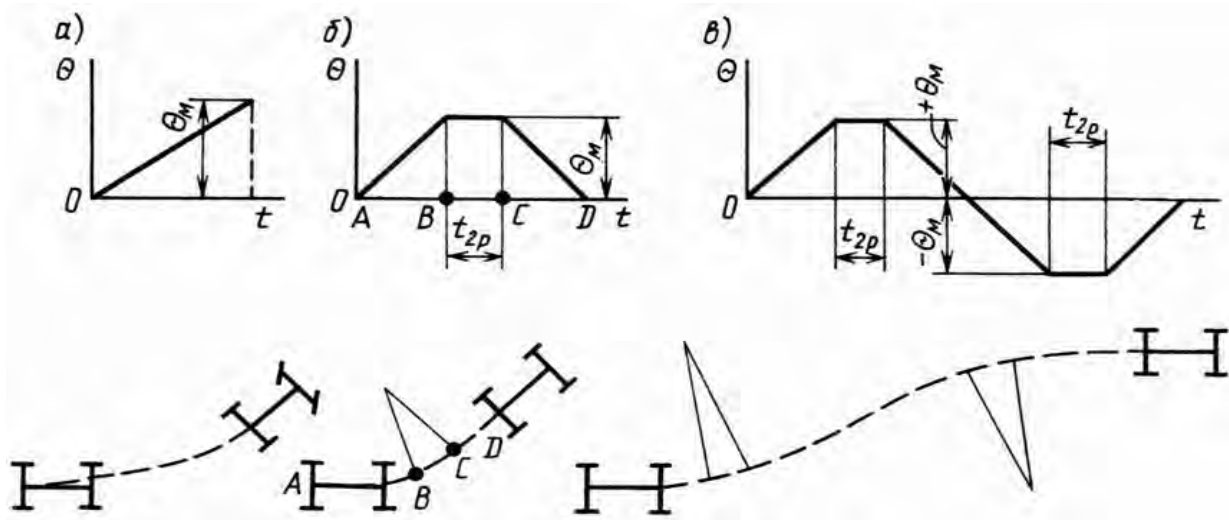
5.6. Аналіз впливу загального рівня поперечної рівності на безпеку руху за умовою втрати стійкості при маневрі

Рівність поверхні покриття, як основний транспортно-експлуатаційний показник, нормується з точки зору забезпечення комфорту, безпеки дорожнього руху, забезпечення пропускної здатності автомобільної дороги та інш. Але з урахуванням переважаючої лінійної траєкторії руху транспортних засобів нормується, як правило, саме поздовжня рівність. В той же час спотворення профілю поверхні покриття в поперечному напрямі с утворенням колії та інших пластичних деформацій може стати причиною виникнення дорожньо-транспортної пригоди при виконанні різних видів маневрів. Тому необхідно додатково розглянути питання впливу загального рівня поперечної рівності на безпеку дорожнього руху за умовою втрати стійкості транспортного засобу при маневрі.



Розглянемо деякі типові схеми виконання маневрів: поворот, зміна смуги руху, виконання маневру при обгоні або випередженні.

Для запобігання зіткнення в самому простому випадку водій різко повертає рульове колесо, курсовий кут θ безперервно збільшується і автомобіль рухається по дузі радіусу, що безперервно зменшується (рисунок 22).



а) – маневр «вхід в поворот»; б) – маневр «вхід-вихід»; в) – маневр «зміна смуги руху»;
 θ_m – максимальний курсовий кут; t_{2p} – час затримки кермового керування, час реакції водія;
 АВ – дуга радіусу, що зменшується; ВС – проміжна ділянка; CD – дуга радіусу, що збільшується; D – точка нейтрального положення коліс.

Рисунок 22 – Типи маневрів

Курсовий кут в кінці такого маневру досить великий, значна також ширина вільного простору, необхідного для маневру (маневр «вхід в поворот»).

Повернувши рульове колесо на максимальний кут θ_m в одну сторону, потім повернувши його в нейтральне положення, виконується маневр «вхід-вихід» (рисунок 22). Перша частина траєкторії AD - АВ – дуга радіусу, що зменшується, а заключна частина - CD – дуга зростаючого радіусу. На проміжному ділянці ВС водій змінює напрямок обертання рульового колеса. Для цього необхідно якийсь час, рівне t_{2p} для вибирання зазорів рульового управління в зворотному напрямку і зміни деформації пружних елементів. Кут повороту передніх коліс за час t_{2p} залишається постійним і можна вважати, що автомобіль на ділянці ВС рухається



по дузі постійного радіусу. Починаючи з точки С, водій повертає передні колеса у зворотному напрямку, кут θ зменшується і на ділянці CD автомобіль рухається по дузі зростаючого радіусу. У точці D колеса займають нейтральне положення, кут $\theta = 0$, і автомобіль рухається під кутом до колишнього напрямку руху.

Застосовуються маневри «вхід в поворот» і «вхід-вихід» у разі, коли перед автомобілем є достатня простір для виконання маневру.

Для виконання маневру зміни смуги руху при обмеженій ширині проїжджої частини водій спочатку повертає колеса в одну сторону на кут θ_m (рисунок 22 в), потім в іншу – на кут θ_m , переводячи їх через нейтральне положення, після чого знову повертає у вихідне положення. У цьому випадку траєкторія складається з шести відрізків: двох дуг зменшується радіуса, двох дуг зростаючого радіусу і двох дуг окружності. При значній ширині проїзної частини може перебувати прямолінійний ділянку. Однак, найчастіше це відстань настільки мало, що воно не береться до уваги.

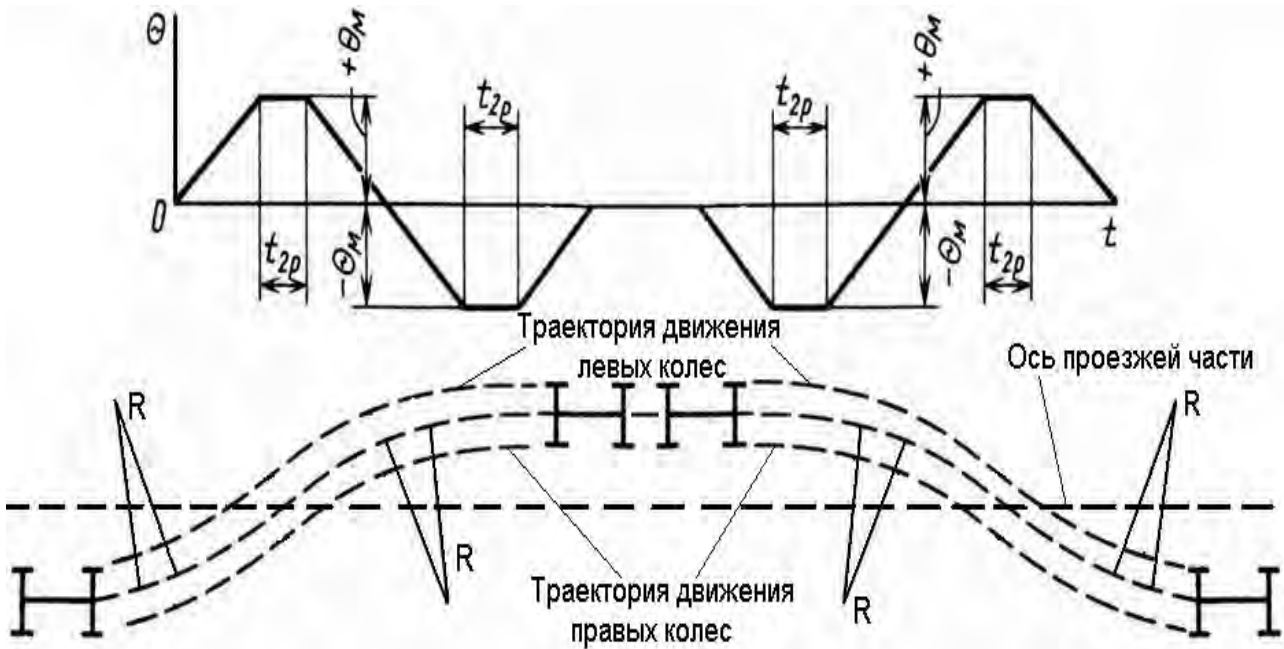
Виконання обгону по своїй суті являє маневр, що складається з 2-х маневрів зміни смуги руху і деякого відрізка часу, протягом якого обганяє автомобіль рухається по зустрічній смузі руху (рисунок 23).

