



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**ДСТУ ISO 13473-4:2020
(ISO/TS 13473-4:2008(E), IDT)**

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШОРСТКОСТІ ЗА
ДОПОМОГОЮ ПРОФІЛІВ ПОКРИТТЯ**

Частина 4

Спектральний аналіз профілів покриття

(проект, перша редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
202X

ПЕРЕДМОВА

- 1 РОЗРОБЛЕНО: Технічний комітет стандартизації «Автомобільні дороги і транспортні споруди» (ТК 307), Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ)
- 2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від ____ 201__ р. № ____ з 201__
- 3 Національний стандарт відповідає ISO/TS 13473-4 Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface (Визначення характеристик шорсткості за допомогою профілів покриття – Частина 4: Спектральний аналіз профілів покриття)

Ступінь відповідності – ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

- 4 Цей стандарт розроблено згідно з правилами, установленими в національній стандартизації України
- 5 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

**Право власності на цей національний стандарт належить державі.
Заборонено повністю чи частково видавати, відтворювати
здля розповсюдження і розповсюджувати як офіційне видання
цей національний стандарт або його частину на будь-яких носіях інформації
без дозволу ДП «УкрНДНЦ» чи уповноваженої ним особи**

ДП «УкрНДНЦ», 202X

ЗМІСТ

Національний вступ	v
1 Сфера застосування	1
2 Нормативне посилення	2
3 Терміни та визначення	3
4 Основні принципи методології просторово-частотного аналізу ..	8
5 Відбір профілів поверхні	9
5.1 Відбір ділянок дороги	9
5.2 Вимірювання лабораторних зразків	12
6 Загальні принципи та вимоги	13
6.1 Вимоги щодо профілометрів	13
6.2 Перетворення просторових частот у часові частоти	13
6.3 Викиди	15
6.4 Фільтрація захисту від накладення спектрів	17
6.5 Цифрова вибірка	17
7 Спектральний аналіз в пропорційних смугах частот (октавна або третьоктавна смуги) методом аналогової фільтрації (Метод 1)	18
8 Спектральний аналіз в пропорційних смугах частот (октавна або третьоктавна смуги) методом цифрової фільтрації (Метод 2).	19
9 Спектральний аналіз в постійних вузьких смугах частот за допомогою дискретного (швидкого)методу перетворення Фур'є (Метод 3)	21
9.1 Огляд методології	21
9.2 Видалення уклону і зміщення	22
9.3 Віконне перетворення	22
9.4 Дискретне перетворення Фур'є та спектральна щільність потужності	25

9.5 Роздільна здатність довжини хвилі	26
10 Перетворення спектральних даних постійної смуги частот в спектральні дані пропорційної смуги частот	27
11 Невизначеність результатів аналізу	29
12 Звіт щодо результатів аналізу	30
Додаток А (нормативний) Невизначеність результатів спектрального аналізу	32
Додаток В(інформаційний)Накладення спектрів	40
Додаток С (інформаційний)Оцінка відхилення енергії в діапазоні частот через коливання швидкості	42
Додаток D (інформаційний)Компенсація коливань швидкості під час обробки результатів вимірювань	44
Додаток Е (інформаційний) Пояснення залежності між роздільною здатністю довжини хвилі та просторово-частотною роздільною здатністю	45
Додаток F (інформаційний) Спектральний аналіз та асиметрія профілю	46
Бібліографія	49

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ ISO 13473-4:2020 «Визначення характеристик шорсткості за допомогою профілів покриття — Частина 4: Спектральний аналіз профілів покриття» прийнятий методом перекладу, ідентичний щодо ISO/TS 13473-4:2002 Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface.

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- слова «цей європейський стандарт» замінено на «цей стандарт»;
- структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення понять» – оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- вилучено «Передмову» до ISO/TS 13473-4:2002 як таку, що безпосередньо не стосується технічного змісту цього стандарту.

Копії нормативних документів, на які є посилання в цьому стандарті, можна отримати в національному фонді нормативних документів.

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШОРСТКОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОФІЛІВ ПОКРИТТЯ. ЧАСТИНА 4. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОФІЛІВ ПОКРИТТЯ

ISO/TS 13473-4 Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface

Чинний від 202X-XX-XX

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Ці Технічні умови описують методи, доступні для проведення спектрального аналізу сигналів профілю поверхні дорожнього покриття. Визначено три можливі методи просторово-частотного аналізу (або аналізу довжини хвилі шорсткості) двовимірних профілів поверхні, які описують амплітуду нерівностей дорожнього покриття як функцію відстані по прямій чи вигнутій траєкторії над дорожнім покриттям.

Результатом частотного аналізу буде спектр просторової частоти (або довжини хвилі шорсткості) у пропорційних смугах частот октавної або третьоктавної смуги пропускання.

Ці Технічні умови пропонують три альтернативні методи отримання цих спектрів:

- 1) аналогова фільтрація пропорційної смуги частот;
- 2) цифрова фільтрація пропорційної смуги частот;
- 3) аналіз постійної вузької смуги частот за допомогою дискретного перетворення Фур'є з подальшим перетворенням вузькосмугового спектра в спектр октавної або третьоктавної смуги.

Метою цих технічних умов є стандартизація спектральної характеристики профілів поверхні дорожнього покриття. Реалізацію цієї мети забезпечено шляхом надання детального опису методів аналізу та відповідних вимог до тих, хто бере участь у визначенні характеристик

дорожнього покриття, але не ознайомлений із загальними принципами частотного аналізу випадкових сигналів. Ці методи та вимоги, як правило, можуть бути застосовні до всіх типів випадкових сигналів, але ті, що докладно розроблені в цих Технічних умовах, призначені для їх використання щодо сигналів профілю поверхні дорожнього покриття.

Примітка. Користувач цих Технічних умов повинен знати, що спектральний аналіз, як зазначено в цьому документі, не може представити всі характеристики профілю поверхні, що досліджується. Зокрема, наслідки асиметрії профілю, наприклад, різниця певних функціональних якостей для «позитивного» та «негативного» профілів не може бути виражена спектральною щільністю потужності, оскільки вона не враховує будь-яку асиметрію сигналу. (Див. Додаток F.)

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Наступні посилання на документи є обов'язковими для застосування цього документа. Для датованих посилань застосовуються лише наведені видання. Для недатованих посилань застосовується остання редакція зазначеного документа (включаючи будь-які поправки)

ISO 13473-2:2002, Визначення характеристик шорсткості за допомогою профілів покриття — Частина 2: Термінологія та основні вимоги щодо аналізу профілів шорсткості покриття

ISO 13473-3, Визначення характеристик шорсткості за допомогою профілів покриття — Частина 3: Специфікація і класифікація профілометрів

IEC 61260, Electroacoustics — Octave-band and fractional-octave-band filters

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

Для цілей цього документу застосовуються терміни та визначення, які наведено в ISO 13473-2:2002.

З метою допомоги користувачам, найбільш важливі терміни та визначення з ISO 13473-2:2002 було скопійовані в ці Технічні умови.

3.1 довжина хвилі (шорсткості) ((*texture*) wavelength)

Л

Величина, що описує горизонтальний розмір амплітудних змін профілю поверхні.

Примітка 1. Довжина хвилі (шорсткості) зазвичай вимірюється в метрах (м) або міліметрах (мм).

Примітка 2. Довжина хвилі - це величина, яка зазвичай використовується і прийнята в словниках з електротехніки та обробки сигналу. Оскільки для багатьох користувачів цих Технічних умов може бути не звичним використовувати термін "довжина хвилі" щодо застосувань у дорожній сфері, а електричні сигнали часто використовуються під час аналізу профілів дорожнього покриття, існує ймовірність плутанини. Отже, термін «довжина хвилі шорсткості» є кращим для чіткого розмежування стосовно інших застосувань.

Примітка 3. Профіль може розглядатися як стаціонарна, випадкова функція відстані вздовж поверхні. За допомогою аналізу Фур'є таку функцію можна математично представити у вигляді нескінченного ряду синусоїдальних компонентів різних частот (і довжин хвиль), кожна з яких має задану амплітуду та початкову фазу. Для типових і безперервних профілів поверхні профіль, що проаналізований за компонентами Фур'є, містить безперервний розподіл довжин хвиль. Довжина хвилі шорсткості в ISO 13473 є зворотною величиною просторової частоти, одиниця виміру якої є зворотний метр(еквівалент циклів на метр). Також див. 3.14.

Примітка 4. Довжини хвиль можуть бути фізично представлені як різні довжини періодично повторюваних частин профілю.

3.2 вибірка профілю (*profile sampling*)

Вибір репрезентативних частин поверхні дороги, за якими буде вимірюватися профіль.

3.3 профілометр (*profilometer*)

Пристрій, що використовується для вимірювання профілю поверхні дорожнього покриття.

Примітка. Сучасні конструкції профілометрів, що застосовуються в дорожній галузі, включають, але не обмежуються ними, датчики на основі лазера, секціонування світла, голки та технологій ультразвукової діагностики.

3.4 швидкість вимірювання (*measurement speed*)

V

Швидкість, з якою датчик профілометра проходить по поверхні, що вимірюється.

Примітка. Швидкість вимірювання зазвичай вимірюється в кілометрах на годину (км/год.) або метрах в секунду (м/с).

3.5 цифрова вибірка сигналу (*digital signal sampling*)

Визначення дискретних значень вимірювання сигналу в регулярно розташованих точках даних (і подальше перетворення цих значень у цифровий код).

Примітка. У цьому загальному визначенні цифрової вибірки сигналу регулярний інтервал між точками даних може застосовуватися як в часовій, так і в просторовій області, залежно від домену (часовий або просторовий), в якому вловлюється сигнал.

3.6 інтервал вибірки (*sampling interval*)

Відстань між двома суміжними точками даних на поверхні, що дорівнює швидкості вимірювання, поділеній на частоту вибірки датчика.

Примітка. Інтервал вибірки зазвичай вимірюється в міліметрах (мм).

3.7 довжина вимірювання профілю (*profile measurement length*)

I_P

Довжина безперервного вимірювання профілю.

Примітка. Довжина вимірювання профілю зазвичай вимірюється в метрах (м) або міліметрах (мм).

3.8 інтервал повторення (*repetition interval*)

r

Відстань між початком двох послідовних вимірювань довжини профілю, остання визначена в 3.7.

Примітка. Інтервал повторення зазвичай вимірюється в метрах (м).

3.9 довжина оцінки (*evaluation length*)

l

Довжина зразка з профілю, який був або має бути проаналізований.

Примітка 1. Довжина оцінки може дорівнювати, а може і не дорівнювати довжині вимірювання профілю (але ніколи не буде більшою).

Примітка 2. Довжина оцінки, як правило, вимірюється в метрах (м) або міліметрах (мм).

3.10 викид (*drop-out*)

Виміряна точка (вимір) у профілі, яка визнається недійсною і яка зазвичай відкидається під час подальшої обробки даних.

3.11 рівень викидів (*drop-out rate*)

Відсоток (%) виміряних точок в межах довжини оцінки, які визнаються недійсними.

3.12 Нульова середня крива профілю з видаленням уклонів (*zero-mean, slope-suppressed profile curve*)

$Z(x)$

Крива профілю, $Z(x)$, для якої середній рівень профілю по довжині оцінки доведений до нуля і для якої були видалені довгохвильові тенденції.

Примітка 1. Для отримання кривої профілю, корисної для математичних розрахунків, необхідно видалити будь-які компоненти уклону або довгих хвиль (видалення уклону), а також довести середній рівень профілю по довжині оцінки до нуля (видалення зміщення) . Це може бути здійснено шляхом згладжування методом найменших квадратів, див. 9.2. Отримана середня лінія профілю знаходиться на нульовому рівні, див. рис. 3.1.

Примітка 2. Особливості на рисунку (3.1) перебільшено з метою зробити ілюстрацію більш зрозумілою. Якщо застосовується метод найменших квадратів щодо профілю, два кроки зліва направо на рисунку виконуються за одну операцію (що може бути виконано також за допомогою фільтру високої частоти).

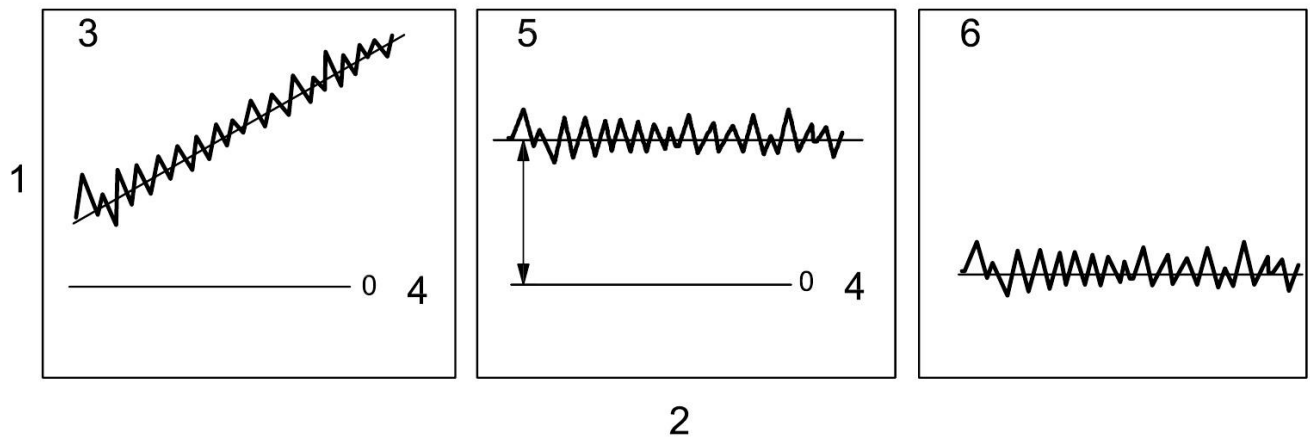
3.13 спектр профілю поверхні (*surface profile spectrum*)

спектр шорсткості (*texture spectrum*)

спектр нерівності (*unevenness spectrum*)

Спектр, отриманий після аналізу кривої профілю цифровими або аналоговими методами фільтрації для визначення величини її спектральних компонентів на різних довжинах хвиль (3.1) або просторових частотах (3.14).

