

УДК 629. (431+432). 004.163

А.О. Сулим, Е.В. Третьак, С.В. Мурчков

ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ ПІДРЕЙКОВОЇ ОСНОВИ НА ДОСЛІДНИХ ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

У статті розглянуто процедуру та описано математичне забезпечення визначення модуля пружності підрейкової основи на дослідних ділянках залізничної колії, що ґрунтується на теорії розповсюдження пружних хвиль. Визначено модуль пружності підрейкової основи для п'ятих дослідних ділянок (прямої, кривих радіусом 419 м, 906 м, 1530 м та стрілочному переводі).

Постановка проблеми. Модуль пружності підрейкової основи є однією з основних характеристик для оцінки напружено-деформаційного стану залізничної колії. Він визначає зв'язок між діючою силою і деформацією – одне з положень, на якому будується сучасний метод інженерного розрахунку на міцність [1–3]. Його значення впливає на точність розрахунку напружень в елементах колії, що відбивається на правильності встановлення експлуатаційних характеристик ділянки [4], в тому числі допустимої швидкості руху і строків призначення ремонтів. Існують пропозиції використовувати модуль пружності підрейкової основи як одного з показників оцінки стану залізничної колії [4, 5].

Питання з правильного врахування і вимірювання модуля пружності перш за все пов'язані зі складністю фізичного процесу, що відбувається. На модуль пружності підрейкової основи впливають властивості елементів колії: підкладки, шпали, баласту, земляного полотна. Його значення складається з жорсткості кожного з наведених елементів, але не в рівній мірі, а з урахуванням їх вкладу у загальну деформацію на дану мить дії. Саме ступінь їх вкладу буде суттєво залежати від динаміки процесу, який в свою чергу враховує властивості рейки. Напевно, що чим меншу жорсткість має шар, тим більша частина прогину буде реалізовуватися саме за рахунок його деформації. Але деформації від навантаження на рейку розповсюджуються не миттєво, і поки у процес увійде найменш жорсткий шар (земляне полотно) до взаємодії (теж поступово у часі) будуть вже залучені й інші елементи. Це спричинить зміну значення модуля пружності в часі в досить значних межах. А якщо навантаження діє недовгий час (достатньо велика швидкість руху), то значення модуля пружності може й не встигнути набути меж, які б відповідали стану урівноважених деформацій усіх шарів [2, 4].

© Сулим А.О., Третьак Е.В., Мурчков С.В., 2017

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

В 60-80 роках в ДПТі для натурального виміру модуля пружності застосовувався спеціальний гідравлічний навантажувальний пристрій, змонтований на базі чотиривісного вагона. При цьому сили, що діють на рейку, вимірювалися за допомогою встановлених у головці домкратів силовимірів, а прогини рейок – за допомогою електричних прогиномірів. Пристрій дозволяв одержувати безпосередньо графіки

залежності прогинів рейок від прикладної вертикальної сили в кожному циклі навантаження й розвантаження [6, 7]. Існуючі пропозиції [8, 9], які ґрунтувалися на вимірюванні прогинів колії під проїздом поїзда, не знайшли загального практичного застосування. Основні труднощі виникають від неможливості забезпечити достатню точність вимірювання динамічного прогину – величини, яка має невелике значення та швидко змінюється у часі. Також на точність результатів впливає те, що прогинається не тільки безпосередньо рейка, а її основа, включаючи земляні споруди навколо залізничної колії.

Мета роботи – пошук сучасного методу вимірювання модуля пружності підрейкової основи на дослідних ділянках залізничної колії експериментальним шляхом, який забезпечить достатню точність отриманих даних.

Матеріал і результати досліджень. Із аналізу існуючих досліджень [1–4] відомо, що одним із сучасних методів визначення модуля пружності є метод, який базується на теорії розповсюдження пружних хвиль. В даному випадку рейка розглядається як балка нескінченної довжини, яка опирається на рівнопружну основу і сприймає навантаження від поодинокі вертикальної сили. Таким чином, згідно даної теорії визначення модуля пружності підрейкової основи достатньо знати відношення напружень в рейках в двох перерізах, навіть без розрахунку значення сили, яка спричинила їх появу.

