

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 631.372-027.45

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного факультету

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

технічного сервісу та інженерного  
менеджменту ім. М.П.Момотенка  
(назва кафедри)

Вячеслав БРАТІШКО

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Іван РОГОВСЬКИЙ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

2023 р.

2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Удосконалення техекспертизи оцінки експлуатаційної надійності лісовозних автомобільних доріг»

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»  
(код і назва)

Освітня програма «Автомобільний транспорт»  
(назва)

О  
n

(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Д  
Ф  
Р  
К

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

В  
Р  
Т  
О  
В  
А  
К  
У  
Р  
Н  
И  
Н  
И

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ім'я, прізвище)

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Валерій СОРОКА

П  
И  
С  
Ь

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П.Момотенка

д.т.н., проф. Іван РОГОВСЬКИЙ

(научковий ступінь, ученє звання) (підпис) (ім'я, прізвище)

ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Валеріо Віталійовичу Сороці

(прізвище/ім'я, по батькові)

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

(код і назва)

Освітня програма «Автомобільний транспорт»

(назва)

О

(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Удосконалення техекспертизи оцінки

затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» грудня 2022 р. № 1944 «Є»

Термін подання завершеної роботи на кафедру

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Науково – технічна література; результати науково-дослідних робіт по літературних джерелах з експлуатаційної надійності лісовозних автомобільних доріг

Т Перелік питань, що підлягають дослідженню:

Ф Аналіз стану питання досліджень, мета, задачі дослідження

В Теоретичне вивчення впливу параметрів та експлуатаційної надійності лісовозних автомобільних доріг

Д Методика розрахунку алгоритму експлуатаційної надійності лісовозних автомобільних доріг

Н Результати експериментальних досліджень експлуатаційної надійності лісовозних автомобільних доріг

Б Перелік графічного матеріалу Електронна презентація на 14 слайдах

Н а Дата видачі завдання «11» листопада 2022 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Людмила ТІТОВА

(підпис)

(ім'я прізвище)

Завдання прийняв до виконання

Василь СОРОКА

(підпис)

(ім'я прізвище)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД, ЗАВДАННЯ ТА ЦІЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	7
1.1. Огляд літературних джерел з проблеми мережі та стану лісовозних автомобільних доріг.....	7
1.2. Існуючі теорії освіти профілю доріг типу «гребінка».....	12
1.3. Існуючі теорії втомного зношування дорожнього покриття.....	15
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ДІЛЯНКИ ЛІСОВОЗНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ.....	19
2.1. Загальні положення.....	19
2.2. Методи оцінки контактних напруг.....	20
2.3. Оцінка періоду виникнення втомної тріщини.....	24
2.4. Оцінка періоду поширення втомної тріщини.....	25
2.5. Оцінка ймовірності безвідмовної роботи автомобільних лісовозних доріг.....	27
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОСТІ НА ДОРОЖНЬОМУ ПОКРИТТІ ЛІСОВОЗНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ.....	29
3.1. Якісна модель утворення нерівності типу «гребінка».....	29
3.2. Математична модель утворення нерівності типу «гребінка».....	32
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І МЕТОДИКА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ.....	38
4.1. Способи та інструменти для вимірювання нерівностей покриття автомобільних доріг.....	38
4.2. Вимірювання рівності за допомогою дорожньої універсальної складаної триметрової рейки «РДУ – Кондор».....	39
4.3. Вимірювання рівності за допомогою нівеліру та нівелірної рейки.....	46

РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ПОШКОДЖЕНЬ ТИПУ «ГРЕБІНКА»

5.1. Результати експериментальних досліджень «гребінки» визначені  
методом максимумів і мінімумів..... 52

5.2. Результати експериментальних досліджень «гребінки», отримані  
методом випадкових координат..... 57

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 71

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 73

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

Обмежені обсяги будівництва та недостатня увага до змісту вже наявних лісовозних автомобільних доріг, дуже стримує вплив на розвиток лісопромислової галузі. Також використання ертиментовозів із підвищеним навантаженням на вісь на відміну від хлистової технології для транспортування лісових матеріалів призводять до більш швидкого збільшення розмірів та кількості різних дефектів і як наслідок скорочення терміну служби лісовозних доріг.

Зважаючи на велику вартість дослідження, проектування, будівництва та експлуатації лісовозних автомобільних доріг, незначного фінансування даного напрямку лісової галузі як з боку держави, так і приватного сектору, а також небажання лісозаготівельних компаній будувати лісовозні дороги на довгий перспективний термін, ставить завдання про необхідність підвищення ефективності кожного з перерахованих етапів. Зростання ефективності необхідно здійснювати за рахунок використання нових матеріалів, техніки та технології при будівництві, експлуатації та утриманні лісовозних автомобільних доріг, а також застосування методів математичного моделювання та вдосконалення методик розрахунку різних конструктивних елементів під час проектування.

Використання наукових методів для знаходження відповідей на питання щодо прогнозування працездатності елементів дорожнього одягу, земляного полотна та дороги в цілому, а також визначення факторів, що впливають на утворення різних дефектів під час експлуатації, є актуальним.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення транспортно-експлуатаційних якостей лісовозних доріг на стадії проектування та експлуатації.

### Завдання дослідження

Для досягнення мети, необхідне вирішення наступних завдань:

- Розробити метод визначення ймовірності безвідмовної роботи ділянки автомобільної лісовозної дороги внаслідок втомного зношування

дорожнього покриття;  
→ Розробити алгоритм дослідження нерівності типу "гребінка";  
→ Провести експериментальні дослідження на ділянках лісовозних автомобільних доріг, де є нерівність типу «гребінка».

Об'єктом магістерської кваліфікаційної роботи є конструкція лісовозної автомобільної дороги та процес взаємодії лісовозного автопоїзда з покриттям.

Методи досліджень

Для вирішення поставленої мети було використано методи: теорії ймовірностей, математичної статистики, регресійного аналізу, диференціального та інтегрального обчислень, теорії розрахунку нежорстких дорожніх покриттів, теоретичної механіки, механіки руйнування, кореляційного та спектрального аналізу, математичного моделювання. У процесі вирішення поставлених завдань та обробки результатів експериментів застосовувалися прикладні програмні пакети Microsoft Excel, MathCAD14.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

# НУБІП України

### 1.1 Огляд літературних джерел з проблеми мережі та стану лісовозних автомобільних доріг

# НУБІП України

Як відомо, природні ресурси – це неосхідна умова різної виробничої діяльності. Ліси, будучи об'єктом господарської експлуатації, створюють основу існування лісового господарства та лісової промисловості.

# НУБІП України

Лісова промисловість є основою економіки України. Частка продукції лісової промисловості становить близько 50% загального обсягу виробництва в Україні [6]. Тому розвиток цього напрямку є важливим для регіону та країни загалом. Проте, наскільки значуще для України вдосконалення лісової

# НУБІП України

галузі, говорить той факт, що більш ніж у 40 суб'єктах областей України продукція лісової промисловості складає від 10 до 50% загального обсягу промислової продукції [10].

# НУБІП України

Одним із найважливіших технологічних процесів лісозаготівельного виробництва є вивезення деревини. Обсяги вивезення деревини значною мірою залежать відстану лісовозних автомобільних доріг та транспортної доступності лісових ресурсів.

# НУБІП України

Як встановлено вченими Національного університету біоресурсів і природокористування України, потреба в лісових автомобільних дорогах цілорічної дії становить 25-30 км/1000га. Вважається, що з охоплення насаджень

# НУБІП України

лісгосподарськими заходами необхідно мати щонайменше 10-15 км лісових автомобільних доріг на 1000 га земель лісового фонду [16].

# НУБІП України

Відомо, що щільність мережі лісових доріг на території України в середньому становить лише 1,5 км на одну тисячу гектарів лісових.

# НУБІП України

Загальна довжина лісових автодоріг становить **182,97 тис. км**, з них 93,2% проходить по землях державного лісового фонду. Найбільша кількість доріг і відповідно їх протяжність наявна у передгірних лісництвах тоді як у гірських лісництвах є одна або кілька лісових доріг.

# НУВБІП УКРАЇНИ

- дороги загального користування
- дороги лісогосподарського призначення
- лісовозні дороги.

Внаслідок низької щільності доріг рубки відбуваються поблизу старих транспортних шляхів, що призводить не тільки до перерубування лісів біля доріг, але і збільшення витрат на лісозаготівельні роботи.

Так, для порівняння протяжності доріг, можна взяти схожу за площею лісового масиву територію Фінляндії, де щільність доріг становить: у північній частині країни 5 км/1000 га, у центральній частині 10 км/1000 га та південній 20 км/1000 га.

Зважаючи на недостатню кількість доступних лісосировинних ресурсів, внаслідок старої та слабо розвинутої транспортної інфраструктури, а також через недостатній обсяг планово-попереджувальних та профілактичних робіт, недостатній рівень утримання та ремонту вже наявних доріг та малого обсягу будівництва нових лісовозних автомобільних доріг, розвиток лісопромислового комплексу протікає повільно.

Причинами такої низької густини є висока вартість дорожнього будівництва та обмежені фінансові можливості орендарів лісу. Більше того, на основній площі лісів Карелії низька здатність ґрунтів, що несе. Оскільки останні 25 років був приділено належної уваги змісту вже існуючих лісовозних автомобільних доріг, багато з них є непрацездатними [7].

Добре розвинена транспортна інфраструктура дозволяє ефективно освоювати території багаті на ресурси, якою і є Чернігівська область.

Чим вище щільність лісових та автомобільних доріг загального користування, тим коротша відстань вивезення лісу, менші витрати часу та транспортні витрати. Планування ефективного розташування мережі лісовозних автомобільних доріг України займаються: В. Кудра, В. Тимчук [26], Д.В. Рожин [25] та ін.

Залежно від переважного призначення лісові дороги можна розділити такі види [12]:

- лісовозні - служать головним чином вивезення деревини;

- лісогосподарські-забезпечують постійне виконання лісогосподарських заходів;

- протипожежні - забезпечують проїзд у пожежонебезпечні райони та їх територією;

- господарські - призначені для перевезення вантажів господарського призначення від шляхів загального користування до підприємств;

- туристичні дороги в окремі райони, на туристичні бази, в зони відпочинку, мисливські господарства та ін.

Лісові дороги можна використовувати і в інших господарських цілях.

З усіх лісових доріг лісовозні мають найбільші вантажообіги і у зв'язку з цим, найвищі вимоги до технічних параметрів, якості виконання робіт з проектування, будівництва та змісту.

Стан дорожньої мережі залежить як від якості робіт з ремонту та утримання, так і від відповідності міцності дороги навантаженням, що долаються [7]. При низькій щільності доріг існуючою мережею перевозиться більша кількість лісоматеріалів, тобто дороги зазнають більш інтенсивні навантаження і як наслідок, утворення руйнувань на покритті відбувається за менший термін і

в результаті вихід лісовозної автомобільної дороги з ладу [14].

Останнім часом спостерігається прискорене зростання обсягів лісозаготівель, які здійснюються з використанням сортиментної технології транспортування лісових матеріалів [109]. Причому у багатьох регіонах частка обсягу деревини, заготовлюваної з використанням сортиментної технології вже перевищила 50%, а місцями досягла 90%.

Це значно підвищує вимоги до стану лісових доріг оскільки у межах цієї технології деревина вивозиться з допомогою сучасних великовантажних автомобілів - сортиментовозів з причепами, які мають значно меншою прохідністю, ніж транспортні засоби, застосовувані зазвичай за використанням традиційної України хлистової технології. Одними з основних показників, що впливають на стан та працездатність доріг, є рівність та міцність покриття

дорожнього одягу [76].

На даний момент проектування лісових доріг у Україні здійснюється згідно з відомчими будівельними нормами СУ 01-82.

"Інструкція з проектування лісозаготівельних підприємств" [21].

Нормативи та рекомендації цього документа призначені для об'єктів руху лісовозних автопоїздів, які здійснюють вивезення у хлистах. Водночас світова тенденція зростання частки сортиментної технології лісозаготівель потребує адаптації підходів проектування доріг до руху сортиментовозів.

Конструкції дорожнього полотна також повинні враховувати структуру навантажень [5, 7], сезонність впливу різних факторів, інтенсивність вивезення та різну завантаженість ділянок лісових доріг, що визначається логістикою перевезень [8].

Внаслідок впливу коліс рухомого складу та природних факторів (опади, вітер, температура повітря тощо) відбувається зношування та деформування земляного полотна, водовідвідних споруд та дорожнього покриття. Істотний вплив на появу деформацій надає недотримання технології будівництва, зниження його якості та ін.

Через нерівності, що є на покритті дороги, швидкість руху автопоїзда може знизитися вдвічі, продуктивність на 30...40%, а собівартість вивезення заготовленого лісу збільшиться на 50...60% [22]. Якщо значення нерівностей досягнуть критичних значень, то вивезення можуть зовсім припинитися.

І навпаки, завдяки високій якості лісових доріг, робота на лісозаготівлях та вивезенні лісоматеріалів не переривається протягом усього року, включаючи періоди бездоріжжя [41].

У процесі експлуатації дороги кількість нерівностей та їх розміри збільшуються. Якщо нерівності вчасно не ліквідувати, це може бути причиною появи гребінки, нових вибоїн, а зрештою виведення дороги з ладу.

Працездатність дороги - узагальнений показник техніко-експлуатаційного стану дороги, що характеризує її відповідність вимогам автомобільного транспорту [7].

Техніко-експлуатаційний стан дороги залежить від ряду факторів: поздовжнього профілю (підйомів та спусків, їх чергування), плану дороги (чергування прямих та кривих, радіусів горизонтальних кривих, видимості перешкод); з'їздів та перетинів; конструкції земляного полотна, дорожнього одягу та узбіччя; шорсткості та рівності проїжджої частини; інженерного облаштування дороги; системи регулювання руху автомобілів, автомобільних поїздів та ін. [14]. Вивченням транспортно-експлуатаційного стану та його зміною у процесі експлуатації доріг займався ряд науковців. В результаті теоретичної роботи та проведених експериментальних досліджень авторами були отримані залежності, що відображають зміну транспортно-експлуатаційних характеристик у процесі роботи дороги. На практиці працездатність дороги оцінюється показниками міцності, рівності, зчеплення коліс автомобіля з поверхнею дорожнього покриття, пропускної спроможності, вантажо-навантаження та іншими параметрами.

Порівняння показників, встановлених у процесі контрольної перевірки, з нормами, відповідними вимогам руху, дозволяє визначити якою мірою дорога цьому ділянці у період відповідає нормам, тобто визначити її працездатність.

Дорога вважається працездатною, якщо забезпечується безаварійний пропуск встановленого числа автомобілів із розрахунковою швидкістю руху [15].

Експлуатаційні якості автомобільних доріг характеризуються рядом показників чи критеріїв, які залежно від конструкції, рівня утримання, стану дороги та її окремих елементів варіюють у значних межах. Основні критерії відносяться до міцності дорожнього одягу, рівності проїжджої частини, опору кочення автомобіля, шорсткості покриття та інших якостей [8].

Надійність - властивість дорожньої конструкції зберігати необхідні якості у процесі її експлуатації. Поняття надійність дорожнього одягу має кількісний сенс — це ймовірність зміни експлуатаційних характеристик до краю, нижче за який потрібно проведення середнього чи капітального ремонту. Надійність тісно пов'язана із поняттям про відмови. Розрізняють відмову повний та частковий [1]. Під повною (функціональною) відмовою розуміють подію, що характеризує

повну втрату працездатності дороги, а під частковою (параметричною) — подію, при якій порушується можливість забезпечення встановленої продуктивності автомобільного транспорту в цих умовах.

Незадовільний стан значної частини мережі автомобільних доріг України, включаючи дороги лісового комплексу, збільшення наднормативного впливу на дорожній одяг постійно зростаючого вантажного руху, дефіцит коштів, що направляються на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг, призвели до необхідності створення системи, що дозволяє оптимізувати програму дорожніх робіт та забезпечити підвищення ефективності використання коштів, що вкладаються в дороги.

## 1.2. Існуючі теорії дослідження профілю доріг типу «гребінка»

Для лісовозних автомобільних доріг найбільш характерним є дорожнє покриття перехідного типу з гравійним покриттям. Даний тип покриття характеризується відносною дешевизною та частими утвореннями різних дефектів так як складається з сипучого матеріалу без використання різноманітних в'язучих. До найпоширеніших дефектів такого покриття відносяться розмив, колійність, знос, вибоїни, просідання, безодні, хвилястість і гребінка. Однак перше за поширеністю місце серед них займає гребінка: 82% від загальної кількості руйнувань та деформацій. Більшість дефектів вже досить добре вивчені, відомі причини їхньої освіти та ефективні заходи щодо боротьби з їх освітою, за винятком гребінки. Гребінка – це рівномірно розташовані поперечні хвилясті нерівності, що утворюються на цебеневих, гравійних та ґрунтових покриттях під дією руху транспортних засобів [19]. На даний момент гребінка залишається одним із найменш вивчених видів деформації на дорожньому покритті. Тому для кращого розуміння причин освіти та розвитку гребінки необхідно ретельно вивчати та розглядати всі явища та процеси, що протікають як у самому дорожньому одязі, так і в системі взаємодії автомобіля з дорогою, які можуть так чи інакше пояснити причини утворення та розвитку

таких деформацій.

Вчені припускають що при вирішенні завдань плавності ходу автомобіля необхідно задаватися не впливом, що обумовлює, у вигляді суми гармонік характерної для даної ділянки, а коли мікропрофіль (мікрорельєф) дорожніх ґрунтових покриттів представляється у вигляді ряду характерних нерівностей.

Після аналізу нерівностей на покриття автомобільних доріг вчені виділили 4 основних типи: хвиля, трикутник, циліндр, вибоїна. Нерівність типу «хвиля» властива для доріг з найпростішим і перехідним покриттям, для яких характерний інтенсивний або постійний рух. Нерівність типу «трикутник»

характерна для таких самих доріг, але з одиничними випадками руху. Перешкода типу "циліндр" характерна для лісових доріг. Нерівність типу «вибоїна» - це розбите асфальтобетонне шосе. Також вони припустили, що для моделювання мікропрофілю поверхні автомобільної дороги необхідно знати не тільки розташування нерівностей щодо дороги, але і взаємне їх розташування.

Вчений припустив, що однією з таких причин може бути резонанс коливань системи колеса автомобіля та коливань поверхні дорожнього покриття певної вологості, що викликається вищезгаданою системою. В результаті дослідження вийшла спрощена та значно ідеалізована залежність між

коливаннями колеса автомобіля та обуреннями дорожнього покриття у вигляді поперечної пружної хвилі:

$$\frac{s}{\lambda} = \frac{2\pi mV}{T \sqrt{\frac{kg}{G_k} - h^2} \sqrt{\frac{G_n}{\rho}}} \quad (1.1)$$

де  $S$  – відстань, яка пройде колесо за проміжок часу, кратний одному періоду коливань,

$\lambda$  – довжина хвилі, яка утворюється при підвищеній вологості ґравійного покриття після удару колеса по його поверхні,

$m$  – кількість хвиль,

$V$  – швидкість руху автомобіля,

$T$  – період коливання хвилі,

$k$  – коефіцієнт жорсткості пружини,

$g$  – прискорення вільного падіння,

$G_k$  – вертикальна сила, що діє на колесо,

$h$  – коефіцієнт загасання,

$G_n$  – модуль зсуву матеріалу покриття,

$\rho$  – щільність матеріалу покриття у недеформованому стані.

На цю проблему звертали увагу західні закордонні вчені. Першу спробу пояснити походження хвилястості їх зробив Relton [115]. Він запропонував, що хвилястість викликана колесами автомобіля, які під час руху збирають перед собою купу піску і коли вона досягає певних розмірів, то колесо перекочується через неї, утворюючи хвилю. Пізніше експерименти, які проводив Mather [121], показали, що причини не в цьому. Він припустив, що хвилястість спричинена нестабільністю коливань підресорної частини автомобіля. Тобто хвилястість виникає від руху колеса, яке спочатку заїжджає гребенем вгору і підлітає в повітря, а після падіння на деякій відстані, частина матеріалу покриття вибиває, а частина ущільнює. У будь-якому випадку ця дія створює чергову западину, розвиваючи хвилястий профіль.

