

УДК 534-16+620.179.148(06)

# РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ З ВИКОРИСТАННЯМ РЛС МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Д.т.н. Р.Е. Пащенко, д.т.н. О.В. Полярус, к.т.н. С.М. Краснов, А.В. Лебединський, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*У статті проведено аналіз результатів вимірювань коливань балки у часовій і частотній областях, отриманих за допомогою РЛС міліметрового діапазону. Визначені закономірності змінювання частотних характеристик сигналу, тривалості коливань при зміні маси підвішеного вантажу і відстані між балкою і РЛС.*

*В статті проведено аналіз результатів вимірювань коливань балки в часовій і частотній областях, отриманих з допомогою РЛС міліметрового діапазону. Були знайдені закономірності зміни частотних характеристик сигналу, тривалості коливань при зміні маси підвішеного вантажу і відстані між балкою і РЛС.*

*The results of the measurements of the beam oscillations in the time and frequency domains, obtained using a millimeter-wave radar are analyzed. The regularities of changing the frequency characteristics of the signal, the oscillations duration as function of the suspended load and the distance between the beam and the radar were found.*

**Ключові слова:** механічні коливання балок, доплерівська РЛС, доплерівське зміщення, спектральний аналіз.

## Вступ

У мостових конструкціях в результаті різкої зміни величини навантаження можуть виникати періодичні затухаючі коливання. Такі коливання, наприклад, можуть проявлятися під час руху різних транспортних засобів, що мають різні маси і швидкості руху. В результаті такого впливу на резонансних частотах можуть значно підвищуватися амплітуди власних коливань мостових конструкцій. Дослідження коливальних процесів мостових конструкцій, як правило, проводяться під час приймальних випробувань, а також при їх періодичних обстеженнях [1, 2].

В даний час при проведенні таких досліджень використовуються різні датчики (тензорезисторні, п'єзокерамічні, індукційні тощо). При цьому сигнали з виходів датчиків фіксуються на паперових носіях за допомогою різних самописців [3] та спеціалізованих приладів і вимірювальних систем [4, 5, 6]. У подальшому отримані дані аналізуються і визначаються характеристики коливань (амплітуда, період, частота тощо).

Зазначені датчики є контактними і розміщуються безпосередньо на нижній частині конструкції мостів. Їх монтаж вимагає відносно тривалого часу і перекриття руху по досліджуваному мосту. Останнім часом для досліджень механічних коливань мостових конструкцій все частіше використовуються безконтактні методи на основі дистанційного зондування мостів в різних

діапазонах довжин хвиль. У роботах [7, 8] проведено аналіз дистанційних методів оцінки прогинів мостів і розглянуто метод оцінки прогинів поверхні мостових конструкцій з використанням вимірювання спотворень діаграми спрямованості системи випромінювачів, встановлених на нижній поверхні моста. Практичний інтерес представляє дослідження можливості застосування радіолокаційних станцій (РЛС) для дослідження механічних коливань.

Мета статті: оцінити можливість застосування РЛС міліметрового діапазону для аналізу параметрів механічних коливань мостових конструкцій.

## Опис експериментальної установки та порядку проведення вимірювань

При проведенні експериментальних досліджень використовувалася вимірювальна інформаційна установка (система) (ВІС), яка показана на рис. 1, а. Вона створена на базі персонального комп'ютера типу Notebook Samsung P29 з використанням РЛС IPS-154, розробленої фірмою InnoSenT, і вимірювача дальності Laser Distance Meter китайського виробництва.