Аналітичне описання визначення модуля пружності відповідно до [1] можна описати наступним чином:

$$\sigma_{n-o} = \frac{M}{W}, \quad (1)$$

де σ_{n-o} – осьове напруження в підшві рейки;

M – згинальний момент в рейці;

W – момент опору по підшві рейки.

Напруження в інших місцях перерізу рейки можна розрахувати використовуючи відповідні коефіцієнти [1].

Згинальний момент в рейці визначається за формулою:

$$M = \frac{P_{екв}^I}{4k}, \quad (2)$$

де $P_{екв}^I$ – перша еквівалентна сила (враховує одночасну дію на переріз рейки декількох коліс);

k – коефіцієнт відносної жорсткості;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (3)$$

де U – модуль пружності підрейкової основи;

E – модуль пружності рейкової сталі;

I – момент інерції поперечного перерізу рейки у вертикальній площині.

В загальному вигляді перша еквівалентна сила визначається за формулою:

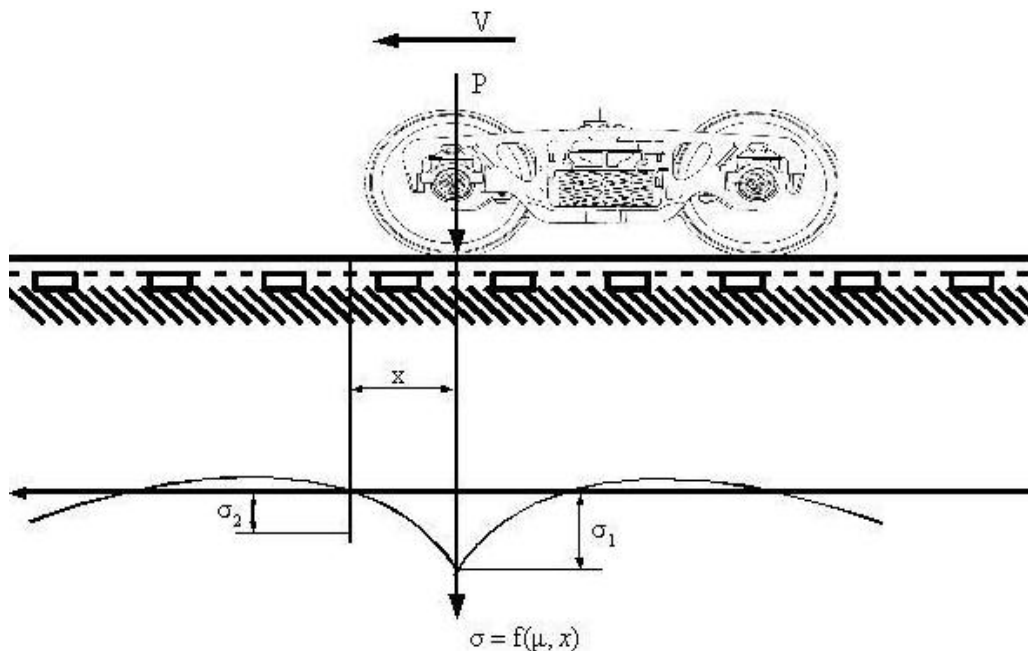
$$P_{екв}^I = \sum P_i \mu_i, \quad (4)$$

де P_i – сила від i -го колеса, що діє на розрахунковий переріз рейки;

μ_i – коефіцієнт, що враховує відстань (x_i) від розрахункового перерізу до діючої сили:

$$\mu_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i), \quad (5)$$

Якщо відомі напруження в двох перерізах рейки, що виникли в момент часу від дії зовнішньої сили, можливо розв'язання зворотної задачі – розрахунок модуля пружності підрейкової основи. Розрахункова схема показана на рис. 1.



РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Рис. 1 - Розрахункова схема

Послідовність розрахунків наведено в формулах (6...8):

$$\mu = \frac{\sigma_{p2}}{\sigma_{p1}}, \quad (6)$$

де σ_{p1} і σ_{p2} – напруження в першому і другому перерізу рейки відповідно (див. рис. 1);

$$k = f(\mu, x), \quad (7)$$

де x – відстань між перерізами рейки, в яких визначено напруження σ_{p1} і σ_{p2} ;

$$U = 4EI k^4. \quad (8)$$

Формула (7) може не визначатися в аналітичному вигляді у зв'язку з необхідністю розв'язання складних тригонометричних залежностей. Коефіцієнт відносної жорсткості розраховувався шляхом апроксимації набору пар значень відношення напружень-відстань за критерієм найменших квадратів функцією (5). Такий підхід дає змогу не обмежуватись двома перерізами на рейці.

Визначення модуля пружності з використанням зазначеного методу виконувалось на п'яти дослідних ділянках залізничної колії (прямій, кривих радіусом 419 м, 906 м, 1530 м та стрілочному переводі типу Р65 марки 1/11). Визначення модуля пружності підрейкової основи на зазначених ділянках виконувалось в два етапи: експериментальне визначення кромочних напружень в рейці та математична обробка отриманих даних.

Визначення напружень в елементах колії відбувалось за допомогою сучасного тензометричного комплексу, до складу якого входять: вимірювальні тензометричні датчики, кабелі, підсилювач сигналів ТМК 32, аналого-цифровий перетворювач Е14-440 та персональний комп'ютер. Даний комплекс дозволяє отримувати, відображати та зберігати дані, отримані від вимірювальних тензометричних датчиків. Загальний вигляд комплексу показано на рис. 2.

Обробка даних експериментальних досліджень, зареєстрованих тензометричним вимірювальним комплексом, здійснювалась за допомогою підпрограми «Воздействие на путь [exp]». Структуру та функціональні можливості даної підпрограми детально описано в іншій роботі збірника, тому зупинятись на ній більш детально не будемо.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