Примітка. Спектр шорсткості представляє величину кожного спектрального компонента як функцію або довжини хвилі шорсткості, або просторової частоти.



Умовні позначки:

- 1 - вертикальна відстань;
- 2 - горизонтальна відстань;
- 3 - оригінальний профіль;
- 4 - 0 рівень;
- 5 - застосовано видалення уклону;
- 6 - застосовано видалення зміщення.

Рисунок 3.1 – Ілюстрація видалення уклонів та зміщення

3.14 просторова частота (*spatial frequency*)

Зворотна величина довжини хвилі (шорсткості).

Примітка 1. Просторова частота зазвичай вимірюється у зворотних метрах (m⁻¹); див. також 3.1, Примітка 3.

Примітка 2. Термін «частота», що використовується у часовій області, точніше «часова частота», відповідає «просторовій частоті» в просторовій області.

3.15 рівень профілю (шорсткості) поверхні (*surface (texture) profile level*)

$L_{tx,\lambda}$

Логарифмічне перетворення амплітудного представлення кривої профілю поверхні $Z(x)$, остання виражається як середньоквадратичне значення.

Приклад. $L_{tx,80}$ позначає рівень профілю шорсткості для третьоктавної смуги частот, що має середню довжину хвилі 80 мм, див. Таблицю 1 в ISO13473-2:2002.

Примітка 1. Рівень профілю шорсткості може бути виражений таким рівнянням:

$$L_{TX,\lambda} \text{ або } L_{tx,\lambda} = 10 \lg \frac{a_{\lambda}^2}{a_{ref}^2} = 20 \lg \frac{a_{\lambda}}{a_{ref}} \text{ dB}, \quad (3.1)$$

де $L_{tx, \lambda}$ – рівень профілю шорсткості в третьоктавній смузі частот (опорне значення 10^{-6} м), в децибелах;

$L_{TX, \lambda}$ – рівень профілю шорсткості в октавній смузі частот (опорне значення 10^{-6} м), в децибелах;

a_{λ} – середньоквадратичне значення вертикального зміщення профілю поверхні, в метрах;

a_{ref} – опорне значення ($=10^{-6}$ м);

λ – індекс, що вказує значення, отримане за допомогою фільтра третьоктавної або октавної смуги частот, що має довжину середньої хвилі λ .

Примітка 2. Фільтри октавної та третьоктавної смуги частот зазначено в 4.4 ISO 13473-2: 2002.

Примітка 3. Амплітуди шорсткості, виражені як середньоквадратичне значення, відфільтровані чи ні, можуть мати діапазон декількох величин; як правило, від 10-5 м до 10-2 м. Спектральна характеристика сигналів часто використовується в дослідженнях у сфері акустики, вібрацій та електротехніки. У всіх цих областях найчастіше використовують логарифмічні шкали амплітуди. Такий же підхід є кращим у цій частині ISO 13473.

Примітка 4. Рівні профілю шорсткості, на практиці, під час проектування дорожнього покриття, зазвичай коливаються від 20 дБ до 80 дБ з цими визначеннями.

3.16 спектральна щільність потужності (*power spectral density*)

СЩП

Величина, що виражає потужність сигналу на одиницю частоти або на одиницю довжини хвилі як функцію частоти або довжини хвилі.

Примітка 1. У разі відфільтрованого в смузі пропускання сигналу у часовій області СЩП може бути визначена як граничне значення часового усередненого зведеного в квадрат сигналу в межах певного інтервалу частот, поділеного на пропускну здатність цього інтервалу частот, коли ширина смуги пропускання дорівнює нулю і час усереднення прямує до безкінечності, в результаті чого спектр представлений у вигляді квадрата амплітуди на одиницю частоти, як виражено рівнянням (3.2).

$$X_{\text{СЩП}} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0, T \rightarrow \infty} \frac{1}{(\Delta f)T} \int_0^T x^2(f_0, \Delta f, t) dt, \quad (3.2)$$

де $X_{\text{СЩП}}$ - спектральна щільність потужності часового сигналу х;

Δf - пропускну здатність інтервалу частот у герцах, Гц;

T - час усереднення в секундах, с.

Примітка 2. У разі дискретного перетворення Фур'є дискретизованого сигналу СЩП може бути визначена як квадрат величини компонентів ряду Фур'є, поділений на ефективну пропускну здатність (вузьких) смуг спектру Фур'є (9.4).

Примітка 3. У разі спектрального аналізу профілю поверхні дорожнього покриття сигнал не є функцією часу, а є функцією довжини оцінки l . Спектральна щільність потужності може бути задана як функція просторової частоти або довжини хвилі (шорсткості) і вимірюється, відповідно, в $\text{м}^2/\text{м}^{-1} = \text{м}^3$ або в $\text{м}^2/\text{мм}$.

Примітка 4. Слово «потужність» у цьому значенні походить з термінології, що використовується в сфері електричного та акустичного сигналу, де сигнали містять фактичну потужність і де квадрат амплітуди є мірою цієї потужності.

4 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ МЕТОДОЛОГІЇ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОГО АНАЛІЗУ

Переважно, існує три альтернативні методи отримання спектра просторової частоти в пропорційних смугах частот октавної або третьоктавної смуги, а саме:

Метод 1 – аналогова фільтрація пропорційної смуги частот;

Метод 2 – цифрова фільтрація пропорційної смуги частот;

Метод 3 – аналіз постійної вузької смуги частот за допомогою дискретного перетворення Фур'є з подальшим перетворенням вузькосмугового спектра в спектр октавної або третьоктавної смуги.

Передбачається, що всі три методи дадуть еквівалентні результати (у межах довірчих інтервалів, що виникають внаслідок невизначеності вимірювань та аналізу), за умови високої якості сигналу (крім усього іншого: без викидів) та відповідності всіх компонентів обробки сигналу у кожному з методів вимогам, які зазначено у цих Технічних умовах. Однак, якщо сигнал має викиди, метод 1 не рекомендується, оскільки він не передбачає можливості обробки викидів, що може призвести до помилкових результатів.

Методи 2 та 3 дадуть цілком еквівалентні результати. Метод 3 включає більше етапів, ніж метод 2, але може забезпечити більшу гнучкість у виборі параметрів аналізу.

Три альтернативні методи наведено на схемі на рисунку (4.1). Зліва показано етапи аналогової фільтрації пропорційної смуги частот, в середині - етапи цифрової фільтрації пропорційної смуги частот, справа показано етапи аналізу за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

Примітка 1. У разі поетапного підходу в методі 2, етапи «цифрова вибірка» та «цифрова фільтрація» можуть бути об'єднані.

Примітка 2. Різні етапи методів 2 і 3 можуть бути реалізовані як в апаратному, так і в програмному забезпеченні.

5 ВІДБІР ПРОФІЛІВ ПОВЕРХНІ

5.1 Відбір ділянок дороги

Найбільш поширений і рекомендований спосіб відбору профілів поверхні ділянки дороги – по прямій лінії в поздовжньому напрямку дороги. Альтернативно, профілометр може слідувати іншій траєкторії, яка адаптована до характеру обстеження, наприклад, поперечна та коса лінії, коло, спіраль або синусоїда. Відбір по прямій лінії в поздовжньому напрямку може проводитися як на лівій, так і на правій колісній колії, або між колісними коліями.

У будь-якому випадку тип та положення траєкторії відбору мають бути точно зазначені. Спектральний аналіз має проводитись використовуючи набір даних, які отримано лише з одного типу траєкторії.

Необхідна довжина оцінки залежить від частотного аналізу, який слід виконати. Вимоги щодо довжини оцінки l_e такими:

$$\begin{aligned} l &\geq 5\lambda_{\max} \text{ для октавних смуг} \\ l &\leq 15 \lambda_{\max} \end{aligned} \quad (5.1)$$

де $\lambda_{\max}$ – найдовша (треть-) октавна смуга середньої довжини хвилі, що використовується в спектральному аналізі.

Примітка. Ці вимоги означають, що рівні октавних смуг, відповідно рівням третьоктавних смуг, визначені за цими довжинами оцінки, будуть знаходитись у межах 95 % довірчого інтервалу приблизно ± 3 дБ навколо справжніх рівнів діапазону (результатом може бути нескінченно велика довжина оцінки).

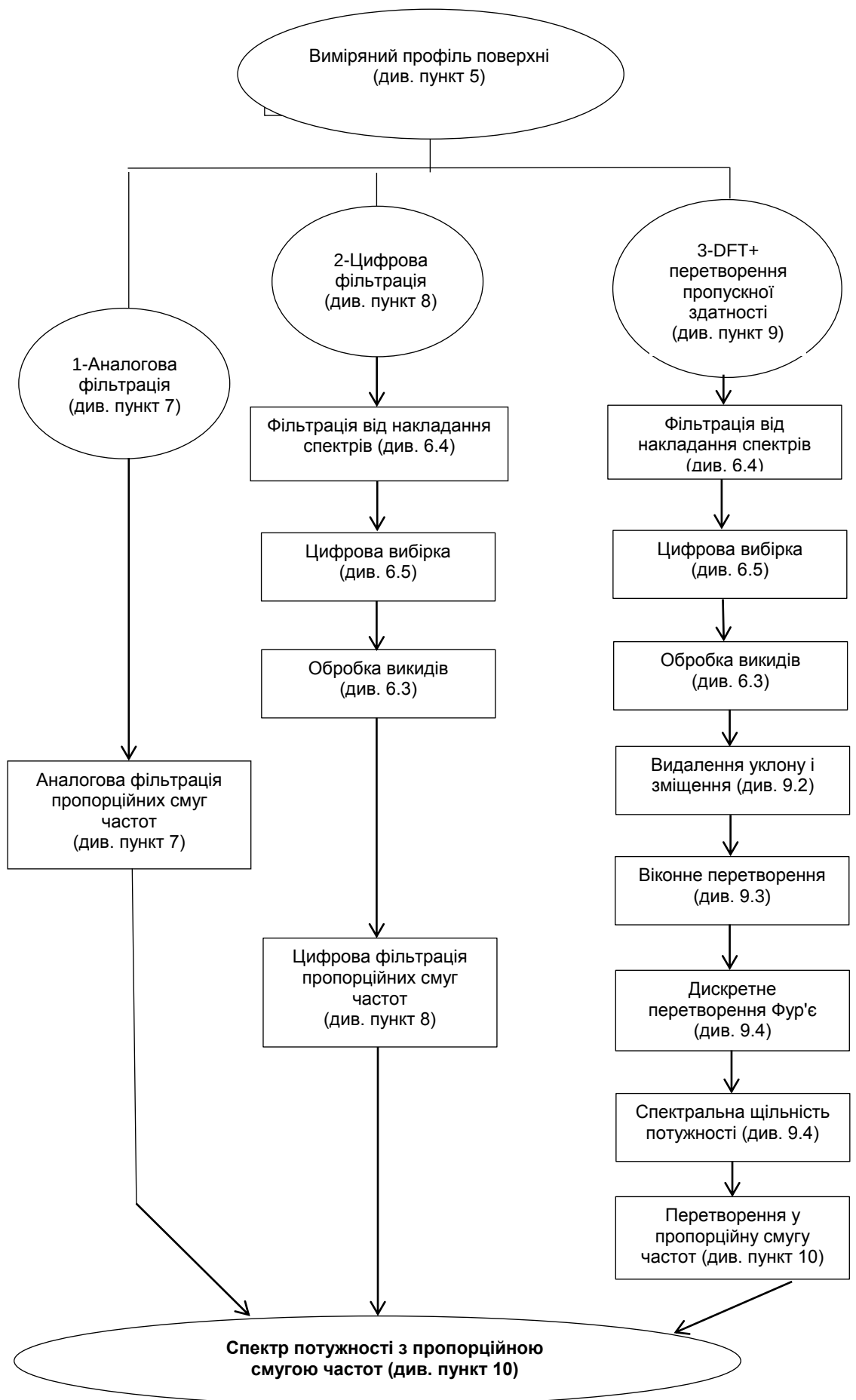


Рисунок 4.1 — Схема спектрального аналізу з посиланням на пункти та підпункти, в яких розглядається тема

Примітка. Ці вимоги означають, що рівні октавних смуг, відповідно рівням третьоктавних смуг, визначені за цими довжинами оцінки, будуть знаходитись у межах 95% довірчого інтервалу приблизно ± 3 дБ навколо справжніх рівнів діапазону (результатом може бути нескінченно велика довжина оцінки).

Для відбору тестових ділянок у поздовжньому напрямку рекомендується така процедура.

Мають бути проведені кілька вимірів профілю, розподілених по довжині ділянки дороги. Довжина кожного вимірювання профілю та/або довжина оцінки повинні бути досить великими, щоб відповідати вимогам щодо максимальної довжини хвилі, як наведено у рівнянні (5.1). Вимірювані профілі мають бути рівномірно розподілені вздовж випробувальної ділянки.

Кількість вимірювань профілю повинна бути такою, щоб характеристики поверхні були добре представлені вимірними частинами випробувальної ділянки. Виміряні профілі аналізуються окремо. Коли виміряні профілі формують репрезентативний зразок з випробувальної ділянки, відносне стандартне відхилення може розглядатися як оцінка ступеня зміни характеристик поверхні вздовж випробувальної ділянки.

Рекомендується, щоб кожна довжина оцінки була не менше 1 м; така довжина оцінки забезпечує діапазон третьоктавної смуги $\lambda_{\max}$ приблизно 0,08 м, що достатньо для покриття діапазону макрошорсткості.

Приклад. Див. рис. 4.2.