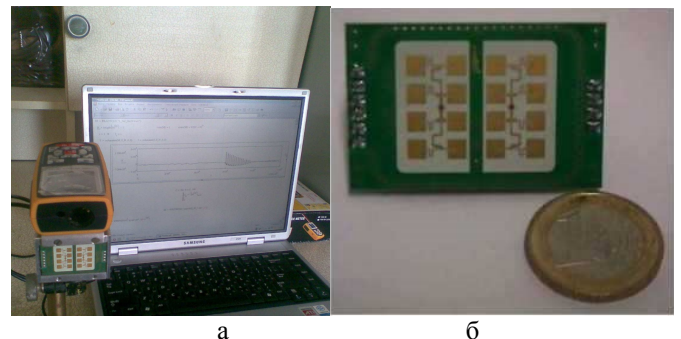


Рис. 1. Фотографія вимірювальної інформаційної установки (а); зовнішній вигляд РЛС IPS-154 (б) [9]

В якості датчика механічних коливань використовувалася РЛС IPS-154, зовнішній вигляд якої показаний на рис. 1, б [9]. Дана РЛС фактично являє собою детектор руху або так звану доплерівську РЛС (Doppler Radar). Конструктивно РЛС має рознесені площинні передавальну і приймальну антенні решітки з діаграмою спрямованості в горизонтальній (азимутальній) площині  $45^\circ$ , і у вертикальній (кутомісцевій) –  $38^\circ$ . Крім того, РЛС має наступні характеристики, що зазначені виробником [9]: напругу живлення 5.5 В (можна забезпечити живлення РЛС через порт USB комп'ютера), пікова потужність передавача до 100 мВт, смуга пропускання приймача до 50 кГц, габаритні розміри РЛС  $\sim 44 \times 30 \times 8.3$  мм. Типовий вимірювач дальності Laser Distance Meter

використовувався для визначення відстані від РЛС до об'єкта дослідження (механічної коливальної системи).

Об'єктом досліджень була сталеві балка, закріплена з одного кінця, як показано на рис. 2. Довжина балки становила 0.65 м, ширина – 0.05 м і товщина – 0.01 м. На незакріплений кінець балки (на відстані 0.65 м) на тонкому сталевому дроті підвішувались вантажі різної маси: 1 кг, 2 кг і 3 кг.



Рис. 2. Об'єкт дослідження механічних коливань – сталеві балка, що закріплена з одного кінця

Під час проведення експериментів дріт, на який підвішувалися вантажі, перерізали, і в результаті звільнення від навантаження вільного кінця сталеві балки виникали механічні коливання, які фіксувалися за допомогою ВІС. При цьому РЛС розташовувалася під сталеві балкою на відстані 0.5 м від її закріпленого кінця. Запис доплерівських сигналів при механічному коливанні балки в такому положенні проводився для двох відстаней від РЛС до балки – 0.34 м і 0.64 м.

**Аналіз експериментальних доплерівських сигналів у часовій області**

Проведемо аналіз у часовій області особливостей доплерівських сигналів, що отримані за допомогою РЛС при механічних коливаннях балки. В результаті математичної обробки сигналів отримуємо основні характеристики зареєстрованих коливань.

На рис. 3 та рис. 4 показані тимчасові реалізації доплерівських сигналів, записані на дальності РЛС від балки – 0.34 м і 0.64 м відповідно. Рисунок 3,а та 4,а відповідають коливанням при використанні вантажу масою 3 кг, рисунки 3,б і 4,б – 2 кг а рисунки 3,в 4,в – 1 кг.

Як впливає з рис. 3, коливання доплерівського сигналу є затухаючими, але регресивний характер затухання спостерігається тільки для максимальних значень сигналу, а мінімальні значення змінюються за параболічним законом.

На рис. 3, а видно, що доплерівській сигнал, отриманий при механічному коливанні балки з використанням вантажу масою 3 кг, складається з 18 періодів і містить приблизно 22000 точок ( $22000 \times 45.4$  мкс  $\sim 1.0$  с), тобто можна сказати, що коливання балки,

які можна впевнено оцінити, тривали приблизно 1.0 секунду.

Сигнал, що показаний на рис. 3, б, складається з 14 періодів і містить приблизно 18000 точок ( $18000 \times 45.4$  мкс  $\sim 0.82$  с), тобто коливання балки тривали приблизно на 0.18 с менше ( $\sim 20\%$ ), ніж при використанні вантажу 3 кг.

