

**Визначення деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу при дії динамічного навантаження залізничного транспорту**

**В. В. Ковальчук, М. П. Коваль, А. М. Онищенко, І. Б. Кравець, О. М. Баль, Р. В. Маркуль, С. І. Віхоть, О. В. Петренко, Р. Т. Рибак, А. Р. Мілянч**

*Проведено аналіз перспектив застосування збірних металевих гофрованих конструкцій у тілі насипу залізничної колії у вигляді тунельного шляхопроводу з метою пропуску автомобільних транспортних засобів та рухомого складу залізниць.*

*Наведено спосіб інерційних динамічних випробувань деформованого стану тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій при проїзді рухомого складу залізничного транспорту, шляхом вимірювання прискорень у вершині та на бокових сторонах конструкцій шляхопроводу.*

*Запропоновано алгоритм обробки сигналу прискорень для оцінки деформованого стану металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу при дії динамічного навантаження від залізничного транспорту.*

*Проведено експериментальні динамічні вимірювання прискорень, що виникають у вершині та на бокових сторонах тунельного шляхопроводу при проїзді пасажирського та вантажного рухомого складу залізничного транспорту. Максимальна величина прискорень, що виникають у вершині тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного поїзду склала  $7,99 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $6,21 \text{ м/с}^2$ , а максимальні прискорення, які виникають на бокових сторонах становили  $2,63 \text{ м/с}^2$  та  $1,77 \text{ м/с}^2$ .*

*Встановлено, що максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій вершини тунельного шляхопроводу, при проїзді вантажного та пасажирського поїздів становлять, відповідно,  $1,63 \text{ мм}$  та  $1,11 \text{ мм}$ . Максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій на бокових сторонах шляхопроводу становлять  $1,07 \text{ мм}$  та  $0,48 \text{ мм}$ .*

*Отримано величину відносних деформацій вертикального та горизонтального розмірів конструкцій тунельного шляхопроводу при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниці. Відносні вертикальні деформації шляхопроводу склали  $0,020 \%$ , а горизонтальні –  $0,012 \%$ .*

*Практичне значення роботи полягає у тому, що за допомогою розробленої методики вимірювання прискорень можна проводити оцінку деформованого стану металевих гофрованих конструкцій при дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниці.*

*Ключові слова: тунельний шляхопровід, збірні металеві гофровані конструкції, залізнична колія, прискорення металевих конструкцій, вертикальні та горизонтальні деформації конструкцій.*

## 1. Вступ

Збірні металеві гофровані конструкції (МГК), які використовуються для будівництва тунельних шляхопроводів, малих мостів та водопропускних труб є перспективними конструкціями. Оскільки транспортні споруди із МГК є економічно-доцільними, вимагають мінімальних витрат часу і матеріалів для їх будівництва та експлуатації [1]. Особливо дане питання актуальне для швидкого відновлення пропускної та провізної здатності пошкоджених транспортних споруд у наслідок проведення бойових дій на території України.

Із досвіду експлуатації транспортної споруди із металевих гофрованих конструкцій, що експлуатується на залізничній колії, встановлено, що у початковий період експлуатації відбувся розвиток залишкових деформацій горизонтального та вертикального розмірів конструкцій [1]. Це вимагає особливої уваги до якісного виконання будівельних робіт та контролю змін технічного стану металевих гофрованих конструкцій споруд. Особливо у період, коли відбувається припрацювання конструкцій із ґрунтовою ущільнюючою засипкою [2, 3]. Крім цього у роботі [4] встановлено, що несуча здатність металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд залежить від величини ступеню ущільнення ґрунтової засипки. При нормативному ущільненню ґрунтової засипки забезпечується проектна несуча здатність конструкцій.

Технічний стан транспортних споруд на залізничній колії відіграє чи не найважливішу роль у забезпеченні безпечного пропуску рухомого складу залізничного транспорту. У Директиві 2016/797 Європейського Союзу та Технічних специфікаціях інтегрованості підсистеми «Інфраструктура» TSI INF [5] зазначено, що основним критерієм працездатності транспортних споруд є пропуск рухомого складу залізниць із встановленими швидкостями та забезпечення безпеки руху.

У 2019 р. побудовано шляхопровід тунельного типу із збірних металевих гофрованих конструкцій під залізничною колією. Технічні параметри тунельного шляхопроводу: поперечний переріз – еліпс шириною 9,37 м, висотою 8,12 м та довжиною 34,63 м. Вигляд діючого тунельного шляхопроводу наведено на рис. 1.

Контроль технічного стану транспортних споруд із збірних МГК в умовах експлуатації можливий за допомогою проведення експериментальних вимірювань вертикальних та горизонтальних деформацій металевих конструкцій споруд.

Для оцінки деформованого стану шляхопроводу тунельного типу постала задача контролю деформацій при дії динамічного навантаження від рухомого складу залізничного транспорту. Проте, накопиченого досвіду експериментальної оцінки деформованого стану споруд із металевих гофрованих конструкцій залізничної колії на сьогоднішній день практично немає. Тому важливим та актуальним завданням наукових досліджень є впровадження неруйнівних методів контролю технічного стану таких споруд. Ці методи (вимірювальні системи) повинні надавати можливість прогнозувати погіршення технічного стану споруд із МГК, що дозволить вчасно виконувати невідкладні ремонтні роботи з метою забезпечення проектної несучої здатності споруд.

Також слід зазначити, що діючі норми [6] наводять вимоги тільки до металевих гофрованих конструкцій і методів їх монтажу. Однак експериментальних

методів контролю технічного стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд у процесі експлуатації не наводиться.



Рис. 1. Вигляд тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій під залізничною колією

Отже, проведення досліджень деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій шляхопроводу тунельного типу при дії рухомого складу залізничного транспорту є актуальною задачею. Такі дослідження дозволять встановити динамічні параметри металевих гофрованих конструкцій і дадуть можливість оцінити несучу здатність споруд.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Діючі норми [6] висувають вимоги до проектування транспортних споруд із МГК на автомобільних дорогах. У них викладено принципи інженерного методу розрахунку споруд при дії статичних навантажень від транспортних засобів. Не розглядаються інструментальні методи досліджень деформованого стану тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій.

У роботі [7] наведено методику розрахунку величин сил тиску на вершину залізобетонної труби, яка підсилена металевими гофрованими конструкціями. Методика базується на визначення деформованого стану підсиленої труби при дії статичних та динамічних навантажень у залежності від висоти засипки над трубою, рахуючи від підшови шпали до вершини труби.

У роботі [8] проведено теоретичні дослідження несучої здатності металевих гофрованих конструкцій залізничної колії. Виконано розрахунок еквівален-

тних сил, які виникають від рухомого складу залізничного транспорту. Однак у роботі не наведено експериментальних досліджень деформованого стану металевих гофрованих конструкцій.