довжина випробувальної ділянки l_r ;

найдовша довжина хвилі (шорсткості) $\lambda_{\max}$;

кількість вимірювань профілю N_p ;

довжина оцінки l ;

довжина вимірювання профілю l_p ;

інтервал повторення $r = l_r/N_p$.

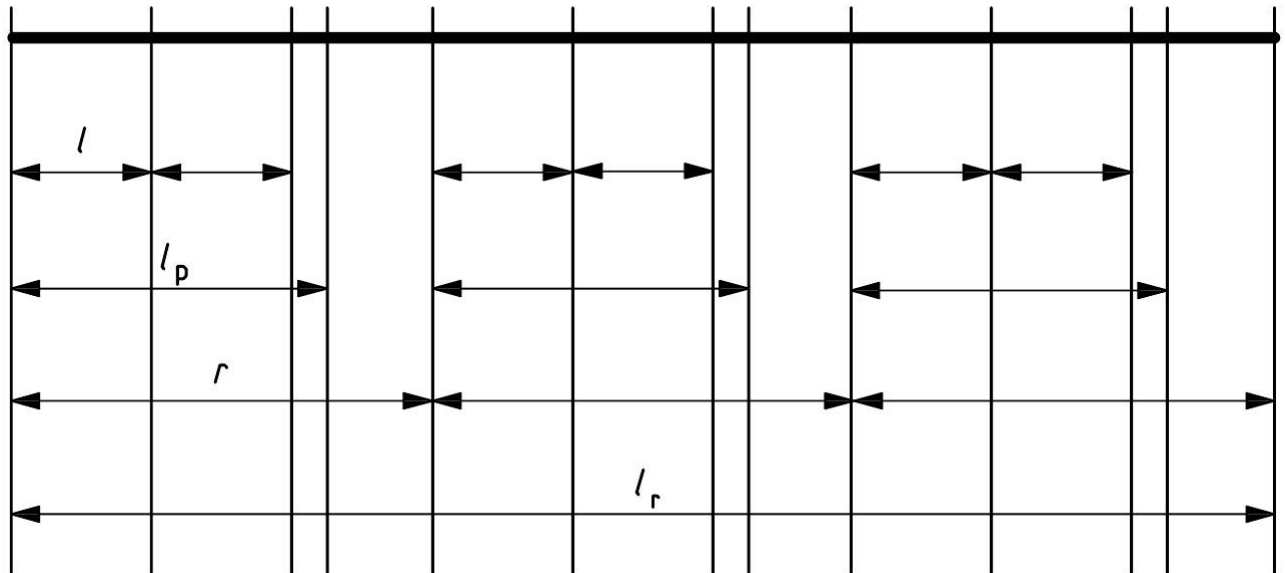


Рисунок 4.2 — Випробувальна ділянка довжиною l_r , щовимірюється з інтервалом повторення r

Примітка. Кількість вимірювань профілю N_p з довжиною вимірювання профілю l_p кожен з них можна розділити на частини з довжиною оцінки l .

5.2 Вимірювання лабораторних зразків

Під час випробування зразків дорожнього покриття в лабораторії доцільно використовувати якомога більші зразки і максимально використовувати розміри зразка. Прямокутні зразки слід сканувати профілометром уздовж паралельних ліній. Довжина оцінки l дорівнюватиме довжині однієї безперервно сканованої лінії.

Круглі зразки можуть бути скановані за діаметром або спіральною або круговою траєкторією. Довжина оцінки l дорівнюватиме довжині безперервно сканованої траєкторії.

Залежність між довжиною оцінки l та найдовшою середньою довжиною хвилі ($\lambda_{\max}$), яка має використовуватися в спектральному аналізі відповідно до рівняння (5.1), також може бути застосована в разі лабораторного випробування зразків.

Примітка. Доцільно дотримуватись відстані між паралельними лініями вибірки або між наступними частинами спіральної траєкторії таким чином, щоб цифрові зразки на одній лінії або частині траєкторії можна було вважати статистично незалежними від

цифрових зразків на сусідніх лініях, відносно діапазону довжин хвиль, що включено в спектральний аналіз.

6 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ТА ВИМОГИ

6.1 Вимоги щодо профілометрів

Профілометр, який використовується для відстеження та/або вибірки нерівностей шорсткості дорожнього покриття, має відповідати всім вимогам, які визначено в ISO 13473-3, що застосовуються до класу діапазону довжин хвиль, який спостерігається. Якщо спостерігаються декілька класів діапазону довжин хвиль, то повинні бути виконані найсуворіші вимоги цих діапазонів.

6.2 Перетворення просторових частот у часові частоти

6.2.1 Загальні вимоги

Під час відбору значень шорсткості зі швидкістю вимірювання v (м/с), отриманий сигнал є функцією часу. Частоти в межах часового сигналу визначаються як часові частоти $f_{\text{час}}$ (Гц/абс⁻¹). Часова частота пов'язана з просторовою частотою $f_{\text{пр}}$ (м⁻¹) згідно з:

$$f_{\text{час}} = v f_{\text{пр}} . \quad (6.1)$$

Відносна зміна швидкості $\Delta v/v$ призведе до відносної зміни часової частоти $\Delta f_{\text{час}}/f_{\text{час}}$, що визначається як:

$$\frac{\Delta f_{\text{час}}}{f_{\text{час}}} = \frac{\Delta v}{v} . \quad (6.2)$$

Отримане відхилення часової частоти призведе до помилок аналізу. Далі приведено два можливі способи контролю цих помилок.

6.2.2 Мінімізація коливань швидкості

Коливання швидкості повинні бути повільними порівняно з виявленими змінами амплітуди поверхні. Отже, максимальна частота коливань швидкості як функція часу має бути меншою ніж 10 % від мінімальної часової частоти (Гц), що аналізується.

Як для фільтрації пропорційної смуги частот (методи 1 і 2), так і для аналізу постійної вузької смуги частот з подальшим перетворенням у спектр пропорційної смуги частот (метод 3), амплітуда коливання швидкості має

відповідати вимогам щодо максимального відносного коливання швидкості протягом однієї довжини оцінки:

- для аналізу в октавних смугах: $\Delta v/v$ має бути меншим або рівним 10 %;
- Для аналізу в третьоктавних смугах: $\Delta v/v$ має бути меншим або рівним 5 %.

Примітка. Максимальні значення $\Delta v/v$ вибирають таким чином, щоб максимальна похибка потужності на смугу частот, обумовлена коливанням швидкості, не перевищувала 0,4 дБ для безперервного спектру шорсткості. Однак можуть виникати більші помилки для поверхонь з нерегулярними спектрами частот, наприклад хвилясті дорожні покриття (див. Додаток В).

6.2.3 Компенсація в режимі реального часу коливань швидкості під час вимірювання

Альтернативою мінімізації коливань швидкості є компенсація коливань швидкості та виникаючих коливань частоти під час вимірювань. Це виконується таким чином.

Для отримання коректного цифрового зображення профілю поверхні як функції вимірюваної відстані необхідно брати зразки з постійними інтервалами вибірки Δx уздовж траєкторії вимірювання. Під час відбору зразків зі швидкістю вимірювання v , отриманий сигнал буде функцією часу. Для заданої часової частоти вибірки $f_{ч,в}$, часові інтервали вибірки $\Delta t = 1/f_{ч,в}$ будуть давати просторові інтервали вибірки Δx згідно з:

$$\Delta x = \Delta t \cdot v = \frac{v}{f_{ч,в}}. \quad (6.3)$$

Коли швидкість буде постійною, часові інтервали вибірки Δt перетворюються на постійні просторові інтервали вибірки Δx . Якщо швидкість змінюється, інтервали просторової вибірки також змінюватимуться.

Цьому можна запобігти, застосувавши частоту вибірки залежну від швидкості. Таким чином, коливання швидкості компенсуються пропорційними коливаннями часової частоти вибірки, щоб отримані

інтервали просторової вибірки залишалися постійними. Вибірка, залежна від швидкості, може бути забезпечена сигналом, що залежить від швидкості, наприклад, виведений з приводного механізму транспортного засобу, що застосовується для вимірювання, для контролю генератора частоти вибірки.

Якщо компенсація коливань швидкості під час вимірювань неможлива, вона також може бути здійснена під час обробки даних вимірювань згідно з методом, який зазначено у додатку Г.

6.3 Викиди

Вимірювання на конкретному дорожньому покритті вважається дійсним лише в тому випадку, якщо коефіцієнт викидів для відповідної довжини оцінки становить не більше ніж 10 % і для заміни недійсних значень використовується лінійна інтерполяція.

Може мати місце декілька викидів із серії, як це показано на рисунку 6.1. Коли до і після серії недійсних значень є дійсні показання, кожне з недійсних значень замінюється інтерпольованим значенням z_i згідно рівняння (6.4):

$$z_i = \frac{z_n - z_m}{n - m} (i - m) + z_m, \quad (6.4)$$

де i - номер вибірки, де значення недійсне;

m - номер вибірки найближчого дійсного значення до i ;

n - номер вибірки найближчого дійсного значення після i ;

z_i - інтерпольоване значення для вибірки i ;

z_m - значення вибірки m ;

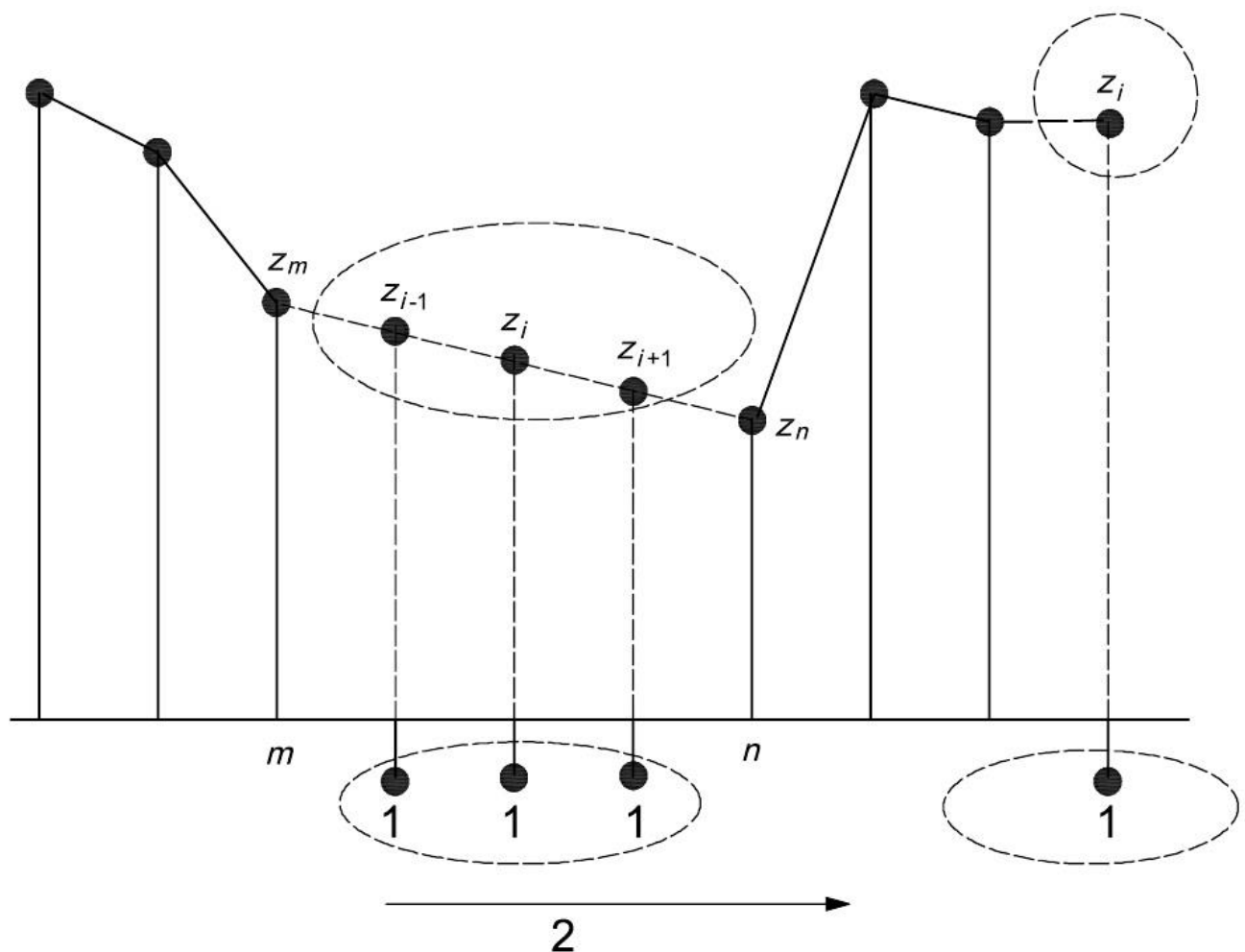
z_n - значення вибірки n .

Якщо недійсне значення знаходиться (знаходяться) на початку або в кінці вибіркового профілю, недійсні значення замінюються найближчими дійсними значеннями. Цей метод екстраполяції має бути обмежений максимальною довжиною по обидві сторони серії даних вибіркового профілю, що дорівнює найкоротшій середній довжині хвилі, що використовується під час спектрального аналізу.

Якщо інтерполяція або екстраполяція не використовуються, останнє показання перед викидом (викидами) має використовуватися як заміна викиду (викидам). У такому випадку коефіцієнт викидів не повинен перевищувати 5 %.

Вимірювання з більш високими показниками викидів, ніж допустимі значення, мають бути відкинуті.

Примітка. Для оцінки особливостей дорожнього покриття (наприклад, стиків) такі особливості можуть бути навмисно включені в аналіз за умови, що не відбудеться недійсних показань датчика.



Умовні позначки:

1 - викид;

2 - номер вибірки.

Рисунок 6.1 — Ілюстрація інтерполяції та екстраполяції викидів

Примітка. У цьому випадку є три проміжні послідовні викиди, які лінійно інтерполюються між значеннями в положенні m і n , і один крайній викид, що екстраполюється з попереднім значенням.