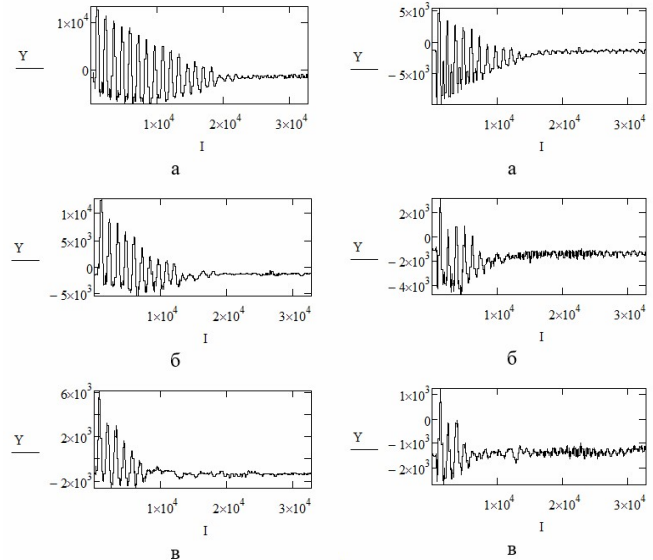


Рис. 3. Часові реалізації доплерівських сигналів, записаних на дальності РЛС від балки – 0.34 м, при використанні вантажів масою: 3 кг (а), 2 кг (б), 1 кг (в)

Рис. 4. Часові реалізації доплерівських сигналів, записаних на дальності РЛС від балки – 0.64 м, при використанні вантажів масою: 3 кг (а), 2 кг (б), 1 кг (в)

Показаний на рис. 3, в сигнал (при механічному коливанні балки з використанням вантажу масою 1 кг), складається тільки з 7 періодів і містить приблизно 8200 точок ( $8200 \times 45.4$  мкс  $\sim 0.37$  с), тобто тривалість коливання балки зменшилася майже в два рази у порівнянні з коливаннями при використанні вантажу масою 2 кг.

Як впливає з рис. 4, коливання доплерівського сигналу також є затухаючими, але при цьому при використанні вантажу масою 3 кг регресивний характер затухання спостерігається не тільки для максимальних значень сигналу, як було при дальності 0.34 м, а й для мінімальних значень. При використанні вантажів 2 кг і 1 кг максимальні і мінімальні значення сигналу змінюються згідно з законом близькому до параболічного.

Аналіз рисунка 4,а показує, що доплерівський сигнал, отриманий при механічному коливанні балки з використанням вантажу масою 3 кг, складається з 12 періодів, що на третину менше, ніж на дальності 0.34 м (18 періодів), і містить приблизно 14500 точок ( $\sim 0.66$  с).

Доплерівський сигнал, що відповідає механічному коливанні балки з використанням вантажу масою 2 кг (рис. 4, б), складається з 9 періодів і містить приблизно 11400 точок ( $\sim 0.52$  с), а з використанням вантажу масою 1 кг (рис. 4, в) – з 5 періодів і містить приблизно 6000 точок ( $\sim 0.27$  с).

Усереднені граничні значення рівня доплерівського сигналу і його тривалості, при використанні вантажів 1 кг, 2 кг і 3 кг на дальності 0.34 м і 0.64 м наведені відповідно в табл. 1 і табл. 2. У нижній частині таблиці наведені відносини цих величин для різних відносин вантажів.

Як видно з даних табл. 1 і табл. 2, при використанні вантажів 1 кг і 2 кг співвідношення рівнів доплерівського сигналу і його тривалості приблизно дорівнює двом, тобто воно пропорціональне співвідношенню маси вантажів (2 кг/1 кг).