S. Shoop, R. Haehnel, V. Janoo, D. Harjes, R. Liston [132], вивчали сезонні руйнування ґрунтових доріг, у тому числі й гребінець. Вихідними для вивчення дефектів лісовозних доріг вони брали геометричні характеристики дорожнього одягу, матеріал покриття, кліматичні умови, вага автомобіля та інтенсивність руху. Крім цього передбачалося, що дорожній одяг складається з деякої кількості шарів певної товщини та матеріалів з певними властивостями (щільність, еластичність, втома матеріалів тощо). У дослідженні інтенсивність руху була взята на рівні 7300 автомобілів на рік, з мінімальною швидкістю 32 км/год. Навантаження на дорожнє полотно розраховувалося з використанням моделі  $\frac{1}{4}$  частини автомобіля (навантаження від одного колеса із заданими параметрами підвіски та маси автомобіля). Кліматичні умови проведення експериментів визначалися для досліджуваної місцевості з конкретного сезону. Результати досліджень показали, що руйнування доріг без капітальних покриттів відбуватиметься у 4 рази швидше, ніж аналогічних доріг із 5см асфальтовим

покриттям. Особливо це стосується великих руйнувань, що відбувається з покриттям ґрунтових доріг під час весняного бездоріжжя, які руйнують покриття ґрунтових доріг і призводять до появи ям і гребінки. Наприклад, для доріг з твердим капітальним покриттям значення рівня  $S=0,6$  м/км вже близьке до критичного, а для гравійних рівність легко досягає значення  $S=10-15$  м/км, причому на ділянках де є гребінка і зовсім  $S=80$  м/км [132]. Вчені також довели досвідченим шляхом, що причиною утворення гребінки є не лише рух гранульованого матеріалу поверхнею дороги під час посушливих літніх місяців, а й за рахунок пластичної деформації матеріалу покриття коли дорога була мокрою. Спостереження за формуванням гребінки велося на 11 ділянках доріг, де було помічено, що частіше вона утворюється в місцях, де дорога петляє, на підйомах та спусках та на ділянках між дорогою з капітальним покриттям і без нього, причому довжина хвилі в середньому становила 50 сантиметрів.

Загальним фактором для всіх випадків і всіх ділянок досліджуваних доріг стала зміна швидкості автомобіля та напрямок його руху, що викликало або зміну горизонтально діючих сил, або ковзання, пробуксування коліс або все це разом.

Також причинами утворення гребінки та її моделювання займалися А.

Douglas[115], К. Mather[121], D. Mays, В. Faybishenko, [122], S. Saarelainen, Н.

Onninen, Н. Kangas, J. Pihlajamaki [127], та ін.

Уроте, у перерахованих вище роботах не до кінця розкрито сутність причин утворення нерівності типу «гребінка». Для того, щоб більш повно розкрити це питання необхідно провести експериментальні дослідження з вивчення цієї нерівності на лісовозних автомобільних дорогах, а також змоделювати процес її утворення для прогнозування робіт з експлуатації, утримання та ремонту.

Для кращого розуміння процесу утворення гребінки в магістерській роботі

будемо використовувати наступні терміни, що представлені на рисунку 1.1:

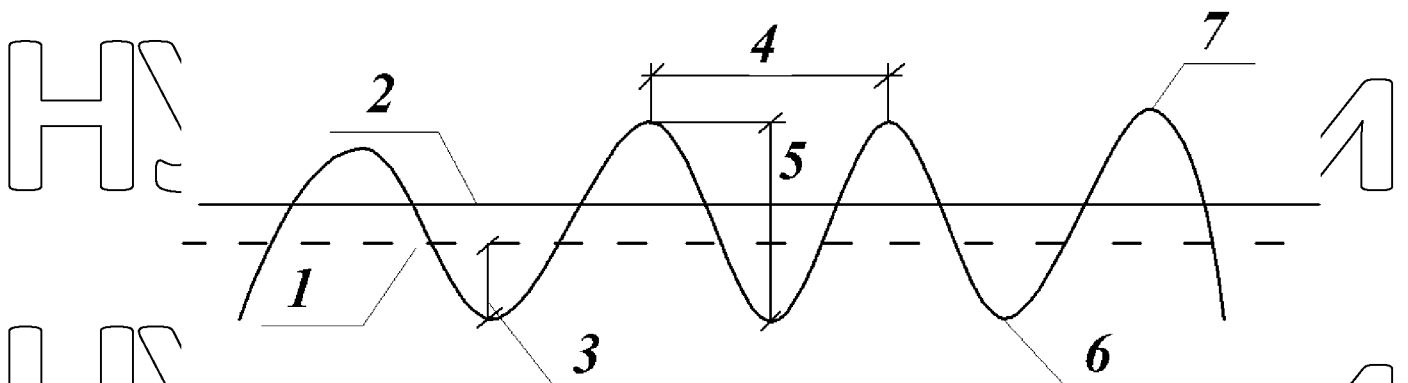


Рис. 1.1 Елементи гребінки: 1 – середня лінія гребінки; 2 – поверхня дороги; 3 – амплітуда гребінки; 4 – крок гребінки; 5 – розмах гребінки; 6 – мінімум гребеня; 7 – максимум гребеня.

## 1.2 Існуючі теорії втомного зношування дорожнього покриття

Покриття – верхня частина дорожнього одягу, що сприймає зусилля від коліс транспортних засобів і піддається безпосередньому впливу атмосферних факторів, що безпосередньо впливає на показники роботи лісовозних автопоїздів [48]. Це визначає підвищені вимоги до якості матеріалів і процесу будівництва, що застосовуються для його влаштування.

Для лісовозних автомобільних доріг з покриттями, виконаними із застосуванням органічних в'язучих, найпоширенішими видами дефектів є тріщини, вибоїни, місцеве фарбування, а деформаціями – коліс-утворення.

Однією з основних причин відмов дорожнього покриття, що визначають термін служби, є зношування, під яким розуміють зменшення товщини дорожнього покриття за рахунок стирання та втрати матеріалу під час експлуатації під впливом коліс автомобілів та природних факторів. Зношування може виникати в результаті наступних причин: фрикційної втоми, малоциклової фрикційної втоми, мікрорізання при перших актах взаємодії, руйнування (у тому числі втомних) плівок, ерозії, адгезійного відриву матеріалу при перших актах взаємодії [70].

Руйнування основи елементарних фрикційних зв'язків матеріалу дорожнього покриття може відбуватися за різного числа циклів залежно від характеру руйнування. Слід зазначити, що адгезійний відрив матеріалу

відноситься до неприпустимих видів і є наслідком помилок під час підбору матеріалу. Крім того, намагаються уникнути процесів зношування, при яких виникає мікрорізання, тому що при цьому значно зростає інтенсивність процесу руйнування поверхневих шарів. Тому основні причини руйнування пов'язані зі втомними процесами. Під дією змінних напруг у матеріалах відбувається процес поступового накопичення пошкоджень, що призводять до утворення тріщин, їх розвитку та руйнування [46].

Основна причина руйнування дорожнього покриття пов'язана з виникненням тріщин втоми при дії змінних контактних навантажень і відділенням частинок з поверхні матеріалу. При цьому процес зношування необхідно розглядати як кумулятивний, тобто підсумовує дію окремих факторів при багаторазовому навантаженні, що призводить у результаті відділення частки. Для пояснення фізичної сутності явищ втомного зношування можна використовувати дослідження процесів розвитку втомних тріщин на основі механіки руйнування при циклічному контактному навантаженні. Механіка руйнування - це розділ механіки, в якому вивчаються конструкційні матеріали та їх здатність чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил за наявності втомних тріщин та різних технологічних та експлуатаційних дефектів [14].

Розвиток втомних тріщин показує, що енергетичний баланс напруженого стану в зоні тріщини тісно пов'язаний з розвитком дислокаційної структури матеріалу, широкий спектр яких спостерігається при різних механічних властивостях, напруженого стану, температурних та інших факторів. Запропоновано близько 40 різних напівемпіричних формул для визначення швидкості зростання втомних тріщин, що передбачають знання від 2 до 6 різних констант матеріалу [51].

Розрахунок на втомне зношування в імовірнісному аспекті необхідно проводити для двох розрахункових випадків: для регулярної та нерегулярної навантаженості. Під регулярною навантаженістю слід розуміти періодичний закон зміни напруги з періодом, що відповідає одному циклу, при незмінності в часі характеристик циклу напруги.

Імовірнісне трактування умов міцності дорожніх покриттів при регулярній змінній напруженості ґрунтується на статистичній оцінці можливих випадкових відхилень величини контактної напруги та межі витривалості або її значень, обмежених за кількістю циклів.

Мінливість контактної напруги і межі витривалості описується відповідними кривими щільності розподілу. Розрахунок ймовірності втомного зношування виконується найбільш просто при використанні нормального закону розподілу меж витривалості та діючих контактних напруг.

Для лісовозних автомобільних доріг регулярна навантаженість не є характерною. Тому розглядався випадок нерегулярної навантаженості.

У роботах О.М. Петрова [7] припущення, що тріщина при втомному зношуванні утворюється на поверхні покриття, було взято за основу, і для розрахунку цих процесів автор використав традиційні експериментальні криві втоми. Однак аналіз напруженого стану покриття показує [24], що небезпечна точка максимальної дотичної напруги розташована на глибині, що дорівнює  $\sim 0,4$  ширини площі контакту колеса з покриттям. З огляду на це методики розроблені О.М. Петровим вимагають уточнення. У запропонованій роботі положення, що тріщина утворюється на певній глибині, буде взято за основу, і для розрахунку використовуватимуть рівняння механіки руйнування. Крім того, розглядається не тільки період поширення, а й період зародження втомної підповерхневої мікротріщини.

# РОЗДІЛ 2. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ БЕЗВИДМОВНОЇ РОБОТИ ДІЛЯКИ ЛІСОВОЗНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ ЗА ВСТАНОВЛЕНИМ ЗНОШУВАННЯМ ДОРОЖНОГО ПОКРИТТЯ

## 2.1 Загальні положення

Перший варіант методу розроблений у дисертаційній роботі А. А. Кашканова та опублікований у працях [7]. При цьому вважалось, що втомне зношування - процес руйнування дорожнього покриття, що характеризується втомними явищами в поверхневих шарах. Воно спостерігається за умов високих контактних навантажень циклічної дії. Розвиток прогресуючого втомного зношування починається з появи поверхневих втомних тріщин. Вода, потрапляючи в тріщини, сприяє їх розклиненню та фарбуванню частинок матеріалу дорожнього одягу. Інтенсивність втомного зношування залежить від властивостей матеріалу, навантаження і температури, шорсткості поверхні та вологості. Поступове фарбування дорожнього покриття призводить до утворення дрібних раковин. Це сприяє появі ударних навантажень і подальшому більш інтенсивному фарбуванню, що призводить до утворення вибоїн та виходу ділянки лісовозної дороги з ладу - відмови. Тобто в основі методу лежить припущення, що при втомному зношуванні тріщина зароджується на поверхні лісовозної дороги, поширюється всередину під деяким кутом і знову виходить на поверхню, утворюючи раковину [5]. Але є й інший підхід, інше пояснення сутності втомного зношування.

При деякому числі циклів контактних напруг і достатньому рівні утворюється первинна мікротріщина, тобто існує період зародження. При ізотропному матеріалі зародження її слід було б віднести до точки, де діє найбільше дотичне напруження чи найбільша інтенсивність напруг. Відомо, що нормальній силі відповідає симетричний розподіл напруг щодо лінії її дії та найбільша дотична напруження знаходиться в точці, розташованій на певній глибині

від поверхні [4]. Експериментально встановлено, що первинна тріщина поширюється, незалежно від місця її зародження, похило до поверхні, витягуючись у напрямку тертя. Отже метод розроблений А. Кашкановим потребує уточнення.

## 2.2 Методи оцінки контактної напруги

Велику роль при розрахунках на втомне зношування відіграють контактні напруги (рисунк 2.1), що діють у безпосередній близькості від зони контакту [24].

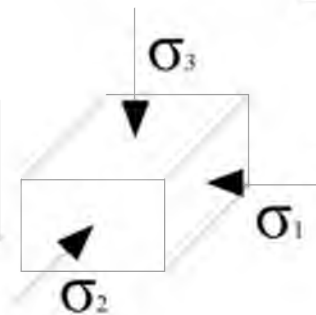


Рис. 2.1 Напрямок головної напруги

Оцінку контактної міцності ведуть за найбільшою стискаючою напругою  $\sigma_3$ , що дорівнює максимальному контактному тиску  $q$ . Його прийнято називати контактною напругою  $\sigma_H$ .

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\rho_{np}} \frac{E_{np}}{2\pi(1-\nu^2)}} \quad (2.1)$$

де  $E$  – наведені модулі кривизни;

$q$  – розподілене навантаження, Н/мм<sup>2</sup>;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

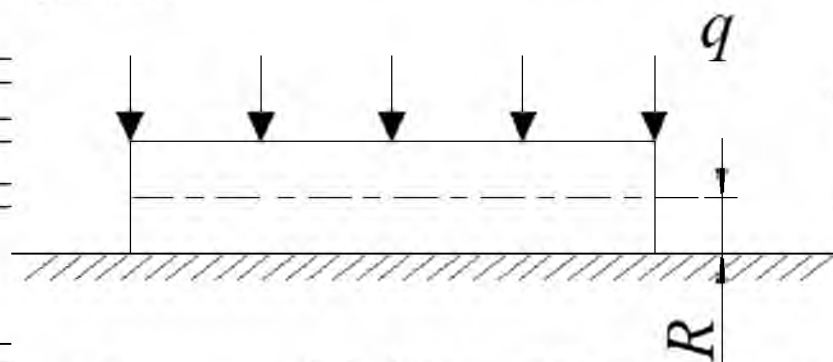


Рис. 2.2 Розрахункова схема визначення контактних напруг

Аналіз напруженого стану показує, що небезпечна крапка розташована на

осі z на глибині, рівної  $\sim 0,4$  ширина площі контакту. Найбільша дотична напруга в небезпечній точці:

$$\tau_{max} = 0,3\sigma_H \quad (2.2)$$

Головні напруги у цій точці мають такі значення:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= -0,18\sigma_H \\ \sigma_2 &= -0,288\sigma_H \\ \sigma_3 &= -0,78\sigma_H \end{aligned} \quad (2.3)$$

Майданчик контакту має вигляд вузького прямокутника, ширина якого визначається за такою формулою:

$$b = 2,15 \sqrt{q \frac{R(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \quad (2.4)$$

Крім формули Герца, розподіл діючих напруг може бути визначений з використанням методів теорії пружності і, зокрема, завдання Буссінеєка [65].

## 2.2. Оцінка періоду зародження втомної тріщини

Розрахунок на втомне зношування (контактну витривалість) при циклічних контактних напругах традиційно базується на експериментальних кривих втоми, які зазвичай будують у логарифмічних координатах. У методі, розробленому О.М. Петровим [70], таке становище було прийнято за основу.

Ми ж припускатимемо, що тріщина зароджується не на поверхні, а на глибині в зоні дії максимальної дотичної напруги і замість кривої втоми використовувати рівняння механіки руйнування.

При нерегулярному змінному навантаженні фактична зміна напруги може бути зведена до блокового навантаження. Один простий блок навантаження складається з  $n$  ступенів, кожнім з яких відповідає певна величина контактної напруги цієї  $\sigma_H$  та число циклів повторення.

Число циклів у блоці навантаження визначається за формулою:

$$\sum_{i=1}^r v_i = v_0 \quad (2.5)$$

Тривалість блоку навантаження  $t_6$ :

$$t_6 = v_0 \cdot t_{ц} \quad (2.6)$$

де  $t_{ц}$  – середня тривалість періоду (циклу) навантаження. Середній термін

служби у разі запищеться як:

$$T = \lambda \cdot t_6 \quad (2.7)$$

де  $\lambda$  - середня кількість блоків навантаження до руйнування.

При циклічному навантаженні під дією змінних контактних напруг у

поверхневому шарі дороги відбувається процес поступового накопичення пошкоджень, що призводить до утворення підповерхневих тріщин, їх розвитку та локального руйнування ділянки поверхні, фарбування.

Процес накопичення ушкоджень у випадку ділять кілька стадій:

- 1). Створення характерної структури та зміна механічних властивостей;
- 2). Зародження мікротріщин;
- 3). Поширення мікротріщин та розвиток їх у макротріщинах;
- 4). Дослідження магістральної тріщини;
- 5). Вихід магістральної тріщини на поверхні і остаточне руйнування.

Обмежимося двома укрупненими стадіями втомного руйнування:

- 1). Стадія розсіяних ушкоджень;
- 2). Стадія розвитку втомної тріщини.

Тривалість стадій залежить від матеріалів, наявності концентраторів напруги, розмірів дефектів, ступеня стиснення деформацій, рівня навантаженості. У зонах місцевих напруг в умовах стиснення пластичних деформацій тривалість стадії зростання магістральної тріщини може суттєво перевищувати тривалість стадії розсіяних ушкоджень.

В даний час для металів запропоновано чимало як структурних, так і феноменологічних моделей першої та другої стадій втомного руйнування. Феноменологічні (напівемпіричні) моделі засновані на узагальненні результатів спостережень і не мають на меті пояснення або повний опис істоти явищ.

Структурні моделі дозволяють описати і пояснити явища виходячи з внутрішньої структури об'єктів, що розглядаються. Використовується енергетичний, деформаційний та силовий підходи. Силкові моделі знайшли широке поширення. Заслужують на увагу кінетичні рівняння пошкоджень силового типу та розрахунки на їх основі, запропоновані П.А. Павловим [67].

У механіці руйнування використовують поняття циклічної тріщиностійкості, під яким розуміється схильність матеріалу до докритичного зростання тріщин при втомному навантаженні конструкції [83]. Для будівельних неметалевих матеріалів також поширимо поняття циклічної тріщиностійкості матеріалів, що використовується, що визначає довговічність конструкції при втомному навантаженні і, зокрема, тривалість етапу докритичного зростання початкових тріщиноподібних несплошностей матеріалу. Як правило, нехтують неоднорідністю матеріалу і вважають його однорідним та ізотропним.

Запропоновано понад 40 різних напівемпіричних формул для визначення швидкості зростання втомних тріщин, що передбачають знання від 2 до 6 різних констант матеріалу [51].

У цій роботі для опису процесу втомного зношування покриття лісовозних автомобільних доріг на першій стадії розсіяних ушкоджень використовується рівняння В.В. Болотина [7]. З його допомогою рекомендується визначати число циклів зародження  $N_3$ , після якого тріщина почне свій розвиток при дії контактних циклічних напруг постійного розмаху.

$$N_3 = \frac{N_c}{((\chi \Delta \sigma - \sigma_{th}) / \sigma_\psi)^{m_3}} \quad (2.8)$$

де  $N_c$  – постійна часу;

$\chi$  – Коефіцієнт концентрації напруг від мікрodefекту;

$\sigma_\psi$ ,  $\sigma_{th}$ ,  $m_3$  – константи матеріалу (за заданих умов зовнішнього

середовища);  $\sigma_\psi$  -характеризує опір матеріалу накопиченню мікроушкоджень;

$\sigma_{th}$  – характеризує поріг опору накопиченню мікроушкоджень;

$\Delta \sigma$  – розмах напруг у циклі;

У нашому випадку при дії циклічної контактної напруги вважаємо  $\Delta \sigma = \sigma_n$ .

Формула (2.9) визначає число циклів, після якого тріщина почне свій

розвиток з мікрodefекту при вплив контактних циклічних напруг постійного розмаху  $\Delta\sigma$ . Однак у зв'язку з тим, що навантаження на вісь транспортних засобів можуть змінюватися в широкому діапазоні (порожні та навантажені автопоїзди), це викликає появу змінної напруги, яка може бути представлена у вигляді блоку навантаження. Як мовилося раніше, під блоком навантаження розуміємо сукупність послідовних значень за певної напрацюванні  $v_b$  за умов експлуатації [2].