Розглянемо елементарний компонент маневру обгону – поворот автомобіля (рисунок 24).

На рисунку 24 цифрою I позначено положення автомобіля в початковий момент криволінійного руху, передні колеса знаходяться в нейтральному положенні. Прямокутна система координат проведена так, щоб її початок збігався з серединою задньої осі автомобіля, а вісь OX – з поздовжньою віссю в положенні I. У момент часу $t = 0$ водій починає повертати передні колеса і рух автомобіля стає криволінійним. Після повороту коліс на деякий кут θ (положення II) автомобіль повернеться щодо осі OX на кут γ .

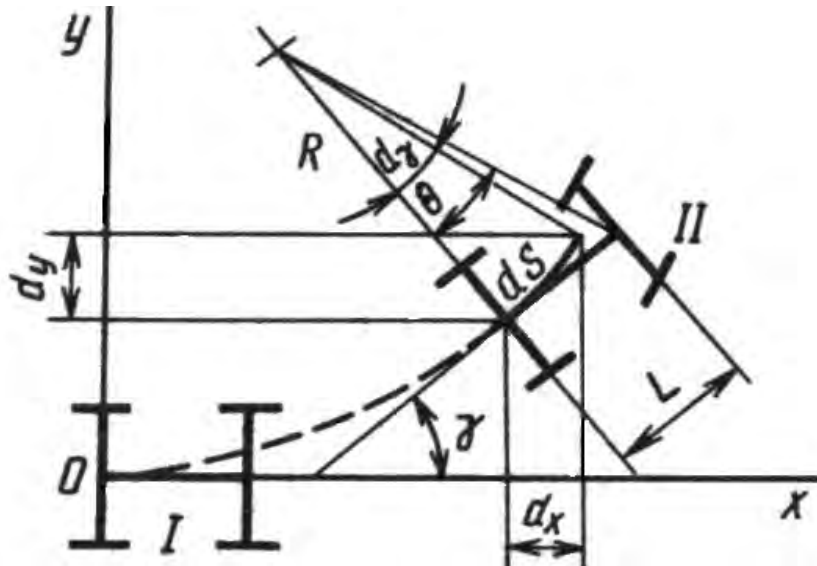
Якщо прийняти припущення, що автомобіль має шини, що мало деформуються, вектор швидкості центру колеса збігається з його площиною, тому можна записати (1):

$$R = L/\operatorname{tg}\theta. \quad (1)$$



Θ – кут повороту коліс, град; t – час, с; t_{2p} – час затримки кермового керування та реакції водія, с; R – радіус кривої повороту, м.

Рисунок 23 – Маневр обгону



I – положення автомобіля в початковий момент руху; II – положення автомобіля після повороту на деякий кут γ ; θ – кут повороту коліс; γ – курсовий кут; dy – нескінченно малий кут; dS – елементарна дуга; dx – прирощення координати x ; dy – прирощення координати y ; R – миттєвий радіус повороту; L – база автомобіля.

Рисунок 24 – Схема повороту автомобіля



Якщо прийняти, що при екстремому маневруванні на високій швидкості кут θ не перевищує 5° , тоді $\text{tg}\theta \approx \theta$ (рад) і вираз (1) прийме вигляд (2):

$$R = L/\theta. \quad (2)$$

Після повороту автомобіля на нескінченно малий кут $d\gamma$ середина заднього моста опише елементарну дугу dS , рівну $Rd\gamma$. При русі автомобіля з постійною швидкістю v_a довжина дуги $dS = v_a dt$. З урахуванням формули 2 (3):

$$d\gamma = dS/R = v_a \theta dt/L. \quad (3)$$

Закон зміни кута θ в часі залежить від водія і може бути різноманітним. Однак експериментальними дослідженнями встановлено, що в небезпечних дорожніх ситуаціях водій, прагнучи запобігти ДТП, повертає кермове колесо дуже різко, але на невеликий кут. При цьому кутова швидкість θ_0 повороту передніх коліс практично постійна ($\theta_0 \approx \text{const}$) і кут θ змінюється приблизно пропорційно часу: $\theta = \theta_0 t$. При цьому допущенні курсовий кут γ прямо пропорційний квадрату часу (4):

$$\gamma = \left(v_a \theta_0 / L \right) \int_0^t \tau d\tau = v_a \theta_0 t^2 / (2L). \quad (4)$$

При невеликих значеннях кута θ і коротких проміжках часу, характерних для небезпечних дорожньо-транспортних ситуацій, курсовий кут зазвичай становить $10-12^\circ$. Для таких малих кутів можна прийняти $\cos\gamma = 1$ і $\sin\gamma \approx \gamma$. Тоді збільшення dx і dy координат x і y за нескінченно малий проміжок часу dt (5):

$$dx = dS \cos\gamma \approx dS; \quad dy = dS \sin\gamma \approx v_a \gamma dt. \quad (5)$$

Отже, координати середини заднього моста (точка В) в момент часу τ (6, 7):

$$x_B = S = v_a \tau, \quad (6)$$

$$y_B = v_a^2 \theta_0 / (2L) \int_0^t \tau^2 d\tau = v_a^2 \theta_0 \tau^3 / (6L). \quad (7)$$



Формули 6-7 дозволяють знайти координати x_B і y_B середини моста і курсовий кут γ в будь-який момент часу та визначити по ним положення кожної точки автомобіля в процесі входу його в поворот при $\gamma \leq 15^\circ$ (0,216 рад.).

Підставив в вираз 7 значення x_B з формули 6, отримуємо рівняння траєкторії руху середини заднього моста автомобіля (8):

$$y_B = \theta_0 x_B^3 / (6v_a L). \quad (8)$$

При рівномірному русі автомобіля і повороті передніх коліс з постійною кутовою швидкістю траєкторія являє собою кубічну параболу.

Як вже зазначалося вище, маневр обгону складається з декількох поворотів. При виконанні цього маневру автомобіль повинен залишатися на проїзній частині, яка має обмежену ширину, тому після повороту в одну сторону на кут θ_m слідує поворот в інший бік на кут мінус θ_m .

Графік залежності кута θ від часу при маневрі зміни смуги руху або обгоні має трапецієподібну форму (рисунки 23, 24). Однак, при екстремому маневруванні можна вважати, що напрямок повороту передніх коліс змінюється миттєво (перехід від $+\theta$ к $-\theta$ і назад) і часом t_{2p} можна знехтувати. Таке припущення слабо відбивається на траєкторії автомобіля.

Щоб ліквідувати небезпечну ситуацію, не даючи їй перерости в аварійну, водій повинен повертати рульове колесо якомога швидше. Однак максимальна кутова швидкість θ_0 обмежена психофізіологічними можливостями водія. Згідно з наявними експертними даними при маневруванні на сухому асфальтобетоні вона знаходиться в межах від 0,3 рад/с до 0,5 рад/с для легкових автомобілів і від 0,15 рад/с до 0,35 рад/с для вантажних автомобілів і автобусів. Крім того, кутова швидкість θ_0 не може бути дуже великою з міркувань безпеки.

Проводячи аналогічні попереднім розрахунки з урахуванням спрощень, описаних вище, отримуємо формули для визначення параметрів X_m , Y_m , γ_m , що характеризують положення автомобіля в кінці маневру (таблиця 5).



Таблиця 5 – Формули для розрахунку параметрів маневру автомобіля

Параметри	Тип маневру		
	«Вхід в поворот»	«Вхід-вихід»	«Зміна смуги руху»
$\tau_1, \text{с}$	x_M/v_a	$x_M/(2v_a)$	$x_M/(4v_a)$
$\theta^0, \text{рад/с}$	$gL\varphi_y/(v_ax_M)$	$2gL\varphi_y/(v_ax_M)$	$4gL\varphi_y/(v_ax_M)$
$x_M, \text{М}$	$v_a \tau_1$	$2v_a \tau_1$	$4v_a \tau_1$
$y_M, \text{М}$	$v_a^2 \theta^0 \tau_1^3 / 6L =$ $= g\varphi_y x_M^2 / 6v_a^2$	$v_a^2 \theta^0 \tau_1^3 / L =$ $= g\varphi_y x_M^2 / 4v_a^2$	$2v_a \theta^0 \tau_1^3 / L =$ $= g\varphi_y x_M^2 / 8v_a^2$
$\gamma_M, \text{М}$	$v_a \theta^0 \tau_1^2 / 2L =$ $= g\varphi_y x_M / 2v_a^2$	$v_a \theta^0 \tau_1^2 / L =$ $= g\varphi_y x_M / 2v_a^2$	0

Формули в таблиці 5 дозволяють з певною точністю визначити положення автомобіля на дорозі при виконанні будь-якого маневру.