Таблиця 1

Граничні значення рівня доплерівського сигналу і його тривалості для відстані між РЛС і балкою в 0.34 м

| Маса вантажу | Максимум          | Мінімум           | Діапазон          | Тривалість      |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1 кг         | 6009/<br>8.83dB   | -2678/<br>3.94dB  | 8687/<br>12.77dB  | 8200/<br>0.37с  |
| 2 кг         | 12690/<br>18.65dB | -5540/<br>8.14dB  | 18230/<br>26.8dB  | 18000/<br>0.82с |
| 3 кг         | 13260/<br>19.49dB | -7264/<br>10.68dB | 20524/<br>30.17dB | 22700/<br>1.03с |
| 2 кг/1 кг    | 2,11              | 2,07              | 2,1               | 2,19            |
| 3 кг/1 кг    | 2,21              | 2,71              | 2,36              | 2,77            |
| 3 кг/2 кг    | 1,05              | 1,31              | 1,13              | 1,26            |

Таблиця 2

Граничні значення рівня доплерівського сигналу і його тривалості для відстані між РЛС і балкою в 0.64 м

| Маса вантажу | Максимум        | Мінімум           | Діапазон          | Тривалість      |
|--------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1 кг         | 1592/<br>2.34dB | -2515/<br>3.7dB   | 4107/<br>6.04dB   | 6000/<br>0.27с  |
| 2 кг         | 3308/<br>4.86dB | -5104/<br>7.5dB   | 8412/<br>12.37dB  | 11400/<br>0.52с |
| 3 кг         | 5145/<br>7.56dB | -9578/<br>14.08dB | 14723/<br>21.64dB | 14500/<br>0.66с |
| 2 кг/1 кг    | 2.08            | 2.03              | 2.05              | 1.90            |
| 3 кг/1 кг    | 3.23            | 3.81              | 3.58              | 2.42            |
| 3 кг/2 кг    | 1.56            | 1.88              | 1.75              | 1.27            |

При використанні вантажів 1 кг і 3 кг співвідношення доплерівського сигналу трохи менше співвідношення маси вантажів (3 кг/1 кг). Для співвідношення маси вантажів 3 кг/2 кг співвідношення рівнів доплерівського сигналу і його тривалості також дещо відрізняється від величини 1.5.

Таким чином, з використанням часових реалізацій доплерівського сигналу можна оцінити характер коливань. Також за тривалістю доплерівського сигналу можна оцінювати тривалість механічних коливань, а за максимальним рівнем доплерівського сигналу – величину навантаження, яка була прикладена до об'єкта дослідження.

**Аналіз експериментальних доплерівських сигналів у частотній області**

Для дослідження частотних характеристик сигналів найбільш часто використовується спектральний аналіз на базі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), яке

реалізується за допомогою швидкодіючих процесорів ШПФ або програмно на персональному комп'ютері.

Для оцінки частотних характеристик доплерівських сигналів механічних коливань балки використовувався спеціалізований математичний пакет Mathcad [10], в якому є вбудована функція для розрахунку прямого ШПФ.

ШПФ дозволяє розрахувати дискретний спектр, в якому кожне значення амплітуди знаходиться відносно сусідніх на рівних проміжках по частоті. Величина цих проміжків між дискретами залежить від частоти дискретизації і кількості відліків у вибірці сигналу, тобто частота сигналу кратна кроку, який дорівнює відношенню частоти дискретизації до кількості відліків. Для описаних вище умов проведення експериментів частота дискретизації доплерівського сигналу дорівнює  $f_{\text{дискр}} = 22,050$  кГц, а кількість відліків у сигналі –  $N = 32768$  точок. Для таких умов крок між дискретами частоти на спектрах дорівнює

$$\Delta f_c = f_{\text{дискр}}/N = 22050/32768 \approx 0,67 \text{ Гц,}$$

тобто похибка визначення частоти доплерівського сигналу (дозвіл за частотою) становить 0,67 Гц.

На рис. 5 показані спектри доплерівських сигналів, записані на дальності РЛС від балки – 0.34 м, а на рис. 6 – 0.64 м, при цьому рисунки а) відповідають коливанням при використанні вантажу масою 3 кг, рисунки б) – 2 кг і рисунки в) – 1 кг.