Згідно роботи [9], несуча здатність МГК транспортних споруд забезпечується при умові виконання якісного ущільнення ґрунтової засипки, тобто при забезпеченні нормативного ступеня ущільнення засипки до коефіцієнту 0,97 і вище. У роботі [10] зазначено, що крім ступеню ущільнення ґрунтової засипки важливим завданням забезпечення довговічної експлуатації споруд із МГК, є контроль деформацій вертикального та горизонтального діаметрів споруди із МГК. Контроль потрібно виконувати протягом півроку від початку експлуатації споруд із МГК. Крім цього у роботі [11] зазначено, що при експлуатації споруд із металевих гофрованих конструкцій на залізницях необхідно обмежувати швидкість руху поїздів. Обмеження швидкості виконується до того моменту, коли металеві гофровані конструкції не будуть мати залишкових деформацій вертикального та горизонтального розмірів споруди.

Слід зазначити, що проаналізовані роботи стосуються актуальних питань, щодо необхідності моніторингу деформованого стану металевих гофрованих конструкцій споруд. Однак у них не наводять результати оцінки деформованого стану конструкцій споруд при дії рухомого складу залізничного транспорту.

У роботі [3] зазначено, що у початковий період експлуатації споруд із МГК виникають деформації споруд, що зумовлено недостатнім ступенем ущільнення ґрунтової засипки. Крім цього, у роботі [12] зазначено, що значний вплив на сили динамічної взаємодії залізничної колії та рухомого складу залізниць відіграють технічні параметри рухомого складу залізниць.

У роботі [13] наведено теоретичні основи визначення динамічної взаємодії колії та рухомого складу із врахуванням параметрів геометричних нерівностей колії, що утворюються з причини осідання баласту залізничної колії. Експериментальних досліджень величини динамічних сил у роботі не проведено.

Однак у роботах [12, 13] експериментальних досліджень сил взаємодії колії і рухомого складу не наведено.

У роботі [14] наведено результати теоретичних досліджень напружено-деформованого стану армованого земляного полотна залізничної колії трубчастими дренажами. Встановлено, що величина деформацій труб із збільшенням діаметру труби збільшується. Проте у роботі не наведено експериментальної методики проведення випробувань деформованого стану трубчастих дренажів.

У роботі [15] проведено теоретичні дослідження впливу діаметру склопластикової труби на деформований стан транспортної споруди «насип-труба» залізничної колії. Встановлено, що із збільшенням діаметру склопластикової труби величина деформацій земляного полотна та склопластикової труби збільшується. Слід зазначити, що склопластикові труби, які досліджувалися у даній роботі, мають вищу циліндричну жорсткість, аніж труби із збірних металевих гофрованих конструкцій.

Велика кількість робіт із дослідження напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд присвячена лише розробці теоретичних методів досліджень. А саме, у роботі [16] проведено дослі-

дження температурних напружень та деформацій металевих гофрованих конструкцій, що виникають при впливі кліматичних температурних впливів навколишнього середовища. У роботі [17] наведено теоретичну модель оцінки деформацій водопропускної труби із МГК та проведені дослідження їх деформування у залежності від щільності ґрунтової засипки.

У роботі [18] зазначено, що для оцінки технічного стану транспортних споруд в основному застосовують візуальні огляди споруд. Також в окремих випадках використовуються інструментальні методи обстеження конструкцій споруд [19]. Однак у роботі [20] зазначено, що такі методи оцінки технічного стану транспортної інфраструктури не забезпечують встановлення достовірного технічного стану споруди. Крім цього, вони не дають можливості оцінити динамічні параметри споруди, що є актуальним для транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій.

У країнах Європейського Союзу широкого застосування для діагностики технічного стану елементів залізничної колії [21] отримали інерційні системи діагностики [22]. Це такі як ESAH-M та ESAH-F. Система ESAH-M є стаціонарною, тобто встановлюється безпосередньо на конструкції залізничної колії, що діагностується. Діагностика конструкцій залізничної колії системою ESAH-F передбачає встановлення системи на рухомому складі залізничного транспорту (датчик прискорень кріпиться до букси колеса поїзду). У результаті при русі поїзду відбувається запис динамічної взаємодії рухомого складу і залізничної колії [23].

Основним елементом систем ESAH-M та ESAH-F є 3D-датчики прискорень, що дозволяє отримати прискорення. Також системи містять пристрої збору та оцифровки вимірюваної інформації.

До недоліків системи ESAH-M слід віднести складову ручної обробки вимірюваних значень прискорень, та не забезпечує вимірювання прискорень при великих швидкостях руху рухомого складу. Крім цього, не має автономного джерела живлення [24]. Система ESAH-F потребує ідентифікації місць проїзду рухомого складу [25]. Це призводить до неточностей встановлення координат несправних ділянок колії та вимагає розробки складних алгоритмів обробки вимірюваних значень сигналу прискорень.

Із виконаного аналізу [5–25] науково-дослідних робіт встановлено, що експериментальних досліджень деформованого стану шляхопроводу тунельного типу із збірних металевих гофрованих конструкцій при дії рухомого складу залізничного транспорту не проводилось.

Слід зазначити, що через специфічні умови роботи МГК та не значне їх використання на залізницях досі залишаються невирішеними питання оцінки їх динамічних характеристик. Більшість наукових робіт стосуються питань математичного моделювання та оцінки напружено-деформованого стану споруд із МГК, не наводячи експериментальних динамічних випробувань споруд із МГК. Тому доцільне дослідження деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій при дії динамічних навантажень, що дасть змогу вирішити задачу отримання динамічних параметрів тунельного шляхопроводу при дії рухомого складу залізничного транспорту.

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є визначення впливу динамічного навантаження від рухомого складу залізниці на деформований стан збірних металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу. Це дасть можливість отримати обґрунтовані дані деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу у залежності від дії типу рухомого складу залізниці.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні завдання:

– провести експериментальні вимірювання прискорень у вершині тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій та на бокових сторонах споруду при дії змінних динамічних навантажень залізничного рухомого складу;

– провести оцінку деформацій вершини та бокових сторін тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій при дії залізничного рухомого складу.

### 4. Матеріали та методи дослідження

#### 4.1. Геометричні параметри досліджуваного тунельного шляхопроводу

Експериментальні вимірювання деформованого стану збірних МГК проводилися на шляхопроводі тунельного типу. Геометричні параметри шляхопроводу: поперечний переріз шляхопроводу – еліпс із шириною 9,23 м, висотою 8,12 м та довжиною 34,19 м. Матеріал конструкції – гофровані оцинковані металеві конструкції із розміром гофри: висота хвилі гофра – 140 мм, відстань між вершинами хвиль гофра – 380 мм та товщина листа гофра – 6 мм. Межа міцності сталі листа гофра – 355 МПа.

Матеріал засипки гофрованої конструкції – щебенево-піщана суміш фракції 0–40 мм з середнім коефіцієнтом ущільнення 0,99.

Над конструкцією проходить двоколійна електрифікована залізниця (рис. 2). Висота насипу над конструкцією – рахуючи від низу шпали до верху гофра, становить 2,91 м.