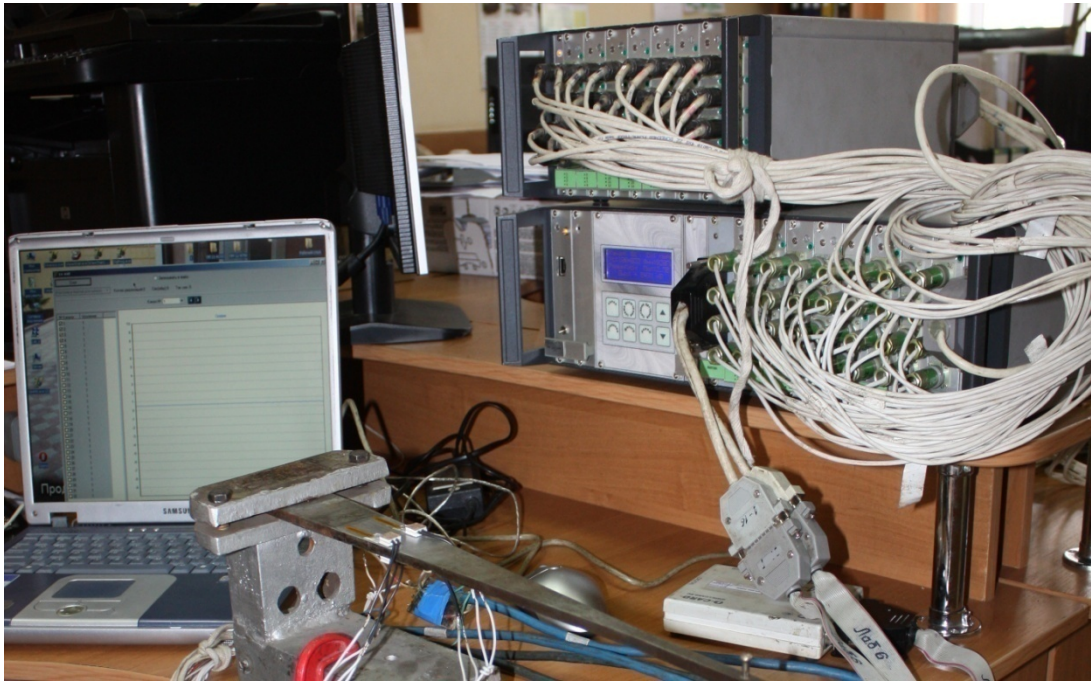


Рис. 2 - Загальний вигляд тензометричного комплексу

Наявність цифрового обладнання для виміру напружень в рейках, яке завдяки високій частоті дискретизації вимірювань, дає змогу отримувати майже безперервний запис процесу, відкриває можливість визначити модуль пружності з високою точністю. Розроблена підпрограма дає змогу автоматизувати процес визначення модуля пружності підрейкової основи і здійснювати подальший аналіз отриманих даних. Крім того, запропонований підхід значно зменшує можливість помилки внаслідок людського фактору і дає змогу отримати вичерпну інформацію на етапі проведення експерименту. Таким чином, з'являються можливості більш якісного та точного визначення даного показника.

Запропонована методика обробки отриманих результатів апробована при виконанні експериментів на ділянці Новомосковськ – Балівка Придніпровської залізниці. Під час проведення експериментів кожна дослідна ділянка мала чотири послідовні перерізи рейки, кожен з яких обладнано датчиками. Схему розташування датчиків на прямій ділянці зображено на рис. 3. Аналогічним чином було обладнано датчиками чотири інші ділянки залізничної колії.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