Наклавши можливі траєкторії руху під час виконання маневру на виміряну поверхню автомобільної дороги, можна визначити профіль покриття під колесом автомобіля. Аналіз цих профілів можна виконати за допомогою методики IRI. Такий аналіз дозволить визначити умови руху автомобіля під час виконання маневру (рисунок 25).

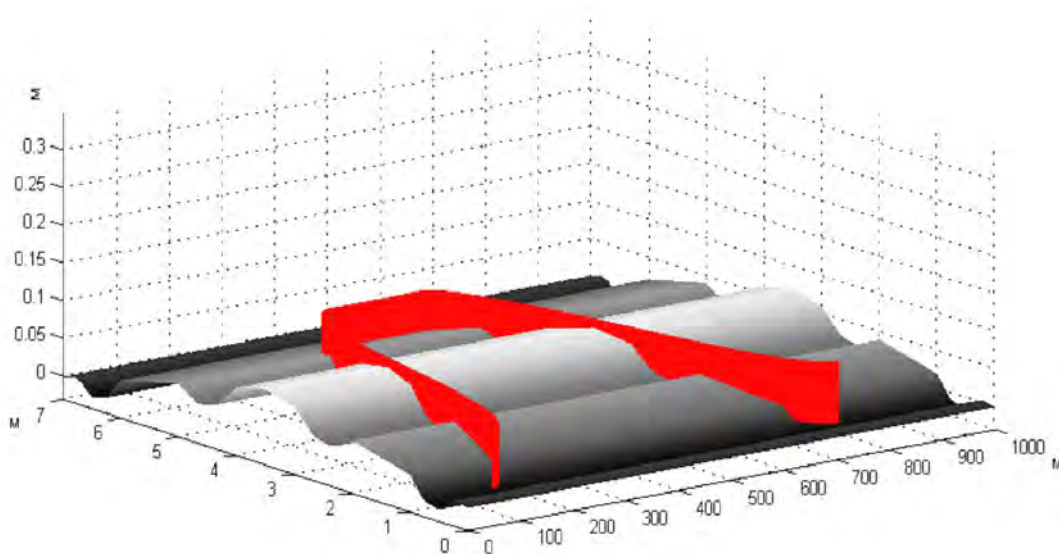


Рисунок 25 – Модель поверхні покриття з нанесеним перетином по траєкторії обгону



Дослідження щодо спільного аналізу математичної моделі «золотого автомобіля» і формул, наведених в таблиці 5 були виконанні автором [13]. Була запропонована математична модель для визначення рівності по IRI для основних маневрів (9):

$$y = 6,16 + 3,97x_1 + 5,3x_2 + 3,62x_1x_2, \quad (9)$$

де x_1 – коефіцієнт, що враховує глибину нерівностей на покритті;

x_2 – коефіцієнт, що враховує кут виконання маневру;

y – рівність за IRI.

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що при виконанні маневру на покритті, що уражене колієутворенням, залежно від кута і типу виконуваного маневру вплив дороги на автомобіль може істотно змінюватися. У деяких випадках при незначній зміні кута повороту може різко змінитися (у кілька разів) динамічний вплив на підвіску автомобіля. За таких умов велика ймовірність втрати керованості і виникнення небезпечної ситуації.

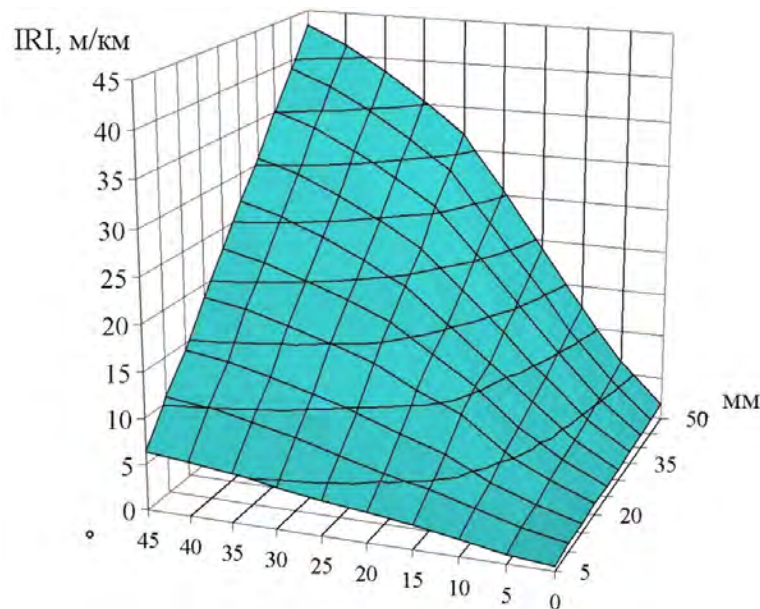


Рисунок 26 – Залежність зміни значення IRI від кута виконання маневру та глибини колії для маневру «зміна смуги руху»

Використовуючи наведену методику необхідно виконати моделювання та оцінку впливу поперечної нерівності покриття на показники динамічної дії на



підвіску автомобіля при виконанні маневрів. В якості базової моделі автомобіля доцільно прийняти модель «золотого автомобіля», що використовується в методі IRI. При цьому слід виконати варіювання таких параметрів як:

- тип маневру;
- кут виконання маневру;
- швидкість руху при виконанні маневру;
- форма колії;
- глибина колії.

Нормування допустимої глибини колії в цьому випадку доцільно виконати як з міркувань безпеки при втраті стійкості та керованості автомобіля та к і з міркувань вимог до комфорту дорожнього руху.

Виконання такого нормування вимагає додаткового проведення об'ємних математичних експериментів із залученням програмних комплексів як сторонніх розробників так і розробки ХНАДУ.

5.7. Експериментальні дослідження закономірностей поперечної деформації дорожніх покриттів

З метою встановлення впливу величини поперечної деформації покриття на комфорт та безпеку руху транспортних засобів необхідно виконати експериментальні дослідження на діючій мережі автомобільних доріг України. Дослідження виконувались за наступною методикою [13]:

- 1 попередні візуальні обстеження з вибором характерних ділянок;
- 2 оцінка поздовжньої рівності з використанням поштовхоміру та обладнання ЛВС-2-ХНАДУ;
- 3 вимірювання поперечного профілю поверхні покриття з використанням 3-х метрової рійки (рисунок 27);
- 4 обробка даних польових вимірювань з залученням методів математичної статистики та математичного аналізу.



Всі зразки вимірювального обладнання, що використовувались при проведенні досліджень, пройшли відповідну метрологічну атестацію та мають відповідний сертифікат Харківського центру стандартизації та метрології.



Рисунок 27 – Вимірювання рівності за допомогою 3-х метрової рейки

Метою вимірювання за допомогою 3-х метрової рейки є побудова 3-х мірного графіка поверхні автомобільної дороги для подальших досліджень. Для ього виконуються вимірювання просвітів і ухилів при почерговому прикладанні рейки в поздовжньому і поперечному напрямках. Вимірювання виконуються у відповідності зі схемами, наведеними на рисунках 28, 29. Вимірювання ухилів виконуються для розрахунків перевищень кожної точки щодо умовного нуля, за який приймається точка поверхні в місці вимірювання першого просвіту під рейкою.

Оскільки вимірювання з високою частотою за допомогою 3-х метрової рейки є дуже трудомісткими, було проведено окреме дослідження, присвячене визначенню оптимального кроку і кількості вимірювань [13]. Для цього досліджувані ділянки вимірювалися з різною частотою, виконувався розрахунок матриці поверхні і розрахунок значень IRI для різних траєкторій руху автомобілів. Результатом стало оптимальне значення кроку вимірювань, яке і використовувалося в подальшому.

