

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ «РЕЙКА – СТОРОННІЙ ПРЕДМЕТ»

Запропоновано методику розрахунку акустичних властивостей системи, що складається із залізничної рейки і стороннього предмета, який знаходиться на її поверхні. Методика дозволяє розрахувати зменшення амплітуди акустичного сигналу в рейці, викликаного появою предмета на її поверхні, залежно від щільності матеріалу предмета і швидкості поширення акустичних хвиль у матеріалі предмета.

Предложена методика расчета акустических свойств системы, состоящей из железнодорожного рельса и постороннего предмета, находящегося на его поверхности. Методика позволяет рассчитать уменьшение амплитуды акустического сигнала в рельсе, вызванного появлением предмета на его поверхности, в зависимости от плотности материала предмета и скорости распространения акустических волн в материале предмета.

A calculation technique is suggested for the system of the rail track and a foreign body on its surface. The procedure allows calculating a decrease of the intra-rail acoustic signal amplitude affected by the presence of a foreign body on the rail surface depending on the body substance density and the speed of acoustic wave propagation in the body substance.

З упродовженням високошвидкісного руху для забезпечення надійної роботи залізничного транспорту усе більшого значення набуває контроль якості рейкової колії та її технічне обслуговування, зокрема, своєчасне виявлення та усунення сторонніх предметів на рейках. Особливо це стосується потенційно небезпечних ділянок залізниці, таких як тунелі, мости, переїзди, криволінійні ділянки колії, на яких велика імовірність виникнення небезпечної ситуації в результаті наїзду або зіткнення транспортного засобу зі стороннім предметом, що зростає зі збільшенням швидкості руху поїздів. Актуальність даної проблеми полягає в необхідності своєчасного виявлення сторонніх предметів на рейковій колії і відсутності пристроїв для цих цілей.

У роботі [1] обговорювалися можливості фізичних методів щодо даної проблеми, у роботі [2] були розглянуті питання практичної реалізації пристроїв для виявлення сторонніх предметів на рейках, у роботі [3] автори запропонували використовувати акустичні методи для виявлення предметів на потенційно небезпечних ділянках колії.

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку акустичних властивостей системи «рейка – сторонній предмет», що дозволяє розрахувати зменшення амплітуди акустичного сигналу в рейці, викликане появою предмета на її поверхні, залежно від щільності матеріалу предмета і швидкості поширення акустичних хвиль у матеріалі предмета.

Об'єктом дослідження є система «рейка – сторонній предмет», умови поширення акусти-

чних хвиль у якій відрізняються від умов їхнього поширення в рейці, що межує з повітрям. Наявність стороннього предмета на поверхні рейки приводить до появи відбитих від межі розподілу «рейка – сторонній предмет» і заломлених хвиль, кути відбиття і заломлення, а також коефіцієнти відбиття і заломлення яких залежать від фізичних властивостей контактуючих середовищ [4].

Напрямок поширення акустичних хвиль на межі розподілу двох середовищ буде визначатися акустичними властивостями матеріалів рейки і стороннього предмета відповідно до виразів [5]

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_l}{c_l} = \frac{\sin \theta_\tau}{c_\tau}, \quad (1)$$

де c_l, c_τ – швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі рейки щільністю ρ ; c_1 – швидкість поширення поздовжніх хвиль у матеріалі стороннього предмета щільністю ρ_1 ; θ_1 – кут заломлення в друге середовище (матеріал стороннього предмета); θ_τ – кут падіння поперечної хвилі на межу розподілу двох середовищ, відлічуваний від нормалі до неї; θ_l – кут поширення трансформаційної поздовжньої хвилі.

Розрахуємо коефіцієнти відбиття по енергії акустичних хвиль від сторонніх предметів, що знаходяться на поверхні рейки, для предметів з різних матеріалів. Приймемо як початкові умови щільність сталі, з якої виготовлено

рейку, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$; швидкості поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль у рейці відповідно $c_l = 5900 \text{ м/с}$; $c_t = 3250 \text{ м/с}$. Для розрахунків і зображення результатів у вигляді графіків використано математичний пакет Mathcad 11. Введемо такі позначення: c_l – швидкість поздовжніх хвиль у матеріалі стороннього предмета щільністю ρ_l ; cL , c_t – відповідно, швидкості поширення поздовжніх і поперечних хвиль у рейці щільністю ρ ; θ_1 – кут заломлення в друге середовище; θ_L – кут поширення трансформаційної поздовжньої хвилі; θ_t – кут падіння хвилі на межу розподілу двох середовищ.