При заданні навантаження у вигляді блоку отримуємо залежність:

$$N_3 = v_b \frac{N_c \sigma_\psi^{m_3}}{\sum_{j=1}^r v_j (\chi \Delta \sigma_j - \sigma_{th})^{m_3}} \quad (2.9)$$

### 2.3. Оцінка періоду поширення втоми тріщини

Другу стадію розвитку тріщини прийнято описувати з позицій механіки руйнування. Запропоновано близько двох десятків рівнянь, що пов'язують швидкість зростання тріщини втоми зі зміною коефіцієнта інтенсивності напруг [5]. Аналіз експериментальних даних показує, що при невеликих амплітудах коефіцієнта інтенсивності напруги рівняння Періса [12], Формана [11], Брока та Ердогана [16] однаково добре відповідає експериментальним даним.

Найбільшого поширення внаслідок своєї наочності та простоти набуло рівняння

Періса:

$$\frac{dl}{dN} = C \Delta K^n \quad (2.10)$$

Де  $l$  - Довжина тріщиноподібного дефекту;

$N$  - Число циклів;

$n, C$  - Константи, що експериментально визначаються;

$\Delta K$  - зміна (розмах) коефіцієнта інтенсивності напруги в циклі.

Подані залежності дозволяють оцінити кількість циклів до руйнування за наявності тріщиноподібного дефекту.

У разі завдання навантаження не у вигляді блоку навантаження, а у вигляді щільності розподілу  $f(\Delta\sigma)$  число циклів  $dn$  з розмахом від  $\Delta\sigma$  до  $d\Delta\sigma$  протягом усього напрацювання  $N_p$  визначається:

$$dn = N_p f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma \quad (2.11)$$

Умова руйнування при використанні принципу лінійного підсумовування пошкоджень  $dn/N$  у цьому випадку запишеться:

$$\frac{\sigma_B}{\Delta\sigma_{th}} \frac{dn}{N} = a_p \quad (2.12)$$

де  $\Delta\sigma_{th}$  – граничне значення розмаху контактних напруг, нижче якого зростання тріщини не відбувається;

$\sigma_B$  – межа міцності;

$N$  – Число циклів до руйнування при постійному рівні циклічних контактних напруг  $\Delta\sigma$ .

Використовуючи дані залежності, визначимо число циклів поширення тріщини від початкової величини  $l_0$  до критичної  $l_c$ :

Запропонована модель втомного фарбування дорожнього покриття при циклічному додатку навантаження дозволяє оцінити появу і зростання тріщини втомі в покритті лісовозної автомобільної дороги і в подальшому визначити ймовірність безвідмовної роботи. При цьому доцільно використовувати метод статистичних випробувань чи статистичної лінеаризації.

## 2.5. Оцінка ймовірності безвідмовної роботи лісовозних автомобільних доріг

Асфальтобетонні покриття працюють у значному інтервалі температур, що впливає на їх властивості міцності. Міцність при розтягуванні в 6-8 разів нижча за міцність при стисканні. Асфальтобетон може деформуватися в покритті не тільки при недостатній міцності при стисканні, розтягуванні або зсуві, але і внаслідок малої пластичності при знижених температурах або надмірної пластичності при підвищених. У літній період температура нагріву асфальтобетону значна, він має в'язкопластичні властивості, при негативних температурах - пружними і навіть жорсткими. У зв'язку з цим оцінку ймовірності безвідмовної роботи внаслідок втомного фарбування необхідно проводити для всього інтервалу температур роботи дорожнього покриття.

Опис режиму навантаження. Для опису режиму навантаження будемо

використовувати матрицю: по рядках матриці із заданим інтервалом наводяться температури дорожнього покриття, по стовпцях – рівні навантаження від дії коліс лісовозних автопоїздів при русі в заданому інтервалі температури.

Таблиця 2.1

Матриця навантажень на дорожнє покриття лісовозної автомобільної дороги

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	Кількість циклів за $t_0$ при навантаженні $F_j$					
		$F_1$	$F_2$	...	$F_j$	...	$F_r$
1	$t_1$	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{1j}$	...	$v_{1r}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$i$	$t_i$	$v_{i1}$	$v_{i2}$	...	$v_{ij}$	...	$v_{ir}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$k$	$t_k$	$v_{k1}$	$v_{k2}$	...	$v_{kj}$	...	$v_{kr}$

Визначення розмахів діючих напружень для кожного ( $i_j$ ) елемента матриці, тобто кожного поєднання температури та навантаження з урахуванням модуля пружності  $E_i$ . Цикл навантаження передбачаємо нульовим.

Проводимо підсумовування пошкоджень кожної градацияї температури дорожнього покриття  $t_i$ , оскільки характеристики опору втоми залежить від температури (як параметри кривої втоми Велера, і параметри  $C_i$  п у рівнянні Періса (2.13)).

Міра пошкодження  $a_{ij}$  при впливі циклічного навантаження з розмахом протягом  $v_{ij}$  циклів визначатиметься за формулою:

$$a_{ij} = \frac{v_{ij}}{N_{ij}} \quad (2.13)$$

де  $N_{ij}$  – число циклів до руйнування, що визначається за формулою механіки руйнування.

Представлений метод дозволяє визначити середнє напрацювання до втомного викрашування та ймовірність безвідмовної роботи в залежності від сезонності вивезення та наявного рухомого складу.

До правої частини виразу (2.12 і 2.13) входять випадкові величини  $n_i$ ,  $C_i$ ,  $\sigma_{ij}$ ,  $l_c$ ,  $l_0$  характеризуються своїми функціями розподілу. Як функція

випадкових аргументів, величини  $\lambda$  та  $T_r$  також є випадковими. Щоб знайти функцію розподілу  $T_r$  застосовуємо метод статистичних випробувань. Крім методу статистичних випробувань часто використовують метод статистичної лінеаризації [8], проте він значно поступається методу статистичних випробувань у точності оцінок і в ряді випадків може виявитися неадекватним.

Для лісовозних автомобільних доріг регулярна навантаженість не є характерною. Тому розглянемо нагоду нерегулярної навантаженості. При нерегулярній навантаженості у випадку, коли закон розподілу контактної напруги представлений у вигляді ступінчастого графіка зі ступенями  $\sigma_{nij}$ , випадкові варіації функції розподілу контактної напруги можуть бути описані співвідношенням:

$$\sigma_{nij} = \overline{\sigma_{nij}} \varepsilon \quad (2.14)$$

де  $\sigma$  – середнє значення контактної напруги ступеня блоку  $i, j$   
 $\varepsilon$  – коефіцієнт, що враховує вплив нерегламентованих факторів (погоди, кліматичні умови тощо).

Величина  $\varepsilon$  приймається нормально розподіленою, що має середнє значення, що дорівнює одиниці  $\varepsilon = 1$  [15].

Задаючи закони розподілу випадкових змінних та використовуючи залежність (2.42) за допомогою відомої процедури методу статистичних випробувань визначаємо середній термін служби, закон розподілу терміну служби та інші необхідні оцінки.

При цьому використовуємо таку послідовність розрахунку:

1. Задаємо режим навантаження у вигляді матриці, де наводяться числа циклів навантаження в залежності від температури і рівнів навантаження від впливу коліс лісовозних автопоїздів (таблиця 2.1).

2. Задаємо закони розподілів характеристик матеріалу дорожнього покриття, що визначають зародження втомної тріщини від впливу контактних напруг  $f_1(N_c)$ ,  $f_2(\sigma_v)$ ,  $f_3(\sigma_{th})$ ,  $f_4(m\beta)$  і поширення тріщини, що

зародилася, аж до руйнування:  $f_5(C)$ ,  $f_6(n)$ . Зазначені вище закони розподілу задаються для кожного рівня температури.

3. Задаємо закони розподілу  $f_7(n_0)$ ,  $f_8(l_c)$ ,  $f_9(\epsilon)$ .

4. Задаємо число випадкових випробувань  $N_u$  залежно від необхідної точності оцінки параметрів, що розраховуються.

5. Визначаємо вектор наведених модулів пружності залежно від температури:  $E_{pr1}, \dots, E_{prk}$ .

1. Визначаємо матрицю діючих контактних напруг розмірністю  $r \times k$  з використанням залежності (2.2) та матриці навантажень.

2. Моделюємо за відповідними законами розподілу випадкову реалізацію вектора початкових параметрів  $\{N_0, \sigma_y, \sigma_{th}, m_3, C, n, l_0, l_c, \epsilon\}$ .

3. Підраховуємо за формулою (2.42) час до фарбування (утворення ямки)  $T_1$ .

4. Повторюємо обчислення за пунктами 7 та 8  $N_u$  разів. В результаті отримуємо вибірку  $T_1, \dots, T_{N_u}$ .

5. Обробляємо вибірку відомими методами математичної статистики для отримання шуканих статистичних оцінок: середнього часу до викрашування, середнього квадратичного відхилення  $\sigma_T$ , функції розподілу напрацювання до викрашування, ймовірності безвідмовної роботи (відсутність викрашування).

На відміну від методів та оцінок запропонованих О.М. Петровим, при впливі циклічних контактних напруг втомна тріщина зароджується не так на поверхні покриття лісовозної автомобільної дороги, але в деякій глибині, де діють найбільші дотичні напруги чи найбільша інтенсивність напруг. Після цього поширюється похило до поверхні, вигинаючись у бік сил тертя. Так як тріщина зароджується на глибині, то при розрахунку на втомне зношування слід спиратися не на традиційні експериментальні криві втоми як у попереднього автора, а рівняння механіки руйнування. Істотним уточненням методу О.М.

Петрова є облік впливу температурного чинника рівень контактних напруг і показники опору втомному зношуванню.

Таким чином, запропонований метод оцінки втомного зношування

при циклічному додатку навантаження дозволяє суттєво точніше визначити ймовірність безвідмовної роботи дорожнього покриття, ніж методи попередніх авторів, що може бути використане для уточненого планування робіт з ремонту дорожніх покриттів лісовозних автомобільних доріг.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

### РОЗДІЛ 3.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОСТІ ТИПУ «ГРЕБІНКА» НА ДОРОЖНЬОМУ ПОКРИТТІ ЛІСОВОЗНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Термін «модель» неоднозначний і охоплює широке коло різних матеріальних та ідеальних об'єктів. Будь-яка модель несе інформацію про властивості та характеристики об'єкта [25].

Модель є створюваний з метою отримання або зберігання інформації специфічний об'єкт, що відображає властивості, характеристики та зв'язки об'єкта-оригіналу довільної природи, суттєві для завдання, яке вирішує суб'єкт. Важливим моментом на етапі постановки задачі є визначення мети моделювання. Від обраної мети залежить, які характеристики об'єкта, що досліджується, вважати суттєвими, а які другорядними і не брати їх до уваги.

Цілі моделювання процесу утворення нерівності типу «гребінка»:

1. Отримання нових знань про дорожнє полотно, його структуру та властивості, процесах та явищах.

2. Прогнозування поведінки дорожнього полотна.

3. Ухвалення конкретних рішень з питань проектування, будівництва та експлуатації лісовозних автомобільних доріг.

### 3.1 Якісна модель утворення нерівності типу «гребінка»

Так як на даний момент гребінка залишається однією з найменш вивчених видів деформації на дорожньому покритті, то для кращого розуміння причин дослідів і розвитку нерівності, що розглядається, необхідно ретельно вивчити і розглянути всі явища і процеси, що протікають як в самому дорожньому покритті, так і в системі взаємодії автомобіля з дорогою, які можуть так чи інакше пояснити причини утворення та розвитку таких деформацій [42].

Після проведених нами тривалих спостережень за процесом утворення гребінки та проведення експериментальних досліджень було відмічено:

1. Гребінка утворюється в основному на дорогах з покриттям з різного

гранульованого матеріалу, таких як щебінь, гравій, пісок, їх суміші тощо без використання укріплень у вигляді органічних і неорганічних в'язучих. На дорожньому одязі капітального типу з асфальтобетонним покриттям також можна спостерігати утворення такої деформації, але в основному в регіонах зі спекотним кліматом. Це пов'язано із збільшенням пластичності матеріалу асфальтобетонного покриття через високі температури.

2. Дослідження гребінки можна спостерігати на гравійних дорогах. Але найчастіше її можна зустріти на ділянці де є перехід від покриття капітального типу до покриття перехідного типу, де і відбувається її утворення, а також на підйомах, спусках, у місцях підходу до повороту, безпосередньо на ньому самому і на виході з нього. Це пов'язано із збільшенням горизонтально спрямованих сил взаємодії між колесом автомобіля та матеріалом покриття, внаслідок гальмування або прискорення руху, а також зміни напрямку дії горизонтально спрямованих сил.

3. Якщо поворот побудований у вигляді віражу, то утворення нерівності відбувається ближче донизу поперечного профілю повороту. Це пов'язано з тим, що для безпечнішого його проходження водій автомобіля намагається наблизитися до внутрішнього радіусу, тим самим основна інтенсивність руху зосереджена по одній смузі накату.

На гравійних дорогах гребінка утворюється на ділянках, де можливо розвинути швидкість руху автомобілів вище 20 км/год, що пов'язано зі значеннями коефіцієнта опору коченню та коефіцієнта зчеплення колеса з покриттям, які залишаються незмінними при швидкостях менше цього.

значення [19]. Якщо швидкість руху пісовозними автомобільними дорогами менше 20 км/год, то утворюється інший дефект, званий суцільна ямковість.

1. Гребінка утворюється у весняно-осінньо-літній період погоди, як на сухому покритті, так і на вологому, причому при великій інтенсивності руху з одночасним випаданням опадів у вигляді дощу, гребінка утворюється набагато швидше (1-3 доби), ніж за тих же умов але без опадів (15-20 діб). З цього

впливає, що у період міжсезоння, тобто. весняно – осінній період дороги потребують частішого обслуговування. Також цю нерівність можна спостерігати і в холодну пору року на дорогах зі сніговим накатом.

2. Так як лісовозні автомобільні дороги відносно не широкі і транспортування вантажів здійснюється вантажними машинами, то для безпечнішого та комфортнішого руху вибирається середина проїжджої частини, що і зумовлює появу гребінки саме тут.

3. Гребені нерівності мають положення перпендикулярне до осі лісовозної автомобільної дороги. Так на прямолінійних ділянках вони розташовуються поперек напрямку дороги, а на криволінійних спрямовані до центру радіусу повороту.

4. Формування синусоїдального профілю забезпечується коливальним характером роботи підвіски автомобілів при взаємодії колеса з покриттям лісовозної автомобільної дороги.

Проаналізувавши подані зауваження можна виділити основні критерії, що впливають на формування профілю типу «гребінка»: швидкість руху автомобілів, інтенсивність руху, матеріал покриття лісовозної автомобільної дороги та його характеристики, кліматичні умови, маса автомобіля, тип та характеристики підвіски автомобіля.

Причинами утворення нерівності, на покриттях із сипких матеріалів без використання в'язучих, є вплив вертикально та горизонтально спрямованих сил від коліс автомобілів, величина яких перевищує значення кута внутрішнього тертя та внутрішнього коефіцієнта зчеплення частинок матеріалу покриття. В результаті відбувається переміщення компонентів матеріалу дорожнього одягу і цим порушується рівність покриття. Форму синусоїдального профілю нерівності типу «гребінки» забезпечує коливальний характер роботи підвіски автомобілів, тобто. вплив з боку колеса на дорогу збільшуватиметься в момент відбою підвіски та зменшуватиметься у момент стиснення, утворюючи хвилі у місцях контакту.

Також першопричиною утворення гребінки може служити деяка інша

нерівність, наприклад окремий камінь на гравійному покритті або щебінь на щебеневому покритті, що виділяється з рівня поверхні дорожнього одягу і викликає коливання підвіски автомобіля.

До робіт з утримання при боротьбі з гребінцем відносяться прасування на ґрунтових покриттях та грейдерування на гравійних та щебеневих. При цьому матеріал дорожнього одягу, що знаходиться на максимумі гребеня, зрізається і переміщується в наступний мінімум, утворюючи рівну поверхню із заданим поперечним ухилом (рисунок 3.1). Однак після проходу автогрейдера ми отримуємо поверхню з нерівномірним коефіцієнтом ущільнення, так у місці колишнього максимуму щільність досягає своїх максимальних значень, а в місці колишнього мінімуму знаходиться розпушений матеріал з низьким рівнем ущільнення. У цьому випадку утворення гребінки відбувається набагато швидше за рахунок інтенсивнішого вибивання неущільненого матеріалу, причому положення гребенів щодо один одного залишається на колишніх місцях.

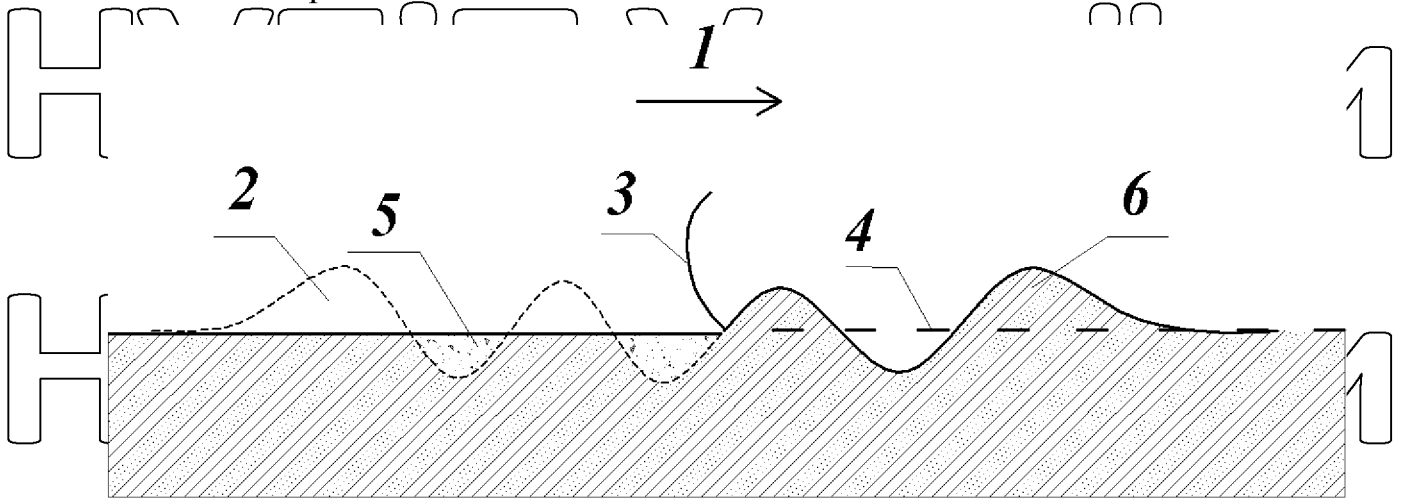


Рис. 3.1 Грейдерування лісовозної автомобільної дороги: 1 – напрямок руху автогрейдера; 2 – зрізаний гребінь; 3 – відвал автогрейдера; 4 – рівень автомобільної дороги; 5 – пухкий матеріал покриття; 6 – ущільнений матеріал покриття.

### 3.2 Математична модель утворення нерівності типу «гребінка»

Експерименти, які проводив Mather [21], показали, що причини утворення гребінки пов'язані з нестабільністю коливань підресорної частини автомобіля.

Тобто хвилястість виникає від руху колеса, яке спочатку заїжджає гребенем вгору і підлітає в повітря, а після падіння, на деякій відстані, воно висиває одну частину матеріалу покриття, а іншу частину матеріалу ущільнює. У будь-якому випадку ця дія створює чергову западину, резвиваючи хвилястий профіль.

Грунтуючись на цьому положенні А. Douglas, у своїй роботі [15], представив математичну модель освіти нерівності типу гребінка, яка представлена нижче.

Нехай існує деяка рівна поверхня лісовозної автомобільної дороги у напрямку  $x$ , причому реальне положення профілю відповідає значенню  $H(x,t)$ .

Цією дорогою рухаються автомобілі масою  $M$  зі швидкістю  $V$ , ходова частина яких складається з ресор із власною частотою  $\omega_0$  і амортизаторів з коефіцієнтом демпфування  $b$ . Нехай  $Z$  - висота до рами машин, що проїжджають, відносно рівної поверхні і причому  $H-Z+(g/\omega_0^2)$  це величина, на яку пружини стискаються (рисунок 3.2).