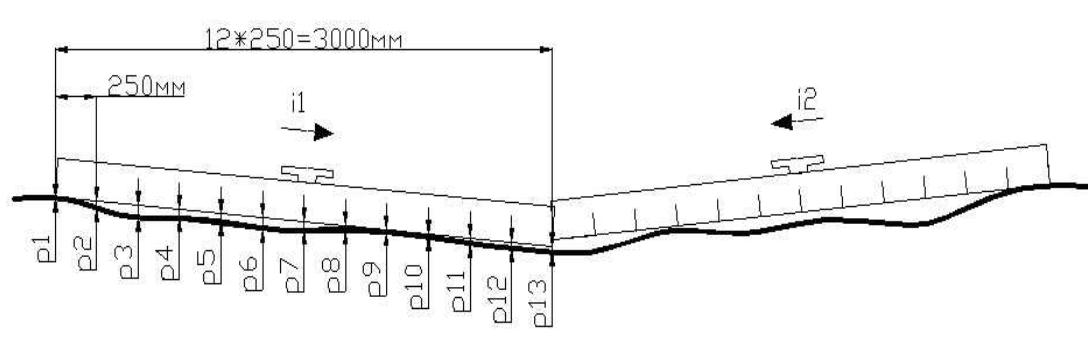


Рисунок 28 – Схема вимірювання поздовжнього профілю з використанням 3-х метрової рійки

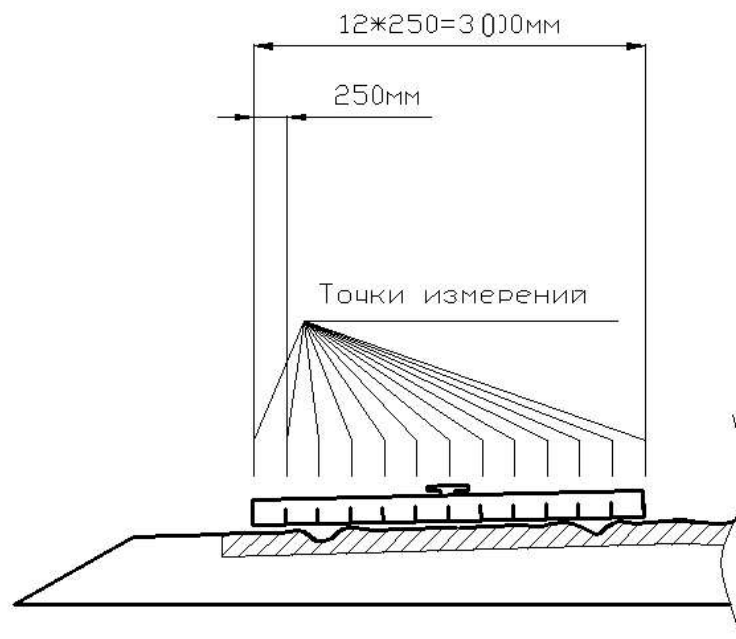


Рисунок 29 – Схема вимірювання поперечної рівності з використанням 3-х метрової рійки

За результатами попередніх досліджень на дорогах державного значення Харківської області було вибрано 5 експериментальних ділянок на дорогах різних категорій, з різними значеннями рівності, визначеної поштовхоміром у відповідності з існуючими стандартами та візуальних обстежень. Ділянки розташовуються на наступних дорогах: Київ – Харків – Довжанський, Харків – Сімферополь – Севастополь – Алушта – Ялта, Харків – Щербаківка, Харків – Суми – Охтирка. На досліджуваних ділянках доріг також спостерігається різна



глибина колії. На обраних ділянках проводилися виміри рівності за допомогою поштовхоміру, системи ЛВС-2-ХНАДУ і 3-х метрової рійки. Після чого проводилися виміри для визначення поперечної рівності поверхні покриття у відповідності з розробленими схемами за допомогою 3-х метрової рійки.

З метою визначення необхідної кількості вимірювань отримані дані були опрацьовані з використанням методів математичної статистики.

За результатами вимірювань просвітів в поздовжньому і поперечному напрямках для кожної виборки були визначені максимальні і мінімальні значення, відповідно до яких був встановлений інтервал варіювання (10):

$$U_{pr} = P_{\max} - P_{\min}, \quad (10)$$

де U_{pr} – інтервал варіювання просвітів;

P_{\max} – максимальне значення просвіту, мм;

P_{\min} – мінімальне значення просвіту, мм.

Інтервал варіювання просвітів розбивається на кілька класів. Число класів визначається за формулою Старджеса (11):

$$K = 1 + 3,32 \lg N, \quad (11)$$

де N – число вимірювань просвітів.

Визначається класовий інтервал за формулою (12):

$$i = \frac{U_{pr}}{K}. \quad (12)$$

Встановлюються межі класових інтервалів, визначається число вимірювань просвітів, що потрапили в кожний класовий інтервал. Розраховуються частоти потрапляння виміряних просвітів в класові інтервали (13):

$$P_j = \frac{M_j}{N}, \quad (13)$$

де P_j – частота для j -го класового інтервалу;



M_j – число значень просвітів, що потрапили до j -го класового інтервалу.

Частоти оцінюються за формулою (14):

$$Y_j = \frac{P_j}{i}. \quad (14)$$

За результатами розрахунків будуються гістограми вимірних просвітів. Для цього по осі абсцис відкладаються значення кордонів класових інтервалів, а по осі ординат частоти і частоті. У кожному класовому інтервалі величина частоти або частоті приймається постійною. Зробивши візуальну оцінку гістограм (рисунок 30, 31), визначили, що як наведені гістограми, так і всі інші на розглянутих ділянках за своєю формою істотно відрізняються від нормального розподілу. Провівши додаткові розрахунки, встановили, що отримані розподіли найкраще описуються законом Вейбула (15):

$$f(t) = n\mu^n t^{n-1} e^{-\mu t^n}, \quad (15)$$

де t – випадкова величина;

μ – параметр масштабу;

n – параметр форми.

Для визначення необхідної кількості вимірювань обчислюється ряд послідовних значень середнього арифметичного за зростаючим обсягом вибірки (16):

$$\bar{P}_k = \frac{\sum P_k}{K}, \quad (16)$$

де K – число вимірювань у виборці.

За даними обчислень будуються графіки залежності середнього арифметичного від обсягу вибірки. Задавшись необхідною точністю вимірювань, визначили необхідний обсяг вибірки.

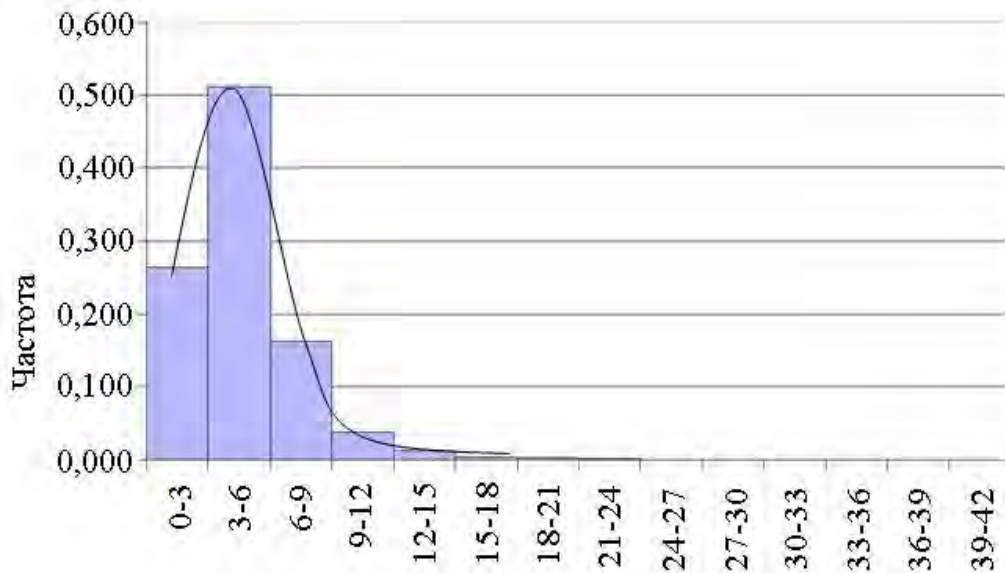


Рисунок 30 – Гістограма величини просвітів (мм) під 3-х метровою рейкою на автомобільній дорозі Харків - Вовчанськ км 15 + 000 – км 16 + 000 (поздовжній напрямок)