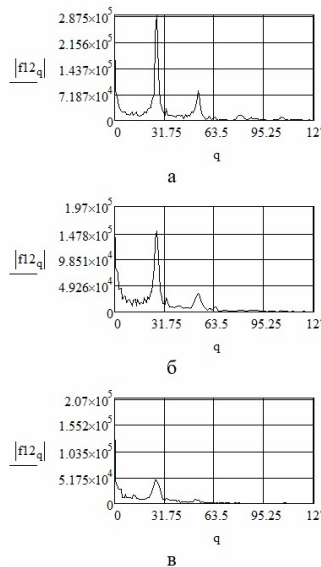


Рис. 5. Спектри доплерівських сигналів, що записані на відстані РЛС від балки – 0.34 м, з використанням вантажу масою: 3 кг (а), 2 кг (б), 1 кг (в)

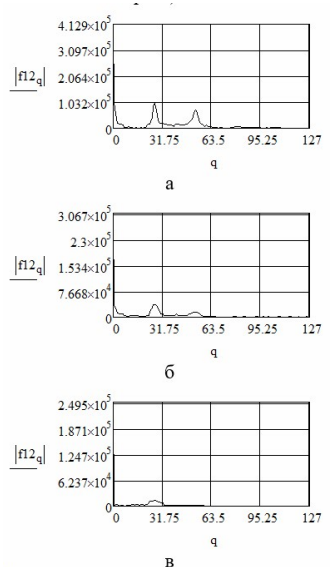


Рис. 6. Спектри доплерівських сигналів, що записані на відстані РЛС від балки – 0.64 м, з використанням вантажу масою: 3 кг (а), 2 кг (б), 1 кг (в)

На рис. 5, а спектр містить дві основні гармоніки. При цьому максимальний рівень основної гармоніки ( $2,875 \cdot 10^5$  рівнів) знаходиться приблизно на  $q \approx 27$  дискреті частоти, тобто частота доплерівського сигналу буде дорівнювати  $f_{\text{дс1}} = \Delta f_c \times q = 0,67 \times 27 \approx 18,09$  Гц.

Частоту доплерівського сигналу також можна визначити за величиною періоду сигналу  $T$ , який був визначений вище,  $f_{дс1} = 1/T = 1/0,0558 \approx 17,91$  Гц. Друга гармоніка ( $7,2 \cdot 10^4$  рівнів) знаходиться приблизно на  $q \approx 42$  дискреті частоти, тобто її частота буде дорівнювати  $f_{дс2} = 0,67 \times 42 \approx 28,36$  Гц.

Аналіз спектру, показаного на рис. 5, б, (використання вантажу масою 2 кг) дозволяє зробити висновок, що частоти двох основних гармонік такі ж як і при використанні вантажу масою 3 кг ( $f_{дс1} \approx 18,09$  Гц і  $f_{дс2} \approx 28,36$  Гц). Однак, максимальні рівні цих гармонік приблизно в два рази менше, відповідно,  $1,5 \cdot 10^5$  і  $3,9 \cdot 10^4$  рівнів. Такий характер спектра також пов'язаний з особливостями його мінімальних значень (див. рис. 3, б).

На рис. 5, в (використання вантажу масою 1 кг) спектр містить тільки одну основну гармоніку на частоті  $f_{дс1} \approx 18,09$  Гц. При цьому максимальний рівень основної гармоніки ( $5,175 \cdot 10^4$  рівнів) приблизно в три рази менше у порівнянні з використанням вантажу масою 2 кг, і в п'ять разів менше у порівнянні з використанням вантажу масою 3 кг. Відсутність другої гармоніки в спектрі пов'язано з тим, що в тимчасовій реалізації доплерівського сигналу (його мінімальних значеннях) відсутній другий період, який був при використанні вантажів масою 3 кг і 2 кг (див. рис. 3, в).