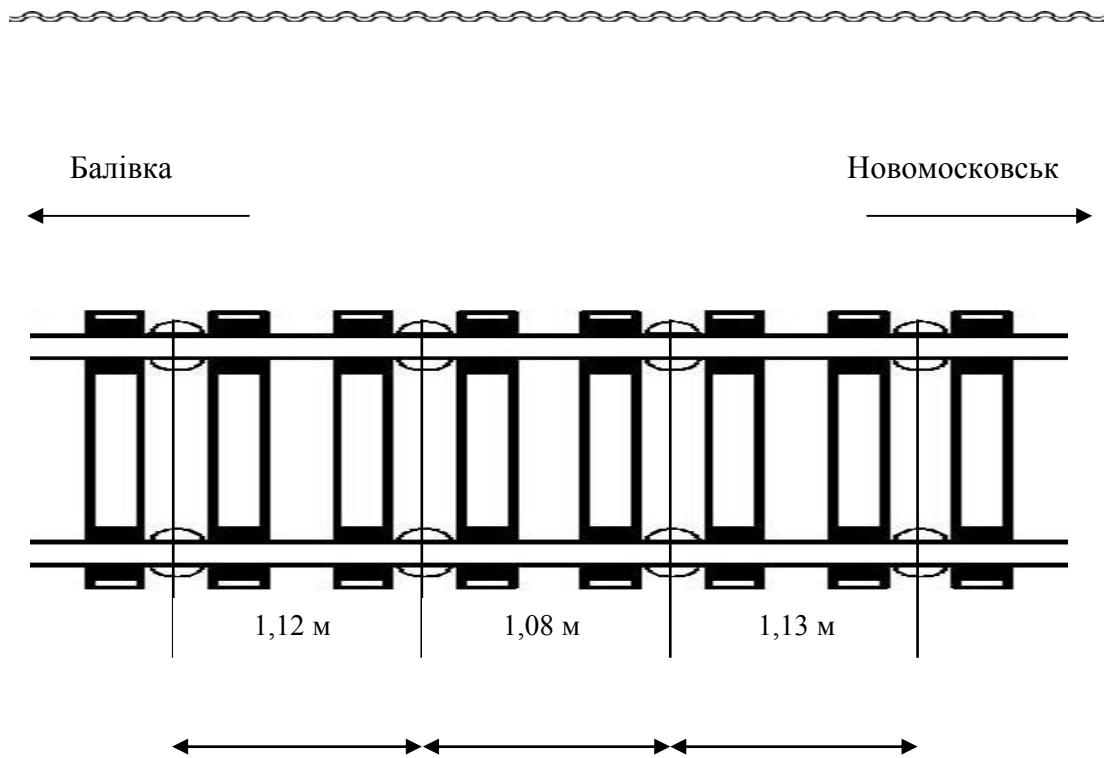


Рис. 3 - Схема розташування датчиків на дослідній ділянці

Під час експерименту для зменшення впливу суміжних коліс розглядались тільки варіанти розташування рухомого складу, коли перше колесо першого локомотива знаходиться на першому перерізі рейки. В даних експериментах по дослідних ділянках рухався поїзд, що складався з такої послідовності: локомотив ЧС-7, два пасажирських вагона, локомотив ЧС-7. Заїзди виконувались в обидва напрямки з різними швидкостями руху. Таким чином, для кожної ділянки було отримано близько 150 результатів визначення модуля пружності підрейкової основи. Результати визначення модуля пружності підрейкової основи для п'ятих дослідних ділянок залізничної колії, представлено на рис. 4.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