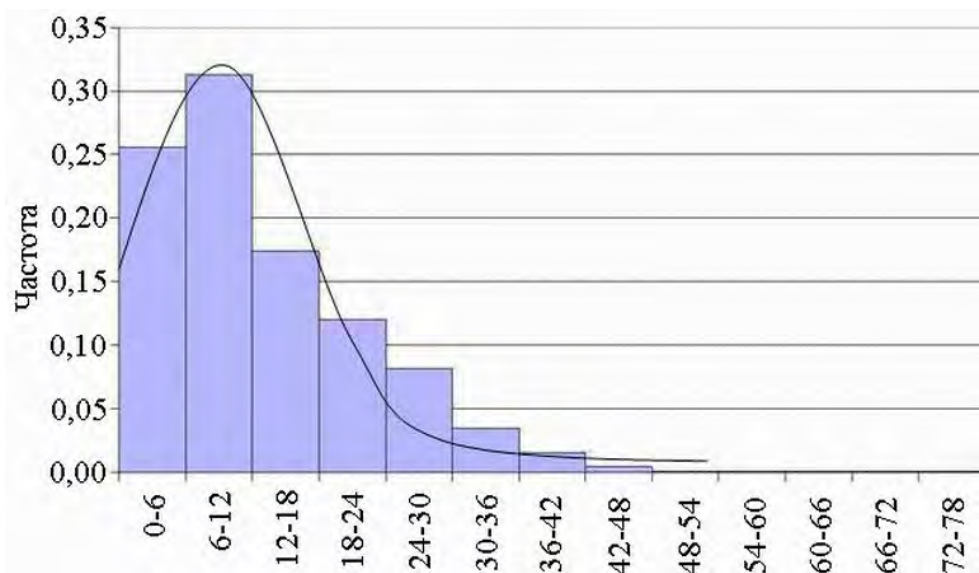


Рисунок 31 – Гістограма величини просвітів (мм) під 3-х метровою рейкою на автомобільній дорозі Харків - Вовчанськ км 15 + 000 – км 16 + 000 (поперечний напрям)

Необхідна кількість вимірювань для оцінки поздовжньої рівності на кілометр становить – 150 вимірювань, а для поперечної рівності – 300 вимірювань на кілометр.



Результатом вимірювань для подальших розрахунків є 3-х вимірна матриця, що містить 3 координати точок поверхні. Детальна обробка сукупності даних польових вимірювань дозволила отримати основні закономірності спотворення поперечного профіля покриття автомобільної внаслідок утворення колії. Польові дослідження підтвердили теоретичні передумови щодо деформування покриття в поперечному напрямку за двома основними типами: в наслідок просідання основи та чистого стиску шарів дорожнього одягу (рисунок 32) та в наслідок пластичного витискування матеріалу шарів покриття та основи (т.з. «випору»), рисунок 33).

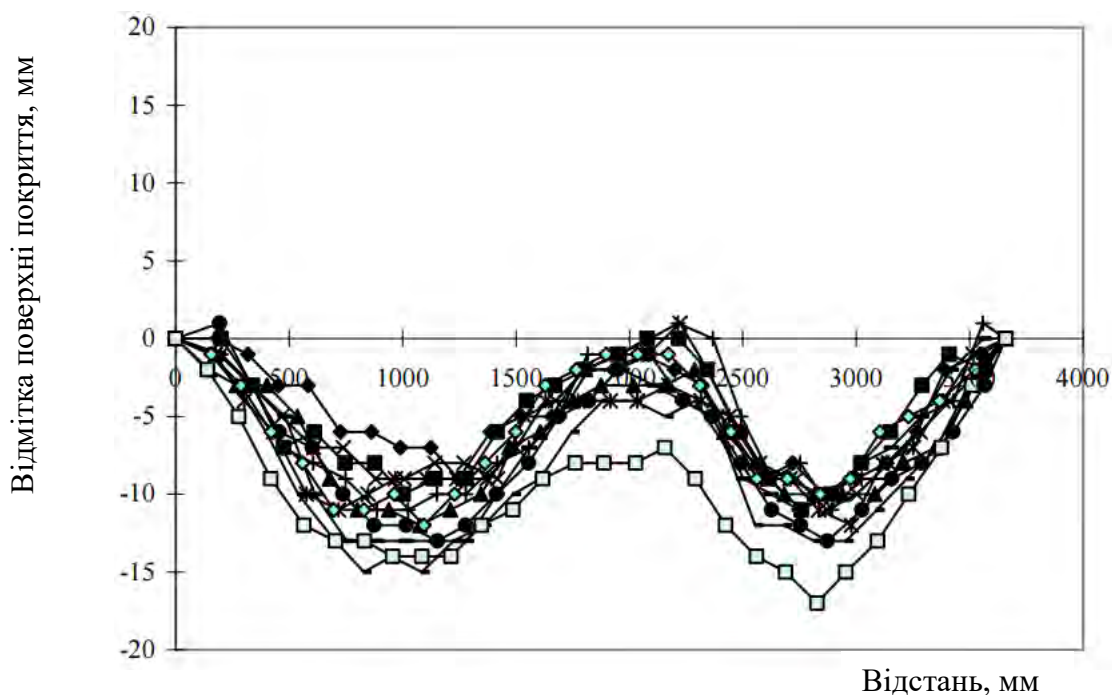


Рисунок 32 – Поперечна деформація поверхні покриття внаслідок стиску матеріалу шарів дорожньої конструкції

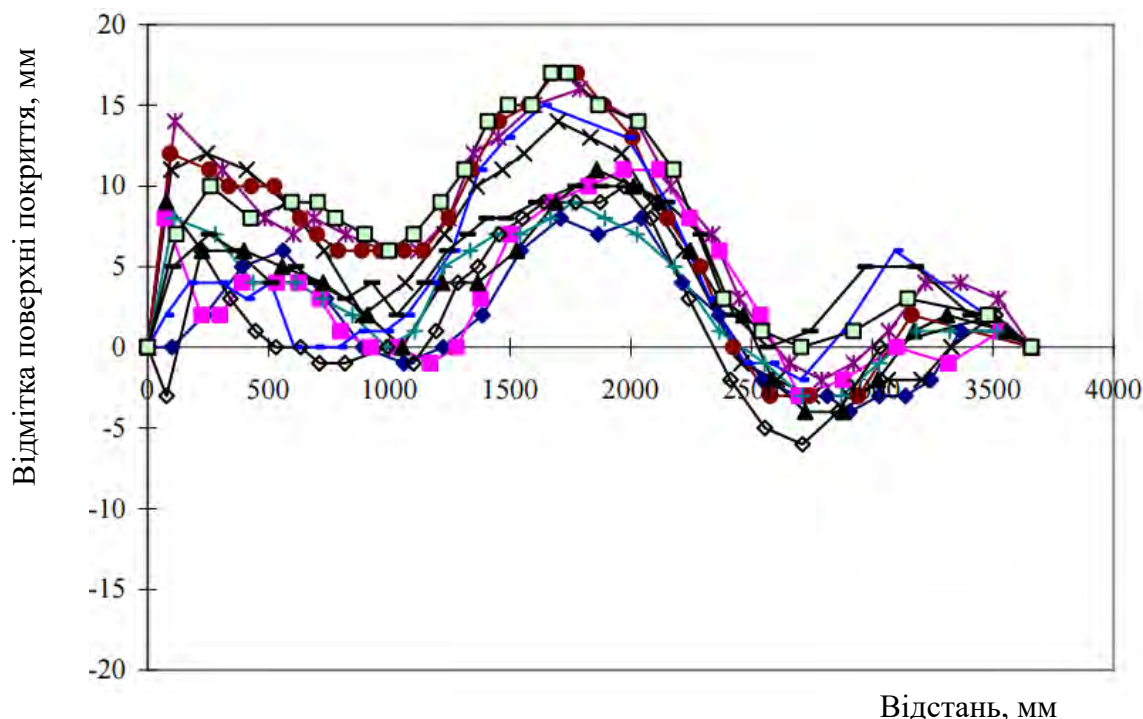


Рисунок 33 – Поперечна деформація поверхні покриття внаслідок пластичного зсуву матеріалів шарів покриття та основи дорожнього одягу

5.8. Моделювання типових поперечних профілів

Ґрунтова оцінка міри впливу поперечної нерівності на безпеку та комфорт дорожнього руху вимагає збільшення діапазону варіювання параметрів поперечної деформації в порівнянні з результатами експериментальних досліджень. Закономірності, отримані в результаті аналізу форми поперечних деформацій, дозволяють виконати моделювання поперечних профілів з різними характеристиками.

Одним з важливих параметрів колії є відстань між найглибшими точками правої та лівої колії. Ця відстань залежить в першу чергу від характеристик транспортних засобів, що найбільшою мірою впливають на утворення пластичних деформацій, а саме важких вантажних автомобілів. Колісна формула типового для доріг України вантажного автомобіля (рисунок 34) передбачає відстань між колесами заднього візка (що здійснює найбільш агресивний вплив



на дорожню конструкцію) у 2040 мм. Таке значення узгоджується з результатами польових досліджень (рисунки 32, 33) тому прийнято в якості базового для подальших досліджень.