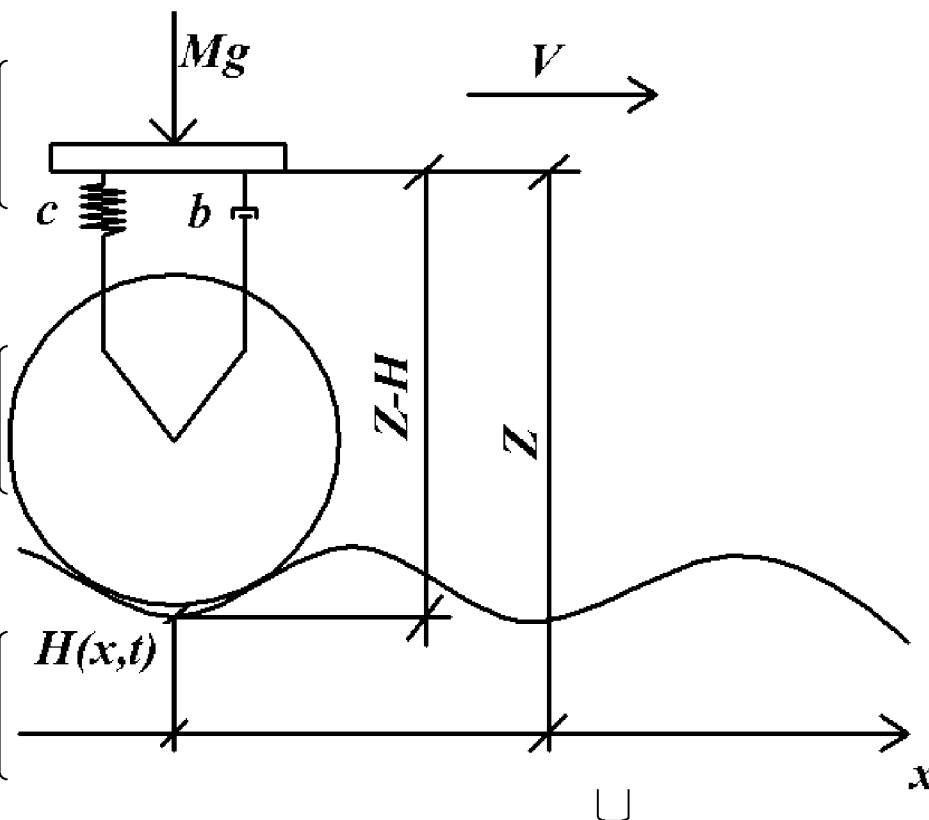


Рис. 3.2 Елементи моделі, що розглядається.

Тепер можна записати другий закон Ньютона для одиночного автомобіля, що дозволить ув'язати автомобіль, що рухається по горизонталі зі швидкістю  $V$  і профіль лісовозної автомобільної дороги в єдиній системі

координат. Запишемо його у вигляді [15]:

$$(\partial_t + V\partial_x)^2 Z + \Gamma\omega_0(\partial_t + V\partial_x)(Z - H) + \omega_0^2(Z - H) = 0 \quad (3.1)$$

Безрозмірний параметр  $\Gamma\omega_0$  визначає відношення періоду коливань пружин на час демпфування, причому його критичне значення для пружин досягається при  $\Gamma = 2$ . Припустимо, що дорожній профіль  $H$  змінюється в часі набагато повільніше порівняно з періодом коливань колеса, і тому нехтуємо значенням  $\partial_t H$  у цьому рівнянні.

Припустимо, що сили, що впливають на лісовозну дорогу від транспорту, що проїжджають, викликають ерозію або пластичні стиснення покриття. Приймаємо величину стиснення покриття, що пропорційно діє на нього, з урахуванням коефіцієнта пропорційності ущільнення покриття  $a$ . Розраховуємо, що буде незначним, т. як. розвиток дорожнього профілю відбувається повільно.

Також будемо припускати, що,  $a$  зменшуватиметься через стиснення та ущільнення матеріалу покриття. Таким чином, змодельюємо цей ефект, який дає залежність функції від  $H$ . Запишемо рівняння для профілю дорожнього покриття:

$$\partial_t H = -Ma(H)[g + (\partial_t + V\partial_x)^2 Z] \quad (3.2)$$

Це рівняння не враховує геометричну різницю між  $\partial_t H$  та нормальною складовою швидкості, а також іншими горизонтальними складовими силами, що діють з боку автомобіля. Однак, якщо вважати поверхню дороги, близьку до плоскої, цей ефект не проявляється в лінійному порядку.

Тепер розглянемо профіль земляного полотна  $H$ , який дорівнює:

де  $H_0$  – просторова постійна;

$h$  – розмах хвилястого профілю, що

зароджується,  $m$ ;  $k$  – номер хвилі.

Оскільки розвиток профілю земляного полотна протікає повільно, то права частина рівняння (3.2) повинна містити середнє похідне значення  $Z$ , усереднена за час кратне  $1/a$ . Але з рівняння (3.1) бачимо, що  $Z$  розслабляє квазістаціонарну

структуру, визначаючи поточний профіль земляного щільна  $H$  набагато швидше, ніж величина  $1/\omega$ . Таким чином, щоб знайти час середньої величини  $Z$ , яка належить до рівняння (3.2), ми можемо упустити час похідних (3.1). З огляду на наші підходи для  $H$  можна вирішити  $Z(x)$  для даного профілю земляного полотна  $H(x)$ .

$$\beta = Mg(da/dH) \quad (3.4)$$

У зв'язку з тим, що мало, ми бачимо, що  $\delta th$  буде кратна  $a$ . Таким чином  $\delta th$  продовжуємо порівнювати зі значеннями  $V$ ,  $k$  та  $h$ . Тепер маємо явний вираз для логарифмічної похідної амплітуди хвилеподібного профілю:

Тепер ми можемо проаналізувати стабільність площини земляного полотна у такий спосіб: якщо є будь-яка хвиля номер  $k$ , для якої лінійна швидкість зростання має позитивний напрямок, то амплітуда зростає в часі при нестійкій горизонтальній поверхні. Комплексна частина зростання жорсткості пружини дає інформацію у тому, що хвилеутворення рухається у напрямку  $x$ , тобто збільшується та зменшується. З рівняння (3.6) можемо знайти хвилю номер  $k_{\max}$ , яка зростає найшвидшими темпами.

Розглянемо деякі моделі, що визначають швидкість зростання стосовно гребінці.

У найпростіших моделях, що описують зростання популярності, числа наукових публікацій тощо, передбачається що їх зростання пропорційна вже досягнутої величині [7].

Аналогічно припускаємо, що швидкість зростання висоти (розмаху) гребінки пропорційна вже досягнутій величині

$$\frac{dh}{dN} = Ch \quad (3.5)$$

де  $h$  – Розмах циклу, м,

$N$  – число циклів навантаження дорожнього покриття на якому

проїжджають транспортними засобами;

$C$  – коефіцієнт пропорційності константа.

Інтегруючи формулу (3.9) і вважаючи  $h=h_0$  при  $N=0$ , отримаємо розмах гребінки за число циклів  $N$

$$h(N) = h_0 \exp(CN) \quad (3.6)$$

Таким чином, при описі швидкості зростання гребінки моделлю (3.5), зі збільшенням числа циклів навантажень гребінця зростає за експоненційною залежністю. При  $N \rightarrow \infty$ ,  $h \rightarrow \infty$ . Очевидно, що модель (3.6) справедлива лише обмеженому інтервалі часу. Насправді в певний момент часу зростання гребінки має загальмуватися.

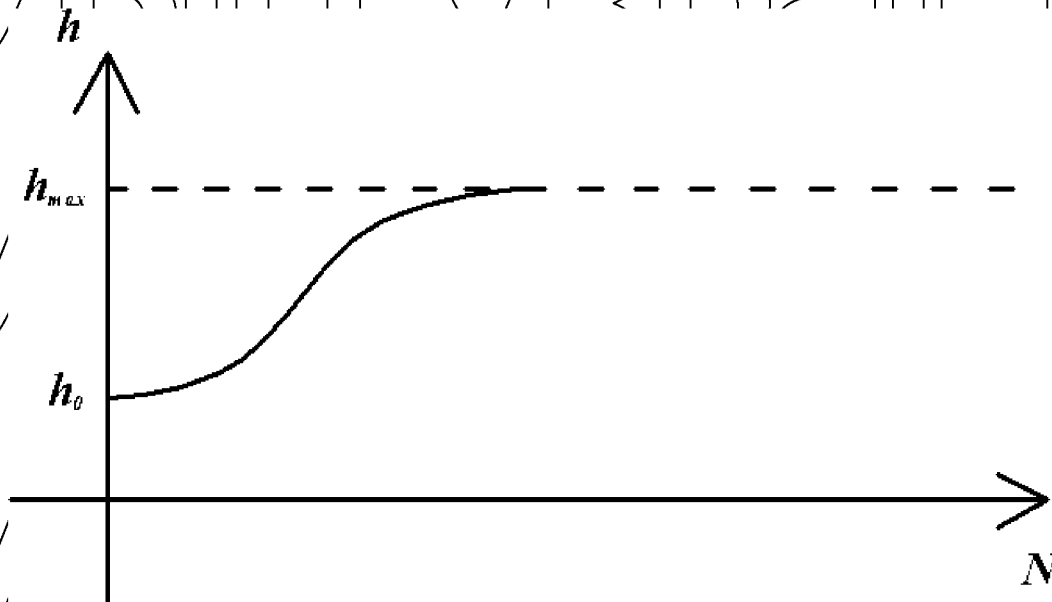


Рис.3.3 Логістична функція, що описує зростання гребеня

Швидкість зростання гребінки з урахуванням навантаження сеті опишемо рівнянням

$$\frac{dh}{dN} = C \tau_{max}^\alpha \quad (3.7)$$

де  $h$  - Розмах циклу (профілю гребінки), мм;

$N$  - Число циклів навантаження;

$\tau_{max}$  - максимальна дотична напруга, що виникає в дорожньому покритті при дії колеса, МПа.

$C, \alpha$  - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей дорожнього покриття та швидкості зростання гребінки.

Рівняння (3.7) володіє тим недоліком, що швидкість не залежить від форми і розмірів гребінки, що вже утворилася, і, насамперед, величини  $h$ .

За аналогією з рівнянням Періса, що описує швидкість зростання тріщини

при впливі циклічних навантажень, вважаємо

$$\frac{dh}{dN} = c (\tau_{max} h^{1/2})^\alpha \quad (3.8)$$

У моделі (3.15) показник ступеня при  $h$  становить 0.5, що справедливо для рівняння Періса в механіці руйнування і впливає з точного розв'язання

задачі теорії пружності поширення тріщини в суцільному анізотропному пружному середовищі. У загальному випадку показник ступеня можна позначити величиною  $\beta$ , що підлягає експериментальному визначенню. Але це суттєво ускладнить вирішення завдання.

#### *Висновки:*

Як основу для складання моделі процесу утворення нерівності типу «гребінка» прийнято математичну модель, представлену західним ученим А. Douglas [11]. В результаті розрахунку з її використанням можна отримати значення величини кроку між гребнями від впливу автомобілів, що проїжджають. Однак у моделі не передбачена оцінка розмаху між максимумом і мінімумом гребенів.

У математичній моделі, розробленій у представленій магістерській роботі, питання з розмахом гребінки було вирішено шляхом використання рівнянь регресії.

В результаті отримали математичну модель процесу утворення нерівності типу «гребінка», яка враховує швидкість руху транспортних засобів, характеристики підресорної частини автомобілів, навантаження на покриття, кількість циклів навантаження дорожнього полотна машинами, що проїжджають, а також характеристики матеріалу покриття. Всі перераховані вище параметри дозволяють визначити крок, розмах гребінки, швидкість зростання гребінки і тим самим спрогнозувати роботи з утримання лісовозних автомобільних доріг.

## РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І МЕТОДИКА ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

### 4.1 Способи та інструменти для вимірювання нерівностей покриття автомобільних доріг

Рівність дорожнього покриття є одним із основних показників, що характеризують зручність руху по лісовозній автомобільній дорозі та надають вирішальний вплив на швидкість руху автопоїздів та транспортну роботу дороги в цілому.

При поганому стані дорожнього покриття значно погіршуються умови руху: з'являються шкідливі для водія та автопоїзда вібрації, суттєво ускладнюються умови роботи водія, оскільки йому тривалий час доводиться відстежувати стан проїжджої частини, постійно змінюючи траєкторію руху, здійснюючи гальмування та розгоони. Всім цим увага водія відволікається від інших важливих з точки зору безпеки дорожнього руху елементів дороги та автомобіля. Тому погіршення рівня дорожнього покриття призводить до підвищення аварійності, витрат на транспортування вантажів та збільшення поломок транспортних засобів.

Відповідно до ГОСТ 30412-96 рівність може бути визначена рейкою з клиновим промірником, установкою ПКРС-2 або за висотними відмітками з використанням нівеліру та нівелірних рейок.

Одним з основних критеріїв, що визначають різноманітність вимірювальної техніки для визначення рівнів покриття лісовозних автомобільних доріг, є їх ефективність. Наприклад, для контролю геометричних параметрів нерівностей при обстеженні невеликих локальних ділянок автомобільних доріг застосовується дорожня універсальна складна триметрова рейка «РДУ - Кондор», а при виконанні діагностики для призначення ремонту – дорожні лабораторії. Такий вибір обумовлений як технічної, і економічної

ефективністю застосування різних приладів [81].

Наведені в ГОСТ 30412-96 [31] методи застосовуються визначення рівності як із операційному контролі, і при прийманні об'єктів в експлуатацію.

#### 4.1.1 Вимірювання рівності за допомогою дорожньої універсальної складної триметрової рейки «РДУ - Кондор»

Дорожня рейка є пристосуванням у вигляді жорсткого прямолінійного стрижня, що прикладається до поверхні покриття дороги з метою виявлення просівів між стрижнем і поверхнею (рисунк 4.1). Де просвіт під рейкою це зазор між нижньою гранню рейки та поверхнею покриття дороги.



Рис. 4.1 Дорожня універсальна складна триметрова рейка «РДУ – Кондор»

Секції корпусу рейки РДУ Кондор виготовлені з легкого металу (алюмінію або алюмінієвих сплавів) і з'єднані між собою шарнірами, а при похідному стані фіксуються стопорними гвинтами, розташованими всередині центральної секції корпусу. На центральній секції рейки «РДУ Кондор» встановлено вимірювач ухилів, що складається з вимірювальної голівки та зчленованого з нею, рівня. У внутрішній порожнині центральної секції вмонтовано екліметр, призначений для

вимірювань ухилів та крутості укосів. Для вимірювань нерівностей поверхонь у комплект поставки рейки «РДУ Кондор» входить клиновий промірник, що є клином з певним кутом ухилу і, нанесеними на одній грані, шкалами: одна шкала призначена для вимірювань просвітів, інша - для вимірювань товщини шарів покриттів (рисунок 4.2).



Рис. 4.2 Вимірювання нерівності покриття за допомогою мірного клина

Універсальна дорожня рейка «РДУ Кондор» призначена для вимірювань

[31]:

- нерівностей поверхонь основ та покриттів автомобільних доріг та аеродромів (за ГОСТ 30412-96) [31];
- ухилів проїжджої частини та узбіччя доріг та покриттів аеродромів;
- крутизни укосів та насипів при будівництві та ремонті автомобільних доріг та аеродромів;
- товщини покриттів;

Таблиця 4.1

Технічні характеристики дорожньої універсальної складної триметрової рейки  
«РДУ - Кондор»

Параметри	Розмір параметрів
Вимірювання просвітів під рейкою, мм	0,5 – 15
Вимірювання товщини шарів, см	0 – 15
Вимірювання лінійних параметрів, мм	0 – 3000
Вимірювання ухилів, ‰	0 – 100
Вимірювання ухилів, Н/Л	1:1; 1: 1,5; 1:2; 1:3
Довжина рейки, мм	3000
Ширина рейки, мм	50
Висота рейки, мм	140
Ширина промірника, мм	50,5
Висота промірника, мм	15
Кут між гранями, градуси	50 <sup>0</sup> 45'
Маса рейки, кг	8,5

*Вимоги до рейки та клинового промірника згідно з ГОСТ 30412-96[31]*

- 1 Довжина рейки має бути  $3000 \pm 2$  мм
- 2 Прогин рейки від власної ваги в середині прольоту завдовжки 2900 мм не повинен перевищувати 0,4 мм.
- 3 Ширина опорної грані рейки має бути  $50 \pm 2$  мм.
- 4 Відхилення опорної грані рейки від площинності має перевищувати 0,2 мм; допускається замість відхилення від площинності вимірювати відхилення від прямолінійності поздовжнього профілю поверхні опорної грані рейки, яке повинно перевищувати 0,2 мм.
- 5 Відхилення бічної грані рейки від прямолінійності не повинно перевищувати 10 мм по всій довжині рейки.
- 6 На бічних гранях рейки має бути п'ять міток, що вказують на місця

вимірювань проясвітів під рейкою; крок міток  $500 \pm 2$  мм; відстань від крайніх міток до торців рейки  $500 \pm 2$  мм.

7 Клиновий промірник повинен мати дві плоскі грані шириною  $50 \pm 0,5$  мм; кут між поверхнями граней має бути в межах  $5^\circ 45' \pm 5'$ .

8 Одна з граней клинового промірника повинна мати поперечні ризики; крок рисок  $10 \pm 0,1$  мм; ризики мають цифрові позначення від 1 до 15.

9 Рейка та клиновий промірник повинні бути атестовані відповідно до вимог ГОСТ Р 8.568-97 [33].

*Підготовка до вимірювань згідно з ГОСТ 30412-96[31]*

1 Довжину ділянки вимірів слід приймати в межах 300 – 400 м.

2 Сумарна довжина ділянок вимірювань повинна становити не менше ніж 10% довжини контрольованого покриття (підстави) в однорядному обчисленні.

3 Поверхня ділянки вимірів має бути чистою.

*Проведення вимірювань згідно з ГОСТ 30412-96[31]*

1 Вимірювання на дорогах та вулицях слід проводити, прикладаючи рейку до поверхні основи (покриття) на відстані 0,5 – 1,0 м від кожної кромки покриття або краю смуги руху; а на аеродромах – по осі ряду (смуги).

*Примітка* - При багатосмуговій проїжджій частині дороги рейку слід прикладати з відривом 0,3 – 1,0 м від межі кожної лінії руху.

2 При кожному додатку рейки слід вимірювати величину п'яти проясвітів під рейкою у місцях, що відповідають міткам на бічних гранях рейки.

3 Місця застосування рейки повинні бути рівномірно розташовані по довжині ділянки вимірювань.

Загальна кількість вимірювань проясвітів під рейкою на ділянці вимірювань має бути не менше ніж 120.

#### **4.1.2 Вимірювання рівності за допомогою нівеліру та нівелірної рейки**

Нівелір – це геодезичний прилад для нівелювання, тобто визначення різниці висот між точками земної поверхні щодо певного рівня (визначення

перевищень).

Нівелірна рейка – це рейка зі шкалою, необхідна визначення перевищень, тобто, при нівелюванні, і використовується спільно з нівелірами. Нівелірна рейка відноситься до класу допоміжного геодезичного обладнання (рис. 4.3).



Рис. 4.3 Нівелір та нівелірна рейка

*Вимоги до нівеліру та нівелірної рейки згідно з ГОСТ 30412-96 [31]*

1/ Нівелір і рейка повинні бути технічно справні, перевірені та відповідати вимогам ГОСТ 10528-90 [28].

2 Опорний торець нівелірної рейки має бути забезпечений насадкою з напівсферичним під'ятником.

*Підготовка до вимірів. Проведення вимірювань згідно з ГОСТ 30412-*

1 Довжина ділянки вимірів має бути не менше 400 м-коду.

Місця встановлення нівелірної рейки повинні бути розташовані на одній лінії, що знаходиться на відстані 0,5 - 1,0 м від крайки основи (покриття) дороги або на осі основи (покриття) аеродрому. Місця встановлення повинні бути позначені мітками. Крок міток  $5 \pm 0,2$  м.

Вимірювання слід проводити, послідовно встановлюючи нівелірну рейку на кожну з міток.

Вимірювання рівнів за допомогою автомобільної установки ПКРС -2

Прилад контролю рівності та зчеплення є одноколісним причепом, що буксирується автомобілем із встановленим на ньому спеціальним зчіпним пристроєм. Завдяки паралелограмній зчипці зовнішня рама постійно зберігає положення паралельне поверхні дорожнього полотна (рисунок 4.4).