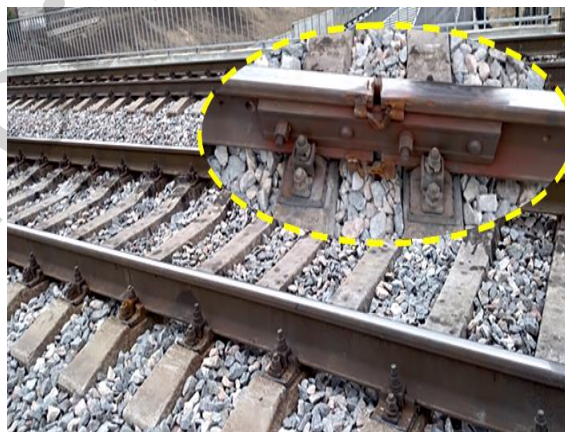


Рис. 2. Двоколійна залізнична колія над тунельним шляхопроводом із металевих гофрованих конструкцій



Над вершиною тунельного шляхопроводу знаходиться рейковий стик величиною зазору 32 мм. У результаті удару коліс рухомого складу в стик утворюється додаткове динамічне навантаження на металеві гофровані конструкції тунельного шляхопроводу.

#### 4. 2. Методика проведення експериментальних вимірювань прискорень тунельного шляхопроводу

Експериментальні вимірювання прискорень у тунельному шляхопроводі проводилось за двома схемами розміщення вимірювальних датчиків прискорень. Перша схема передбачала розміщення датчиків прискорень під віссю парної колії, а друга схема – розміщення датчиків прискорень під віссю непарної колії.

Схема розташування датчиків прискорень на металевих гофрованих конструкціях тунельного шляхопроводу наведена на рис. 3.

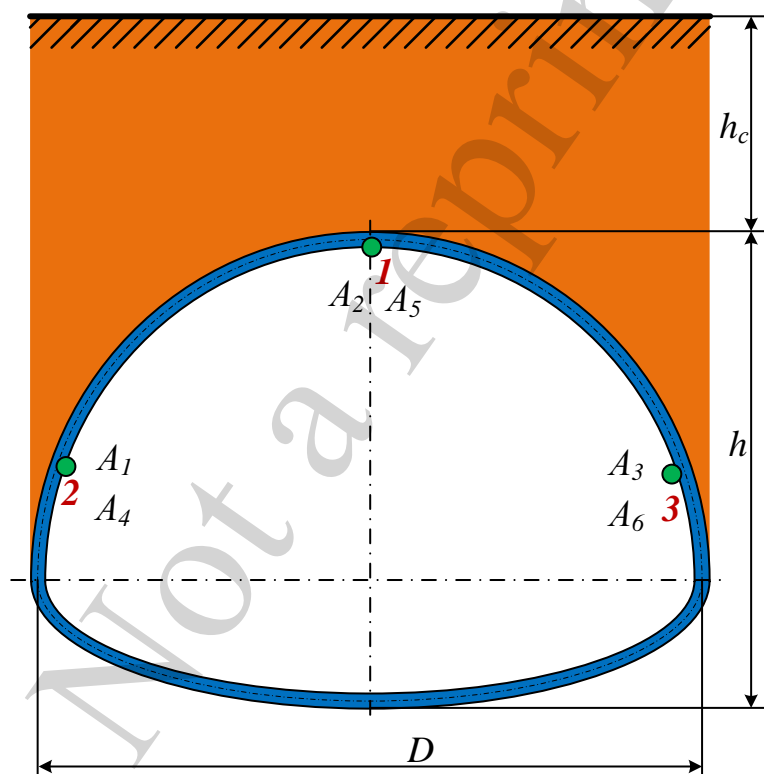


Рис. 3. Схема розташування вимірювальних датчиків на металевій гофрованій конструкції під час випробувань:  $A_1$ – $A_3$  – вимірювальні датчики прискорень розміщені під віссю парної колії  $A_4$ – $A_6$  датчики прискорень розміщені під віссю непарної колії

У кожній схемі один датчик прискорень розміщувався на вершині тунельного шляхопроводу (найбільший вертикальний розмір шляхопроводу), та два датчики на бокових сторонах шляхопроводу (найбільший горизонтальний розмір шляхопроводу).

Вимірювання прискорень проводилось при проїзді рухомого складу залізничного транспорту по парній та непарній коліях. Було проведено експериментальні вимірювання прискорень під віссю парної колії при проїзді пасажирського поїзду та під віссю непарної колії при проїзді двох вантажних поїздів та одного пасажирського поїзду.

Вигляд інерційних експериментальних випробувань тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій наведено на рис. 4.



Рис. 4. Інерційні експериментальні випробування тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій

Для реєстрації динамічних коливань використано високочастотний три-осьовий датчик прискорень ADXL335 із низьким енергоспоживанням і низьким рівнем шуму. Датчик має повний діапазон чутливості по вимірюванню прискорень у межах  $\pm 3g$ . Він може вимірювати статичне прискорення, викликане силою тяжіння, чутливих до нахилу, а також динамічне прискорення, викликане рухом, ударом або вібрацією, що є характерним при дії динамічних навантажень від залізничного транспорту.

Датчики прискорень кріпилися до металеву конструкцій за допомогою високоміцного двокомпонентного клею. У результаті чого забезпечувався добрий контакт датчика із конструкцією шляхопроводу, що є обов'язковою умовою інерційних випробувань транспортних споруд.

### **4. 3. Методика обробки вимірних сигналів прискорень**

У результаті проїзду рухомого складу залізничного транспорту за допомогою інерційної системи вимірювань записувалися значення прискорень у верхній та на бокових сторонах тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій.

Математичний алгоритм запрограмованої системи передбачає усунення високочастотних сигналів. При цьому усувається дріфт сигналу за допомогою згладжування сигналу прискорень сплайнами на характерних ділянках лінії за-



пису прискорень. Для цього використано цифрову обробку сигналу прискорень, згідно із рекомендаціями, що наведені у працях [26–29].

Результати обробки вхідного сигналу прискорень методом згладжування на окремих ділянках сплайнами наведено на рис. 5. Окремо наведено результати обробки сигналу при швидкості рухомого складу до 50 км/год (рис. 5, а) та при швидкості рухомого складу більше 100 км/год (рис. 5, б).

Після обробки сигналу прискорень методом подвійного інтегрування за трапецеїдальним наближенням визначалися деформації вершини та бокових сторін тунельного шляхопроводу.

Перше інтегрування сигналу прискорень  $a_x$  та  $a_y$  за трапецеїдальним наближенням [29–36] дозволяє отримати швидкість, що визначається за формулами:

$$\begin{aligned} V_x &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(a_{x_{i-1}} + a_{x_i})}{2} \cdot \Delta t \right], \\ V_y &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(a_{y_{i-1}} + a_{y_i})}{2} \cdot \Delta t \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – інтервал часу між вимірними значеннями прискорень. Він залежить від частоти дискретності запису сигналу прискорень.

Наступне інтегрування значень швидкостей  $V_x$  та  $V_y$  дозволяє отримати деформації, що визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} S_x &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(V_{x_{i-1}} + V_{x_i})}{2} \cdot \Delta t \right], \\ S_y &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(V_{y_{i-1}} + V_{y_i})}{2} \cdot \Delta t \right], \end{aligned} \quad (2)$$

Отже, у результаті подвійного інтегрування відфільтрованих значень прискорень визначаємо деформації металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу.