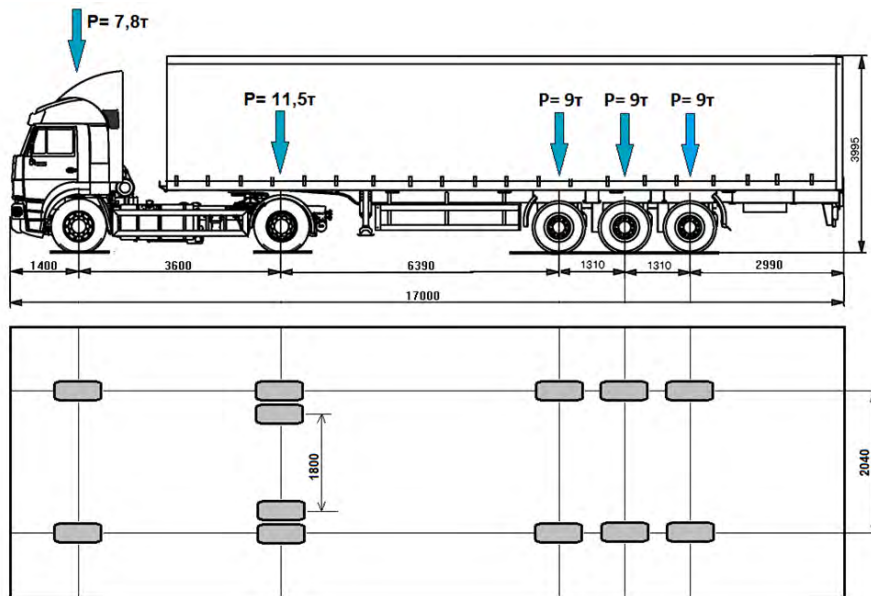


Рисунок 34 – Розрахункова схема прикладання транспортного навантаження

Для аналізу динамічного впливу поперечної деформації поверхні покриття на автомобіль при виконанні маневрів виконано моделювання поверхні покриття ураженої колією зі зміною параметрів колії в наступних межах:

- глибина колії від 0 мм до 100 мм;
- ширина колії від 300 мм до 1500 мм;
- база колії від 1700 мм до 2100 мм;

Поперечний ухил проїзної частини прийнято 25 %, поперечний профіль – двоскатний. Моделювання поверхні відбувалось за допомогою програмного забезпечення RutGenerator розробленого в ХНАДУ. Графічне відображення моделі поверхні покриття ураженої колією наведено на рисунку 35.

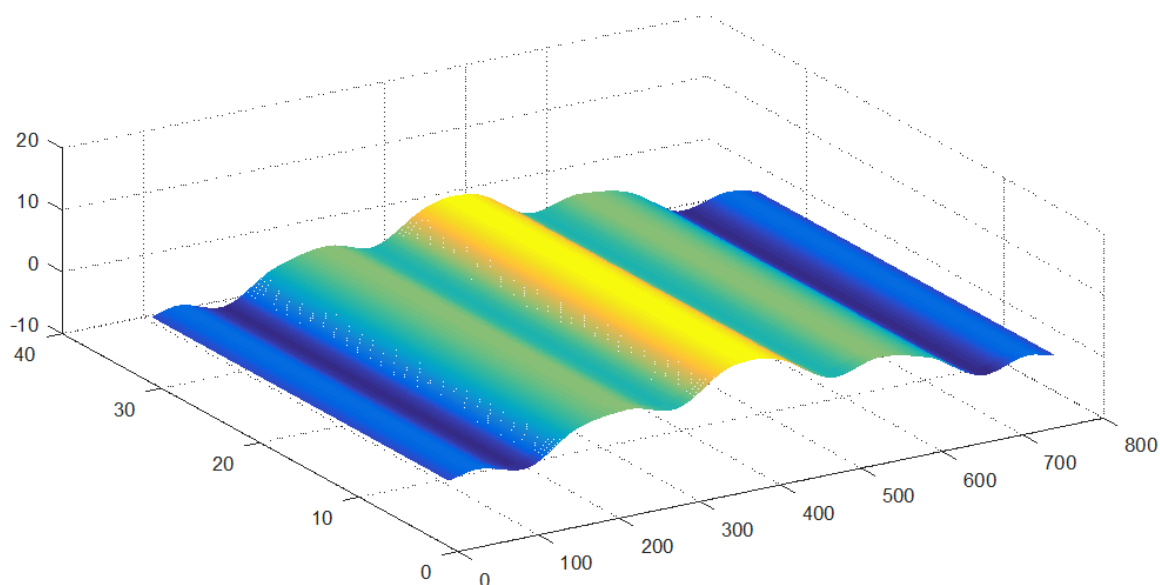


Рисунок 35 – Модель поверхні покриття автомобільної дороги ураженої колією глибиною 30 мм

5.9. Моделювання типових маневрів транспортних засобів

У відповідності з теоретичними передумовами, наведеними в на попередньому етапі досліджень, було виконано розрахунок траєкторій руху автомобіля при виконанні маневрів. Отримана для конкретного маневру траєкторія руху автомобіля накладається на модель поверхні дороги. Перетин, проведений через траєкторію руху автомобіля, перетинає модель поверхні в певній лінії, що представляє собою розрахунковий профіль, тобто профіль, який буде знаходитися під колесом автомобіля під час виконання маневру.

Для розрахунку параметрів маневру транспортного засобу при зміні смуги руху обрано модель Крісті як найбільш точну для сучасних транспортних засобів. Відмінність прийнятої методики від методики Ілларіонова полягає у обмежені максимального поперечного зміщення смуги руху за умовою бічного зносу транспортного засобу а не за умовою його опрокидування, що більш точно відповідає сучасним транспортним засобам.



Згідно з прийнятою для моделювання маневру зміни смуги руху розраховується граничний радіус повороту зовнішньої точки автомобіля за умовою зчеплення коліс з дорогою (17):

$$R_{\text{пр}} = \frac{V_a^2}{127 \cdot \varphi} + 0,5 \cdot B_a, \quad (17)$$

де φ – коефіцієнт зчеплення при бічному ковзанні, 0,8;

V_a – швидкість транспортного засобу, км/год;

B_a – габаритна ширина транспортного засобу, 1,7 м.

Максимальне поперечне зміщення розраховується за залежністю (18):

$$y = 2 \cdot R_{\text{пр}} - B_a - \sqrt{(2 \cdot R_{\text{пр}} - B_a)^2 - S_M^2}, \quad (18)$$

де S_M – відстань, подолана за час маневру.

За залежністю 18 відстань, необхідну для виконання безпечного маневру зміни смугу руху можна розрахувати за залежністю (19):

$$S_M = \sqrt{2 \cdot (2 \cdot R_{\text{пр}} - B_a) \cdot y - y^2}, \quad (19)$$

З урахуванням отриманої залежності за допомогою програми RutGenerator виконано моделювання траєкторій руху транспортного засобу при виконанні маневру «зміна смуги руху» для діапазону швидкостей від 50 км/год до 130 км/год. За розрахованими траєкторіями побудовані профілі поверхні покриття по смугам руху транспортного засобу при виконанні маневру (рисунок 36).