6.4 Фільтрація захисту від накладання спектрів

Якщо спектральний аналіз передбачає цифрову вибірку, можуть виникнути спотворення від накладання спектрів (див. Додаток В). Щоб уникнути подібних помилок під час спектрального аналізу, аналоговий сигнал, який представляє профіль поверхні, має бути відфільтрований перед цифровою вибіркою за допомогою фільтра низьких частот з частотою відсікання, яка нижче половину частоти вибірки.

Характеристики фільтра мають забезпечити плоску амплітудно-частотну характеристику в межах 0,4 дБ до найвищої частоти, що аналізується. Затухання фільтра на половині частоти вибірки має становити 60 дБ або більше.

Якщо аналоговий сигнал спочатку відфільтрований за процесом детектування самого профілометра (наприклад, фільтрація лазерним променем за розміром плями) або відсічений високою власною частотою, комбіновані характеристики цієї внутрішньої фільтрації та фільтрації захисту від накладання спектрів мають відповідати вищезазначеним вимогам.

Вимоги щодо характеристик фільтра можуть бути пом'якшені, якщо з попередньої інформації можна визначити, що спектр профілю поверхні буде безперервним і плавним в діапазоні частот, який представляє інтерес.

6.5 Цифрова вибірка

Коли метод спектрального аналізу включає цифрову вибірку, він має проводитися з просторовими інтервалами вибірки Δx , які визначаються згідно ISO 13473-3 для найменшої довжини хвилі, що бере участь у спектральному аналізі.

Необхідну часову частоту вибірки $f_{ч.в}$ (Гц) для мобільного профілометра можна отримати виходячи з вимоги щодо просторового інтервалу вибірки Δx (м) та швидкості вимірювання профілометра v (м/с):

$$f_{ч.в} = \frac{v}{\Delta x}. \quad (6.4)$$

Вибірка має проводитися з постійними (просторовими) інтервалами. Для забезпечення постійного інтервалу вибірки рекомендується часову частоту вибірки постійно регулювати у відповідності зі швидкістю вимірювання (додаток Г). Якщо такий метод компенсації неможливий, коливання швидкості вимірювання спричинять помилки аналізу, які є незначними. Якщо цифрова вибірка використовується для отримання спектру просторової частоти октавної або третьоктавної смуги, застосовуються вимоги щодо максимального відносного коливання швидкості в 6.1.

Якщо кінцевим результатом аналізу вузької смуги частот за допомогою дискретного перетворення Фур'є є спектр вузької смуги частот, для досягнення постійного просторового інтервалу вибірки слід використовувати лише метод компенсації коливань швидкості.

7 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В ПРОПОРЦІЙНИХ СМУГАХ ЧАСТОТ (ОКТАВНА АБО ТРЕТЬОКТАВНА СМУГИ) МЕТОДОМ АНАЛОГОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ (МЕТОД 1)

Метод спектрального аналізу шляхом аналогової фільтрації пропорційних смуг частот застосовується лише в тому випадку, якщо можна перевірити, що вимірювальний сигнал від профілометра повністю вільний від викидів. Така перевірка може складатися з детального візуального огляду (аналогових) записаних профілів або використання системи виявлення викидів на профілометрі.

Аналоговий сигнал, отриманий шляхом відстеження профілю поверхні, може подаватися безпосередньо в аналогові фільтри октавної або третьоктавної смуги. Фільтри, що використовуються для аналізу частоти в пропорційних смугах, повинні мати середню довжину хвилі шорсткості та середню просторову частоту відповідно до ISO 13473-2:2002 (4.4 та таблиця (7.1)), які встановлено таким чином, щоб чисельно відповідати смугам, зазначеним в ІЕС 61260. Верхня та нижня частоти відсічення (-3 дБ) кожної

смуги, а також форма амплітудно-частотної характеристики фільтра повинні відповідати ІЕС 61260.

Частотний аналіз шляхом аналогової фільтрації може бути застосований безпосередньо до часового сигналу, отриманого в результаті вимірювання профілю поверхні за допомогою профілометра зі швидкістю вимірювання v . Часова частота і смуга пропускання фільтра мають бути адаптовані до швидкості вимірювання. Якщо $f_{пр,с}$ – частота середньої смуги необхідного діапазону просторової частоти, то часова середня частота $f_{ч,с}$ фільтра має бути:

$$f_{ч,с} = v f_{пр,с} \quad (7.1)$$

Для стандартизованих смугових фільтрів з фіксованою серією часових середніх частот швидкість вимірювання повинна бути відрегульована таким чином, щоб фільтрація відповідала рекомендованим діапазорам просторової частоти (відповідно до таблиці (1) ISO 13472-2:2002). Використовуючи рекомендовану десятикова система, вимірювання має проводитис з однією зі швидкостей, визначених згідно рівняння (7.2):

$$\begin{aligned} v &= 3,6 \cdot 10^{3n/10}, \text{ км/год.}, \text{ для одно-октавних смуг,} \\ v &= 3,6 \cdot 10^{n/10}, \text{ км/год.}, \text{ для третьоктавних смуг,} \end{aligned} \quad (7.2)$$

де n – ціле число, значення якого можна вільно вибирати з ряду: ..., -2, -1, 0, 1, 2, ... для отримання бажаної швидкості.

У таблиці 7.1 просторові частоти третьоктавної смуги наведені з необхідними часовими частотами для трьох різних прикладів швидкостей вимірювання з ряду, визначеного рівнянням (7.2).

8 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В ПРОПОРЦІЙНИХ СМУГАХ ЧАСТОТ (ОКТАВНА АБО ТРЕТЬОКТАВНА СМУГИ) МЕТОДОМ ЦИФРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ (МЕТОД 2)

Метод цифрової фільтрації пропорційних смуг частот слід проводити в такому порядку:

- а) фільтрація захисту від накладання спектрів відповідно до 6.4;
- б) цифрова вибірка відповідно до 6.5;

Таблиця 7.1 — Перелік просторових частот третьоктавної смуги та необхідних часових частот третьоктавної смуги для трьох різних швидкостей вимірювання

Довжина хвилі шорсткості мм	Просторова частота третьоктавної смуги м ⁻¹	Часова частота третьоктавної смуги зі швидкістю 18 км/год, Гц	Часова частота третьоктавної смуги зі швидкістю 36 км/год, Гц	Часова частота третьоктавної смуги зі швидкістю 72 км/год, Гц
500	2,00	10,0	20,0	40,0
400	2,50	12,5	25,0	50,0
315	3,15	16,0	31,5	63,0
250	4,00	20,0	40,0	80,0
200	5,00	25,0	50,0	100
160	6,30	31,5	63,0	125
125	8,00	40,0	80,0	160
100	10,0	50,0	100	200
80,0	12,5	63,0	125	250
63,0	16,0	80,0	160	320
50,0	20,0	100	200	400
40,0	25,0	125	250	500
31,5	31,5	160	315	630
25,0	40,0	200	400	800
20,0	50,0	250	500	1 000
16,0	63,0	315	630	1 250
12,5	80,0	400	800	1 600
10,0	100	500	1 000	2 000
8,00	125	630	1 250	2 500
6,30	160	800	1 600	3 200
5,00	200	1 000	2 000	4 000
4,00	250	1 250	2 500	5 000
3,15	315	1 600	3 150	6 300
2,50	400	2 000	4 000	8 000
2,00	500	2 500	5 000	10 000
1,60	630	3 150	6 300	12 500
1,25	800	4 000	8 000	16 000
1,00	1 000	5 000	10 000	20 000
0,80	1 250	6 300	12 500	25 000
0,63	1 600	8 000	16 000	32 000
0,50	2 000	10 000	20 000	40 000
0,40	2 500	12 500	25 000	50 000
Примітка. Частоти октавного діапазону друкуються жирним шрифтом.				

- в) інтерполяція викидів (якщо потрібно) відповідно до 6.3;
- г) цифрова фільтрація пропорційних смуг частот.

Останній крок, що наведено вище, має виконуватися за допомогою цифрових фільтрів октавної або третьоктавної смуги. Ці фільтри повинні мати середню довжину хвилі шорсткості та середню просторову частоту згідно ISO 13473-2:2002 (4.4 та таблиця (7.1)), які встановлено таким чином, щоб чисельно відповідати смугам, зазначеним в IEC 61260. Верхня та нижня частоти відсічення (-3 дБ) кожної смуги, а також форма амплітудно-частотної характеристики фільтра повинні відповідати IEC 61260.

Якщо цифрова фільтрація застосовується до часового сигналу вибірки, отриманого в результаті вимірювання профілю поверхні, часова частота і смуга пропускання фільтри мають бути адаптовані до швидкості вимірювання v , як визначено в п. 7, рівнянні (7.1) та рівнянні (7.2) та на прикладах в таблиці (7.1).

9 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ В ПОСТІЙНИХ ВУЗЬКИХ СМУГАХ ЧАСТОТ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСКРЕТНОГО (ШВИДКОГО) МЕТОДУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є (МЕТОД 3)

9.1 Огляд методології

Методика отримання спектра потужності пропорційних смуг частот з профілю поверхні дороги за допомогою дискретного перетворення Фур'є або швидкого перетворення Фур'є складається з етапів, наведених в таблиці (9.1).

Примітка. Дискретне перетворення Фур'є - це перетворення Фур'є вибіркового сигналу з кінцевою кількістю вибірок. Переважно це називається швидким перетворенням Фур'є (FFT). Прикметник «Швидкий» відноситься до ефективного алгоритму, який використовується для перетворення. Алгоритм працює найбільш ефективно, коли кількість вибірок становить потужність 2. У багатьох мовах програмування, де перетворення Фур'є називають FFT, мова просто використовує найшвидший алгоритм. Деякі мови програмування можуть вимагати, щоб кількість зразків була потужністю 2. Перетворення Фур'є для довільної кількості зразків може бути вказане як DFT (дискретне перетворення Фур'є). У цьому документі різниці між дискретним перетворенням Фур'є та швидким перетворенням Фур'є не буде; обидва будуть позначені як DFT

Таблиця 9.1 — Перелік етапів, які слід виконати для аналізу дискретного перетворення Фур'є

Етап	Результат	Розглянуто в пункті
Фільтрація від накладання спектрів	Аналоговий сигнал	6.4
Цифрова вибірка	Цифровий сигнал, відібраний з інтервалом Δx ($=v/f_s$)	6.5
Інтерполяція викидів	Цифровий сигнал з інтерпольованими значеннями разі викидів	6.3
Видалення зміщення	Цифровий сигнал із нульовим середнім	9.2
Видалення уклону	Цифровий сигнал з нульовим уклонем	9.2
Віконне перетворення	Кінцевий дискретизований сигнал із довжиною $l = \Delta x N$, де N – кількість вимірів	9.3
Дискретне перетворення Фур'є	Складний спектр з постійною пропускну здатністю $\Delta f_{\text{пр}}=1//$ на частотах $0 \dots (N-1) \Delta f_{\text{пр}}$	9.4
Перетворення до спектральної щільності потужності	Спектр щільності потужності з постійною пропускну здатністю $\Delta f_{\text{пр}}=1//$ на частотах $0 \dots (N-1) \Delta f_{\text{пр}}$	9.4
Перетворення у постійний спектр відносної смуги	Спектр рівня профілю з пропорційною смугою частот	10

9.2 Видалення уклону і зміщення

Приймаємо z_i – виміряне значення сигналу для зразка i в точці x_i , а N – кількість зразків в оціненому сигналі, тоді уклон b_1 профілю поверхні визначається як:

$$b_1 = \frac{12 \sum_{i=0}^{N-1} i z_i - 6(N-1) \sum_{i=0}^{N-1} z_i}{N(N+1)(N-1)}. \quad (9.1)$$

Зміщення b_0 профілю поверхні визначається як:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} z_i - b_1 \cdot \frac{1}{2} (N-1). \quad (9.2)$$

Виміряне значення сигналу z_i має бути скориговано з урахуванням уклону і зміщення згідно з рівнянням (9.3), що забезпечить виправлене значення вибіркового сигналу Z_i :

$$Z_i = z_i - b_1 i - b_0 \quad \text{для } i = 0, \dots, N-1. \quad (9.3)$$

Примітка. Для розрахунку коригування уклону та зміщення профіль поверхні обробляється як функція номера зразка i , а не вимірюваної відстані x ($=i \Delta x$).

9.3 Віконне перетворення

Дискретне перетворення Фур'є засноване на припущенні, що вхідний сигнал повторюється з періодом, рівним тривалості сигналу. Наприклад,

вважається, що сигнал, відібраний на відстані l , повторюється при..., $-2l$, $-l$, 0 , l , $2l$, ..., тощо. По краях сигналу може виникати стрибок повного сигналу, цей ефект відомий як розтікання. Розтікання впливає на отриманий спектр. Для запобігання розтіканню спектра слід застосувати вікно, яке зменшує сигнал до нуля на краях.

Переважним типом вікна для спектрального аналізу профілів поверхні є вікно Хеннінга. Це вікно має форму квадрата косинуса і визначається як:

$$w_{i,H} := \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)}{2} = 1 - \cos^2\left(\frac{\pi i}{N}\right), \text{ для } i = 0, \dots, N-1 \quad (9.4)$$

Через свою форму вікно Хеннінга зменшує ефективну довжину сигналу, що впливає на низькочастотний склад сигналу. Таким чином, альтернативне вікно, Split Cosine Bell Window (SCBW; іноді позначається як Cosine Digital Tapering Window), може використовуватися, якщо довжина оцінки профілю менше 1,0 м. Форма SCBW має форму квадрата косинуса, що збільшується в першій 1/10 довжині вікна, і зменшується останній 1/10. У проміжному відрізку, довжиною вісім десятих, вікно дорівнює одиниці, як наведено нижче:

$$w_{i,c} = \begin{cases} \cos^2\left(\frac{5\pi i}{N} - \frac{\pi}{2}\right) & \text{for } 0 \leq i \leq N/10 \\ 1 & \text{for } N/10 \leq i \leq 9N/10 \\ \cos^2\left(\frac{5\pi i}{N} - \frac{9\pi}{2}\right) & \text{for } 9N/10 < i < N \end{cases} \quad (9.5)$$

Недоліком SCBW є втрата спектральної роздільної здатності порівняно з вікном Хеннінга, що викликана спектральними помилками внаслідок розтікання бічної долі. Отже, використання SCBW зазвичай не рекомендується, і під час його використання цей факт чітко зазначається у звіті. Однак реальні дороги не мають таких регулярних деформацій, що дають дуже специфічні піки довжини хвилі в спектрі. Отже, спектральна роздільна здатність не завжди буде важливою проблемою.