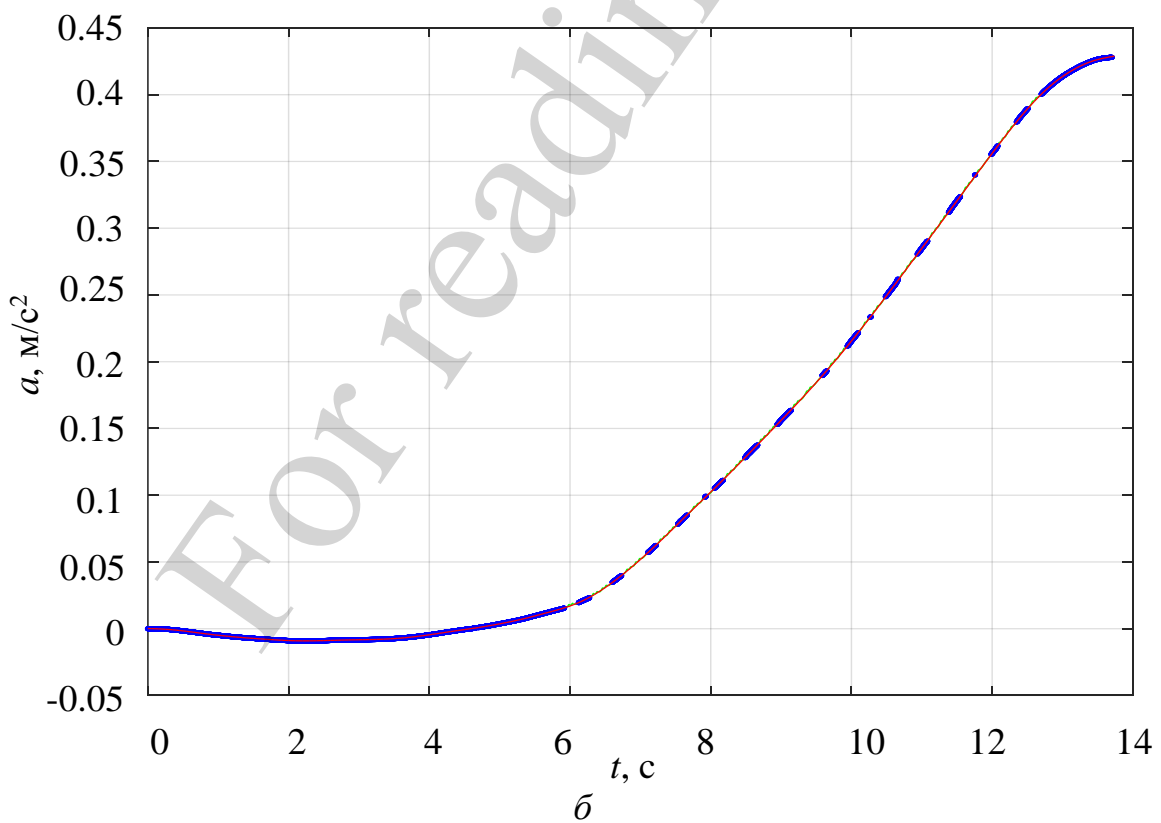
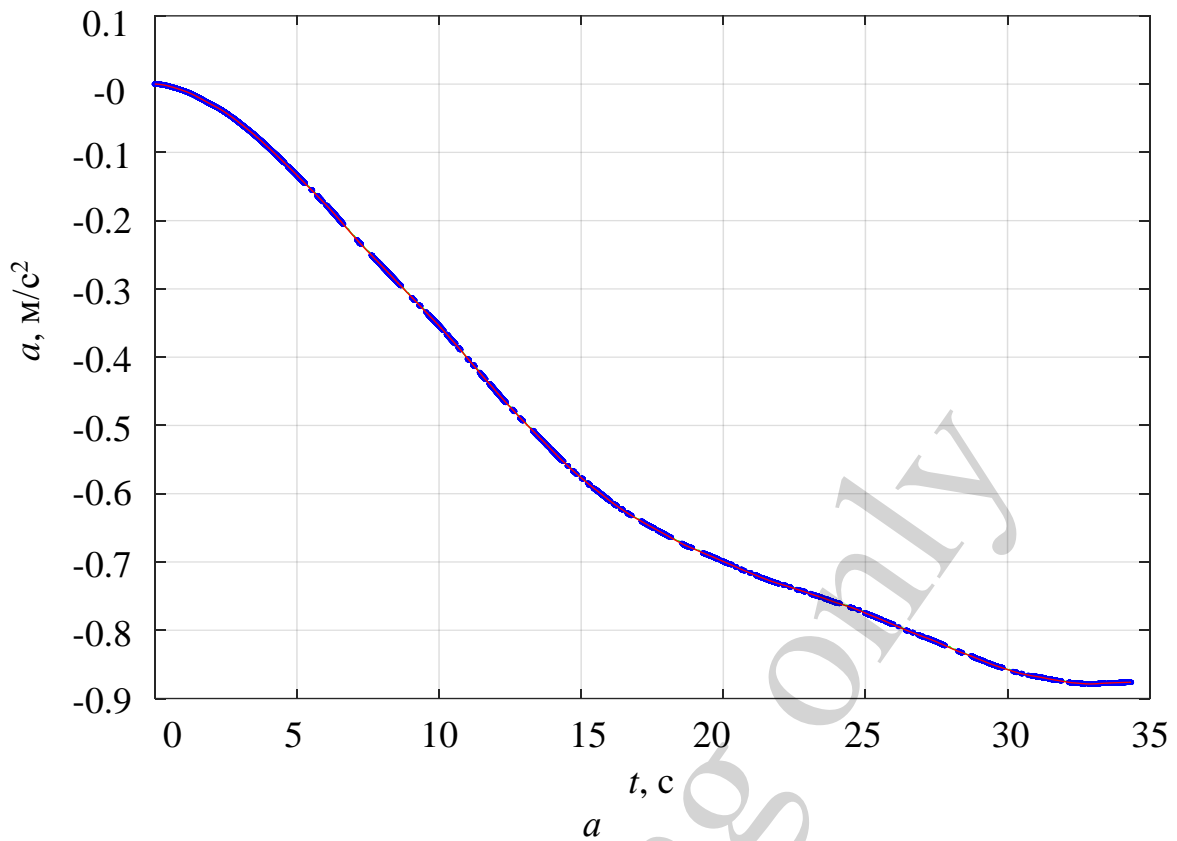


Рис. 5. Результати фільтрації сигналу прискорень у залежності від швидкості руху рухомого складу залізниці: *a* – при швидкості до 50 км/год; *b* – при швидкості більше 100 км/год

## 5. Результати дослідження деформованого стану тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій

### 5. 1. Результати досліджень прискорень тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій

Експериментальні вимірювання прискорень тунельного шляхопроводу із МГК проведено у вершині шляхопроводу та на бокових сторонах. Отримано записи прискорень при проїзді одного поїзду по парній залізничній колії та від проїзду двох вантажних і одного пасажирського поїзду по непарній колії.

Лінія запису прискорень, що виникає у вершині тунельного шляхопроводу із МГК, при проїзді вантажного поїзду наведена на рис. 6. Запис прискорень від пасажирського поїзду наведено на рис. 7.