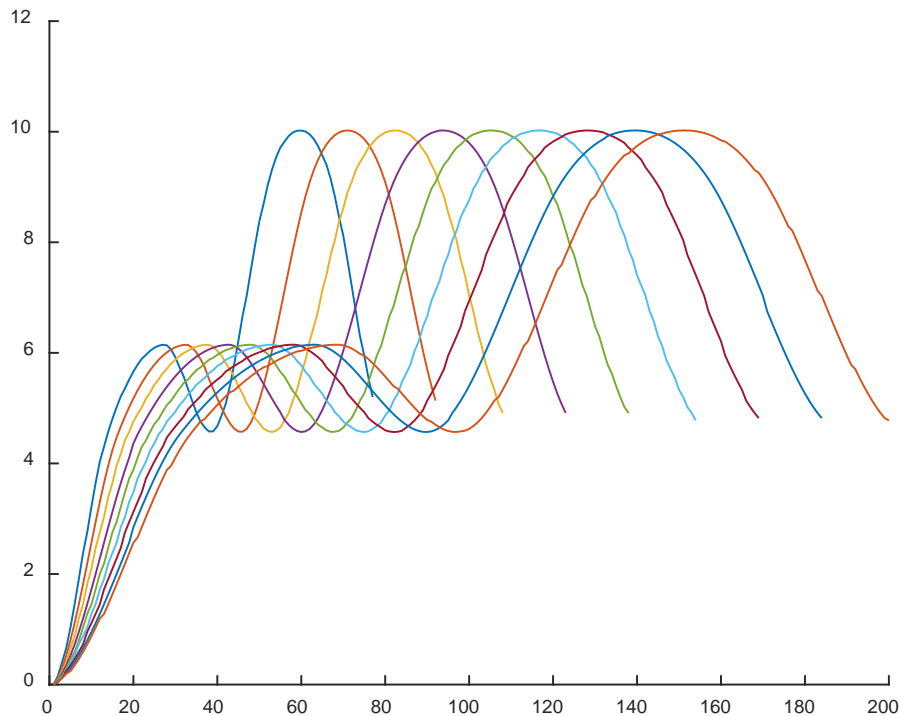


Рисунок 36 – Поздовжні профілі руху транспортного засобу при виконанні маневрів з різними швидкостями (праве колесо)

5.10. Оцінка впливу параметрів поперечної рівності на комфорт та безпеку дорожнього руху

Отримана сукупність профілів була проаналізована з використанням програмного комплексу «ProVal 3.51» розробленого «The Transtec group» [21]. Вказане програмне забезпечення знаходиться у вільному доступі. Розрахунок полягає у моделюванні проїзду транспортного засобу зі сталими уніфікованими характеристиками підвіски (т.з. «золотий автомобіль») по заданому профілю з реєстрацією параметрів коливання підресореної маси (кузов автомобіля) відносно непідресореної.

Серед основних параметрів, що підлягають розрахунку, сумарне коливання та графік переміщення протягом проїзду ділянки, що оцінюється. Використання даних моделювання дає можливість об'єктивно оцінити стан ділянки за рівністю та локалізувати окремі нерівності.

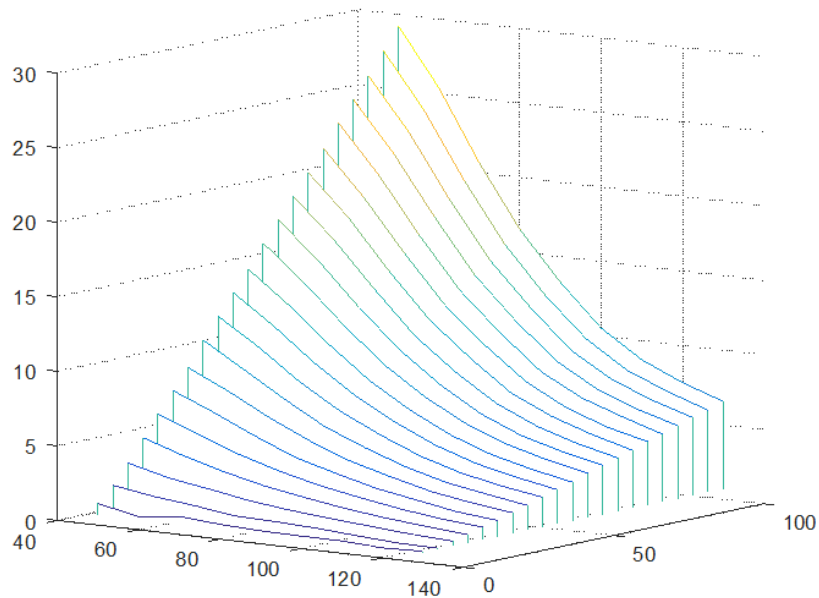


Рисунок 37 – Залежність оцінки траєкторії руху за показником IRI від глибини колії та швидкості виконання маневру

При цьому слід враховувати, що наведені закономірності пов'язані з обмеженням щодо рівня динамічного впливу на транспортний засіб, який виникає при подоланні ним спотвореного поперечного профілю. Тому в терміні «глибина колії» в цьому випадку закладено в першу чергу максимальне перевищення поперечного профілю, яке долає автомобіль при маневрі, а саме різницю між відмітками низу колії та верху її лівого гребню.

5.11. Обґрунтування нормативних значень параметрів поперечної рівності дорожнього покриття

З урахуванням попередніх досліджень серед параметрів поперечної рівності, що безпосередньо впливають на безпеку дорожнього руху слід виділити:

– перевищення правого гребню колії над її нижньою відміткою (надалі – правий випор) з позиції погіршення поперечного водовідведення та формування



застою води к колії руху, що може стати причиною виникнення ефекту аквапланування;

– перевищення лівого гребеню колії над її нижньою відміткою (надалі – лівий випор) з позиції динамічного впливу на транспортний засіб при виконанні маневрів пов'язаних зі зміною смуги руху, що може стати причиною втрати стійкості транспортного засобу.

Нормування зазначених параметрів поперечної рівності має здійснюватися як по середньозваженим значенням з метою отримання статистичної оцінки ділянки обраної протяжності так і по значенням стандартного відхилення від середньозваженого значення з метою обмеження локальних концентрацій дефектів, що досліджуються.

При проведенні процедури нормування зазначених параметрів слід врахувати, що основним керуючим фактором є швидкість руху транспортного засобу. Тому в якості базової залежності слід приймати саме залежність допустимих параметрів поперечної нерівності від фактичної швидкості руху транспортних засобів.

В якості основної закономірності, що накладає обмеження на допустиме значення величини правого випору, прийнята залежність ймовірності виникнення ефекту аквапланування від товщини водної плівки та швидкості руху транспортного засобу (рисунок 21).

Представлена на рисунку 21 залежність дозволяє визначити безпечну товщину шару води на поверхні проїзної частини з урахуванням швидкості руху транспортного засобу. На формування водної плівки в зоні смуги накату окрім правого випору колії буде впливати також шорсткість покриття, що покращує поперечне водовідведення.

З урахуванням закономірності наведеної на рисунку 21 та середньостатистичної висоти мікронерівностей поверхні покриття граничнодопустимі значення величини правого випору колії слід прийняти в залежності швидкості руху на рівні, неведеному в таблиці 6.



Таблиця 6 – Граничнодопустимі значення величини правого випору колії

Швидкість руху, км/год	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Граничнодопустима величина правого випору колії, мм	20	15	12	10	9	8	8	7	7

Обґрунтування граничнодопустимих значень висоти лівого випору колії повинне відбуватись з урахуванням умови динамічної стійкості транспортного засобу при виконанні маневрів, пов'язаних зі зміною смуги руху.

Оцінка динамічного впливу на транспортні засоби передбачає окрім оцінки профілю застосування граничних значень показника IRI, що безпосередньо залежать від швидкості руху. В якості граничних значень IRI прийнято результати досліджень розробників методу IRI [63]. Вказану залежність наведено на рисунку 38.