На рис. 6, а можна побачити, що так само, як і на дальності 0.34 м (див. рис. 5), спектр містить дві основні гармоніки на тих же частотах ( $f_{дс1} = 0,67 \times 27 \approx 18,09$  Гц,  $f_{дс2} = 0,67 \times 42 \approx 28,36$  Гц). Однак, на відміну від дальності 0.34 м, на дальності 0.64 м рівні цих двох гармонік майже однакові. При цьому максимальний рівень першої гармоніки зменшився майже в три рази у порівнянні з дальністю 0.34 м (було  $2,875 \cdot 10^5$  рівнів, а стало  $1,032 \cdot 10^5$  рівнів), а друга гармоніка практично не змінилася (було і залишилося  $7,2 \cdot 10^4$  рівнів). Також можна виділити два періоди сигналу:

$$T_1 = 1230 \times 45,4 \text{ мкс} \sim 55,8 \text{ мс},$$

$$f_{дс1} = 1/T_1 = 1/0,0558 \approx 17,91 \text{ Гц};$$

$$T_2 = 770 \times 4,54 \cdot 10^{-5} \text{ с} \approx 0,035 \text{ с},$$

$$f_{дс2} = 1/T_2 = 1/0,035 \approx 28,61 \text{ Гц}.$$

При використанні вантажу масою 2 кг спектр сигналу (рис. 6, б) також має дві основні гармоніки на тих же частотах. Однак, максимальні рівні цих гармонік також зменшуються приблизно в три рази, у порівнянні з дальністю 0.34 м. Співвідношення рівнів гармонік при зменшенні маси з 3 кг до 2 кг так само, як і на дальності 0.34 м (зменшення приблизно в два рази).

Аналіз спектру на рис. 6, в (використання вантажу масою 1 кг) показує, що так само, як і на дальності 0.34 м, він містить тільки одну основну гармоніку на частоті  $f_{дс1} \approx 18,09$  Гц. При цьому максимальний рівень гармоніки невеликий в порівнянні з шумовою складовою. Відсутність другої гармоніки обумовлено відсутністю другого періоду мінімальних значень сигналу.

Таким чином, спектральний аналіз доплерівських сигналів показав, що при збільшенні дальності від балки до РЛС в два рази частоти основних гармонік спектра не змінюються, а їх рівні зменшуються приблизно в три рази.

### Аналіз закономірностей характеристик доплерівських сигналів для різних відстаней між РЛС та балкою

З порівняння табл. 1 і табл. 2 видно, що тривалість доплерівського сигналу зі збільшенням дальності від балки до РЛС в два рази (з 0.34 м до 0.64 м) зменшується приблизно в 1.57 рази для вантажів 2 кг і 3 кг, та в 1.37 рази для вантажу 1 кг. Характер зміни тривалості доплерівських сигналів для трьох мас (вантажів) і дальності від балки до РЛС (суцільна лінія – 0.34 м, штрих пунктирна – 0.64 м) показано на рис. 7.

З цього рисунку випливає, що тривалості доплерівських сигналів збільшуються зі збільшенням маси, використаного вантажу. Зі збільшенням дальності від балки до РЛС тривалості сигналів зменшуються. При цьому використання вантажу більшої маси призводить до більшого зменшення тривалості.

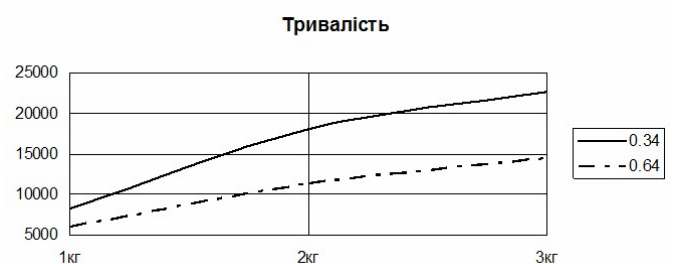


Рис. 7. Зміна тривалості доплерівських сигналів від маси використаних вантажів і дальності від балки до РЛС

З порівняння даних табл. 1 і табл. 2 також видно, що максимальний рівень доплерівського сигналу зі збільшенням дальності від балки до РЛС в два рази (з 0.34 м до 0.64 м) також зменшується. Зменшення рівня дорівнює приблизно 3.8 рази для вантажів 1 кг і 2 кг, і 2.58 рази для вантажу 3 кг.