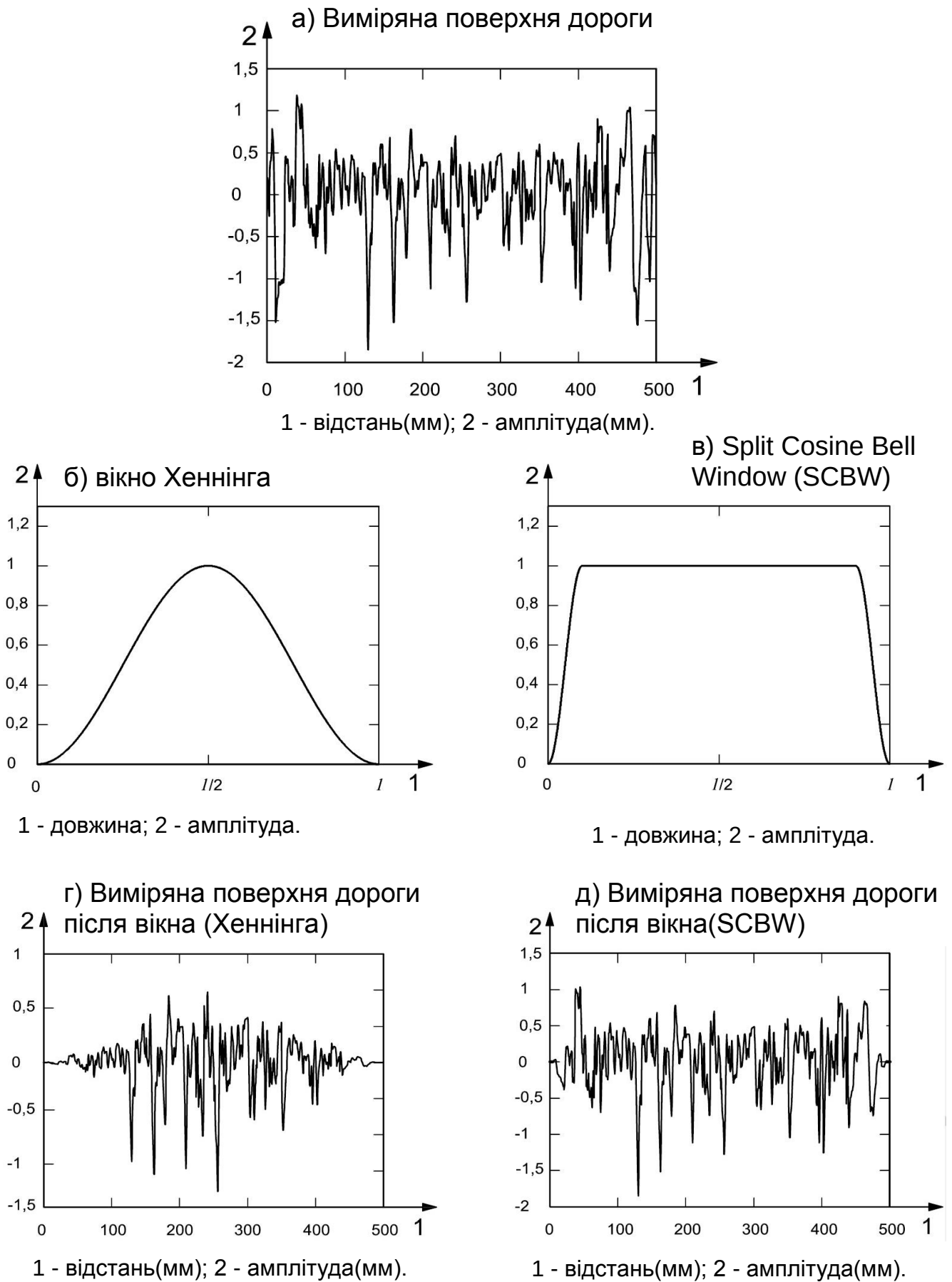


Рисунок 9.1 — Ілюстрація застосування вікна Хеннінга та Split Cosine Bell Window (SCBW)

Вікно застосовується шляхом простого множення сигналу на функцію фільтру (див. рис. 9.1). Оскільки сигнал буде ослаблений цією операцією, він має бути нормалізований шляхом ділення наведеного добутку на інтеграл вікна. Отже, вікно застосовується таким чином:

Для вікна Хеннінга:

$$Z_{i,\text{вікна}} = \frac{w_{i,H} Z_i}{0,6124}, \quad \text{для } i = 0, \dots, N-1. \quad (9.6)$$

Для вікна Split Cosine Bell:

$$Z_{i,\text{вікна}} = \frac{w_{i,C} Z_i}{0,9354}, \quad \text{для } i = 0, \dots, N-1. \quad (9.7)$$

Загальне рівняння для визначення профілю вікна представлено рівнянням (15 с):

$$Z_{i,\text{вікна}} = \frac{w_i Z_i}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i^2}} \quad \text{для } i = 0, \dots, N-1. \quad (9.8)$$

9.4 Дискретне перетворення Фур'є та спектральна щільність потужності

Дискретне перетворення Фур'є (DFT) Z_k профілю вікна визначається шляхом:

$$Z_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Z_{i,\text{вікна}} e^{-j\left(\frac{2\pi k}{N}\right)i} \quad \text{для } k = 0, \dots, N-1. \quad (9.9)$$

де j – уявна одиниця ($j^2 = -1$).

Примітка 1. Z_k є функцією просторової частоти, а Z_i , вікна є функцією вимірюваної відстані. Таким чином, DFT включає перетворення з області відстані в область просторової частоти.

У деяких програмних пакетах, які забезпечують DFT або FFT, це визначення може бути різним, де коефіцієнт $1 / \sqrt{N}$ іноді ігнорується або замінюється $1/N$. Це можна перевірити, застосувавши теорему Парсеваля, визначену як:

$$\sum_{i=0}^{N-1} |Z_{i,\text{win}}|^2 = N \sum_{k=0}^{N-1} |Z_k|^2. \quad (9.10)$$

Якщо рівняння (9.10) виявиться вірним, DFT відповідає рівнянню (9.9); якщо ні, документацію програмного забезпечення слід перевірити щодо призначення.

Примітка 2. Рівняння (9.10) прирівнює загальну (повну) потужність сигналу в області відстані до загальною потужністю сигналу в області просторової частоти і, таким чином, перевіряє, чи виконується закон збереження енергії.

Результатом DFT є спектр з постійною шириною вузької смуги зі складними значеннями. Ширина смуги пропускання залежить від довжини оцінки l_i дорівнює:

$$\Delta f_{sp} = \frac{1}{l}. \quad (9.11)$$

Шкала частот починається з 0 з кроком рівним $\Delta f_{пр}$ до $(N - 1) \Delta f_{сп}$ (примітка: $N\Delta f_{пр}=1/\Delta x$). Для подальшої оцінки мають використовуватися лише частоти до $(\frac{1}{2}N - 1)\Delta f_{пр}$.

Для отримання спектральної щільності потужності (СЩП) за результатами DFT амплітуда кожної вузької смуги має бути піднесена до другого степеню і поділена на спектральну пропускну здатність згідно рівняння (9.12):

$$Z_{СЩП,k} = \frac{2|Z_k|^2}{\Delta f_{пр}} \quad \text{для } k = 0, \dots, (\frac{1}{2}N - 1). \quad (9.12)$$

Спектральне значення вузької смуги рівня профілю $L_{tx,k}$ розраховується за допомогою:

$$L_{tx,k} = 10\lg(2 \left| \frac{Z_k}{a_{ref}} \right|^2) \quad \text{для } k = 0, \dots, (\frac{1}{2}N - 1). \quad (9.13)$$

де a_{ref} – опорне значення амплітуди профілю поверхні ($=10^{-6}$ м);

$L_{tx,k}$ – рівень профілю в діапазоні частот f_k з пропускну здатністю $\Delta f_{пр}$ (дБ).

9.5 Роздільна здатність довжини хвилі

Для спектра з постійною вузькою смугою частот роздільна здатність просторової частоти є постійною для всіх просторових частот. З іншого боку, роздільна здатність просторової довжини хвилі $\Delta \lambda_{пр}$ не є постійною і

залежить від самої середньої просторової довжини хвилі $\lambda_{\text{пр}} (=1/f_{\text{пр}})$ і може бути описана згідно рівняння (9.14) (див. додаток Д):

$$\Delta\lambda_{\text{пр}} = \frac{l\lambda_{\text{пр}}^2}{l^2 - \frac{1}{4}\lambda_{\text{пр}}^2}. \quad (9.14)$$

10 ПЕРЕТВОРЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ ПОСТІЙНОЇ СМУГИ ЧАСТОТ В СПЕКТРАЛЬНІ ДАНІ ПРОПОРЦІЙНОЇ СМУГИ ЧАСТОТ

Перетворення спектра з постійною смугою частот в спектр пропорційної смуги частот може бути здійснено відповідно до процедури, зазначеної нижче, яка застосовується лише для перетворення в шкалі просторових частот. Процедура перетворення за шкалою довжини хвилі вимагала б інших, більш складних рівнянь.

Для виведення спектра пропорційної смуги частот зі спектра постійної смуги частот смуговий фільтр (субоктавні смуги) може вважатися «ідеальним», тобто смуга пропускання – це квадратне вікно в частотній області. Загальна потужність в цьому вікні отримується шляхом підсумовування всіх внесків потужності вузької смуги, що потрапляють в це квадратне вікно (див. рис. 10.1). Потужність вузької смуги, що збігається з межею двох послідовних субоктавних смуг, пропорційно ділиться на ці субоктавні смуги.

Таким чином, потужність $Z_{p,m}$ в межах субоктавної смуги m розраховується зі спектральної щільності потужності вузької смуги згідно рівнянням (10.1).

$$Z_{p,m} = Z_{\text{СЩП},n} \cdot \left(f_{\text{пр},n} + \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}} - 10^{\frac{-1,5}{10n}} f_{\text{пр},m} \right) + \sum_{k=n+1}^{B-1} Z_{\text{СЩП},k} \cdot \Delta f_{\text{пр}} + Z_{\text{СЩП},B} \cdot \left(10^{\frac{1,5}{10n}} f_{\text{пр},m} - f_{\text{пр},B} + \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}} \right), \quad (10.1)$$

де $f_{\text{пр},m}$ – середня частота субоктавної смуги m ;

$f_{\text{пр},n}$ - середня частота вузької смуги, яка збігається з нижньою межею субоктавної смуги;

$Z_{\text{сщп,н}}$ - спектральна щільність потужності вузької смуги, яка збігається з нижньою межею субоктавної смуги;

$f_{\text{пр,в}}$ – середня частота вузької смуги, яка збігається з верхньою межею субоктавної смуги;

$Z_{\text{сщп,в}}$ – спектральна щільність потужності вузької смуги, що збігається з верхньою межею субоктавної смуги.

Примітка. Рівняння (10.1) складається з трьох частин: 1) пропорційна частина потужності вузької смуги, що збігається з нижньою межею субоктавної смуги; 2) підсумовування всіх вузьких смуг, що потрапляють у субоктавний діапазон; і 3) пропорційна частина потужності вузької смуги, що збігається з верхньою межею субоктавної смуги.