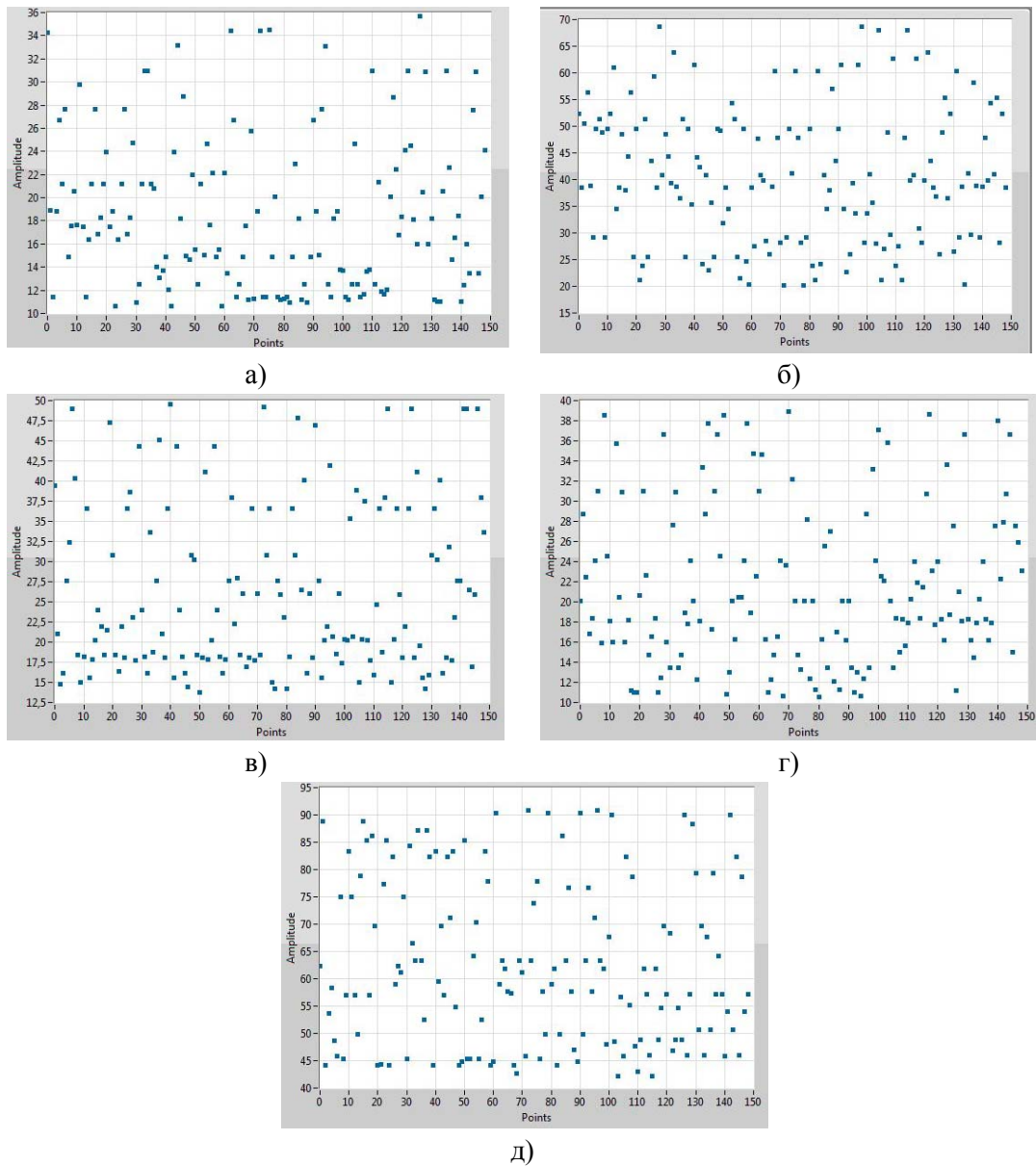


Рис. 4 - Результати розрахунку модуля пружності підрейкової основи:
а) пряма; б) крива $R=419$ м; в) крива $R=906$ м; г) крива $R=1530$ м; д) стрілочний
перевод типу Р65 марки 1/11

Середнє значення модуля пружності підрейкової основи для розглянутих ділянок, яке і рекомендовано прийняти як розрахункове, відповідно складає 18,6; 40,7; 26,5; 21,5; 62,6 МПа. При цьому середньоквадратичне відхилення до середнього значення склало відповідно 0,36; 0,31; 0,39; 0,37; 0,24, що не перевищує рекомендовано інтервалу довіри 0,4 [10].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Висновки. Запропоновано і апробовано метод визначення модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань напружень в рейках, що базується на теорії розповсюдження пружних хвиль та використанні цифрової техніки.

Використання цифрової техніки дає наступні переваги: мобільність, простота і надійність зберігання отриманої інформації, швидкість обробки даних. Висока частота дискретизації вимірювань дає змогу розширити можливості для аналізу результатів досліджень.

Застосовуючи даний метод визначено модуль пружності підрейкової основи для п'яти дослідних ділянок залізничної колії (прямої, кривих радіусом 419 м, 906 м, 1530 м та стрілочному переводі марки Р65 типу 1/11).

ЛІТЕРАТУРА

1 Даніленко Е.І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність та стійкість : ЦП-0117 / Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. – К.: Транспорт України, 2004. – 64 с.

2 Бондаренко І.О. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І.О. Бондаренко, Д.М. Курган, О.М. Патласов, В.Є. Савлук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37 – С. 124–128.

3 Курган Д.М. До вирішення задач розрахунку колії на міцність із урахуванням нерівно пружності підрейкової основи / Д.М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – 1 (55). – С. 90–99.

4 Бондаренко І.О. Визначення методики розрахунку модуля пружності підрейкової основи за результатами експериментальних вимірювань показників взаємодії колії і рухомого складу / І.О. Бондаренко, Д.М. Курган, В.Є. Савлук // Збірник наукових праць ДонІЗТ – 2012. – Вип. 31 – С. 225–230.

5 Гавриленко А.К. Учет жесткости железнодорожного пути / А.К. Гавриленко // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 4. – С. 37–39.

6 Фришман М.А. Исследования изменения вертикальной жесткости пути по его длине / М.А. Фришман, И.С. Леванков // Исследования взаимодействия пути и подвижного состава – Труды ДИИТ. – 1972. – Вып. 138. – С. 48–57.

7 Малявко А.М. Устройство для экспериментального определения упругих характеристик пути / А.М. Малявко // Вопросы исследования пути. – Труды МИИТ. – 1965. – Вып. 210. – С. 80–93.

8 Сисин М.П. Дослідження динамічних коливань балки на пружній основі під дією рухомого навантаження при проходженні силової нерівності колії / М.П. Сисин, В.В. Рибкін, О.М. Патласов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2004. – Вип. 5 – С. 188–193.

9 Гавриленко А.К. Использование данных современных путеизмерительных средств для определения вертикальной жесткости пути / А.К. Гавриленко, М.Н. Смердов // Труды научно-практической конференции «Повышение эффективности работы путевого хозяйства и инженерных сооружений железных дорог». – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – С. 199.

10 ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними [Затверджено наказом Держстандарту України № 31 від 22.01.1995 р.]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 124 с.