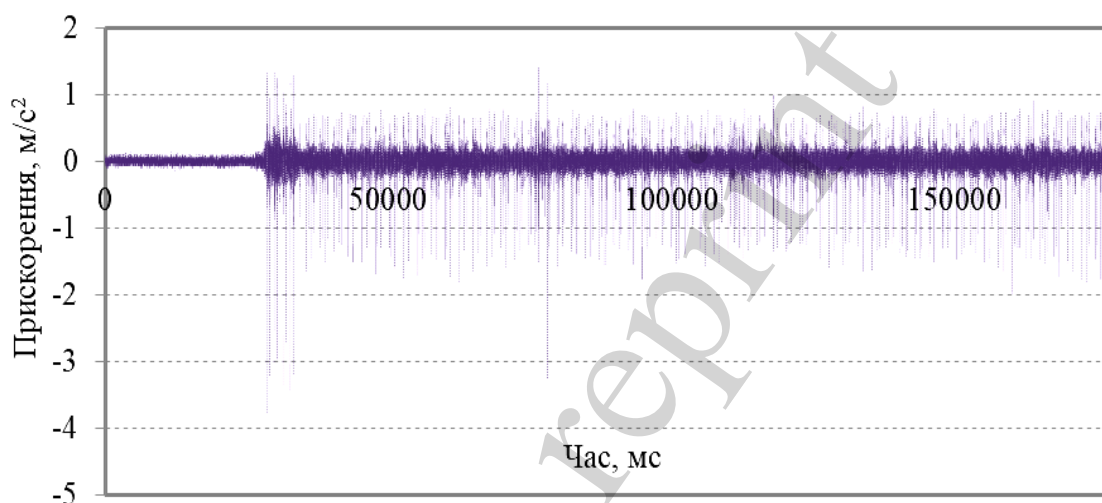


Рис. 6. Графік прискорень, що виникають у вершині металеві гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді вантажного поїзду

Із лінії запису прискорень (рис. 6) спостерігаються ділянки прискорень, які виникають від дії тягового рухомого складу і вантажних вагонів. Прискорення, що виникають від тягового рухомого складу є вищими за значення прискорень, що виникають від вантажних вагонів. Максимальна величина прискорень від тягового рухомого складу склала  $3,77 \text{ м/с}^2$ , а від вантажних вагонів  $1,98 \text{ м/с}^2$ .

Також слід зазначити, що при проїзді вантажних вагонів на графіку спостерігається різка зміна прискорень від одного із вантажних вагонів, які складають  $3,24 \text{ м/с}^2$ . Це пояснюється несправністю ходових частин рухомого складу. Значний вплив на підвищення динамічної дії рухомого складу на тунельний шляхопровід має технічний стан коліс рухомого складу. При наднормативному зношенні коліс, або повзуні виникає додаткове динамічне навантаження на тунельний шляхопровід.

Із лінії запису прискорень, що виникають при проїзді пасажирського швидкісного поїзду (рис. 7) спостерігаються ділянки прискорень від тягового рухомого складу і пасажирських вагонів. Величина прискорень від тягового рухомого складу є нижчою за прискорення, які виникають від пасажирських вагонів. Максимальна величина прискорень при проїзді пасажирського поїзду від тяго-

вого рухомого складу склала  $1,21 \text{ м/с}^2$ , а від останнього пасажирського вагону –  $2,42 \text{ м/с}^2$ .

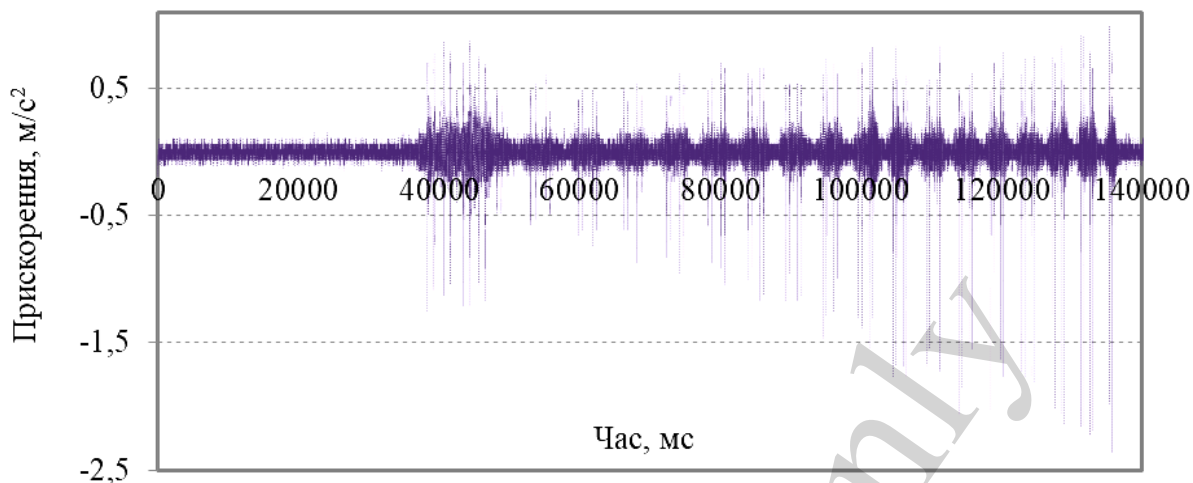


Рис. 7. Графік прискорень, що виникають у вершині металевій гофрованої конструкції шляхопроводу при проїзді пасажирського поїзду

При збільшенні швидкості пасажирського поїзду прискорення у вершині шляхопроводу підвищуються. При чому прискорення від першого до останнього пасажирського вагону зростають лінійно. Від першого пасажирського вагону максимальна величина прискорень склала  $0,62 \text{ м/с}^2$ , а від останнього –  $2,42 \text{ м/с}^2$ . Це пояснюється, по-перше, збільшенням швидкості рухомого складу при відправленні від станції, а по-друге – значним коливанням останнього пасажирського вагону.

Результати запису максимальних прискорень, що отримані при проїзді рухомого складу залізничного транспорту по парній та непарній коліях наведено у табл. 1. Наведено прискорення, що виникають у вершині шляхопроводу (це точка 1, рис. 3) та на бокових сторонах шляхопроводу (це точки 2 та 3, рис. 3).

Таблиця 1

Результати максимальних прискорень, що виникають у тунельному шляхопроводі із збірних МГК при проїзді рухомого складу залізниці

Тип рухомого складу залізниці	Ліва сторона шляхопроводу (точка 2)		Вершина шляхопроводу (точка 1)		Права сторона шляхопроводу (точка 3)	
	A1	A4	A2	A5	A3	A6
Пасажирський поїзд	0,40	–	2,36	–	0,42	–
Вантажний поїзд	0,88	–	3,77	–	0,71	–
Вантажний поїзд	2,63	–	7,99	–	2,35	–
Пасажирський поїзд	–	1,96	-	6,21	–	1,77

Із проведених експериментальних вимірювань прискорень (табл. 1) встановлено, що максимальна величина прискорень шляхопроводу склала  $7,99 \text{ м/с}^2$

при проїзді вантажного поїзду. При проїзді пасажирського поїзду величина прискорень склала  $6,21 \text{ м/с}^2$ .

Максимальні прискорення, які виникають на бокових сторонах тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного вагону становлять  $2,63 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського поїзду  $1,77 \text{ м/с}^2$ .