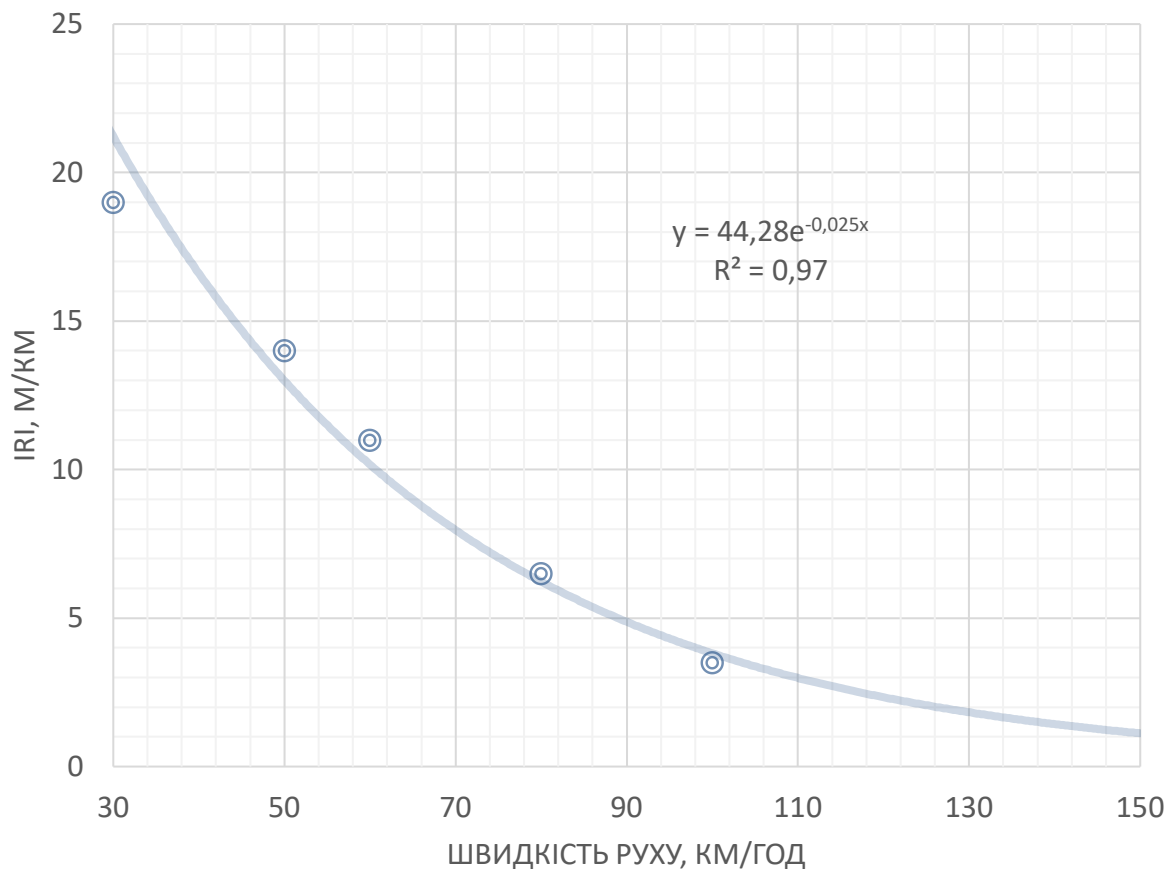


Рисунок 38 – Залежність граничних значень оцінки профілю за IRI від швидкості руху



З урахуванням вказаної залежності виконано розрахунок залежності коефіцієнту рівності при виконанні маневру від швидкості маневру та глибини колії (рисунок 39) за формулою 20.

$$K_p(h_k, V_a) = \frac{IRI_\phi(h_k, V_a)}{IRI_H(V_a)}, \quad (20)$$

де h_k – глибина колії, мм;

V_a – швидкість виконання маневру, км/год;

IRI_ϕ – фактична оцінка профілю за показником IRI;

IRI_H – гранична оцінка профілю за показником IRI.

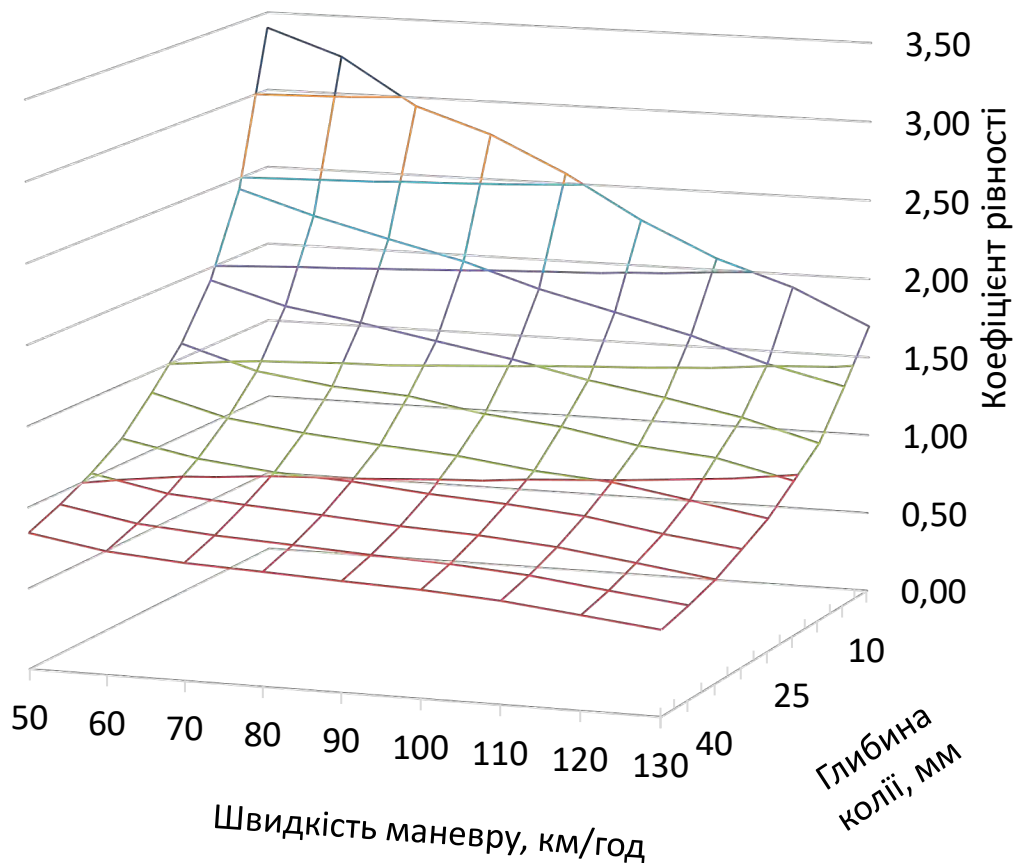
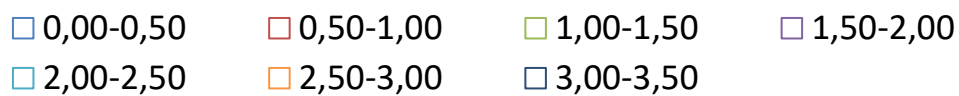


Рисунок 39 – Залежність коефіцієнту рівності від глибини колії та швидкості виконання маневру



В якості нормативного значення коефіцієнту рівності прийнято значення 1. При цьому профіль руху транспортного засобу при виконанні маневру відповідає вимогам безпеки при значеннях $K_p \geq 1$. Залежність безпечної швидкості виконання маневру «зміна смуги руху» від величини лівого випору колії наведено на рисунку 40. В табличному вигляді представлену залежність наведено в таблиці 7.

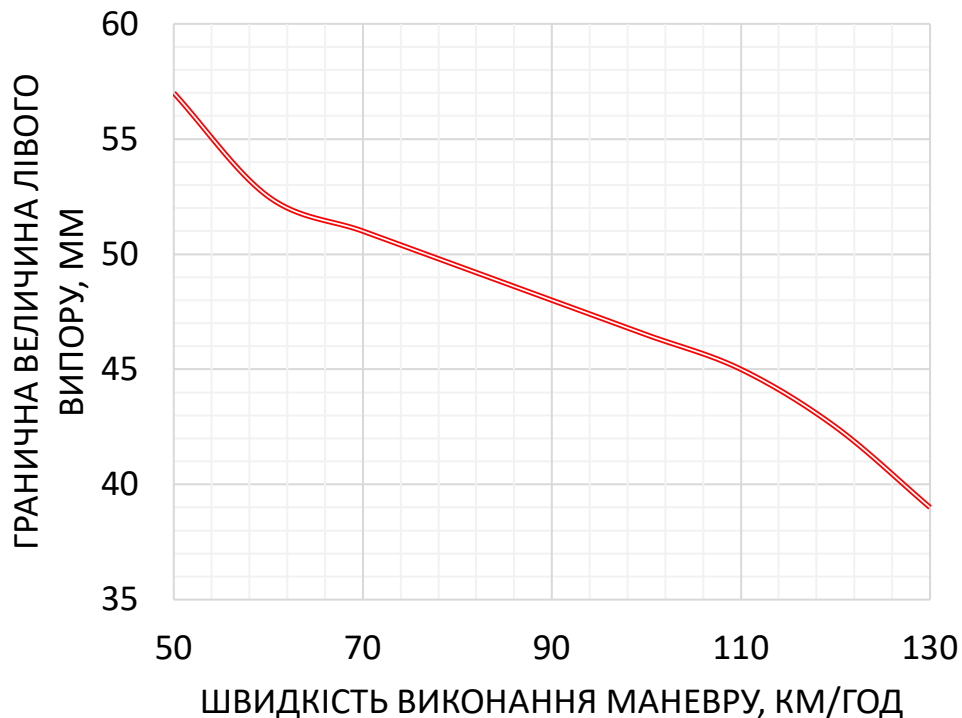


Рисунок 40 – Залежність граничної величини лівого випору колії від швидкості виконання маневру

Таблиця 7 – Граничнодопустимі значення величини лівого випору колії

Швидкість руху, км/год	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Гранично допустима величина правого випору колії, мм	57	52	51	50	48	46	45	42	39