Характер зміни максимального рівня доплерівських сигналів для трьох мас і дальності від балки до РЛС (суцільна лінія – 0.34 м, штрих пунктирна – 0.64 м) показаний на рис. 8.

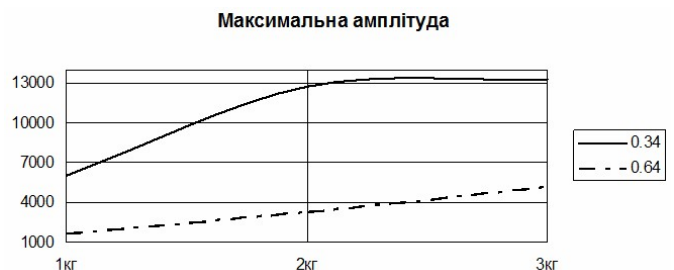


Рис. 8 – Зміна максимального рівня доплерівських сигналів від маси використаних вантажів і дальності від балки до РЛС

Рисунок показує, що на дальності 0.34 м максимальний рівень доплерівських сигналів різко збільшується при збільшенні маси вантажу з 1 кг до 2 кг. При збільшенні маси вантажу до 3 кг максимальний рівень сигналу збільшується несуттєво. Зі збільшенням дальності від балки до РЛС до 0.64 м характер зміни максимального рівня сигналу дещо інший, – відбувається

рівномірне збільшення рівнів при збільшенні мас використаного вантажу.

Характер зміни мінімального рівня доплерівських сигналів для трьох мас і дальності від балки до РЛС (суцільна лінія – 0.34 м, штрих пунктирна – 0.64 м) показано на рис. 9.

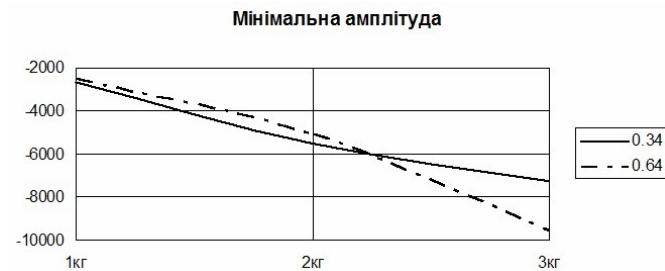


Рис. 9. Зміна мінімального рівня доплерівських сигналів від маси використаних вантажів і дальності від балки до РЛС

Як випливає з рис. 9, мінімальні рівні доплерівських сигналів є негативними значеннями. При збільшенні маси вантажу мінімальні рівні збільшуються а при використанні вантажу масою від 1 кг до 2 кг мінімальні рівні сигналів практично однакові для різної дальності від балки до РЛС. При збільшенні вантажу до 3 кг мінімальний рівень сигналу на дальності 0.64 м збільшується і перевищує в 1.32 рази аналогічний сигнал на дальності 0.34 м.

Отже, проведений аналіз показує, що співвідношення розглянутих параметрів доплерівських сигналів при різних співвідношеннях величин використаних вантажів відрізняються несуттєво при збільшенні дальності від балки до РЛС в два рази (з 0.34 м до 0.64 м) (див. табл. 1 і 2). Однак, зі збільшенням дальності від балки до РЛС тривалість доплерівського сигналу, а також його максимальний і мінімальний рівні і розкид рівнів сигналів зменшуються, тобто при проведенні досліджень необхідно враховувати дальність від балки до РЛС.

### Висновки

РЛС міліметрового діапазону можна використовувати для аналізу особливостей механічних коливань, в тому числі коливань мостових конструкцій.