Нижня гранична частота субоктавної смуги m становить: $10^{\frac{-1,5}{10n}} f_{\text{пр,м}}$, і має таке відношення до $f_{\text{пр,н}}$

$$f_{\text{пр,н}} - \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}} < 10^{\frac{-1,5}{10n}} f_{\text{пр,м}} < f_{\text{пр,н}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}}.$$

Верхня гранична частота субоктавної смуги m становить: $10^{\frac{1,5}{10n}} f_{\text{пр,м}}$, і має таке відношення до $f_{\text{пр,н}}$

$$f_{\text{пр,в}} - \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}} < 10^{\frac{1,5}{10n}} f_{\text{пр,м}} < f_{\text{пр,в}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta f_{\text{пр}}.$$

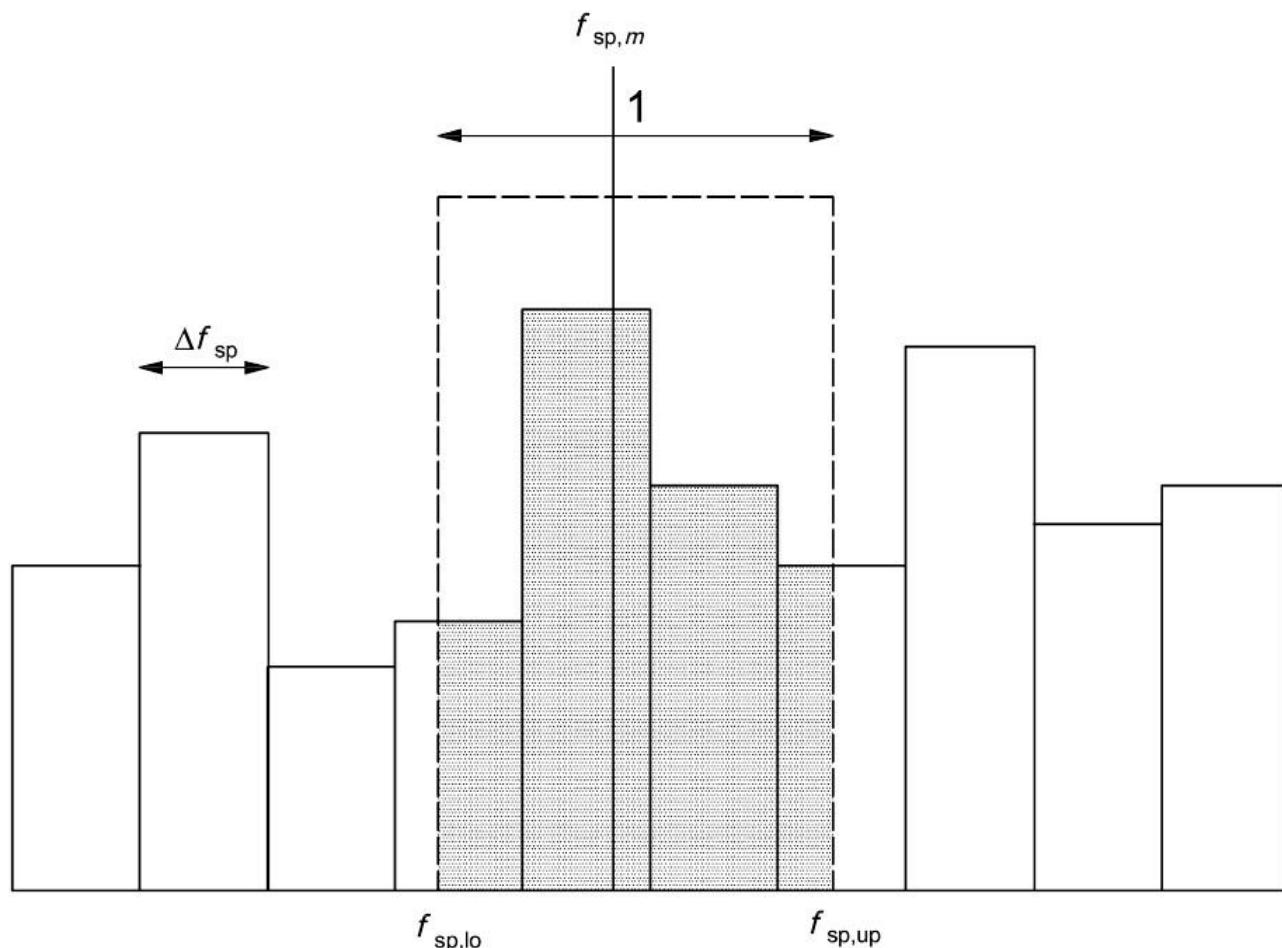
Рівень профілю (шорсткості) субоктавної смуги розраховується за допомогою:

$$L_{\text{tx,м}} = 10 \lg \left(\frac{Z_{\text{p,м}}}{a_{\text{ref}}^2} \right) \text{dB}, \quad (10.2)$$

де a_{ref} – опорне значення амплітуди профілю поверхні ($=10^{-6}$ м);

$L_{\text{tx,м}}$ – рівень профілю (шорсткості) в субоктавному діапазоні m (10^{-6} м), в децибелах.

У разі фільтрації в октавних смугах рівень профілю вказується як $L_{\text{TX,м}}$ (TX пишеться великими літерами).



Умовні позначки:

1 - пропускна здатність 1/п-октавної смуги.

Рисунок 10.1 – Ілюстрація розподілу потужності вузьких смуг на певні субоктавні смуги

Потужність вузьких смуг, що збігаються з верхньою та нижньою межами субоктавної смуги, розподіляється пропорційно сусідніх субоктавних смуг.

11 НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

Невизначеність результатів, отриманих в результаті спектрального аналізу профілів поверхні дорожнього покриття відповідно до цих Технічних умов, має оцінюватися, переважно, відповідно до ISO/IEC Guide 98-3. Якщо надається звіт, слід вказати розширену невизначеність разом із відповідним коефіцієнтом покриття для заявленої ймовірності покриття 95 %, як визначено в ISO/IEC Guide 98-3. Керівництво щодо визначення розширеної невизначеності наведено в додатку А.

Невизначеність результатів спектрального аналізу профілів поверхні дорожнього покриття буде визначатися за внесками з двох основних джерел:

- невизначеність виміряного сигналу профілю поверхні, що становить вхідні дані для процесу спектрального аналізу;
- додаткова невизначеність, викликана самим процесом спектрального аналізу.

Для оцінки об'єднаної стандартної невизначеності та розширеної невизначеності октавного, третьоктавного або субоктавного рівнів в результаті методів спектрального аналізу слід враховувати внески обох джерел. У цих Технічних умовах акцент робиться на внесок процесу спектрального аналізу.

12 ЗВІТ ЩОДО РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ

Звіт щодо результатів аналізу має включати таку інформацію:

- 1) дата вимірювання;
- 2) місце розташування та ідентифікація ділянки дороги або лабораторних зразків, що вимірювалися;
- 3) опис типу дорожнього покриття, що вимірюється;
- 4) опис стану поверхні, (забруднення, вологість, пошкодження, тріщини, стики тощо);
- 5) форма, положення та орієнтація траєкторії вибірки;
- 6) загальна довжина вимірюваної ділянки дороги або розміри лабораторних зразків, що досліджуються;
- 7) інтервал повторення;
- 8) довжина оцінки;
- 9) кількість оцінок в межах одного вимірювання профілю;
- 10) швидкість вимірювання та коливання;
- 11) горизонтальна та вертикальна роздільна здатність датчика;
- 12) перелік обладнання, що використовується (виробник, тип та серійний номер);

13) опис характеристик аналізу: метод аналізу, інтерполяція є чи ні, тип вікна, октавна, третьоктавна або субоктавна смуга;

14) коефіцієнт викидів;

15) рівні октавної, третьоктавної або субоктавної смуги представляють як середнє арифметичне всіх довжин оцінки ділянки, що досліджується, у таблиці та у графічній формі;

16) необов'язково: стандартні відхилення окремих рівнів октавної, третьоктавної або субоктавної смуг протягом всіх довжин оцінки досліджуваної ділянки, представляють у вигляді числових значень в табличній формі та як області невизначеності по обидві сторони від середніх значень у графічній формі;

17) необов'язково: рівні октавної, третьоктавної або субоктавної смуг для кожної довжини оцінки досліджуваної ділянки, представляють у формі таблиці або у графічній формі;

18) необов'язково: розширена невизначеність результатів, зазначених у пунктах 15), 16) та 17), визначається за методом, який наведено в додатку А.

Примітка. Пункти «інтерполяція» та «тип вікна», як зазначено у пункті 13), не застосовуються під час використання аналогової фільтрації (метод 1).

ДОДАТОК А
(нормативний)

НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

А.1 Загальна частина

Кінцеві результати спектрального аналізу, що виконується за методами, розглянутими в цих Технічних умовах, складаються з рівнів октавної, третьоктавної або субоктавної смуги, які разом представляють спектральне зображення профілю поверхні дороги. Метод не є повним методом вимірювання, а є лише методом обробки даних, отриманих відповідно до методів вимірювання, які не розглядаються в цьому документі.

Отже, невизначеність кінцевого результату може бути частково пояснена факторами, що обговорені у цьому документі. Іншими чинниками, які вносять свій вклад в цю невизначеність є фактори, що пов'язані з процесом вимірювання. В цьому додатку буде проаналізовано та обговорено внесок у невизначеність факторів першої групи. Внесок у невизначеність факторів другої групи визначається стандартами, що описують методи вимірювання. В цьому додатку будуть розглядатися виміряні профілі поверхні як вхідні дані, а також поширення невизначеності вхідних даних на результат процесу спектрального аналізу.

Формат для представлення невизначеності у цьому додатку відповідає ISO/IEC Guide 98-3. Цей формат включає бюджет невизначеності, в якому всі різні джерела невизначеності ідентифікуються і кількісно визначаються, і з якого можна отримати об'єднану стандартну невизначеність. Наразі (кількісні) дані, необхідні для розрахунку об'єднаної стандартної невизначеності, доступні лише частково. Оскільки внески у невизначеність неможливо оцінити кількісно, вказуються можливі методи кількісної оцінки.

Нарешті, відповідно до ISO/IEC Guide 98-3, об'єднану стандартну невизначеність необхідно помножити на коефіцієнт покриття для отримання розширеної невизначеності з охопленням ймовірності 95 %.

А.2 Вираз для розрахунку рівнів субоктавної смуги

Загальний рівень субоктавної смуги, $L_{tx,m}$, розраховується за формулою:

$$\overline{L_{tx,m}} = \overline{L_{tx,m}} + \Delta_{\text{вимір}} + \delta_{\text{довжина}} + \delta_{\text{швидкість}} + \delta_{\text{викиди}} + \delta_{\text{нак.спектрів}} + \delta_{\text{уклон}} + \delta_{\text{вікно}} + \delta_{\text{фільтр}}, \quad (\text{A.1})$$

де $\overline{L_{tx,m}}$ – очікування (середнє значення) результату спектрального аналізу, виражене як рівень субоктавної смуги, отримане з рівняння (10.2);

$\Delta_{\text{вимір}}$ – перетворення Фур'є вхідної величини для врахування будь-яких відхилень, викликаних процесом вимірювання профілю поверхні [що перетворюється на відхилення спектральних значень шляхом поширення через процес спектрального аналізу (див. А.3.2)];

$\delta_{\text{довжина}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через можливі обмеження довжини оцінки;

$\delta_{\text{швидкість}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через коливання швидкості вимірювання;

$\delta_{\text{викиди}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через появу викидів;

$\delta_{\text{нак.спектрів}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через недосконалість фільтрації від накладання спектрів;

$\delta_{\text{уклон}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через недосконалості у видаленні уклону та зміщення;

$\delta_{\text{вікно}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через зменшення ефективної довжини сигналу за рахунок вікон;

$\delta_{\text{фільтр}}$ – вхідна величина для врахування будь-яких відхилень, які виникають в процесі спектрального аналізу через недосконалість характеристик смуги пропускання октавних, третьоктавних або субоктавних фільтрів (аналогових або цифрових).

Примітка. Вхідні величини, включені в формулу (А.1) для врахування внеску невизначеності, - це ті, що вважаються прийнятними на момент підготовки цих Технічних умов, але подальші дослідження можуть виявити інші види внесків у невизначеність.

А.3 Внески у невизначеність спектрального аналізу

А.3.1 Загальна частина

Як представлено у рівнянні (10.2), очікування (середнє значення) рівня субоктавної смуги $L_{tx,m}$ є логарифмічною функцією потужності $Z_{p,m}$, що міститься в межах субоктавної смуги m , яка, в свою чергу, отримується з вимірної величини z_i після серії етапів перетворення, виражених рівняннями (9.3), (9.8), (9.9), (9.12) та (10.1).

Отже, вхідна величина $\Delta_{\text{вимір}}$ для врахування об'єднаних відхилень, що виникають в процесі вимірювання, має бути отримана з невизначеності вимірювання вимірної величини z_i . Ця невизначеність буде зазначена в Міжнародному стандарті, що описує технічні характеристики профілометрів (ISO 13473-3). Спосіб, в який невизначеність вимірювання z_i поширюється через процес спектрального аналізу в (часткову) невизначеність, що пов'язана з $L_{tx,m}$, описано в А.3.2.

Невизначеності, що пов'язані з вхідними величинами Δ та δ мають стохастичну природу, і розподіл ймовірностей (нормальний, прямокутний тощо) пов'язаний з кожною з цих величин. Його очікування (середнє значення) є найкращою оцінкою значення величини, а його стандартне відхилення є мірою дисперсії значень, що називається стандартною невизначеністю. Передбачається, що середні значення всіх вхідних величин, наведених у формулі (А.1), дорівнюють нулю. Однак у будь-якому конкретному визначенні рівня субоктавної смуги під час спектрального аналізу профілю поверхні дороги невизначеності не зникають, і вносять

вклад в об'єднану стандартну невизначеність, що пов'язана зі значеннями рівнів субоктавної смуги.

Оцінка невизначеностей, пов'язаних з вхідними величинами, має, переважно, виконуватися для фактичних значень параметрів та умов, що застосовуються до конкретного випадку спектрального аналізу. У А.3.3 йдеться про те, як можна оцінити невизначеності та надаються типові значення стандартних невизначеностей, які можна очікувати для трьох методів спектрального аналізу, які розглядаються у пункті 4.

А.3.2 Поширення невизначеності вимірювання через процес спектрального аналізу

Якщо невизначеність вимірювання вимірюваного сигналу профілю z_i має характер стохастичного некорельованого відхилення, це може бути записано як:

$$z_i = \bar{z}_i + \delta_{\text{вимір},i}, \quad (\text{A.2})$$

де $\bar{z}_i$ – очікування («справжнє» значення) вибіркового значення переміщення профілю z_i ;

$\delta_{\text{вимір},i}$ – випадкове відхилення, додане до кожного виміру i через неточності процесу вимірювання.

Перетворення Фур'є такої простої суми двох змінних дорівнює сумі перетворень Фур'є. Якщо згідно з 9.3 профіль z_i помножити на функцію вікна w_i в просторовій області, це призведе до згортання та підсумовування в частотній області таким чином:

$$Z_k = W_k * \bar{Z}_k + W_k * \Delta_{\text{вимір},k}, \quad (\text{A.3})$$

де Z_k – перетворення Фур'є вибіркового значення переміщення профілю z_i ;

W_k – перетворення Фур'є функції вікна w_i ;

$\bar{Z}_k$ – перетворення Фур'є очікування вибіркового значення переміщення профілю z_i ;

$\Delta_{\text{вимір},k}$ – перетворення Фур'є випадкового відхилення через неточності процесу вимірювання $\delta_{\text{вимір},i}$.