Задамо діапазон зміни кута падіння акустичної хвилі на межу розподілу із кроком 1

$$n = 0 \dots 90. \quad (2)$$

Переведемо значення кута падіння в радіани:

$$\theta_t(n) = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{360}. \quad (3)$$

Задамо згідно з (1) закони зміни кутів θ_1 і θ_L :

$$\left. \begin{aligned} \theta_1(n) &= \arcsin \left\{ \sin[\theta_t(n)] \cdot \frac{c_l}{c_t} \right\}; \\ \theta_L(n) &= \arcsin \left\{ \frac{cL \cdot \sin[\theta_1(n)]}{c_l} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Уведемо позначення:

$$\left. \begin{aligned} Z_1(n) &= \rho_l \frac{c_l}{\cos[\theta_1(n)]}; \\ Z_L(n) &= \rho \frac{cL}{\cos[\theta_L(n)]}; \\ Z_t(n) &= \rho \frac{c_t}{\cos[\theta_t(n)]}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тоді, згідно з [6], вираз для коефіцієнта відбиття поперечної хвилі має вигляд

$$\begin{aligned} V_{\tau t}(n) = & - \left\{ \left\{ Z_1(n) + Z_L(n) \cdot \cos[2 \cdot \theta_t(n)] \right\}^2 - \right. \\ & \left. - Z_t(n) \cdot \left\{ \sin[2 \cdot \theta_t(n)] \right\}^2 \right\} / \left\{ Z_1(n) + \right. \\ & \left. + Z_L(n) \cdot \left\{ \cos[2 \cdot \theta_t(n)] \right\}^2 + \right. \\ & \left. + Z_t(n) \cdot \left\{ \sin[2 \cdot \theta_t(n)] \right\}^2 \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

а вираз для коефіцієнта відбиття з трансформацією поперечної хвилі в поздовжню

$$\begin{aligned} V_{t1}(n) &= \operatorname{tg}[\theta_L(n)] \cdot \cos[2 \cdot \theta_t(n)] \times \\ & \times \left[1 + V_{\tau t}(n) \right] / \left\{ 2 \cdot \left\{ \sin[\theta_t(n)] \right\}^2 \right\}. \quad (7) \end{aligned}$$

З урахуванням отриманих формул вирази для коефіцієнтів відбиття по енергії для відповідних коефіцієнтів відбиття мають вигляд:

$$E_{\tau t}(n) = \left(|V_{\tau t}(n)| \right)^2; \quad (8)$$

$$E_{t1}(n) = \frac{c_t \cdot \cos[\theta_L(n)] \cdot \left(|V_{t1}(n)| \right)^2}{cL \cdot \cos[\theta_t(n)]}. \quad (9)$$

Вираз для сумарного коефіцієнта відбиття по енергії може бути отримано за формулою

$$E(n) = E_{\tau t}(n) + E_{t1}(n). \quad (10)$$

Змінюючи значення кута падіння згідно з (2), (3), отримаємо значення коефіцієнтів відбиття за формулами (4)–(10) для різних матеріалів другого середовища (стороннього предмета на поверхні рейки).

На рис. 1 наведено сімейство кривих для модулів коефіцієнтів відбиття поперечної хвилі $|V_{\tau t}(n)|$ від вільної поверхні – крива 1 (друге середовище – повітря, $\rho_l = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, $c_l = 0,331 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) і поверхні, навантаженої стороннім предметом, виготовленим із заліза – крива 2 ($\rho_l = 7800 \text{ кг/м}^3$, $c_l = 5850 \text{ м/с}$, характеристичний імпеданс $Z = 45,6 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$), з чавуна – крива 3 ($\rho_l = 7200 \text{ кг/м}^3$, $c_l = 3500 \text{ м/с}$, $Z = 25 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$), з бетону – крива 4 ($\rho_l = 2400 \text{ кг/м}^3$, $c_l = 3000 \text{ м/с}$, $Z = 1,4 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2\text{с}$).

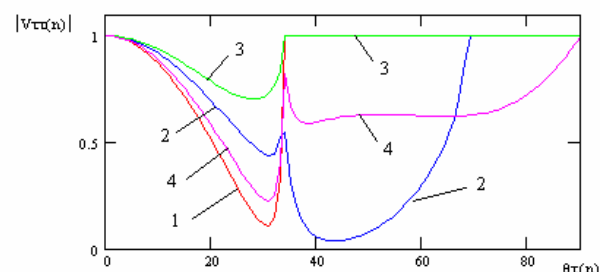


Рис. 1. Модуль коефіцієнта відбиття поперечної хвилі:

1 – від вільної поверхні; 2 – поверхні, навантаженої предметом із заліза; 3 – чавуну; 4 – бетону