Рис. 4.4 Динамометричне встановлення ПКРС – 2

Причіп використовується у складі пересувної лабораторії, з бортовим комп'ютером і ємністю з водою (рисунок 4.5).

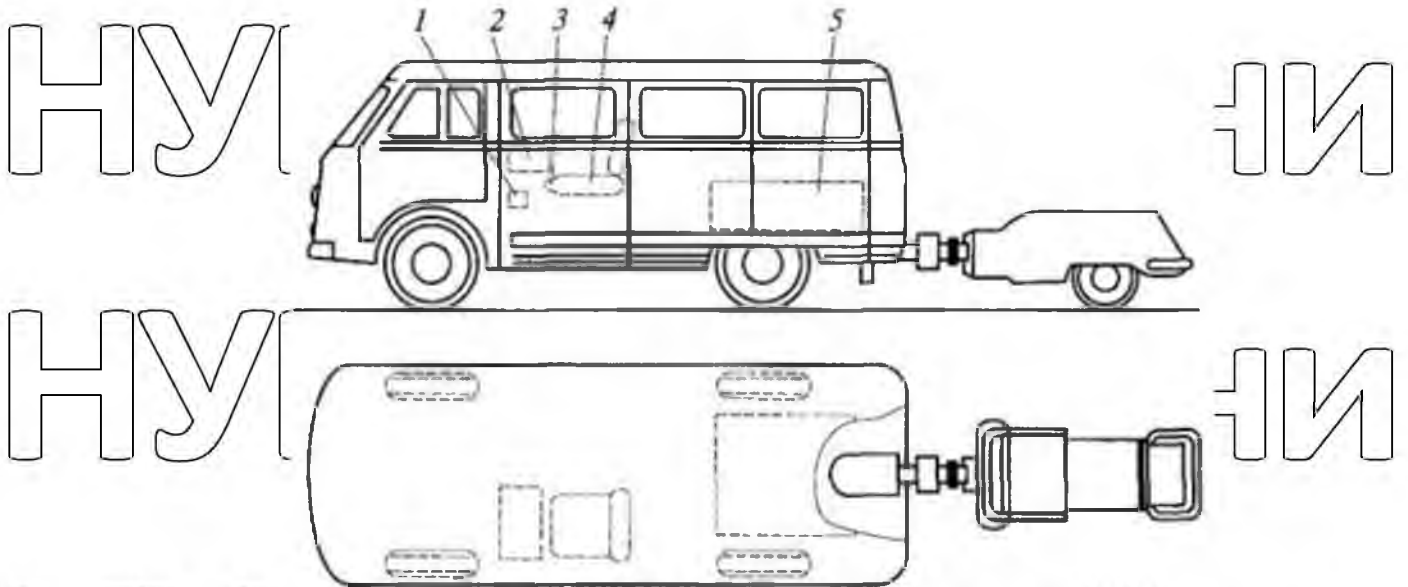


Рис. 4.5 Схема динамометричної установки ПКРС – 2: 1 – педаль гальма причепа, 2 – пульт керування, 3 – важіль поливу водою, 4 – місце оператора, 5 – бак для води.

Вимірюється коефіцієнт зчеплення при повному блокуванні колеса з примусовим поданням води для створення на покритті автодороги водяної плівки товщиною 1 мм.

Реєстрація показань первинних датчиків проводиться бортовим обчислювальним комплексом із виведенням даних виміру на дисплеї. Показник рівності покриття доріг визначається сумарною величиною переміщення колеса причепа щодо інерційної маси його корпусу на одиницю довжини дороги.

*Вимоги до автомобільної установки згідно з ГОСТ 30412-96[31]*

1 Автомобільна установка ПКРС-2 [49] складається з: автомобіля, причіпного одноколісного приладу, обладнаного датчиком рівності, та встановленого в автомобілі пульта управління.

Основні параметри причіпного приладу: розміри шини (ГОСТ 20993) [29], дюйми – 6,75-13, 6,45-13 або 6,40-13; тип протектора – з малюнком; тиск повітря в шині, кПа –  $170 \pm 20$  ( $1,7 \pm 0,2$  кгс/см<sup>2</sup>); навантаження на колесо, кН -  $3 \pm 0,03$  ( $300 \pm 3,0$  кгс); максимальне радіальне биття шини, мм –  $2 \pm 0,2$ ; максимальний статичний дисбаланс колеса, г/см –  $50 \pm 5$ .

Параметри, що відносяться до вимірювання рівності: величина, що

вимірюється (показник рівності) - інтенсивність (рівень) вертикальних коливань причіпного приладу щодо підресореного кузова, що виражається у вигляді сумарного стиску підвіски на 1 км дороги (см/км); швидкість руху при вимірі рівності, км/год – 50; власна частота вільних коливань кузова причіпного приладу, Гц –  $0,8 \pm 0,1$ .

*Підготовка до вимірювань згідно з ГОСТ 30412-96 [31]*

1 Кожна установка повинна пройти атестацію, яка оформляється протоколом та атестатом за формами, передбаченими ГОСТ Р 8.568-97 [33], а також робиться відмітка у паспорті на цей засіб.

2 Безпосередньо перед проведенням вимірювань слід виконувати відповідно до інструкції з експлуатації та обслуговування установки такі роботи:

- перевірка механічної частини причіпного приладу, надійність кріплення причіпного приладу, затягування кріпильних деталей, тертя та демпфування у підвісці, справність приводу датчика рівності (тахогенератора);
- перевірка та юстування спідометра автомобіля;
- балансування коліс; перевірка радіального биття шини;
- установка перемикача режимів роботи в положення "50 км/год".

*Вимоги до ділянок щодо вимірювань. Проведення вимірювань згідно з*

*ГОСТ 30412-96 [31]*

1 Кожна смуга перед проведенням вимірювань має бути очищена від щебеню, піску, залишків бетону, а в осінній та зимовий періоди – від снігу та льоду, здатних спотворити результати вимірювань.

Під час проведення вимірювань необхідно у процесі проїзду витримувати задану швидкість з точністю  $\pm 2$  км/год.

**4.2 Методи вимірювання нерівності типу «гребінка» за допомогою триметрової складаної рейки «РДУ – Кондор»**

Перераховані вище методи вимірювання нерівностей призначені для визначення робочих характеристик, операційного контролю якості будівництва або приймання лісовозної автомобільної дороги в експлуатацію. Згідно з цими

методами, вимірювання виконують на великих за протяжністю ділянках. У нашому випадку метою є не обстеження всієї дороги цілком, а лише локальні ділянки з поперечним профілем типу «гребінка». Зважаючи на це як головний інструмент було обрано дорожню універсальну рейку «РДУ – Кондор», оскільки саме вона призначена для зйомки місцевих ділянок і діапазон довжин хвиль гребінки якраз відповідає для їх зручного вимірювання.

Оскільки цілі вимірів інші, те й метод необхідно модернізувати.

Перший метод, метод максимумів - мінімумів було прийнято під час зйомки гребінки в зимовий період. Для чого:

- Наводимо дорожню рейку в робочий стан шляхом розсування всіх трьох секцій рейки та жорсткого скріплення їх між собою стяжними гвинтами;
- від'єднуємо клиновий промірник;
- встановлюємо рейку в місці, де необхідно провести дослідження на покритті перпендикулярно до хвиль гребінки;
- співвідносимо початок рейки з одним із найвищих значень хвиль гребінки, тим самим позначаючи початок координат;
- беремо відлік по горизонталі, по рейці у місцях зміни перепадів хвилі, тобто у нижчих та вищих положеннях нерівності, у міліметрах;
- за допомогою клинового промірника в тих же точках беремо відлік по вертикалі, міліметрах (рисунок 4.2 і 4.6).

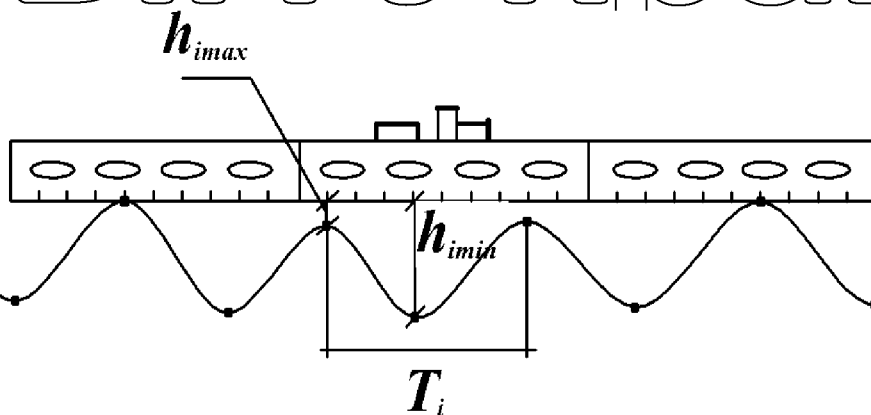


Рис 4.6 Схема вимірювання гребінки методом максимумів – мінімумів

Однак, при обробці даних, отриманих за допомогою аналізованого методу, виявився ряд недоліків таких як:

- значення глибини та висоти нерівностей відраховуються від рівня зіткнення дорожньої рейки з двома найвищими значеннями гребінки;

- за отриманими значеннями можна лише приблизно судити про форму самої нерівності.

Слід зазначити, що схематизація випадкових процесів методом максимумів - мінімумів широко використовується з метою оцінки рівня навантаженості елементів конструкції завдання теорії надійності.

Оскільки спосіб максимумів - мінімумів мав недоліки, було прийнято рішення застосувати і другий спосіб, спосіб випадкових ординат (рисунок 4.7).

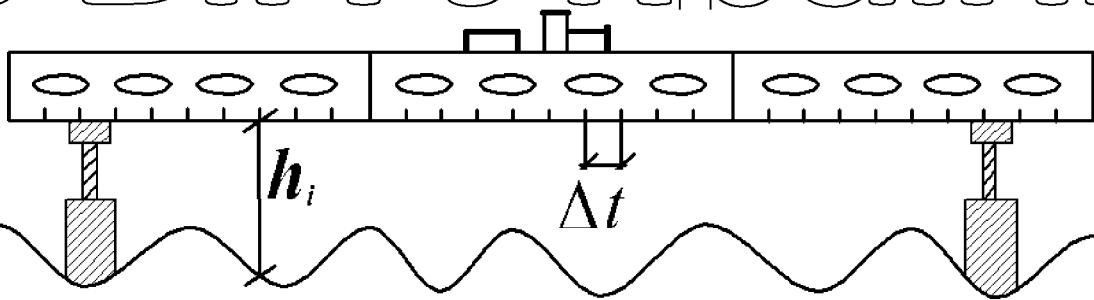


Рис. 4.7 Схема вимірювання гребінки методом випадкових ординат

Відповідно до цього способу необхідно:

- привести дорожню рейку у робочий стан шляхом розсування всіх трьох секцій рейки та жорсткого скріплення їх між собою гвинтами;

- від'єднати клиновий промірник;

- на покритті, у місці, де необхідно провести дослідження, перпендикулярно хвилі гребінки встановити дві опори на такій відстані, щоб на них можна було встановити дорожню рейку;

- на задалегідь підготовлені опори встановлюється дорожня дорожня універсальна «РДУ - Кондор»;

- з використанням рівня та знімних підкладок рейка виводиться у горизонтальне положення;

- починаючи від нуля рейки по горизонталі з певним вибраним кроком у

міліметрах, беруться звіти за допомогою клинового промірника від дорожнього покриття до низу рейки у міліметрах.

Зазначений метод дозволяє нам за отриманими даними побудувати більш докладний профіль, тим самим можна побачити форму нерівності, кути підйому та спуску, а також дає можливість не обмежуватися вибіркою на довжину рейки та передбачає її перестановку багато разів.

Таким чином, метод випадкових ординат при зйомці нерівностей типу "гребінка" дозволяє нам вивчати суцільні хвилеутворення необмеженої довжини, дає більше даних і є досить точним.

#### 4.3. Методика обробки експериментальних даних, отриманих з методом випадкових ординат

Дані, отримані методом випадкових ординат, поданому у параграфі 4.2, було прийнято досліджувати з допомогою спектрального аналізу [90]. Пропонуємо такі припущення: випадкова функція, що описує профіль гребінки, має властивості стаціонарності, ергодичності і є вузькокутовою. Також було прийнято рішення здійснювати всі обчислення в системі MathCAD 14, оскільки вона є найбільш зручною для експериментів з такими тонкими і досить складними методами, як спектральний аналіз.

Методика обробки:

Деякі параметри випадкового процесу представлені на рисунку 4.8.

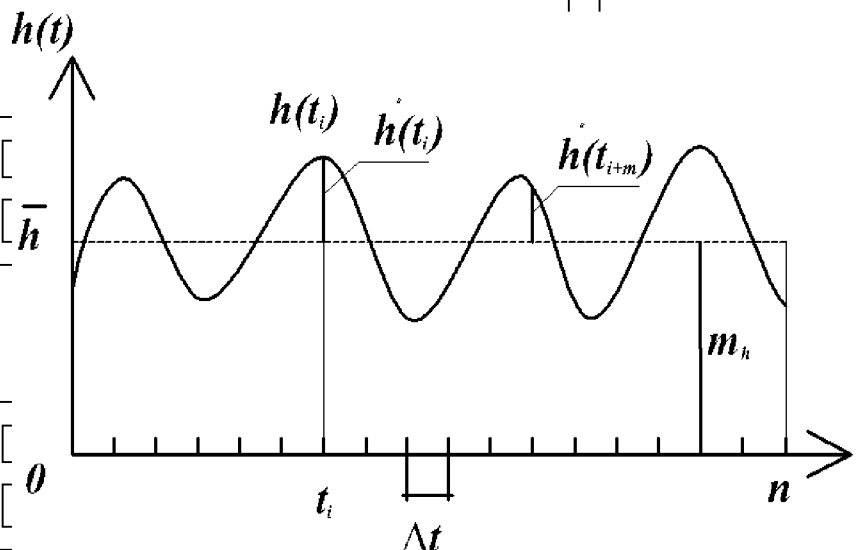


Рис. 4.8 Деякі параметри випадкового процесу

Алгоритм обчислень у системі MathCAD 14:

1. Надає параметру « $n$ » значення кількості вимірювань;
2. Надаємо параметру « $i$ » ряд значень від 0 до  $n$ , через 1;
3. Виводимо в робоче поле значення параметра « $i$ »;
4. Надає параметру « $\Delta t$ » значення відстані кроку вимірювань;
5. Привласнюємо параметру " $h_i$ " значення кожного  $i$ -го виміру;
6. Визначаємо оцінку математичного очікування відхилення профілю від рейки
7. Виводимо значення  $mh$ ;
8. Визначаємо оцінку дисперсії
9. Виводимо значення
10. Будуємо графік оцінки кореляційної функції

Отримавши графік спектральної щільності, можна побачити які коливання переважають у профілі нерівності типу «гребінки» і яка її внутрішня структура.

Таким чином, можна зробити такі висновки:

Розглянувши основні існуючі методи та інструменти для вимірювання рівності покриття, було прийнято рішення, що найбільш підходящим інструментом для вивчення гребінки є дорожня дорожня універсальна РДУ-«Кондор», так як вона досить проста, має невисоку вартість і широко застосовується для вимірювання локальних ділянок.

Для отримання результатів вимірювань було запропоновано два методи: максимумів-мінімумів та випадкових ординат.

Метод максимумів – мінімумів відноситься до групи методів безпосередньої схематизації випадкових процесів та дозволяє оцінити статистичні характеристики розподілу максимумів, висоти гребеня (розмахів), кроку між гребнями, коефіцієнта кореляції між висотою гребеня та кроком, отримати рівняння середньоквадратичних регресій. Однак, вищевказаний метод не дозволяє оцінити частотний склад поверхні дороги з нерівностями типу «гребінки», отримані значення глибини та висоти нерівностей відраховуються від рівня дотику дорожньої рейки з двома найвищими точками гребінки, за отриманими значеннями можна лише приблизно судити про форму самої

нерівності. Внаслідок цього було розроблено другий метод, який отримав назву випадкових ординат.

Метод проведення експерименту з вимірюванням значень випадкових ординат дозволяє отримати необхідні дані для обробки результатів з використанням спектральної теорії і внаслідок цього отримати найповніші уявлення про спектр частот нерівності типу «гребінця».

Для обробки отриманих результатів експерименту для кожного з представлених методів було розроблено дві методики. Згідно з першою методикою знаходимо оцінку коефіцієнта кореляції між кроком та висотою

нерівності, а також рівняння середньоквадратичних регресій для кожної з експериментальних ділянок лісовозної автомобільної дороги. Друга методика заснована на спектральному аналізі даних, в результаті якого отримуємо оцінку спектральної густини, що визначає частотні характеристики нерівності типу

«гребінця». Ці методики дозволяють визначити основні параметри нерівності типу "гребінки", а також встановити взаємозв'язок між ними.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 5.

# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НЕРІВНОСТЕЙ ТИПУ «ГРЕБІНКА»

### 5.1 Результати експериментальних досліджень «гребінки», триманих за методом максимумів – мінімумів

Експериментальні дослідження згідно з методом максимумів - мінімумів проводились у січні 2023 року на лісовозній автомобільній дорозі в Чернігівській області України. Покриття на момент вимірювань являло собою щільний сніговий накат (рисунок 5.1), без використання на ньому різних хімічних протижеледних засобів та матеріалів, що підвищують зчеплення коліс автомобілів з поверхнею лісовозної автомобільної дороги (наприклад, пісок). Ця дорога виконує роль не тільки лісовозної, а й є тід'їздом до приватних дачних селищ.



Рис. 5.1 Експериментальна ділянка лісовозної автомобільної дороги з покриттям у вигляді снігового накату

Результати польових вимірювань гребінки в зимовий період згідно з

методом максимумів - мінімумів, поданим у розділі 4.2, а також результати обробки згідно з методикою, представленою в розділі 4.3.1, показані в таблицях 5.1 та 5.2 відповідно. Слід зазначити, що відстань від рейки до вершини гребеня ( $h_{max}$ ) майже переважають у всіх вимірах дорівнювало нулю, тобто, коливалося не більше одного міліметра. На момент зйомки, нерівності були присутні тільки на під'їздах та виїздах з поворотів лісовозної автомобільної дороги, тому й ділянки для зйомки були взяті відповідно на цих місцях. Так ділянки номер 1 і 2 перебували на виходах із поворотів, а ділянки номер 3, 4 та 5 на підходах до поворотів. На самих поворотах, на момент вимірів, гребінки не спостерігалось.

Причому також було помічено, що повороти.

Таблиця 5.1  
Результати вимірювань методом максимумів - мінімумів.

№ ділянки	Крок між гребнями	Глибина нерівності	Відстань до
	$T$ , мм.	$h_{min}$ , мм.	вершини нерівності $h_{max}$ , мм.
1	500	9	0
	550	8	0
	500	6,5	0
	450	17	0
2	350	14	0
	550	13	0
	850	8	0
	1050	9,5	0
3	300	4,5	0
	600	11	0
	600	15	0
	500	14	0
4	700	7,5	0
	200	7	0

5	300	8	0
	400	10	0
	150	8	0
	400	11,5	0
	350	8,5	0
6	300	6	0
	400	3,5	0
	170	1	0
	230	3	0
6	400	2,5	0
	600	4	0
	350	3	0
	100	1,7	0
6	150	3	0

Таблиця 5.2

Результати аналізу методом максимумів - мінімумів.

№ ділянки	Оцінка мат. очікування $T$ , мм.	Оцінка мат. очікування $h$ , мм.	Оцінка дисперсії $T$ , мм <sup>2</sup> .	Оцінка дисперсії $h$ , мм <sup>2</sup> .	Оцінка коефіцієнта кореляції, $r_{th}$
1	470	10,9	5750	19,55	-0,68
2	817	10,17	63333	6,58	-0,76
3	540	10,4	23000	19,43	0,42
4	300	8,43	9166	3,37	0,64
5	300	2,71	28114	0,93	0,72

За результатами вимірювань також було побудовано графіки та складено лінійні рівняння регресії для кожної з ділянок.