## 5. 2. Результати досліджень деформацій металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу із збірних МГК при дії рухомого складу залізниці

За відомими значеннями прискорень, що виникають у вершині та на бокових сторонах тунельного шляхопроводу отримано деформації металевих конструкцій шляхопроводу, методом подвійного інтегрування сигналу прискорень за формулами (1) та (2).

Лінія запису деформацій, що виникають у вершині тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного поїзду наведена на рис. 8, а при проїзді пасажирського поїзду на рис. 9.

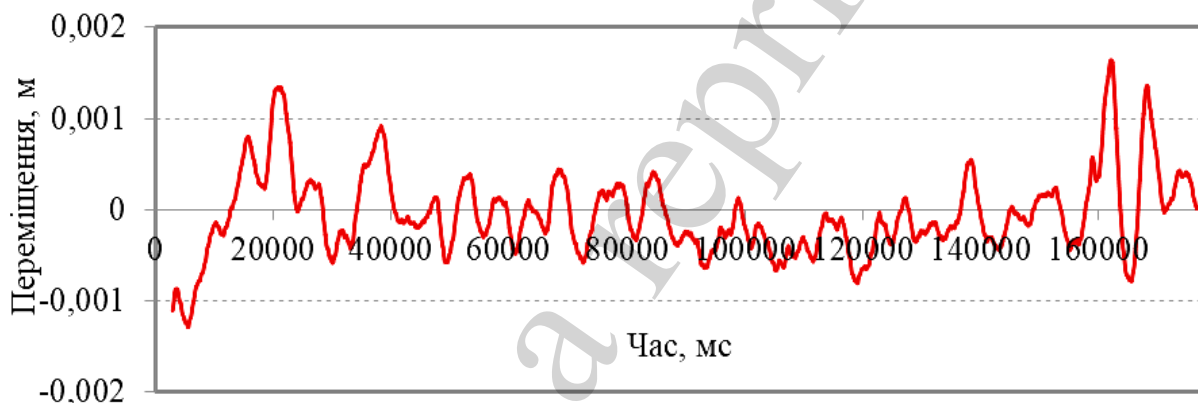


Рис. 8. Деформації вершини тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного рухомого складу залізниці

При проїзді вантажного поїзду на графіку деформацій металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу спостерігається прогин шляхопроводу. У результаті наближення поїзду до шляхопроводу вершина шляхопроводу піднімається на  $0,71 \text{ мм}$  у верх і при наїзді на шляхопровід виникає прогин конструкцій шляхопроводу. Максимальна величина прогину вершини шляхопроводу склала  $1,63 \text{ мм}$ .

При проїзді пасажирського рухомого складу величина максимальних деформацій металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу склала  $1,11 \text{ мм}$ .

У кінці запису лінії деформації вершини шляхопроводу (рис. 9) спостерігається стрибок деформацій. У результаті чого деформації склали більше  $2 \text{ мм}$ . Це пояснюється гнучкістю збірних металевих конструкцій. Коли при з'їзді поїзду із шляхопроводу металеві конструкції повертаються у своє вихідне положення.

Результати запису максимальних деформацій, що отримані при проїзді рухомого складу залізничного транспорту по парній та непарній коліях наведено у табл. 2.

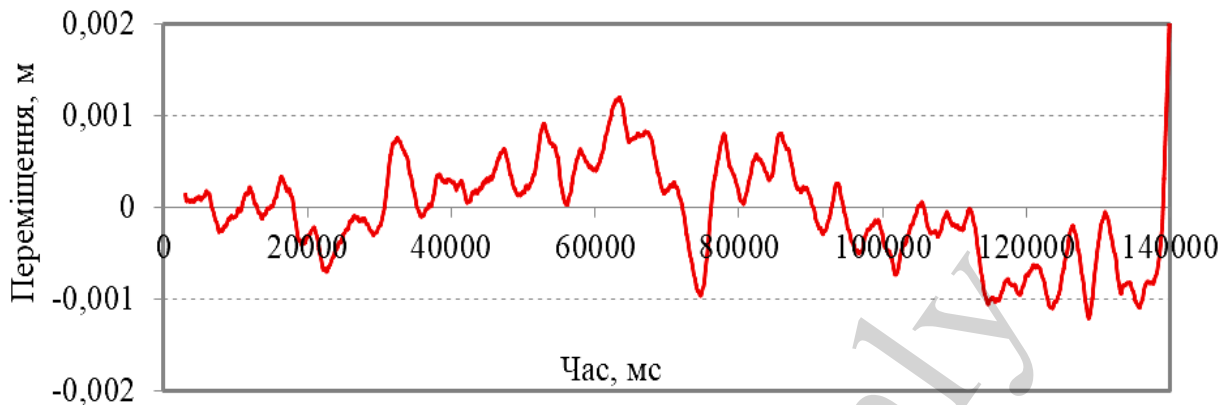


Рис. 9. Деформації вершини тунельного шляхопроводу при проїзді пасажирського рухомого складу залізниці

Таблиця 2

Результати запису максимальних деформацій, що виникають у тунельному шляхопроводі із збірних МГК при проїзді рухомого складу залізниці

Тип рухомого складу залізниці	Ліва сторона шляхопроводу (точка 2)		Вершина шляхопроводу (точка 1)		Права сторона шляхопроводу (точка 3)	
	A1	A4	A2	A5	A3	A6
Пасажирський поїзд	0,41	–	1,02	–	0,63	–
Вантажний поїзд	1,07	–	1,54	–	0,91	–
Вантажний поїзд	0,51	–	1,63	–	0,65	–
Пасажирський поїзд	–	0,39	–	1,11	–	0,48

Із табл. 2 видно, що максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій у вершині тунельного шляхопроводу, при проїзді вантажного вагону склали 1,63 мм, а при проїзді пасажирського поїзду – 1,11 мм.

Максимальні деформації, які виникають на бокових сторонах тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного вагону становлять 1,07 мм, а при проїзді пасажирського поїзду 0,48 мм.

## 6. Обговорення результатів динамічних випробувань тунельного шляхопроводу із збірних металевих гофрованих конструкцій

Проведено інерційні динамічні випробування тунельного шляхопроводу із збірних МГК, що експлуатується у тілі насипу залізничної колії. У результаті чого отримано лінії запису прискорень та деформацій, що виникають у вершині шляхопроводу та на його бокових сторонах при проїзді вантажних та пасажирських поїздів.



Із рис. 6, видно, що максимальна величина прискорень від тягового рухомого складу становила  $3,77 \text{ м/с}^2$ , а від вантажних вагонів прискорення досягли значень  $1,98 \text{ м/с}^2$ . Максимальна величина прискорень при проїзді пасажирського поїзду (рис. 7) становила  $2,42 \text{ м/с}^2$ .

Крім цього, на графіку запису прискорень (рис. 6, 7), що виникають при проїзді вантажного та пасажирського поїздів, добре видно ділянки проїзду тягового рухомого складу і вагонів. При проїзді вантажного поїзду більші значення прискорень виникають від тягового рухомого складу, а менші від вантажних вагонів (рис. 6). Однак при проїзді пасажирського поїзду вищі значення отримано від останнього пасажирського вагону, що пояснюється боковими коливаннями останнього пасажирського вагону. Також це викликано підвищенням швидкості пасажирського поїзду при відправленні від станції.