Кут падіння поперечної хвилі, за яким відбита поздовжня хвиля є неоднорідною (третій критичний кут), може бути розрахований за формулою [6]

$$\theta_{3k} = \arcsin \frac{c_\tau}{c_l}. \quad (11)$$

При кутах падіння θ_τ на межу розподілу двох середовищ, більших за третій критичний θ_{3k} , модуль коефіцієнта відбиття поперечних хвиль зі збільшенням імпедансу стороннього предмета зменшується. При $\theta_\tau > \theta_{3k}$ коефіцієнт трансформації поперечних хвиль у поздовжні є уявним. Для кутів падіння $\theta_\tau < \theta_{3k}$ зменшення модуля коефіцієнта трансформації поперечних хвиль у поздовжні (рис. 2) при збільшенні імпедансу стороннього предмета і пов'язане з цим зменшення потоку енергії акустичної хвилі перекидає деяке збільшення випромінювання в друге середовище (сторонній предмет), внаслідок цього зростає коефіцієнт відбиття поперечних хвиль. При $\theta_\tau = \theta_{3k}$ точне значення коефіцієнта трансформації поперечних хвиль у поздовжні визначається виразом

$$V_{\tau l} = 4 \frac{\cos(\theta_{3k}) c_\tau}{\cos(2\theta_{3k}) c_l}. \quad (12)$$

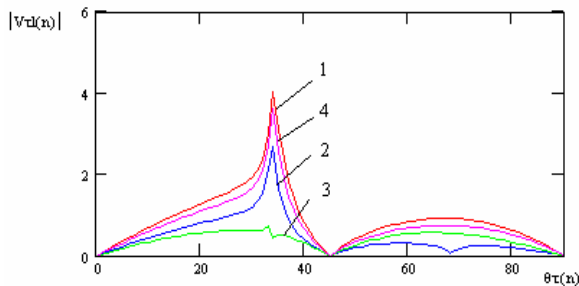


Рис. 2. Модуль коефіцієнта відбиття з трансформацією поперечної хвилі в поздовжню: 1 – від вільної поверхні і поверхні; 2 – навантаженої предметом з чавуна; 3 – заліза; 4 – бетону

Результати розрахунків коефіцієнтів відбиття $E_{\tau\tau}(n)$ і трансформації $E_{\tau l}(n)$ по енергії, а також сумарного коефіцієнта відбиття поперечної хвилі і трансформованої в поздовжню $E(n)$ з урахуванням дійсних значень кута $\theta_l(n)$ для вільної і навантаженої предметом із заліза, чавуна і бетону поверхні, наведені на рис. 3–6. На рис. 7 наведені графіки, що характеризують зміну сумарного коефіцієнта по енергії відбитої поперечної хвилі і трансформованої в поздовжню $E(n)$ з урахуванням дійсних

значень кута $\theta_l(n)$ для розглянутих вище матеріалів. Аналіз графіків (рис. 7) показує, що при куті падіння $\theta_\tau > \theta_{3k}$ сумарний коефіцієнт по енергії хвилі, відбитої від границі розподілу двох середовищ зменшується у разі збільшенні імпедансу стороннього предмета.

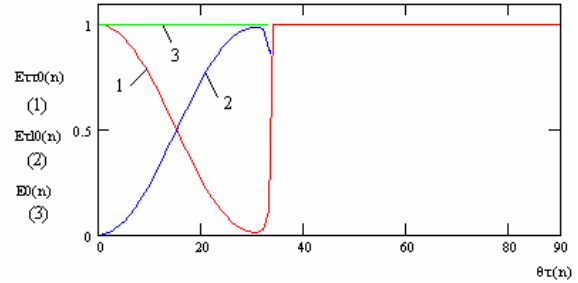


Рис. 3. Коефіцієнти відбиття по енергії залежно від кута падіння поперечної хвилі для вільної поверхні

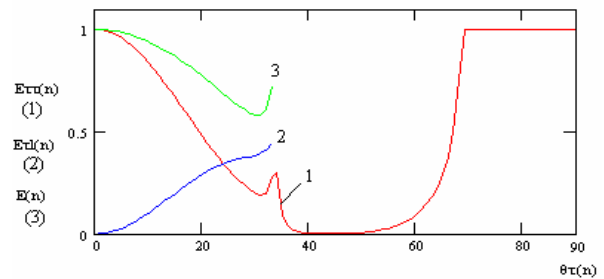


Рис. 4. Коефіцієнти відбиття по енергії залежно від кута падіння для поверхні, навантаженої предметом з чавуна