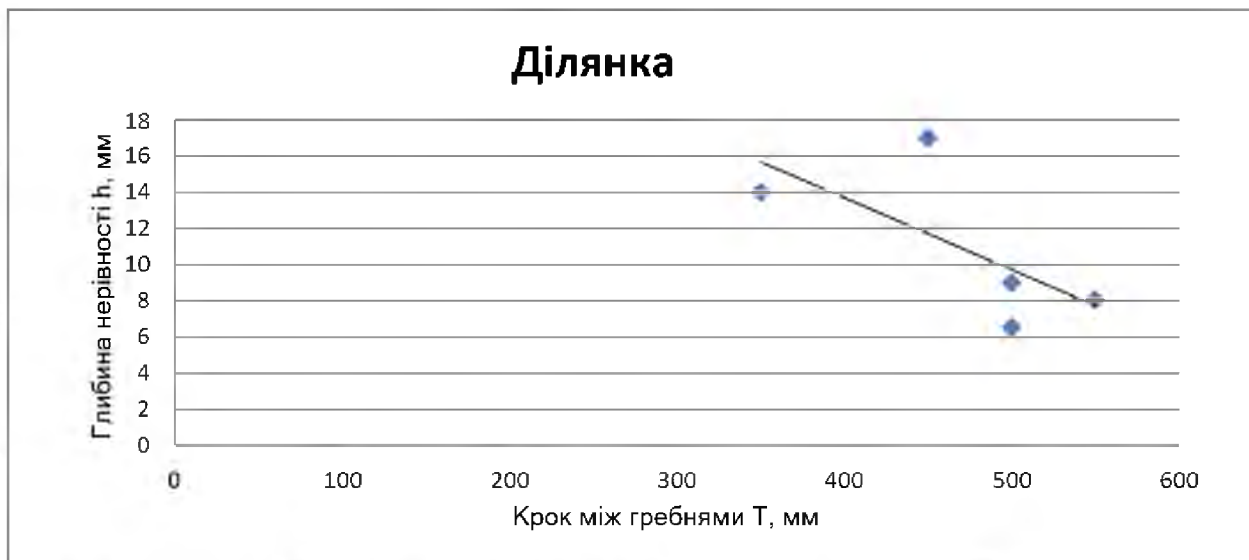


Рис. 5.2 Результати вимірювання ділянки №1

Рівняння регресії для ділянки №1:

$$h = -0.0398T + 29.598 \quad (5.1)$$

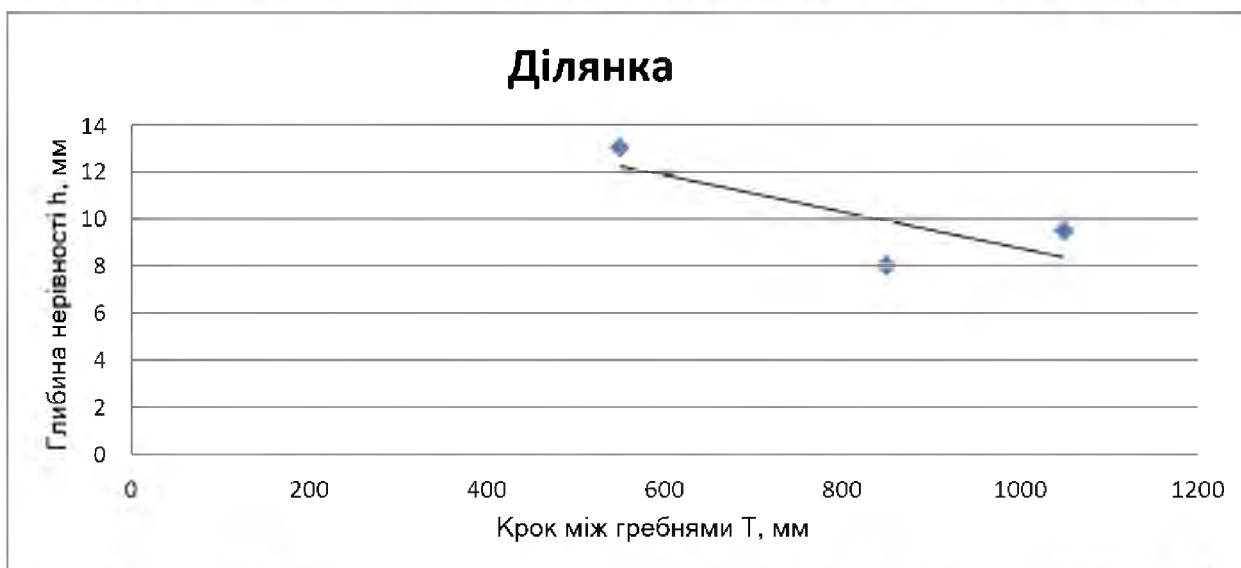


Рис. 5.3 Результати вимірювання ділянки №2

Рівняння регресії для ділянки №2:

$$h = -0.0078T + 16.507 \quad (5.2)$$

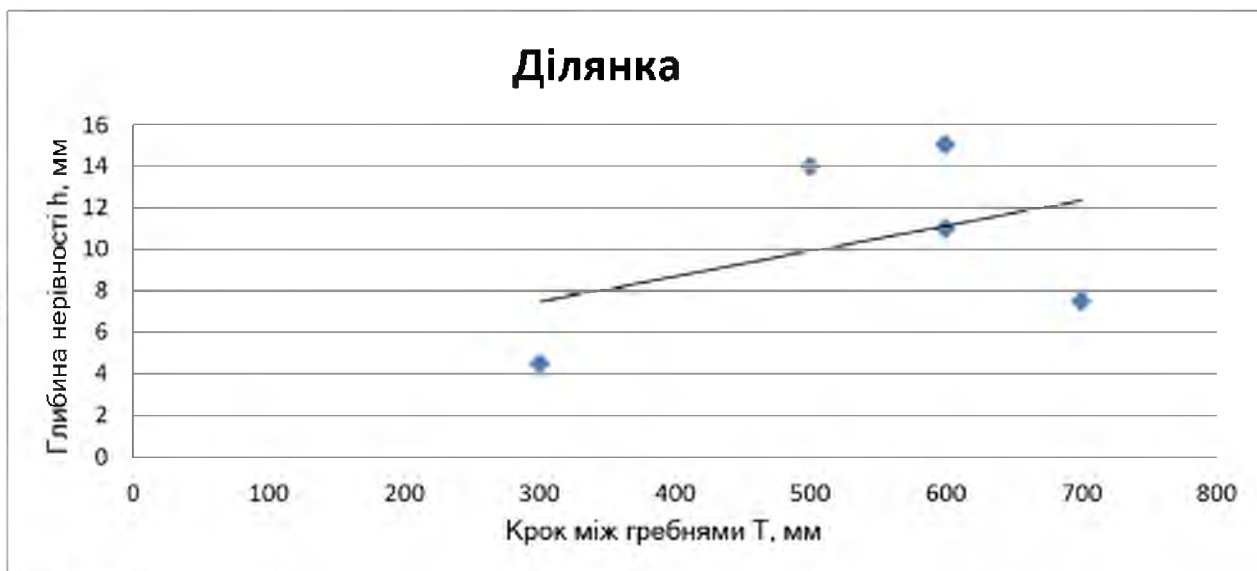


Рис. 5.4 Результати вимірювання ділянки №3  
Рівняння регресії для ділянки №3:

$$h = 0.0122 T + 3.8261 \quad (5.3)$$

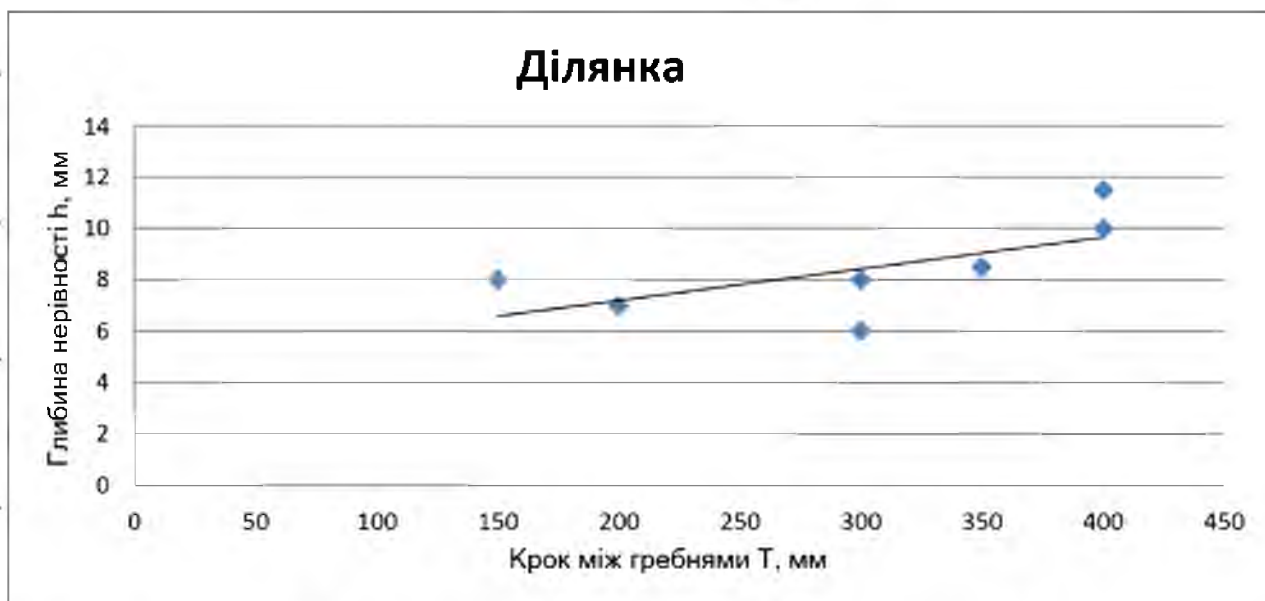


Рис. 5.5 Результати вимірювання ділянки №4  
Рівняння регресії для ділянки №4:

$$h = 0.0123 T + 4.7468 \quad (5.4)$$

Як видно з таблиць 5.1 і 5.2 амплітуда та крок нерівностей мають суттєве розсіювання для однієї і тієї ж дороги. Звідси можна припустити, що факторів, що впливають на освіту, форму та розміри гребінки досить багато. Приміром, в оцінці коефіцієнта кореляції вийшли результати з негативними значеннями на гребінках у місцях виходу з поворотів, і позитивними у місцях підходу до них,

тобто залежність від напрямку дії сили під час гальмування чи прискорення. За отриманими лінійними рівняннями регресії можна визначити, яким буде середнє значення глибини нерівності при тому чи іншому значенні креску між гребінками.

## 5.2. Результати експериментальних досліджень «гребінки», отриманих за методом випадкових ординат

Експериментальні дослідження згідно з методом випадкових ординат проводились у серпні 2022 року на лісовозній автомобільній дорозі з покриттям перехідного типу у вигляді піщано-гравійної суміші (рисунок 5.7), на якій проводилися вимірювання у зимовий період. були обрані інші оскільки прив'язатися до зимових було неможливо. Також за допомогою цього методу дослідження були проведені у вересні 2022 року на іншій лісовозній автомобільній дорозі, що також має перехідний тип покриття у вигляді піщано-гравійної суміші (рисунок 5.8), а місцями у вигляді відсіву дроблення (рисунок 5.9) було знято ділянки номер 2 і 4, що знаходяться на виходах з поворотів, ділянка номер 3 знаходилася безпосередньо на повороті, а ділянка номер 5 розташовувалась на підході до нього, досліджували ділянки номер 1, 6 та 7, які знаходилися на прямолінійних напрямках лісовозної автомобільної дороги. Відстань між знятими ділянками знаходиться в межах від 200 до 1000 метрів одна від одної, на всіх дорозгах, якими досліджуємо.

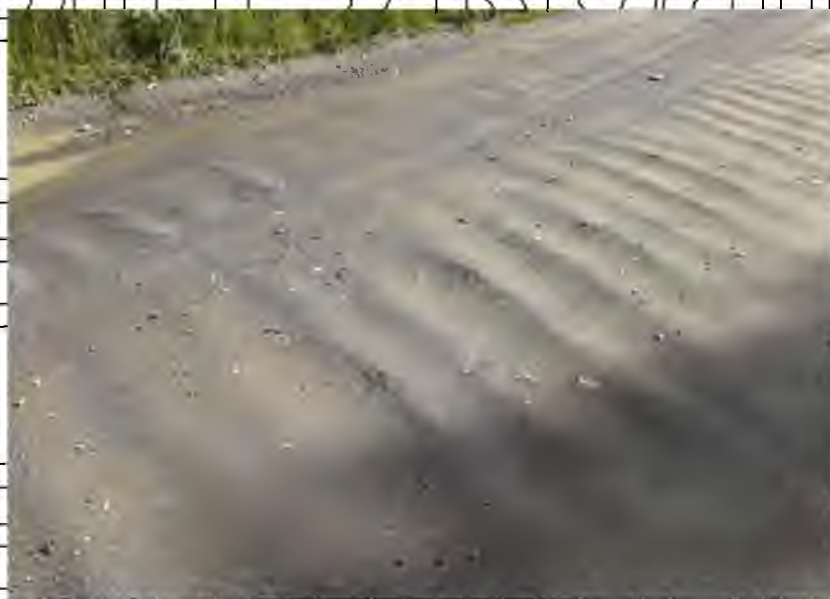


Рис. 5.6 Гребінка на лісовозній автомобільній дорозі



Рис. 5.7 Гребінка на лісовозній автомобільній дорозі



Рис. 5.9 Гребінка на лісовозній автомобільній дорозі з покриттям із відсіву дроблення

Результати польових вимірювань гребінки відповідно до методу випадкових ординат, поданий у розділі 4.2, показані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Результати вимірів методом випадкових ординат.

Координата по горизонталі T, мм.	Позначка по вертикалі h, мм.	Координата по горизонталі T, мм.	Позначка по вертикалі h, мм.
1	2	3	4
1 ділянка			
0	55	250	71
50	47	300	73
100	45	350	71
150	54	400	59
200	62	450	47
500	40	1850	61
550	44	1900	69
600	55	1950	82
650	67	2000	80
700	74	2050	68
750	73	2100	55
800	65	2150	38
850	50	2200	35
900	44	2250	58
950	50	2300	67
1000	59	2350	80
1050	70	2400	75
1100	73	2450	65
1150	71	2500	53
1200	62	2550	38
1250	52	2600	44

1300	44	2650	47
1350	44	2700	59
1400	45	2750	65
1450	60	2800	70
1500	67	2850	60
1550	73	2900	62
1600	68	2950	65
1650	55	3000	35
1700	40	3050	52
1750	38	3100	61
1800	46	3150	68
3200	66	4550	69
3250	58	4600	70
3300	47	4650	75
3350	41	4700	73
3400	44	4750	65
3450	62	4800	55
3500	68	4850	50
3550	70	4900	57
3600	66	4950	62
3650	56	5000	65
3700	45	5050	65
3750	42	5100	64
3800	50	5150	60
3850	65	5200	59
3900	68	5250	60
3950	70	5300	59
4000	66	5350	56
4050	54	5400	55

4100	50	5450	60
4150	55	5500	67
4200	67	5550	66
4250	70	5600	65
4300	71	5650	62
4350	65	5700	63
4400	58	5750	50
4450	51	5800	44
4500	45	5850	55
2/дільнка			
0	60	200	67
50	70	250	60
100	75	300	57
150	72	350	65
400	65	1450	65
450	67	1500	60
500	64	1550	54
550	57	1600	55
600	52	1650	64
650	58	1700	70
700	62	1750	65
750	65	1800	63
800	65	1850	56
850	62	1900	54
900	55	1950	56
950	52	2000	60
1000	57	2050	62
1050	65	2100	64
1100	66	2150	62

1150	62	2200	63
1200	60	2250	60
1250	55	2300	55
1300	57	2350	50
1350	65	2400	55
1400	67	2450	62
0	70	250	62
50	72	300	65
100	79	350	75
150	76	400	77
200	65	450	78
500	70	1550	68
550	65	1600	70
600	65	1650	72
650	77	1700	77
700	82	1750	88
750	81	1800	90
800	81	1850	83
850	73	1900	79
900	62	1950	71
950	63	2000	72
1000	71	2050	77
1050	86	2100	78
1100	91	2150	77
1150	92	2200	79
1200	82	2250	65
1250	75	2300	67
1300	70	2350	74

1350	78	2400	76
1400	84	2450	75
1450	86	2500	67
1500	81	-	-

Результати обробки даних за методикою згідно з підрозділом 4.3.2 представлені у графіках кореляційної функції, спектральної щільності (рисунки 5.9 – 5.15) та значення дисперсії. Так значення дисперсії для кожної ділянки дорівнює:

1)  $\sigma_h^2 = 119,974 \text{ mm}^2$ ;  
 2)  $\sigma_h^2 = 104,877 \text{ mm}^2$ ;  
 3)  $\sigma_h^2 = 169,810 \text{ mm}^2$ ;  
 4)  $\sigma_h^2 = 140,214 \text{ mm}^2$ ;

5)  $\sigma_h^2 = 163,561 \text{ mm}^2$ ;  
 6)  $\sigma_h^2 = 218,826 \text{ mm}^2$ ;  
 7)  $\sigma_h^2 = 169,973 \text{ mm}^2$ .