Запис прискорень, що виникають у металевих гофрованих конструкціях, дає можливість побачити ділянки значних стрибків прискорень, що виникають від вагонів. Це у свою чергу говорить про несправність ходових частин вагонів і дозволяє ідентифікувати конкретно номер вагону який має технічні несправності. Оскільки при значному зносі, прокаті, чи повзуні колеса рухомого складу підвищується динамічна добавки сил на колію, що також збільшує навантаження на тунельний шляхопровід.

У результаті запису прискорень від вантажних та пасажирських поїздів встановлено, що максимальна величина прискорень у вершині шляхопроводу при проїзді вантажного поїзду склала  $7,99 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $6,21 \text{ м/с}^2$  (табл. 1). При цьому максимальні прискорення, які виникають на бокових сторонах тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного вагону, становлять  $2,63 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського поїзду  $1,77 \text{ м/с}^2$ .

Результати запису деформацій збірних металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу показали, що конструкція шляхопроводу прогинається під дією навантаження, а далі при з'їзді поїзду з шляхопроводу конструкції повертаються у початкове положення (рис. 8). Це пояснюється гнучкістю металевих гофрованих конструкцій і перерозподілом згинальних моментів.

Крім цього видно, що при наближенні поїзду до шляхопроводу його вершина піднімається на  $0,71 \text{ мм}$  у верх, а при наїзді на шляхопровід, його конструкції прогинаються. Максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій вершини тунельного шляхопроводу, при проїзді вантажного вагону склала  $1,63 \text{ мм}$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $1,11 \text{ мм}$  (табл. 2).

Максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій на бокових сторонах шляхопроводу (табл. 2) при проїзді вантажного вагону склала  $1,07 \text{ мм}$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $0,48 \text{ мм}$ .

Порівняння результатів досліджень вертикальних деформацій металевих гофрованих конструкцій свідчить, що максимальні деформації виникають у вершині споруд, як при русі вантажних, так і пасажирських поїздів. У роботі [1] при динамічних експериментальних випробуваннях водопропускної труби діаметром  $6,57 \text{ м}$  із МГК встановлено, що максимальна, вертикальна відносна деформація труби склала  $2,74 \text{ мм}$  при проїзді вантажного поїзду та  $0,77 \text{ мм}$  при проїзді пасажирського поїзду. В даному ж дослідженні при проїзді вантажного

вагону вертикальна деформація вершини шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій склала 1,63 мм, а при проїзді пасажирського поїзду – 1,11 мм.

Слід зазначити, що різниця по величинах деформацій зумовлена, у першу чергу, умовами навантажень, а також величиною засипки від підшоши шпали до вершини металевої конструкції споруди.

Слід зазначити, що більшість наукових робіт [5–25] стосуються питань математичного моделювання та оцінки напружено-деформованого стану споруд із МГК, не наводячи експериментальних динамічних випробувань споруд із МГК. Тому запропонований алгоритм проведення експериментальних інерційних вимірювань прискорень у вершині тунельного шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій та на бокових сторонах споруди при дії змінних динамічних навантажень залізничного рухомого складу дає можливість вирішити проблему експериментальних досліджень деформованого стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд при дії динамічних навантажень залізничного транспорту. Крім цього, враховуючи специфічні умови роботи МГК та незначне їх використання на залізницях, дана робота дозволяє інженерним та науковим працівникам галузі залізничного транспорту проводити моніторинг технічного стану шляхопроводу тунельного типу із металевих гофрованих конструкцій.

У результаті проведених динамічних інерційних випробувань тунельного шляхопроводу встановлено, що величина відносних деформацій вертикального розміру конструкції склала 0,020 % від вертикального розміру споруди. Величина відносних деформацій горизонтального розміру конструкції шляхопроводу склала 0,012 % від горизонтального розміру споруди. Ці значення є меншими за допустиму величину відносних деформацій 5 %, що регламентуються нормами [5, 6]. Тому несуча здатність шляхопроводу із металевих гофрованих конструкцій, який експлуатується під залізничною колією і зазнає дії динамічних навантажень від рухомого складу залізниці, є забезпеченою.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання інженерними та науковими працівниками інерційного методу для оцінки деформованого стану металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд при дії динамічних навантажень від залізничного транспорту.

Одним із обмежень проведених досліджень є визначення тільки деформацій збірних МГК тунельного шляхопроводу, що виникають від динамічної дії вантажних та пасажирських поїздів. Також не отримано значень напружень, що виникають у металевих конструкціях шляхопроводу. Тому подальшим продовженням науково-дослідної роботи є розвиток експериментальних методів оцінки напружено-деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій при дії статичних та динамічних навантажень від рухомих транспортних засобів.

## **7. Висновки**

1. Максимальна величина прискорень, що виникають у вершині тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного поїзду, склала 7,99 м/с<sup>2</sup>, а при проїзді пасажирського поїзду – 6,21 м/с<sup>2</sup>.

Прискорення, які виникають від тягового рухомого складу є вищими від прискорень, що виникають від вантажних вагонів. Максимальна величина прискорень від тягового рухомого складу складала  $3,77 \text{ м/с}^2$ , а від вантажних вагонів  $1,98 \text{ м/с}^2$ .

Максимальні прискорення, які виникають на бокових сторонах тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного вагону, становлять  $2,63 \text{ м/с}^2$ , а при проїзді пасажирського поїзду  $1,77 \text{ м/с}^2$ .

Отримані параметри прискорень, що виникають у металевих гофрованих конструкціях тунельного шляхопроводу, можна у подальшому використовувати для моніторингу його технічного стану в умовах експлуатації.

2. Величина максимальних деформації металевих гофрованих конструкцій вершини тунельного шляхопроводу при проїзді вантажного вагону складала  $1,63 \text{ мм}$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $1,11 \text{ мм}$ . При цьому максимальні деформації металевих гофрованих конструкцій на бокових сторонах шляхопроводу при проїзді вантажного вагону склали  $1,07 \text{ мм}$ , а при проїзді пасажирського поїзду –  $0,48 \text{ мм}$ .

Встановлено, що значення максимальних відносних деформацій вертикального та горизонтального поперечних розмірів тунельного шляхопроводу металевої гофрованої конструкції, при дії рухомого складу залізниць, складає  $0,020 \%$  від вертикального розміру споруди. При цьому величина відносних деформацій горизонтального розміру конструкції шляхопроводу складала  $0,012 \%$  від горизонтального розміру споруди. Вони є меншими за допустиму величину відносних деформацій  $5 \%$ , тому несуча здатність металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу забезпечене.

Інерційний метод дає можливість визначити деформований стан металевих гофрованих конструкцій тунельного шляхопроводу, тому пропонується для практичного застосування.