З цього дуже загально сформульованого результату можна зробити висновок, що якщо невизначеність у просторовій області має стохастичну природу, то частотна залежність невизначеності в частотній області відсутня.

Якщо внесок невизначеності у сигнал профілю має характер білого шуму спектр невизначеності буде постійним у частотній області. Це означає, що невизначеність викличе незалежне від частоти збільшення спектральної щільності потужності «справжнього» профілю. Якщо цей вплив візуалізувати за логарифмічною шкалою амплітуди, він буде здаватися більшим для частин спектру з низьким значенням СЩП.

Якщо його представити в рівнях октавної, третьоктавної або субоктавної смуги за логарифмічною шкалою частот, спектр білого шуму збільшується на 3 дБ на октаву при збільшенні частоти середньої смуги. Це означає, що для представлення спектра в октавних, третьоктавних або субоктавних смугах вплив цього типу невизначеності буде збільшуватися з частотою.

А.3.3 Невизначеність, пов'язана з вхідними величинами δ

А.3.3.1 Невизначеність спектрального аналізу через обмеження довжини оцінки

Як зазначено в 5.1, мінімальна довжина оцінки має бути в 5 разів більша за найдовшу середню довжину хвилі для аналізу в октавному діапазоні і в 15 разів більша за найдовшу довжину середньої хвилі для аналізу в третьоктавному діапазоні. Якщо ця вимога виконується, стандартна невизначеність становитиме приблизно 1,5 дБ. Якщо можна забезпечити більшу довжину оцінки, відповідна стандартна невизначеність значно зменшиться, як зазначено в таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Стандартні невизначеності як функція довжини оцінки

Довжина оцінки, виражена в кількості довжин хвиль		Стандартна невизначеність
Октавні смуги	Третьюоктавні смуги	
5 $\lambda_{\max}$	15 $\lambda_{\max}$	1,5 дБ
15 $\lambda_{\max}$	45 $\lambda_{\max}$	1,0 дБ
80 $\lambda_{\max}$	240 $\lambda_{\max}$	0,5 дБ
360 $\lambda_{\max}$	1 080 $\lambda_{\max}$	0,25 дБ
10 000 $\lambda_{\max}$	30 000 $\lambda_{\max}$	0,05 дБ

А.3.3.2 Невизначеність спектрального аналізу, що виникає внаслідок коливання швидкості

Значення стандартної невизначеності, що виникає внаслідок коливання швидкості, надані у таблиці (А.2), будуть дійсними, якщо виконуються вимоги 6.2.2 та якщо спектр є безперервним і досить рівним. Для умов, що відхиляються від цих припущень, стандартні невизначеності вимірювань можуть бути визначені згідно з додатком В.

А.3.3.3 Невизначеність спектрального аналізу, що виникає через викиди

Значення стандартної невизначеності, що виникає через викиди, можуть бути оцінені за результатами дослідження [9].

Якщо викиди лінійно інтерполюються і відсоток викидів не перевищує 10 %, стандартна невизначеність може бути оцінена в 0,5 дБ.

Якщо викиди не інтерполюються, а замінюються останнім дійсним показанням, і відсоток викидів не перевищує 5 %, стандартна невизначеність може бути оцінена в 0,5 дБ для довжин хвиль нижче 0,5 м та 1,0 дБ для довжин хвиль, що дорівнюють або є більшими ніж 0,5 м.

А.3.3.4 Невизначеність спектрального аналізу, що виникає через недосконалість фільтрації від накладання спектрів

Значення стандартної невизначеності, що виникає через недосконалість фільтрації від накладання спектрів, наведені в таблиці (А.2), оцінюються з огляду на вимоги 6.3. Рекомендується використовувати більш

підходящі значення, взяті з фактичних технічних умов або результатів випробувань фільтрів, що застосовуються для фільтрації від накладання спектрів.

Таблиця А.2 — Бюджет невизначеності для розрахунку рівня субоктавної смуги

Величина	Оцінка дБ	Стандартна невизначеність u_i , дБ	Додаткова інформація	Розподіл ймовірностей	Коефіцієнт чутливості c_i	Внесок у невизначеність $c_i u_i$ дБ
$\Delta_{\text{вимір}}$	0	*)	Див. А.3.2	нормальний	1	*)
$\delta_{\text{довжина}}$	0	*)	Див. А.3.3.1	нормальний	1	*)
$\delta_{\text{швидкість}}$	0	0,2	Див. А.3.3.2	нормальний	1	0,2
$\delta_{\text{викиди}}$	0	*)	Див. А.3.3.3	нормальний	1	*)
$\delta_{\text{накл. спектрів}}$	0	0,1	Див. А.3.3.4	нормальний	1	0,1
$\delta_{\text{уклон}}$	0	*)	Див. А.3.3.5	нормальний	1	*)
$\delta_{\text{вікно}}$	0	*)	Див. А.3.3.6	нормальний	1	*)
$\delta_{\text{фільтр}}$	0	*)	Див. А.3.3.7	нормальний	1	*)
*) Визначається відповідно до конкретних умов.						
Примітка. Як пояснено в А.1, бюджет невизначеності, наведений вище, містить лише внески невизначеності через спектральний аналіз. Внески у невизначеність, що пов'язані з процесом вимірювання профілю, надано у відповідних стандартах щодо вимірювання.						

А.3.3.5 Невизначеність спектрального аналізу, що виникає через недосконалість у видаленні уклону та зміщення

Відповідні значення стандартної невизначеності, що виникають через недосконалість у видаленні уклону та зміщення, ще не визначено.

А.3.3.6 Невизначеність спектрального аналізу через віконне перетворення сигналу

Відповідні значення стандартної невизначеності, що виникають через віконне перетворення сигналу, ще не визначено.

А.3.3.7 Невизначеність спектрального аналізу, що виникає через недосконалість фільтрів октавних, третьоктавних або субоктавних смуг

Відповідні значення стандартної невизначеності, що виникають через недосконалість фільтрів октавних, третьоктавних або субоктавних смуг, ще не визначено.

A.3.4 Оцінка внеску невизначеності

Внесок в об'єднану невизначеність, пов'язаний зі значенням рівнів субоктавної смуги, залежить від кожної з вхідних величин, їх відповідних розподілів ймовірностей та коефіцієнтів чутливості, сі. Коефіцієнти чутливості є мірою того, як на значення рівня субоктавної смуги впливають зміни значень відповідних вхідних величин. У моделі, яка використана у формулі (A.1), всі коефіцієнти чутливості мають значення 1. Внесок відповідних вхідних величин у загальну невизначеність потім розраховується як добуток стандартних невизначеностей та відповідних коефіцієнтів чутливості. Таким чином, інформація, необхідна для визначення загальної невизначеності, наведена в таблиці (A.2).

A.4 Розширена невизначеність спектрального аналізу

Об'єднана стандартна невизначеність для розрахунку рівня субоктавної смуги $u(L_{tx,m})$ визначається таким рівнянням:

$$u(L_{tx,m}) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (c_i u_i)^2}. \quad (A.4)$$

ISO/IEC Guide 98-3 вимагає, щоб розширена невизначеність, U , була конкретизована таким чином, щоб інтервал $[L_{tx,m} - U, L_{tx,m} + U]$ покривав 95 % значень $L_{tx,m}$, що може бути розумно віднесено до $L_{tx,m}$. Для цього використовується коефіцієнт покриття, k , який залежить від розподілу ймовірності, що пов'язано з величиною. Розширена невизначеність U розраховується відповідно до рівняння (A.5):

$$U(L_{tx,m}) = k * u(L_{tx,m}), \quad (A.5)$$

Якщо можна припустити, що невизначеності мають нормальний розподіл, коефіцієнт покриття k матиме приблизне значення 2, яке означає, що розширена невизначеність вдвічі перевищує стандартну невизначеність.

ДОДАТОК Б
(інформаційний)

НАКЛАДАННЯ СПЕКТРІВ

Під час вибірки профілю поверхні, значення вимірів представляють глибину шорсткості в окремому місці. Відстань (або інтервал часу) між двома вимірами визначає мінімальну довжину хвилі, яку можна правильно виміряти. Іншими словами, частота вибірки (f_s) визначає найвищу частоту, яка має бути виміряна належним чином.

На рисунку Б.1 показано результат певної частоти вибірки для різних сигналів.

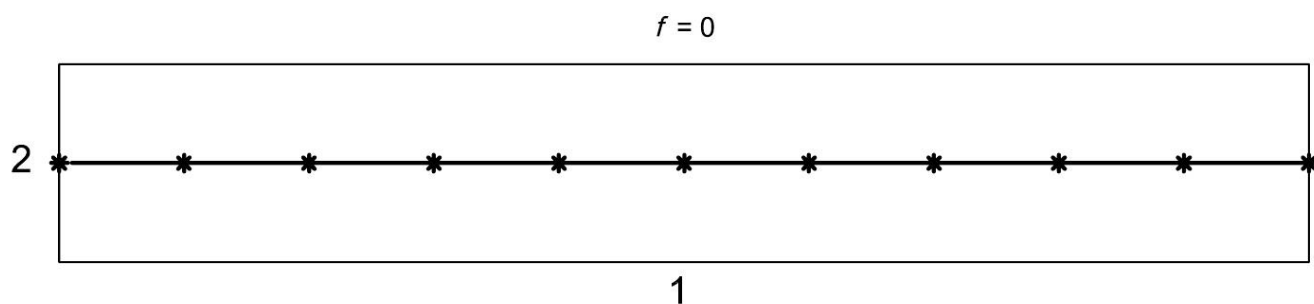
Максимальна частота, яка може бути коректно представлена дискретизованим сигналом, становить половину частоти дискретизації (частота Найквіста). Якщо сигнал містить частотні компоненти, що перевищують частоту Найквіста, вони будуть невірно трактуватися як нижчі частоти в спектрі дискретизованого сигналу. Це явище називається «накладання спектрів».

Два класичних приклади накладання спектрів:

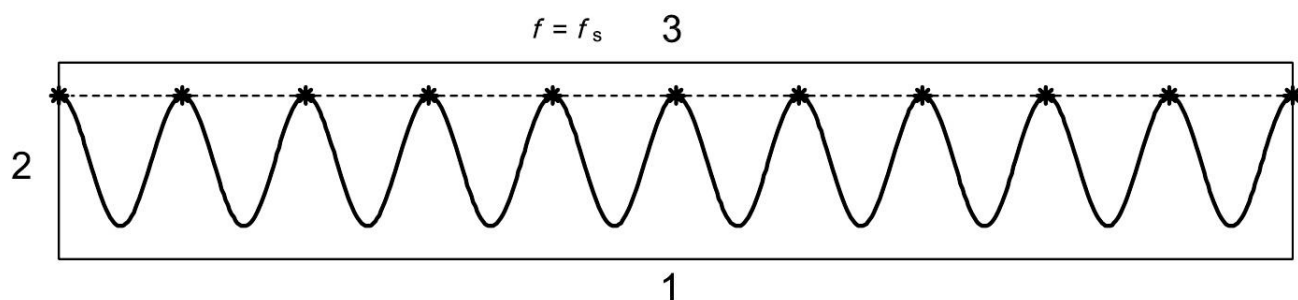
1) колеса в західних фільмах часто, здається, рухаються назад (тобто з негативною частотою) або занадто повільно рухаються вперед через вибірку, яка пов'язана зі зйомками;

2) насправді стробоскоп є пристроєм для накладання спектрів, який призначений представляти високі частоти як низькі (навіть нульову частоту, коли зображення заморожено).

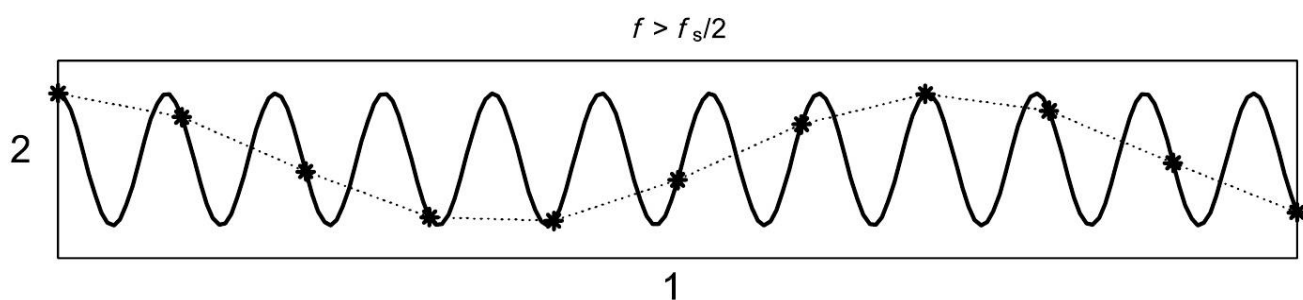
З метою запобігання накладання спектрів, високочастотні складові сигналу мають бути вилучені шляхом застосування низькочастотної фільтрації перед дискретизацією, з частотою відсічення менше половини частоти дискретизації (на практиці частота відсічення буде ще нижчою).



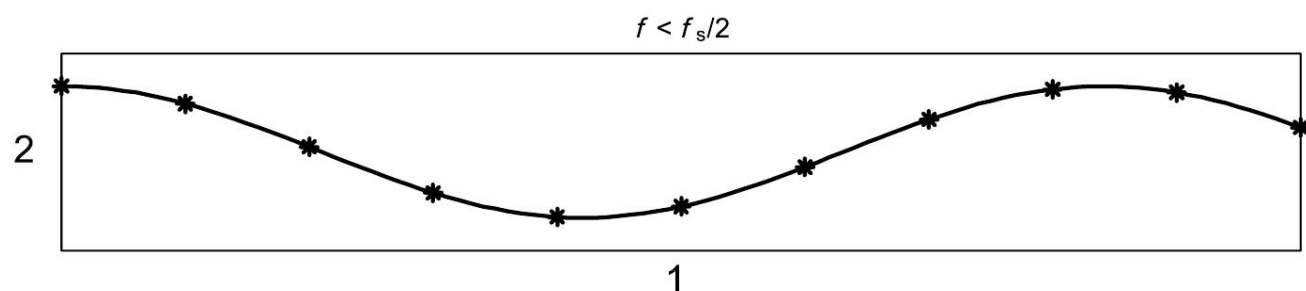
а) Нульова частота (відсутність амплітудних змін)



б) Компонент на частоті вибірки f_s інтерпретується як нульова частота



в) Складова частоти за умови $(1/N) f_s$;



г) Складова частоти за умови $[(N + 1)/N] f_s$ інтерпретується як $(1/N) f_s$

Умовні позначки:

1 - час;

2 - амплітуда;

3 - (f_s = частота вибірки).