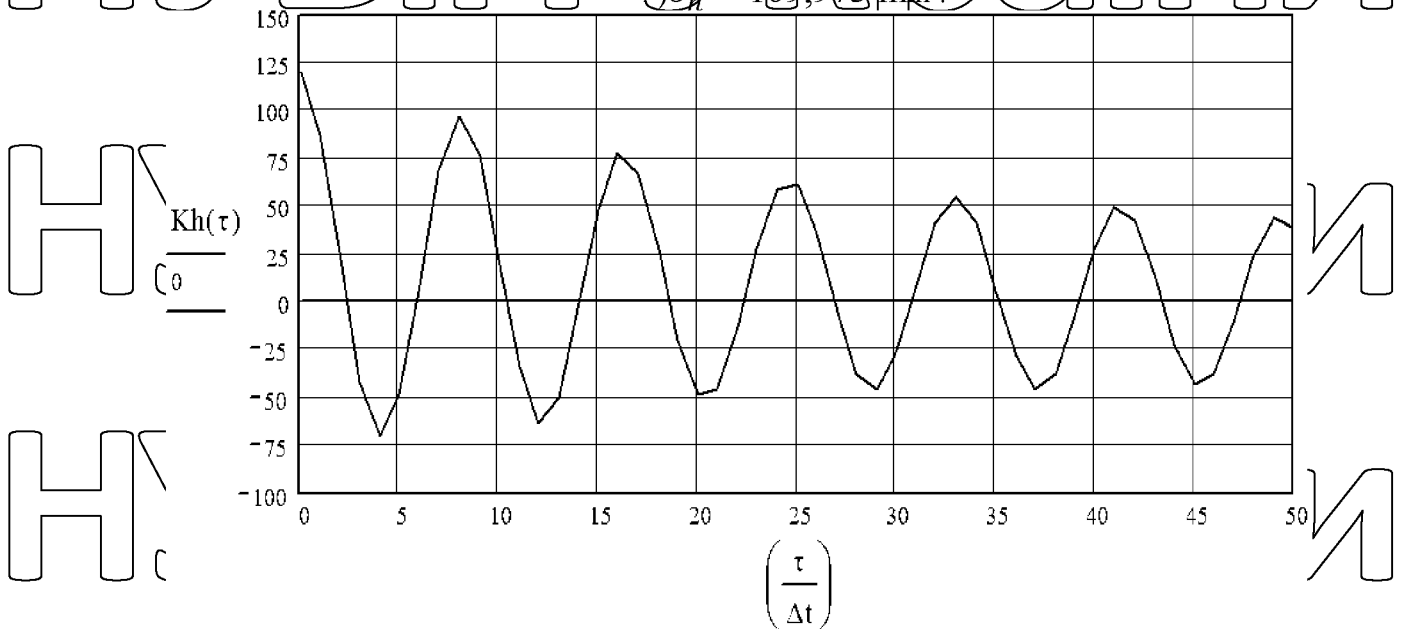


Рис. 5.10 Графік кореляційної функції для 1 ділянки

НУБІП України

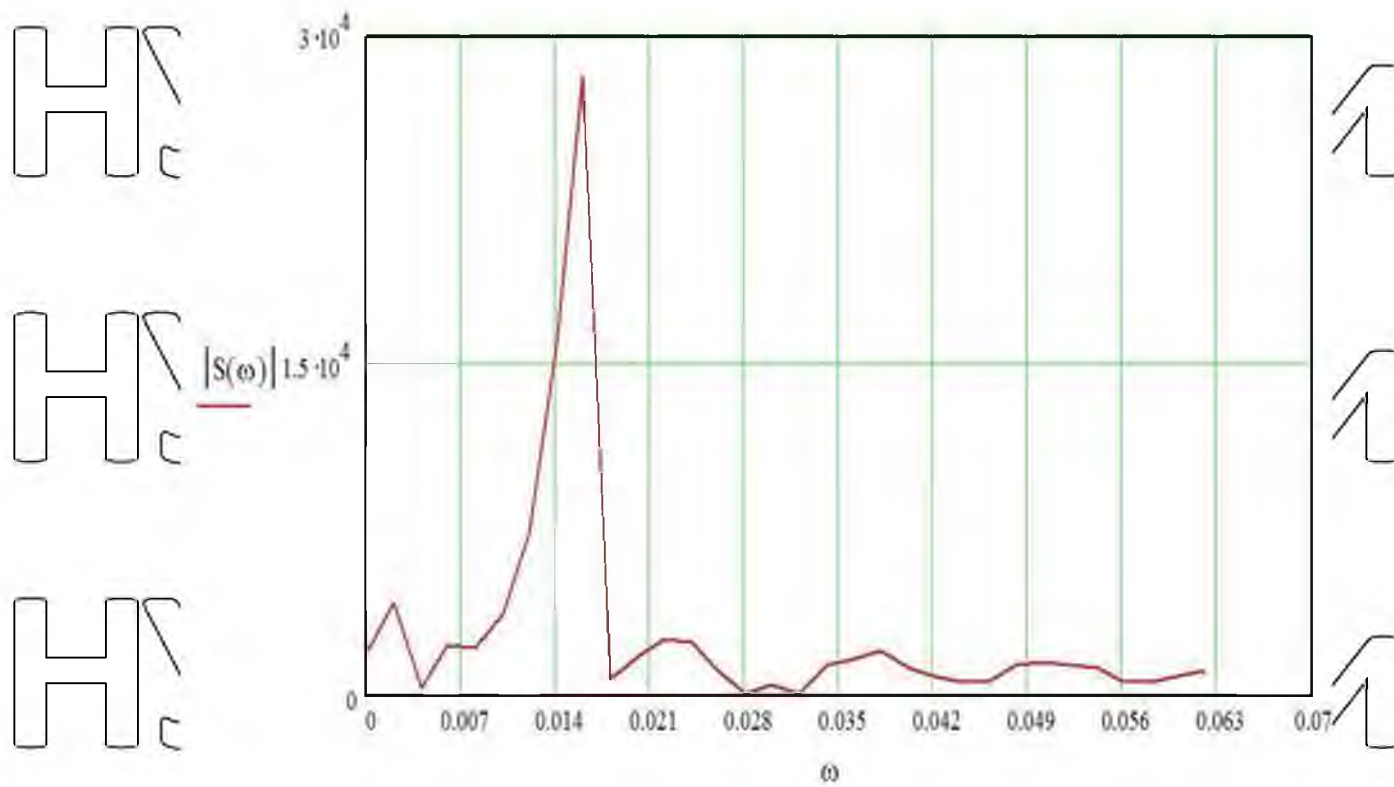


Рис. 5.11 Графік спектральної густини для 1 ділянки

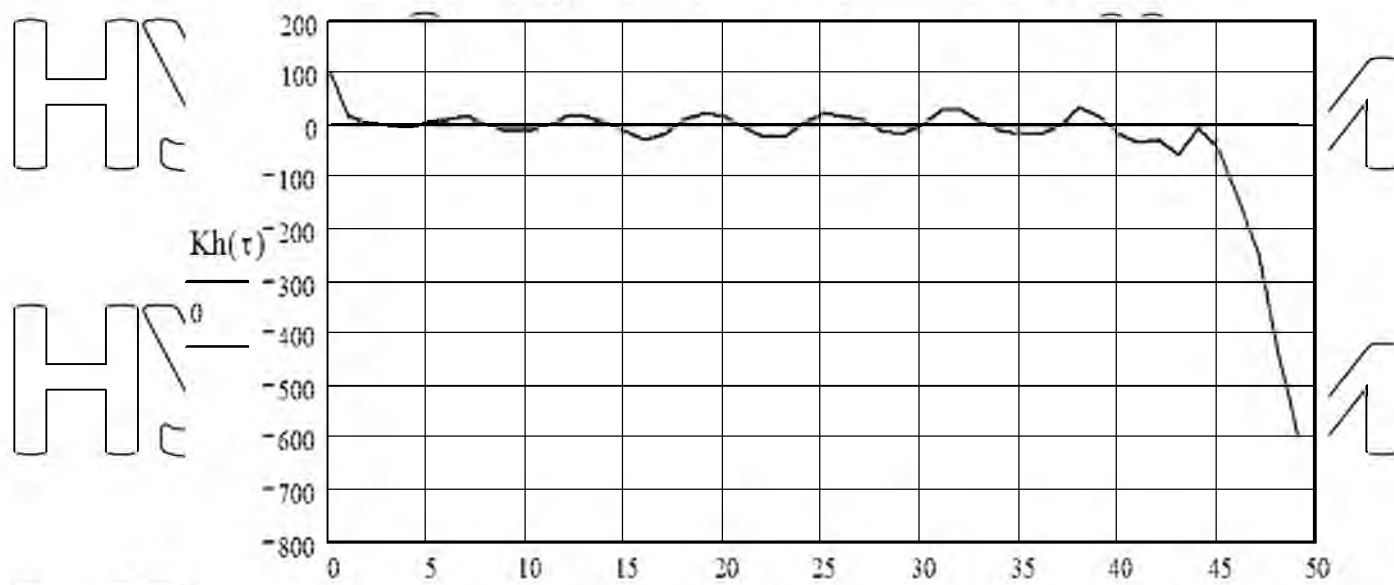


Рис. 5.12 Графік кореляційної функції для 2 ділянки

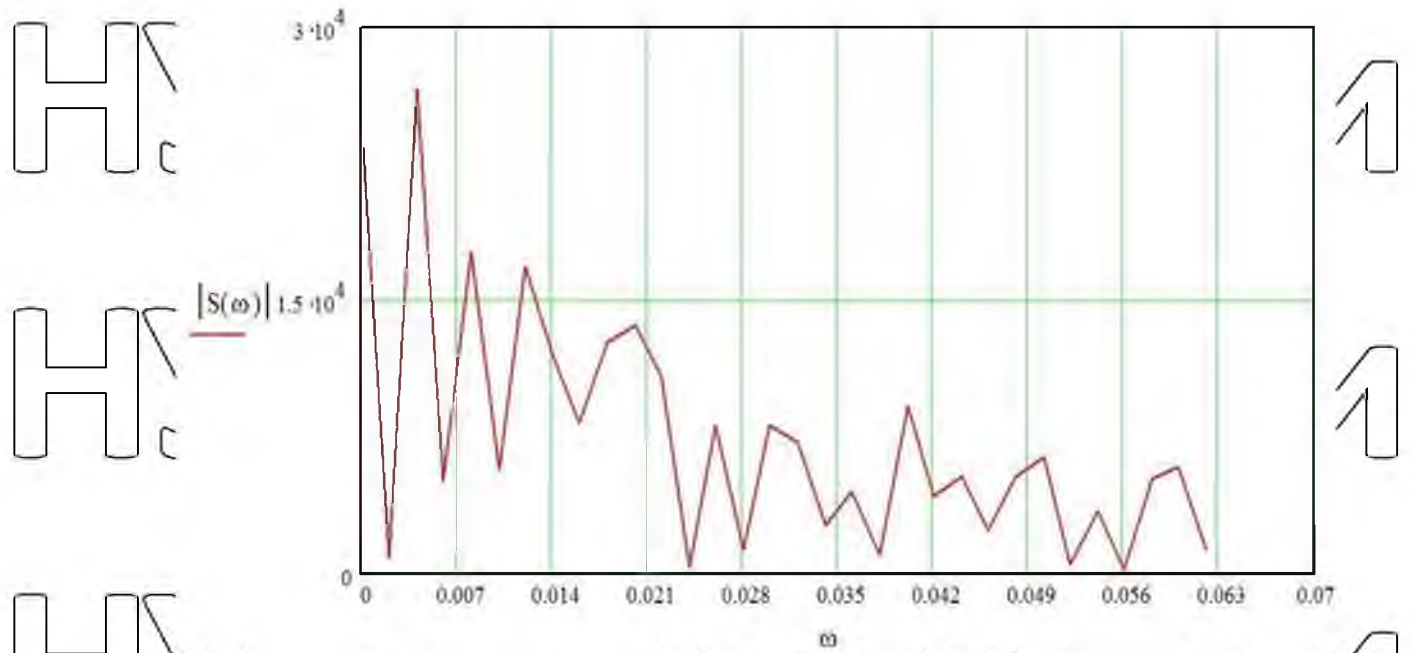


Рис. 5.13 – Графік спектральної густини для 2 ділянки

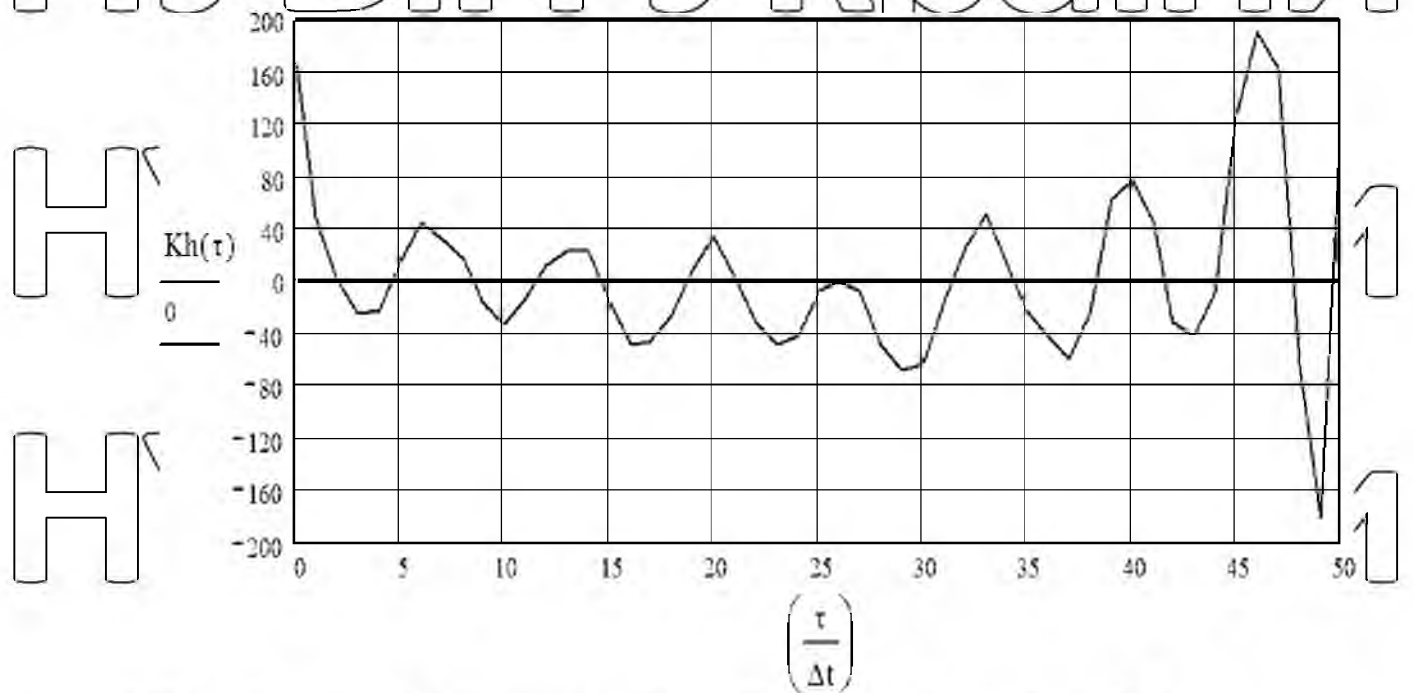


Рис. 5.14 – Графік кореляційної функції для 3 ділянки

НУБІП України

НУБІП України

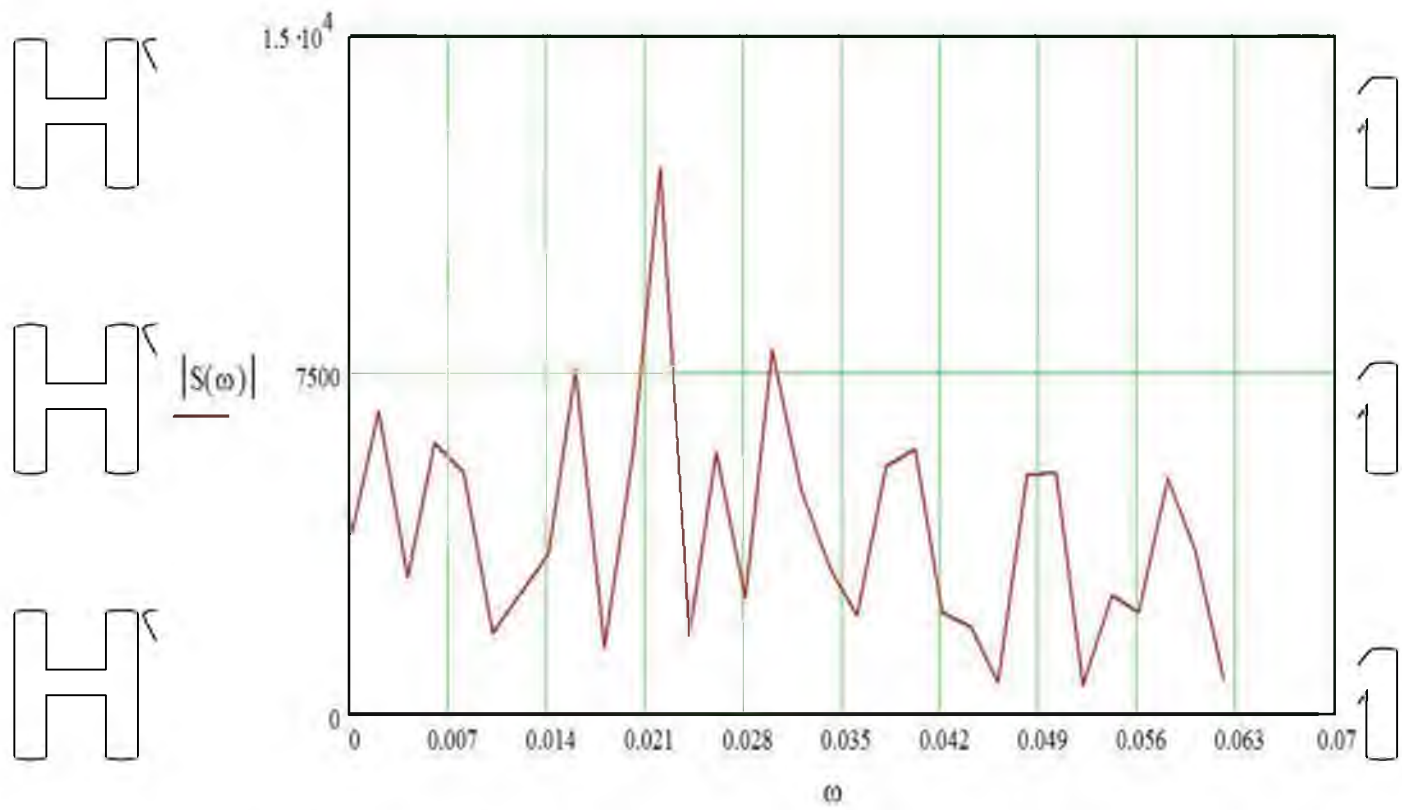


Рис. 5.15 Графік спектральної густини для 3 ділянки

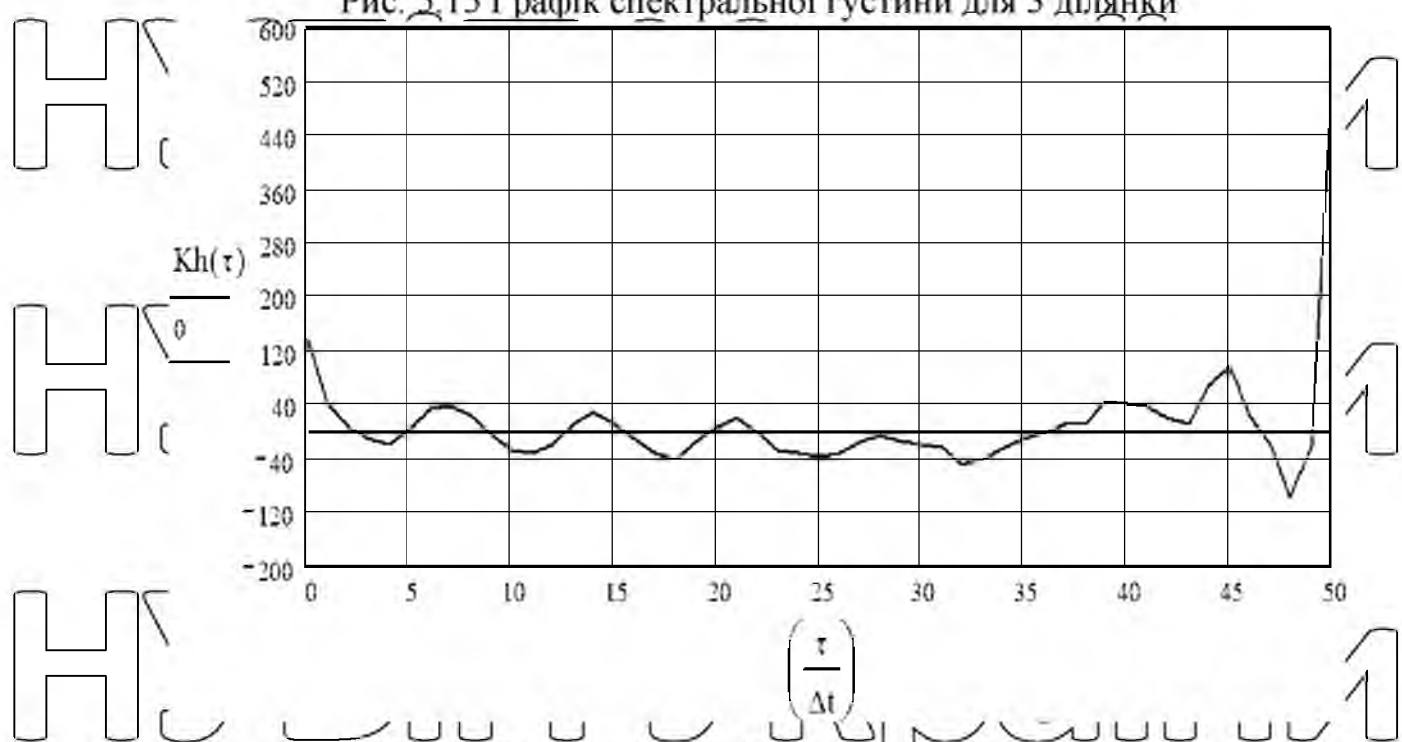


Рис. 5.16 Графік кореляційної функції для 4 ділянки

НУБІП України

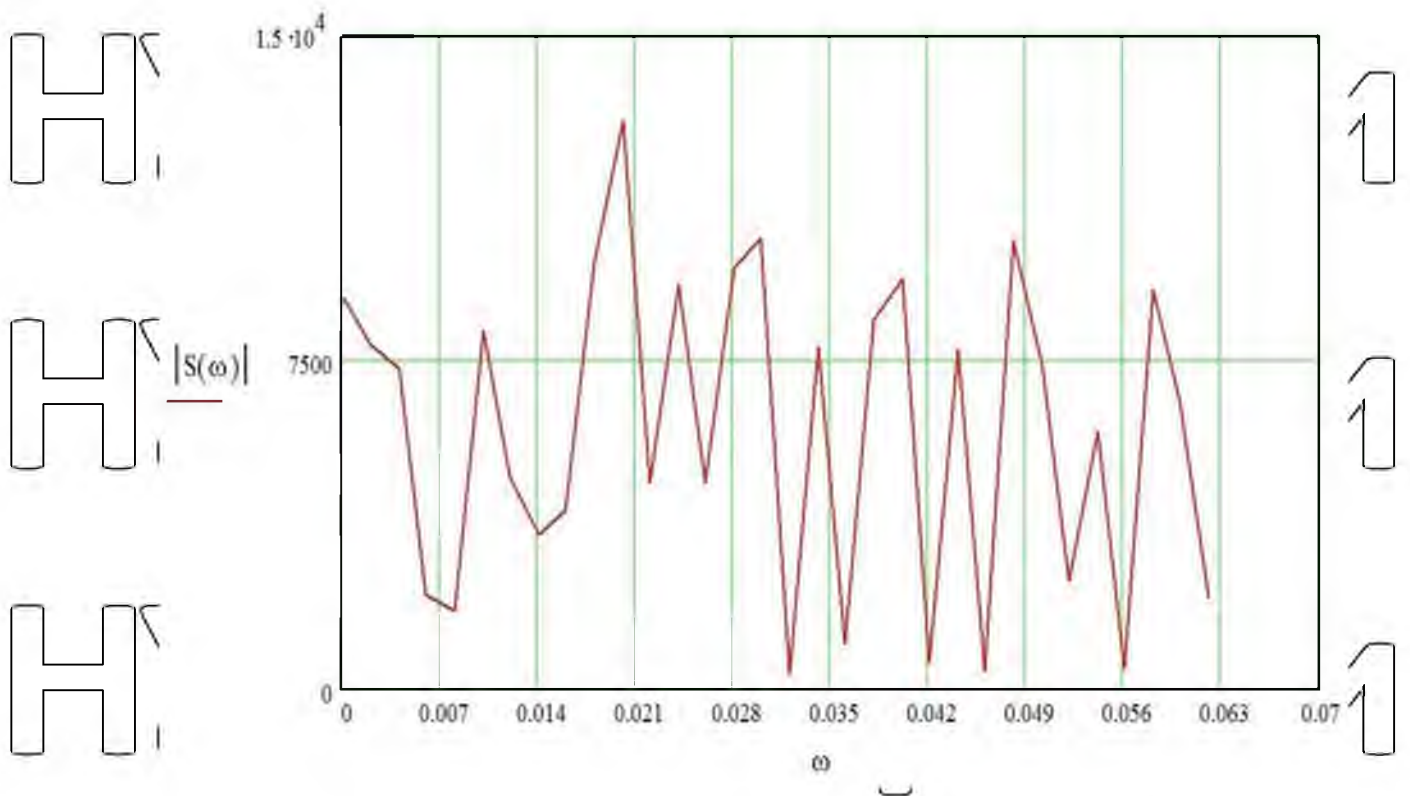


Рис. 5.17 Графік спектральної густини для 4 ділянки

За отриманими графіками спектральної щільності можна будувати висновки про те, яка частота робить найбільший внесок. Значення пікових моментів спектральної густини представлені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Значення піків спектральної щільності та інших параметрів нерівності

№ ділянки	Кутова частота $\omega$ , 1/мм	Спектральна щільність $S(\omega)$ , мм <sup>3</sup>	Крок між гребнями T, мм
1	0,016	28060	390
2	0,020	21840	315
3	0,022	12080	280
4	0,020	13040	315
5	0,018,	37610	350
6	0,016	25920	390
7	0,016	17640	390

Значення оцінок коефіцієнтів кореляції, представлених у таблиці 5.7, показують, що на ділянках 1 і 2 характер зв'язку між кроком та розмахом гребінки дуже слабкий, на 4 ділянці помірний, на 3, 5 та 7 ділянках характер зв'язку помітний. Для ділянки номер 6 визначити величину оцінки коефіцієнта кореляції між кроком та розмахом гребінки не можна, оскільки недостатньо даних.

З вище представлених таблиць видно, що найбільший крок  $T_{\max} = 390$  мм між гребенями нерівності відповідає прямолінійним ділянкам автомобільної лісовозної дороги. Найменший крок  $T_{\min} = 280$  мм, відповідає ділянкам, розташованим безпосередньо на поворотах, та середні значення кроку відносяться до місць в'їзду та виїзду з поворотів.

Це з тим, що у прямолінійних ділянках швидкість проходження автомобілів найбільша, оскільки умови руху комфортніші; на підходах до поворотів швидкість зменшується за рахунок гальмування транспортних засобів для безпечного їх проходження. Відповідно на самому повороті значення швидкості найменше, після чого слідує вихід з нього і відповідно наростає прискорення для подальшого руху прямолінійною ділянкою. Підтвердженням факту збільшення кроку між гребенями зі збільшенням швидкості руху

автомобілів також є побудована в розділі 3.2 математична модель освіти гребінки, за результатами розрахунку якої чітко видно цей зв'язок.

З перерахованого вище випливає такий висновок: величина кроку нерівностей типу гребінка на лісовозних автомобільних дорогах має пряму залежність від швидкості руху транспортних засобів. Отже, можна припустити, що є таке значення швидкості руху автомобілів, при якому утворення гребінки не відбуватиметься. Доведено, що значення коефіцієнта знеплення колеса з покриттям та коефіцієнт опору коченню при русі автомобілів зі швидкістю менше 20 км/год не змінюється, тобто є константою, зі збільшенням швидкості

значення цих коефіцієнтів починають змінюватися [19]. Звідси можна припустити, що ця швидкість  $V_{\min} = 20$  км/год і є тим порогом, з перевищенням якого починається утворення такого дефекту як гребінка. Якщо швидкість руху

автомобілів буде меншою, розглядаючи значення кроку нерівностей з таблиць 5.1 та 5.5 у літній та зимовий періоди чітко видно, що величина кроку на сніговому накаті більша, ніж величина кроку на покриттях із сипучих мінеральних матеріалів у весняний – осінній – літній період. Ці відмінності пов'язані зі швидкістю руху автомобілів та з матеріалом покриття. Так було в зимовий період багато нерівності покриття вирівнює сніговий накат плюс психологічний чинник, тобто. візуально взимку почищена від снігу лісовозна дорога здається ширшою і водій відчувається впевненіше. У сумі ці явища збільшують швидкість руху на зимових лісовозних дорогах щодо швидкості дорогами у весняно-осінньо-літній період. При розгляді розмаху нерівностей бачимо, що й значення мають різні величини. Величина розмаху залежить від часу з моменту утворення гребінки, і оскільки час зародження нерівностей не розглядалося, то щоб знайти залежність між розмірами розмахів та інтенсивністю руху, необхідно проводити додаткові дослідження.

Виконаємо порівняння значення кроку між гребенями отриманого згідно з розрахунком математичної моделі утворення нерівності типу «гребінка» та значення кроку отриманого в результаті проведення експериментальних досліджень на прямолінійних ділянках лісовозних автомобільних дорогах, що діють. Порівняння результатів подано у таблиці 5.8.

Таблиця 5.5  
Порівняння результатів

Тип розрахункового автомобіля	Значення кроку гребінки отриманого з математичної моделі, мм	Значення кроку гребінки, отриманого в результаті вимірювань на дорозі, мм	Розбіжності значень кроку гребінки, %
Легковий автомобіль	387	390	0,77
Завантажений сортиментовоз	413	390	5,89

Порожній  
сортиментовоз

986	390	152,82
-----	-----	--------

# НУБІП України

Як очевидно з розрахунків з математичної моделі, отримані значення кроку гребінки від проходів навантаженого сортиментовоза  $T_1=413\text{мм}$  і легкового автомобіля  $T_2=387\text{мм}$  пропорційні експериментальними значеннями,

представленими в таблицях 5.1, 5.4, 5.5, 5.7, і отриманими на діючих. Значення кроку гребінки, отриманої в результаті розрахунку математичної моделі для порожнього сортиментовозу, сильно відрізняються від результатів експериментального дослідження, що обумовлено жорсткістю ресор, так як вони розраховані на плавний рух у завантаженому стані, а в ненавантаженому стані ресори практично стисливі.

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

# НУБІП України

1. Перевірено метод визначення ймовірності безвідмовної роботи ділянки

дороги внаслідок втомного зношування дорожнього покриття, а саме: передбачається, що втомна тріщина зароджується на деякій глибині, в зоні дії максимальних дотичних напруг а не на поверхні, як це передбачалося раніше; розглянуто період зародження втомної підповерхневої тріщини; враховується вплив температурного фактора на рівень контактної напруги та характеристики опору втомному зношування; Так як тріщина зароджується на глибині, то при розрахунку на втомне зношування слід спиратися не на традиційні експериментальні криві втоми, а рівняння механіки руйнування.

# НУБІП України

# НУБІП України

2. Встановлено, що: гребінка утворюється в основному на дорогах з покриттям нижчого та перехідного типів; освіту гребінки можна спостерігати на

# НУБІП України

всьому протязі доріг, але найчастіше її можна зустріти на ділянці де є перехід від покриття капітального типу до покриття перехідного типу, а також на підйомах, спусках, у місцях підходу до повороту, безпосередньо на ньому самому і на виході з повороту; якщо поворот побудований у вигляді віражу, то утворення

# НУБІП України

нерівності відбувається ближче донизу поперечного профілю повороту; гребінка утворюється на ділянках, де можливо розвинути швидкість руху автомобілів вище 20 км/год;

# НУБІП України

3. Встановлено, що: при великій інтенсивності руху з одночасним випаданням опадів у вигляді дощу гребінки утворюється швидше (1-3 доби), ніж за тих самих умов, але без опадів (15 – 20 діб); гребені нерівності розташовуються перпендикулярно до осі лісовозної автомобільної дороги.

# НУБІП України

4. Виявлено, що на процес утворення гребінки найбільше впливають: швидкість руху транспортних засобів, характеристики підресорної частини автомобілів, навантаження на покриття, кількість циклів навантаження дорожнього полотна машинами, що проїжджають, а також характеристики матеріалу покриття.

# НУБІП України

5. Розроблено метод виміру нерівності типу «гребінка», який отримав

назву «максимумів – мінімумів», в результаті якого можна отримати значення кроку між гребенями нерівності та величину розмаху циклів.

6. Виявлено, що: оцінка середньої величини кроку гребінки в зимовий період на покритті у вигляді снігового накату  $T_1$  490 мм, що на 30% більше, ніж оцінка середньої величини кроку гребінки  $T_2$  350 мм у літній період на гравійному покритті. Така розбіжність утворилася через різницю властивостей матеріалів покриття лісовозних автомобільних доріг, і навіть умов руху автомобілів.

Аналіз результатів експериментального обстеження ділянок лісовозних автомобільних доріг за допомогою кореляційного аналізу показав залежність кроку між гребенями та розмахом циклу. Спектральний аналіз дозволив виявити частотний характер нерівності та показав залежність розмірів нерівності типу гребінка від таких параметрів як: швидкісний режим руху лісовозною дорогою, наявність поворотів, підйомів, спусків, матеріал покриття тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бавбель, Є.І. Обґрунтування розміщення лісотранспортних мереж/Є.І. Бавбель, П.А. Лищик / Лісовий журнал. - 2019. - №4. - С. 82-88.
2. Буторін, Н.М. Транспортна мережа для освоєння лісового масиву/Н.М. Буторін // Лісовий журнал. - 2014. - №6. - С. 40-44.
3. Тітова Л.Л. Методи оптимізації параметрів виробничих процесів машин для лісотехнічних робіт. Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2022» (17-19 травня 2022 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2022. С. 120-124