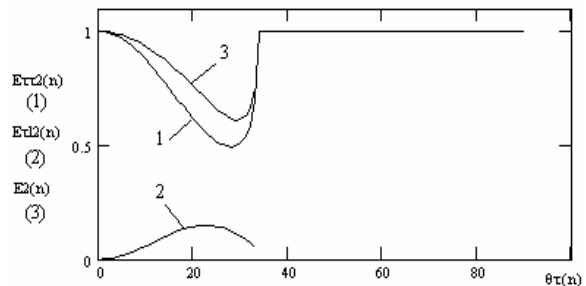


Рис. 5. Коефіцієнти відбиття по енергії залежно від кута падіння для поверхні, навантаженої предметом із заліза

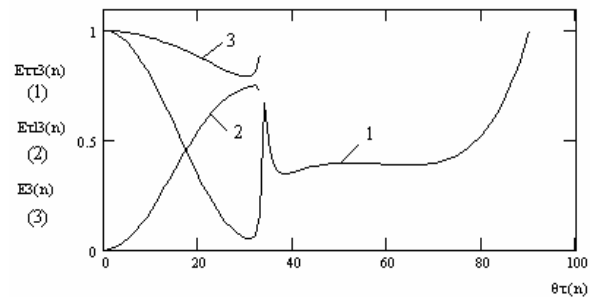


Рис. 6. Коефіцієнти відбиття по енергії залежно від кута падіння для поверхні, навантаженої предметом з бетону

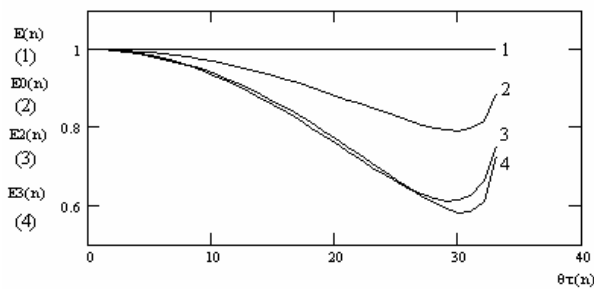


Рис. 7. Сумарні коефіцієнти відбиття по енергії залежно від кута падіння для вільної і навантаженої поверхонь

При відбитті від вільної поверхні (див. рис. 3, 7) сумарний коефіцієнт відбиття по енергії $E(n)$ (крива 3) дорівнює одиниці для всіх кутів θ_τ . Коефіцієнт $E_{\tau l}(n)$ для кута падіння $\theta_\tau > \theta_{3k}$ дорівнює нулю. Для розглянутих матеріалів предметів коефіцієнт $E(n)$ для кутів падіння, відмінних від нуля, менше одиниці. Це пояснюється відтоком частини пружної енергії хвилі в сторонній предмет за рахунок збудженої в ньому поздовжньої хвилі. Таким чином, поява на поверхні рейки стороннього предмета приводить до відтоку частини енергії акустичної хвилі, що поширюється в рейці, у предмет, що викликає зменшення амплітуди акустичного сигналу, прийнятого перетворювачем.

Висновки

Запропонована методика розрахунку акустичних властивостей системи рейка – сторонній предмет, що враховує вплив акустичних властивостей стороннього предмета за умови поширення пружних хвиль у матеріалі рейки, дозволяє розрахувати зменшення амплітуди акус-

тичного сигналу в залізничній рейці, викликане наявністю стороннього предмета на її поверхні.

За допомогою даної методики можна визначити матеріал стороннього предмета, що знаходиться на поверхні рейки, по зменшенню амплітуди прийнятого акустичного сигналу.

Наведені розрахунки показують, що з ростом характеристичного імпедансу матеріалу предмета підвищується надійність його виявлення на поверхні рейки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Войтенко В. А. Обнаружение препятствий на железнодорожном пути / В. А. Войтенко, Ю. И. Осенін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2005. – № 3(85). – С. 54–60.
2. Войтенко В. П. Пристрій для виявлення сторонніх предметів на залізничній колії / В. П. Войтенко, Ю. І. Осенін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2005. – № 8(90), ч. 2. – С. 118–123.
3. Войтенко В. П. Діагностування технічного стану рейкового шляху за допомогою акустичних методів / В. П. Войтенко, Ю. І. Осенін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2005. – № 5(87). – С. 272–278.
4. Войтенко В. П. Моделювання процесу діагностування залізничного рейкового шляху та аналіз результатів дослідження / В. П. Войтенко, Ю. І. Осенін // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2005. – № 6(88). – С. 244–254.
5. Лепендин Л. Ф. Акустика. – М.: Высш. шк., 1978. – 448 с.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

Надійшла до редколегії 26.10.2005.