Рисунок Б.1 – Ілюстрація «накладання спектрів»

ДОДАТОК В

(інформаційний)

ОЦІНКА ВІДХИЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ЧЕРЕЗ КОЛИВАННЯ ШВИДКОСТІ

Коливання швидкості викличе зміщення часової частоти, що призведе до відхилень значення, отриманого для енергії в діапазоні частот. Для оцінки цієї помилки використовується такий підхід.

Для оцінки відхилення, як консервативний підхід, передбачається спектр з усією своєю енергією в межах однієї субоктавної смуги і плоскою амплітудно-частотною характеристикою в межах цієї смуги. Якщо часова частота зміщується, частина енергії не залишиться в межах цієї смуги. Часткова втрата енергії може бути розрахована за допомогою такої процедури:

Приймаємо, що $f_{\text{пр},1}$ та $f_{\text{пр},2}$ є нижньою та верхньою межами щодо відповідної просторової смуги частот. Часові частоти можуть бути розраховані з використанням швидкості вимірювання v :

$$\begin{aligned} f_{\text{ч},1} &= v * f_{\text{пр},1}, \\ f_{\text{ч},2} &= v * f_{\text{пр},2}. \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Коли швидкість змінюється (Δv), часова частота становить:

$$\begin{aligned} f'_{\text{ч},1} &= (v + \Delta v) * f_{\text{пр},1}, \\ f'_{\text{ч},2} &= (v + \Delta v) * f_{\text{пр},2}. \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Якщо Δv позитивний, часткова втрата енергії становитиме:

$$\Delta P_{\text{ч,поз}} = \frac{f'_{\text{ч},2} - f_{\text{ч},2}}{f_{\text{ч},2} - f'_{\text{ч},1}} = \frac{\text{abs}(\Delta v) f_{\text{пр}2}}{v(f_{\text{пр}2} - f_{\text{пр}1})}. \quad (\text{B.3})$$

Якщо Δv негативний, часткова втрата енергії становитиме:

$$\Delta P_{\text{ч,нег}} = \frac{f_{\text{ч},1} - f'_{\text{ч},1}}{f_{\text{ч},2} - f_{\text{ч},1}} = \frac{\text{abs}(\Delta v) f_{\text{пр}1}}{v(f_{\text{пр}2} - f_{\text{пр}1})}. \quad (\text{B.4})$$

В середньому це є:

$$\Delta P_{\text{ч,сеп}} = \frac{\text{abs}(\Delta v)}{2v} * \frac{f_{\text{пр}2} + f_{\text{пр}1}}{f_{\text{пр}2} - f_{\text{пр}1}}. \quad (\text{B.5})$$

Це рівняння показує, що відхилення збільшується з частотою і зменшується з шириною смуги. Для пропорційних смуг пропускання ці ефекти взаємно компенсують один одного, що призводить до рівняння, яке залежить лише від відносної ширини смуги:

$$\Delta P_{\text{ч,сер}} = \frac{\text{abs}(\Delta v)}{2v} * \frac{10^{\frac{3}{20n}} + 10^{-\frac{3}{20n}}}{10^{\frac{3}{20n}} - 10^{-\frac{3}{20n}}}. \quad (\text{B.6})$$

Якщо $n = 1$ для октавних смуг і $n = 3$ для третьоктавних смуг.

ДОДАТОК Г
(інформаційний)

**КОМПЕНСАЦІЯ КОЛИВАНЬ ШВИДКОСТІ ПІД ЧАС ОБРОБКИ
РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ**

Якщо коливання швидкості під час вимірювання профілю поверхні занадто великі, щоб відповідати вимогам 6.2.2, їх слід компенсувати за допомогою вимірювань поверхні, що залежить від швидкості згідно з 6.2.3. Якщо вимірювання вже було здійснено без компенсації швидкості, можна скорегувати зміни швидкості під час обробки даних.

Цей метод вимагає, щоб швидкість вимірювання вимірювалася з тією ж частотою дискретизації, що і профіль поверхні. З фактичних значень швидкості в кожній точці вибірки може бути визначена фактична довжина кожного просторового інтервалу вибірки. Довжина інтервалів у поєднанні з відповідними значеннями профілю поверхні дає ряд нерівномірно розташованих значень профілю поверхні.

Використовуючи відповідний метод інтерполяції з пакету програмного забезпечення для обробки даних, цей ряд може бути перетворений на ряд рівномірно розташованих значень профілю поверхні, який може бути оброблений за методом 2 (8) або методом 3 (9) для спектрального аналізу.

ДОДАТОК Д
(інформаційний)

**ПОЯСНЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ ДОВЖИНИ
ХВИЛІ ТА ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ**

Роздільна здатність частоти вузькосмугового спектра, що виникає в результаті дискретного перетворення Фур'є, визначається рівнянням (Д.1):

$$\Delta f_{\text{пр}} = \frac{1}{l}, \quad (\text{Д.1})$$

де l - довжина оцінки.

Діапазон частот навколо середньої просторової частоти $f_{\text{пр}}$ має нижню межу, що визначається як:

$$f_{\text{пр,н}} = f_{\text{пр}} - \frac{1}{2} \Delta f_{\text{пр}}, \quad (\text{Д.2})$$

і верхню межу, що визначається як:

$$f_{\text{пр,в}} = f_{\text{пр}} + \frac{1}{2} \Delta f_{\text{пр}}, \quad (\text{Д.3})$$

Роздільна здатність довжини хвилі тепер залежить від самої середньої довжини хвилі $\lambda_{\text{пр}}$, як наведено нижче:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{\text{пр}} &= \frac{1}{f_{\text{пр,н}}} - \frac{1}{f_{\text{пр,в}}} \\ \Delta \lambda_{\text{пр}} &= \frac{1}{f_{\text{пр,н}}} - \frac{1}{f_{\text{пр,в}}} \\ &= \frac{\Delta f_{\text{пр}}}{f_{\text{пр}}^2 - \frac{1}{4} \Delta f_{\text{пр}}^2} \\ &= \frac{\frac{1}{l}}{\lambda_{\text{пр}}^2 - \frac{1}{4} \frac{1}{l^2}} \\ &= \frac{l \cdot \lambda_{\text{пр}}^2}{l^2 - \frac{1}{4} \lambda_{\text{пр}}^2}. \end{aligned} \quad (\text{Д.4})$$

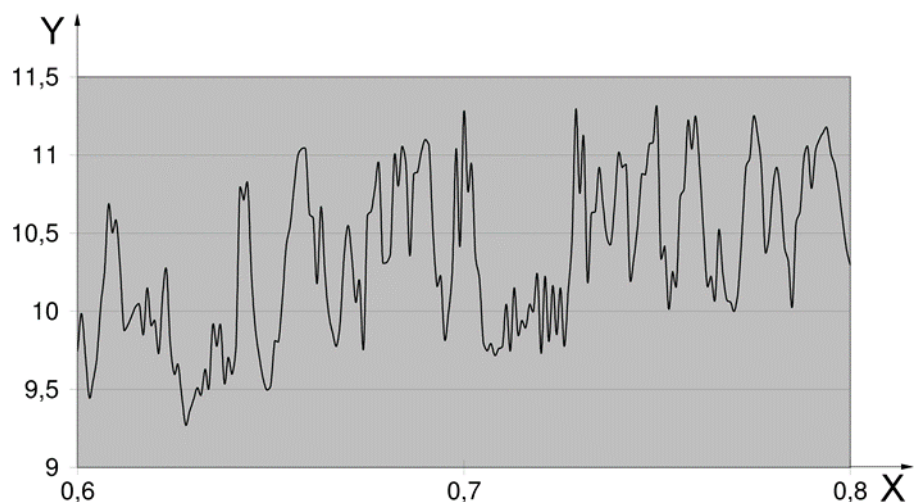
ДОДАТОК Е
(інформаційний)

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА АСИМЕТРІЯ ПРОФІЛЮ

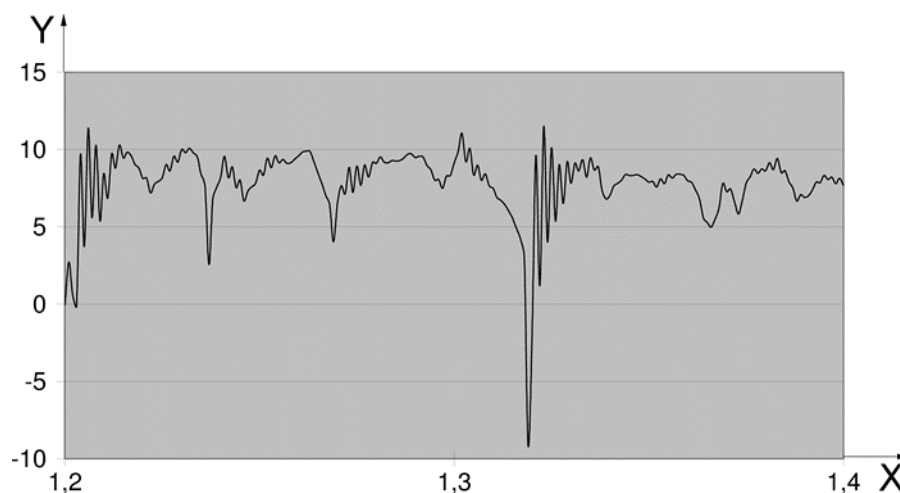
Метод спектрального аналізу, наведений у цих Технічних умовах, в статистичному сенсі аналізу другого моменту не може виявити всі відповідні характеристики профілю поверхні дорожнього покриття. Математичні операції, пов'язані з дискретним перетворенням Фур'є і визначенням спектральної щільності потужності, не враховують будь-яку асиметрію сигналу, що аналізується.

Тому користувач цього методу повинен знати, що деяка відповідна інформація, що міститься у профілі, може бути втрачена в процесі спектрального аналізу. Зокрема, можлива асиметрія профілю, в результаті якої «позитивна» чи «негативна» шорсткість не будуть відображені в результатах аналізу. Для виявлення цього аспекту профілю потрібен аналіз асиметрії, тобто третього статистичного моменту кількості.

Проте, «позитивна» шорсткість (демонструє виліти) може значно відрізнятися поведінкою щодо функціональних характеристик, таких як опір ковзанню або генерація шуму, ніж негативна шорсткість (демонструє провали).



а) Профіль поверхні позитивної макрошорсткості



б) Профіль поверхні негативної макрошорсткості

Умовні позначки:

X - висота профілю (мм);

Y - відстань(м).

Рисунок Е.1 – Приклади профілів поверхні

Хоча метод спектрального аналізу має ці недоліки, він вважається досить актуальним для характеристики дорожнього покриття і тому розроблений у цих Технічних умовах з метою стандартизації методу та поліпшення одноманітності визначення характеристик дорожнього покриття.

Протягом терміну дії Технічних умов будуть розглянуті і, якщо можливо, досліджені можливі методи вирішення проблеми асиметрії. Такими методами можуть бути:

- застосування вагового коефіцієнта до спектральних значень, що є пропорційним коефіцієнту СГП/середньоквадратичне значення профілю; значення цього коефіцієнта має бути досить добре корельовано із асиметрією або асиметрією профілю;
- розробка методу спектрального аналізу по третьому моменту профілю (асиметрія) замість необробленого профілю;
- застосування функції обгортання шини по виступах профілю перед спектральним аналізом. Наслідком такого підходу буде те, що поведінку шини, що обгортається, має бути визначено та стандартизовано.

На цей момент слід зробити висновок, що жодне рішення для більш повного спектрального опису профілів дорожнього покриття не готове до

прДСТУ:201_

стандартизації. Якщо метод стане доступним протягом його терміну дії, ці Технічні умови можуть бути відповідним документом для включення такого методу.

БІБЛІОГРАФІЯ

- 1 ISO 266, Acoustics — Preferred frequencies
- 2 ISO 13473-1, Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of Mean Profile Depth
- 3 ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) 1)
- 4 BENDAT J.S. and PIERSON A.G. Random Data: Analysis and measurement procedures, 2nd edition: John Wiley, New York (ISBN 0-471-04000-2), 1986
- 5 OPPENHEIM A.V. and WILLSKY A.S. Signals and Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (ISBN 0-13-809731-3), 1983
- 6 RANDALL, R.B. Application of B&K equipment to frequency analysis, Вгъел & Кјжг, Нжггг, (ISBN 87-87355-14-0), 1977
- 7 HARRIS, F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the Discrete Fourier Transform, Proceedings of the IEEE, Vol. 66. No. 1, January 1978
- 8 Lawrence Marple, S. Digital spectral analysis with applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs (ISBN 0-13-214149-3), 1987
- 9 GOUBERT, L. Influence of invalid readings in road texture profiles measured with optical profilometers on the calculation of the Mean profile Depth and the third octave texture spectrum, Proceedings of the 5th International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airports (SURF 2004), June 6-10, 2004, Toronto, Ontario, Canada

прДСТУ:201_

Код згідно ДК 004 93.080.10

Ключові слова: автомобільна дорога, визначення показників нерівності, вимірювальне обладнання, дорожнє покриття, дорожній одяг, оцінювання нерівностей.