4. L. Titova, T. Yaremchuk. Condition of maintenance system equipment that ensures the reliability of its operation. Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2022» (17-19 травня 2022 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2022. С. 117-120
5. Тітова Л.Л. Ефективність валильно-пакувальних машин для лісотехнічних робіт. Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2022» (17-19 травня 2022 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2022. С. 86-97
6. Тітова Л.Л. Схема паралельно-послідовного виконання механізованого виробничого процесу лісозаготівлі. Збірник тез VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 6 квітня 2022 р., м. Житомир, С. 45-47.
7. Тітова Л.Л. Алгоритм перевірки статистичних даних на унімодальність виробничих процесів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 115-ї річниці

від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 24-25 лют. 2022 р., м. Київ / МОН

України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2022. С. 225-228

8. Герасимов Ю.Ю. Розробка системи оптимального проектування мережі лісовозних автомобільних доріг // Інформаційні технології. 2021. № 1 (68)

9. Григор'єв І.В., Шкрум В.Д. Вплив роботи колісних рушіїв на лісові ґрунтогрунти / Матеріали міжвузівської науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи лісового комплексу», Львів 26-27 травня 2015 Т. 1, С. 103-107.

10. Офіційний інтернет - портал України [Електронний ресурс]. (<http://www.gov.karelia.ru/Leader/Document/Les/a02.html>). Перевірено 10.03.2015.

11. Петровський С.М. Метод визначення середнього напрацювання повнієї ділянки лісовозної автомобільної дороги внаслідок втомного зношування дорожнього покриття // Підвищення ефективності лісового комплексу України: матеріали третьої республіканської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів, докторантів. - Львів, 2016. - С. 30-33

12. Правила діагностики та оцінки стану автомобільних доріг (ОДН 218.0.006-2002) / Мінтранс України. - М.: Транспорт, 2022. - 131 с.

13. Салмінен Е. О., Борозна А. А., Тюрін Н. А. Лісопромислова логістика. Навч. допомога. - Львів, 2021. - 188 с.

14. Dai Q., Hendrics F., Marchon B. Modeling washboard ефект на head/disk interface/ Journal of applied physics. Vol.96 2014. P. 696-703.

15. Douglas A. Kurtze / The genesis of washboard roads / International journal of modern physics, vol.15, 2021, P.24-25.

16. Erdogan, F. Crack propagation theories [Текст] NASA-CR-901, 2017.

17. Дорман, R.G. Kearney, V.E. Engle, R.M. J. Basic Eng. 89D, 2017. 459 p.

18. Janoo, V., i Shoop, S. (2004). "Influence of spring thaw on pavement rutting." *UNBAR6 Pavements Unbound*, Nottingham, UK, 115-124

19. Karjalainen, T. Intensification forest management and improvement of woodharvestinginNorthwestRussia:finalreporttothersearchproject / T.

Karjalainen, T., Leimonen, Y., Gerasimov [et al.] // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. - Joensuu: Metla, 2019. - Vol. 110. - 151 p.

20. Fiber-Reinforced Fly Ash Subbases in Rural Roads / P. Kumar, SP Singh // Journal of Transportation Engineering. - 2018. - Vol. 134, No. 4. - P. 171-

180

21. Тітова Л.Л., Глоба В.С. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ АМОРТИЗАТОРІВ АВТОМОБІЛІВ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ. Збірник

тез доповідей II Міжнародній науково-практичній конференції «OSHAgro – 2022» (30 вересня 2022 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2022. С. 149-153

22. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Обґрунтування технічних заходів підтримання працездатності машин для лісотехнічних робіт. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. Вип. 160 «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу». – С. 189–195.

23. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Класифікація машин для лісотехнічних робіт за нормативною періодичністю відновлення їх працездатності. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 167 «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу». – С. 189–195.

24. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Імітаційні моделі відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Вісник Харківського національного

технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.  
– Харків: ХНТУСГ, 2016. – Вип. 178 «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу». – С. 77–85.

25. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ СИСТЕМНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ РОБІТ. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2016. – Вип. 178 «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу». – С. 100–107.

26. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Алгоритм розподілу об'ємів відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 167 «Деревооброблювальні технології та системотехніка лісового комплексу». – С. 189–195.

27. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Аналіз періодичності техобслуговування машин для лісотехнічних робіт. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. К., 2015. Вип. 212, ч. 1. С. 322–328.

28. Тітова Л.Л., Роговський І.Л., Надточій О.В. Імітаційність місцеперебування засобу відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Сільськогосподарські машини – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – Вип. 33. – С. 140–149.

29. Тітова Л.Л., Надточій О.В. Використання спектрального аналізу вібросигналів дизельного двигуна для виявлення появи дефектів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. – К., 2016. – Вип. 241. – С. 151–158.

30. Тітова Л.Л., Роговський І.Л. Ефективність відновлення працездатності машин для лісотехнічних робіт. Техніко-технологічні аспекти розвитку та

випробування нової техніки, технологій для сільського господарства України. Дослідницьке. 2017. Вип. 21(35). С. 72–80.

31. Liudmyla Titova, Ivan Rogovskiy Technology recovery of power device of machines for forestry work. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК [Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: Technique and energy of APK]. Київ. 2017. Вип. 258. С. 369—380.

32. Тітова Л.Л. Діагностування насос-форсунок дизелів машин для лісотехнічних машин. Вісник Сумського національного аграрного університету. СЕРІЯ «Механізація та автоматизація виробничих процесів» ВИПУСК 5 (33) 2018, С. 9-14

33. Надточій О.В., Тітова Л.Л. Перспективні джерела струму мобільної сільськогосподарської техніки. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv, Ukraine. Редкол.: С. М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. Київ. 2019. Вип. 10. № 1. С. 83-90 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online)

34. Войналович О. В., Гнатюк О. А., Поліщук О. Г. Тітова Л.Л. Ймовірнісний метод аналізу ступеню небезпеки експлуатації тракторів на засадах даних дефектоскопії деталей. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv, Ukraine. Редкол.: С. М. Ніколаєнко (відп. ред.) та ін. Київ. 2019. Вип. 10. № 1. С. 121-126 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online)

35. Надточій О.В., Тітова Л.Л. Метод пошуку екстремуму багатомірних функцій при вирішенні інженерних задач машин для лісотехнічних робіт. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv, Ukraine. 2020, Vol. 11, No 4, P. 131-141 ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), [www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica](http://www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica)

36. Mays, DC, and Faybishenko, BA (2020). "Washboards in unpaved highways as a complex dynamic system." Complexity, 5 (6), 51-60.

37. Paris, P., Erdogan, F. Критична аналітика crack propagation laws [Текст] / J. Basic Eng. Trans. ASME. 2017. P. 528-534.

38. Pierre, P. Laboratory study on relative performance of treated granular materials used for unpaved roads / P. Pierre, J.-P. Bilodeau, G. Légère, G. Doré // Canadian Journal of Civil Engineering. - 2018. - Vol. 35. - P. 624-634.

39. Pitukhin AV Fracture mechanics and optimal design. // International journal for numerical methods in engineering. 2022. №3 (34). P. 933-940.

40. Pitukhin AV Optimal design problems using fracture mechanics methods. //Computers and structures. 2017. №4 (65). P. 621-624.

41. Saarelainen, S., Onninen, H., Kangas, H., i Pihlajamaki, J. (2019). "Full-scale accelerated testing pavement on thawing, frost-susceptible subgrade (CS8-3)." Proc., Int. Conf. на Accelerated Pavement Testing, Reno, Nev. (www.tieh.fi/tppt/hvsr).

42. Sandler, IS, DiMaggio, FL, i Baladi, GY (2016). "Generalized cap model for geological materials." J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 102 (7), 683-699.

43. Sesions J., Forest road Operations in the Tropics/2017. 170p.

44. Shoop, S., Affleck, R., Janoo, V., i Haehnel, R. (2013). "Modeling deformation of thawing soil under vehicle loading." Proc., 3rd Int. Symp. на Deformation Characteristics of Geomaterials, Lyon, France, 931-938.

45. Shoop, SA, Affleck, R., Janoo, V., Haehnel, R., i Barrett, B. (2015). "Constitutive model of a thawing, frost susceptible sand." ERDC-CRREL Technical Rep. TR-05-3, US Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH

46. Shoop S., Asce M., Haehnel R., Janoo V., Asce M., Harjes D., Liston R., Seasonal deterioration of unsurfaced roads/ Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2016. P. 852 - 860.

47. Shoop, SA (2021). "Finite-element modeling of tire-terrain interaction." Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich.

48. Shoop, S., Haehnel, R., Janoo, V., i Harjes, D. (2022). "Seasonal deterioration

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України