В результаті аналізу часових реалізацій доплерівських сигналів, отриманих за допомогою РЛС, можна оцінити характер коливань. При прогині балки вниз максимальні значення сигналу на виході РЛС мають постійний період і згасають у часі за законом близьким до експоненціального. При прогині балки вгору мінімальні значення сигналу на виході РЛС мають більш складний характер. Так при використанні в якості навантаження вантажу масою 2 кг і 3 кг спостерігаються переколювання балки (з'являється другий період), а самі коливання згасають не по закону близькому до експоненціального. При використанні вантажу масою 1 кг характер поведінки максимальних і мінімальних значень сигналу приблизно однаковий.

За тривалістю доплерівського сигналу можна оцінювати тривалість механічних коливань, а за максимальним рівнем доплерівського сигналу –

величину навантаження, яка була прикладена до об'єкта дослідження.

Спектральний аналіз доплерівських сигналів дозволяє оцінити частотні особливості механічних коливань балки. Так при використанні в якості навантаження вантажу масою 2 кг і 3 кг в спектрах сигналу з'являється друга гармоніка, що вказує на більш складний характер коливань балки (відбуваються переколювання балки на іншій частоті). При використанні вантажу масою 1 кг присутня тільки одна частота.

При збільшенні дальності від балки до РЛС в два рази (з 0.34 м до 0.64 м) співвідношення параметрів доплерівських сигналів при різних співвідношеннях використаних вантажів відрізняються несуттєво.

Зі збільшенням дальності від балки до РЛС тривалість доплерівського сигналу, а також його максимальний і мінімальний рівні і розкид рівнів сигналів зменшуються, що необхідно враховувати при проведенні досліджень.

При збільшенні дальності від балки до РЛС в два рази частоти основних гармонік спектра не змінюються, а їх рівні зменшуються приблизно в три рази.

Представлений підхід може використовуватись для вимірювання параметрів механічних коливань не тільки металевої балки, але і мостових конструкцій. Дистанційні вимірювання їх динамічних характеристик значно скоротять часові витрати на проведення експериментів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Корниенко-Мифтахова И. К. Информационно-измерительная система для анализа характеристик динамического поведения конструкций / И. К. Корниенко-Мифтахова, С. Ф. Филоненко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2006. – №1 (17). – С. 75 – 83/
2. Барашиков А. Я. Оценка технического состояния строительных конструкций, зданий и сооружений / А.Я. Барашиков, А.М. Мальшев. – К.: НМЦ Держнаглядохоронпраці України, 1998. – 232 с.
3. Лучко И. И. Методи дослідження та випробувань будівельних матеріалів і конструкцій / Лучко И.И., Коваль П.М., Дем'ян М.Л. – Львів: Каменяр, 2001. – 436 с.
4. Conceptual bases of technical diagnostics of bridges constructions/ V. M. Kartopoltsev, A. G. Borovikov and other. // Proceedings Int. Conf. "VSU'2002". Sofia, Bulgaria, 2002. – V.1. – P. 48 – 53.
5. Ren W. X. Roebling suspension bridge. I: Finite- element model and free vibration response / Ren W.X., Blandford G.E., Harik I.E. // J. of Bridge Eng. – ASCE (March/April), 2004. – P. 110 – 118.
6. Редченко В. П. Оцінка просторової роботи прогонової будови моста за результатами її випробувань рухомих навантажень / В.П. Редченко // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – № 69. – 2004. – С. 210 – 214.
7. Poliarus O. V. Measurement method of the object surface deflections using antennas theory / Poliarus O.V., Poliakov E.O., Brovko Ja.S // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine. – P. 416 – 418.
8. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System / Poliarus O. V., Poliakov E. O., Lebedynskiy A. V., Pashchenko R. E., Ivanov V. K. // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2017. – Vol. 2, Is. 6. – P. 217 – 224.
9. K-Band CW Transceiver IPS-154 / <https://www.innosent.de/en/sensors/ips-series/cw-ips-154/>
10. Дьяконов В. Mathcad 2000: учебный курс / В. Дьяконов. – Спб.: Питер, 2000. – 592 с.