## Література

1. Kovalchuk, V., Markul, R., Bal, O., Milyanych, A., Pentsak, A., Parneta, B., Gajda, A. (2017). The study of strength of corrugated metal structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (86)), 18–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96549>
2. Mistewicz, M. (2019). Risk assessment of the use of corrugated metal sheets for construction of road soil-shell structures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 18 (2), 89–107. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.019.006>
3. Beben, D. (2013). Evaluation of backfill corrosivity around steel road culverts. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 12 (3), 255–268. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.018>
4. Kovalchuk, V., Kovalchuk, Y., Sysyn, M., Stankevych, V., Petrenko, O. (2018). Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (91)), 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123002>

5. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32016L0797>
6. ВБН В.2.3-218-198:2007. Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування (2007). Київ. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=24463](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=24463)
7. Kovalchuk, V., Markul, R., Pentsak, A., Parneta, B., Gayda, O., Braichenko, S. (2017). Study of the stress-strain state in defective railway reinforced-concrete pipes restored with corrugated metal structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (89)), 37–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109611>
8. Kovalchuk, V., Luchko, J., Bondarenko, I., Markul, R., Parneta, B. (2016). Research and analysis of the stressed-strained state of metal corrugated structures of railroad tracks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (84)), 4–9. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84236>
9. Machelski, C. (2016). Steel plate curvatures of soil-steel structures during construction and exploitation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 15 (3), 207–220. doi: <https://doi.org/10.7409/rabdim.016.013>
10. Esmaili, M., Zakeri, J. A., Abdulrazagh, P. H. (2013). Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5 (1), 7. doi: <https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-7>
11. Liu, Y., Hoult, N. A., Moore, I. D. (2020). Structural Performance of In-Service Corrugated Steel Culvert under Vehicle Loading. *Journal of Bridge Engineering*, 25 (3). doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001524](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001524)
12. Kovalchuk, V., Kuzyshyn, A., Kostritsya, S., Sobolevska, Y., Batig, A., Dovganyuk, S. (2018). Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (96)), 19–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149838>
13. Nabochenko, O., Sysyn, M., Kovalchuk, V., Kovalchuk, Y., Pentsak, A., Braichenko, S. (2019). Studying the railroad track geometry deterioration as a result of an uneven subsidence of the ballast layer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7 (97)), 50–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154864>
14. Luchko, J., Kovalchuk, V., Kravets, I., Gajda, O., Onyshchenko, A. (2020). Determining patterns in the stressed-deformed state of the railroad track subgrade reinforced with tubular drains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (107)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213525>
15. Kovalchuk, V., Sobolevska, Y., Onyshchenko, A., Bal, O., Kravets, I., Pentsak, A. et. al. (2022). Investigating the influence of the diameter of a fiberglass pipe on the deformed state of railroad transportation structure “embankment-pipe.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (116)), 35–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254573>

16. Gera, B., Kovalchuk, V. (2019). A study of the effects of climatic temperature changes on the corrugated structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (99)), 26–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168260>
17. Stankevych, V. Z., Butrak, I. O., Kovalchuk, V. V. (2018). Cracks Interaction in the Elastic Composite under Action of the Harmonic Loading Field. 2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). doi: <https://doi.org/10.1109/diped.2018.8543323>
18. Gerber, U., Zoll, A., Fengler, W. (2015). Verschleiß und Fahrflächenermüdung an Weichen mit starrer Herzstückspitze. *Eisenbahntechnische Rundschau*, 1, 36–41.
19. Zoll, A., Gerber, U., Fengler, W. (2016). The measuring system ESAH-M. *Eisenbahningenieur Kalender*, 49–62.
20. Scholz, S., Lommock, R. (2018). Models for Onboard Train Diagnostics Data to Improve Condition-Based Maintenance. *Automated People Movers and Automated Transit Systems 2018*. doi: <https://doi.org/10.1061/9780784481318.010>
21. Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, O., Li, Y., Kovalchuk, V. (2019). Indicators for common crossing structural health monitoring with track-side inertial measurements. *Acta Polytechnica*, 59 (2), 170–181. doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2019.59.0170>
22. Sysyn, M., Nabochenko, O., Kluge, F., Kovalchuk, V., Pentsak, A. (2019). Common Crossing Structural Health Analysis with Track-Side Monitoring. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (3), 77–84. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.3.77-84>
23. Izvolt, L., Sestakova, J., Smalo, M. (2016). Analysis of Results of Monitoring and Prediction of Quality Development of Ballasted and Ballastless Track Superstructure and its Transition Areas. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 18 (4), 19–29. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2016.4.19-29>
24. Sysyn, M., Gruen, D., Gerber, U., Nabochenko, O., Kovalchuk, V. (2019). Turnout Monitoring with Vehicle Based Inertial Measurements of Operational Trains: A Machine Learning Approach. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (1), 42–48. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.1.42-48>
25. Sysyn, M., Przybylowicz, M., Nabochenko, O., Liu, J. (2021). Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Sustainability*, 13 (14), 7740. doi: <https://doi.org/10.3390/su13147740>
26. Jamshidi, A., Hajizadeh, S., Su, Z., Naeimi, M., Núñez, A., Dollevoet, R. et. al. (2018). A decision support approach for condition-based maintenance of rails based on big data analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 185–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.007>
27. Sysyn, M., Gerber, U., Nabochenko, O., Kovalchuk, V. (2019). Common crossing fault prediction with track based inertial measurements: statistical vs. mechanical approach. *Pollack Periodica*, 14 (2), 15–26. doi: <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.2>

28. Ben Ali, J., Saidi, L., Harrath, S., Bechhofer, E., Benbouzid, M. (2018). Online automatic diagnosis of wind turbine bearings progressive degradations under real experimental conditions based on unsupervised machine learning. *Applied Acoustics*, 132, 167–181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.021>
29. Domin, R., Mostovych, A., Kolomiets, A. (2014). Improving the means of experimental determination of dynamic loading of the rolling stock. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 14 (1), 37–49. URL: <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-d7fbd1b2-71d4-4101-b564-8f2ec1d12342>
30. Attoh-Okine, N. O. (2017). *Big Data and Differential Privacy: Analysis Strategies for Railway Track Engineering*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119229070>
31. Liu, X., Markiene, V., Shevtsov, I., Dollevoet, R. (2015). Experimental study of key parameters in turnout crossing degradation process. 10th International Conference on Contact Mechanics. Colorado. URL: <https://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:tudelft.nl:uuid%3A6faf146e-fc15-4d00-a287-bba31442d9ca>
32. Martey, E. N., Ahmed, L., Attoh-Okine, N. (2017). Track geometry big data analysis: A machine learning approach. 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). doi: <https://doi.org/10.1109/bigdata.2017.8258381>
33. Liu, J., Liu, Z., Wang, P., Kou, L., Sysyn, M. (2022). Dynamic characteristics of the railway ballast bed under water-rich and low-temperature environments. *Engineering Structures*, 252, 113605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113605>
34. Si, X., Zhang, Z., Hu, C. (2017). *Data-Driven Remaining Useful Life Prognosis Techniques: Stochastic Models, Methods and Applications*. Springer, 430. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54030-5>
35. Gebraeel, N. Z., Lawley, M. A., Li, R., Ryan, J. K. (2005). Residual-life distributions from component degradation signals: A Bayesian approach. *IIE Transactions*, 37 (6), 543–557. doi: <https://doi.org/10.1080/07408170590929018>
36. Ma, Y., Mashal, A. A., Markine, V. L. (2018). Modelling and experimental validation of dynamic impact in 1:9 railway crossing panel. *Tribology International*, 118, 208–226. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.09.036>