

УДК 625.46:625.142

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.194.29

## ЗНИЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ВІБРАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ ВІД РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

ПАЛАНТ О. В.<sup>1</sup> *аспірант*,  
САВЧЕНКО О. М.<sup>2</sup> *аспірант*,  
ПЛУГІН Д. А.<sup>3</sup>, *д.т.н., доц.*,  
ПЛУГІН А. А.<sup>4</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1</sup> кафедра будівельних матеріалів конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: elyakina.elena@rambler.ru.

<sup>2</sup> кафедра будівельних матеріалів конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: SavchenkoAM@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4610-289X.

<sup>3</sup> кафедра будівельних матеріалів конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin.da@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4359-4369.

<sup>4</sup> кафедра будівельних матеріалів конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6941-2076.

**Анотація. Мета.** Розробка конструктивно-технологічного рішення безбаластної конструкції трамвайної колії з підвищеними показниками віброізоляційних та електроізоляційних властивостей та дослідження електричного опору між трамвайними рейками та оточуючими конструкціями, а також вібрації на оточуючих конструкціях. **Методика.** Об'єктом представлених досліджень є конструкція трамвайних колій з рейками ізолюваними від підрейкової основи поліуретановим композитом (система ERS). Електричний опір в ланцюзі рейка – плита виміряне через кожні 10 м по всій довжині дослідної ділянки. Для вимірювань електричного опору застосовано цифровий мультиметр Sanwa PC510. Для контакту мультиметру з бетоном застосовано мідно-сульфатний електрод. Для вимірювань вібрації на поверхні залізобетонної підрейкової основи під час проходження рухомого складу застосовано віброаналізатор «Вибран-2.0». **Результати.** Для зниження вібраційних коливань в системі ERS і зниження витрати поліуретанового композиту розроблено спеціальні бетонні прирейкові вкладиші. Проведено дослідження електричного опору між трамвайними рейками і оточуючими конструкціями, а також вібрації на оточуючих конструкціях. Встановлено, що вібраційний вплив колії ERS значно нижче, а електричний опір – в чотири рази вище, ніж у традиційної колії. **Наукова новизна.** Розроблено методику виміру електричного опору в ланцюзі рейка – плита та виміру вібрації на підрейковій основі трамвайної колії системи ERS. Отримано результати відповідних натурних досліджень. **Практична значимість.** Застосування розроблених прирейкових вкладишів дозволить суттєво скоротити витрати поліуретанового композиту та знизити вібраційні коливання при влаштуванні трамвайної колії за системою ERS. Підвищення електричного опору верхньої будови трамвайної колії забезпечить захист від електрокорозії як її елементів, так і конструкцій будівель та споруд, що розташовані вздовж колії.

**Ключові слова:** трамвайна колія, струми витоку, вібрація, шум

## СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

ПАЛАНТ Е. В.<sup>1</sup> *аспірант*,  
САВЧЕНКО А. М.<sup>2</sup> *аспірант*,  
ПЛУГІН Д. А.<sup>3</sup>, *д.т.н., доц.*,  
ПЛУГІН А. А.<sup>4</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1</sup> кафедра строительных материалов конструкций и сооружений, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харьков, Украина, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: elyakina.elena@rambler.ru.

<sup>2</sup> кафедра строительных материалов конструкций и сооружений, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харьков, Украина, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: SavchenkoAM@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4610-289X.

<sup>3</sup> кафедра строительных материалов конструкций и сооружений, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейєрбаха 7, 61050, Харьков, Украина, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin.da@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4359-4369.

<sup>4</sup> кафедра строительных материалов конструкций и сооружений, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха 7, 61050, Харьков, Украина, тел. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6941-2076.

**Аннотация. Цель.** Разработка конструктивно-технологического решения безбалластной конструкции трамвайного пути с повышенными показателями виброизоляционных и электроизоляционных свойств и исследования электрического сопротивления между трамвайными рельсами и окружающими конструкциями, а также вибрации на окружающих конструкциях. **Методика.** Объектом представленных исследований является конструкция трамвайных путей с рельсами изолированными от подрельсового основания полиуретановым композитом (система ERS). Электрическое сопротивление в цепи рельс – плита измерено через каждые 10 м по всей длине опытного участка. Для измерений сопротивления использован цифровой мультиметр Sanwa PC510. Для контакта мультиметра с бетоном использован медно-сульфатный электрод. Для измерений вибрации на поверхности железобетонного подрельсового основания при прохождении подвижного состава использован вибронализатор «Вибран-2.0». **Результаты.** Для снижения вибрационных колебаний в системе ERS и снижения расхода полиуретанового композита разработаны специальные бетонные прирельсовые вкладыши. Проведены исследования электрического сопротивления между трамвайными рельсами и окружающими конструкциями, а также вибрации на окружающих конструкциях. Установлено, что вибрационное воздействие пути ERS значительно ниже, а электрическое сопротивление – в четыре раза выше, чем у традиционного пути. **Научная новизна.** Разработана методика измерения сопротивления в цепи рельс – плита и измерения вибрации на подрельсовом основании трамвайного пути системы ERS. Получены результаты соответствующих натурных исследований. **Практическая значимость.** Применение разработанных прирельсовых вкладышей позволит существенно сократить расходы полиуретанового композита и снизить вибрационные колебания при устройстве трамвайных путей по системе ERS. Повышение сопротивления верхнего строения трамвайного пути обеспечит защиту от электрокоррозии как его элементов, так и конструкции зданий и сооружений, расположенных вдоль пути.

*Ключевые слова:* трамвайный путь, токи утечки, вибрация, шум

## ELECTRICAL AND VIBRATION IMPACTS REDUCTION FROM RAIL TRANSPORT

PALANT O. V.<sup>1</sup> *Graduate student,*  
SAVCHENKO O. M.<sup>2</sup> *Graduate student,*  
PLUGIN D. A.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Assos.prof.,*  
PLUGIN A. A.<sup>4</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup> Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, 61050 Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057)730-10-63, e-mail: elyakina.elena@rambler.ru.

<sup>2</sup> Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, 61050 Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057)730-10-63, e-mail: SavchenkoAM@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4610-289X.

<sup>3</sup> Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, 61050 Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin.da@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4359-4369.

<sup>4</sup> Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach sq. 7, 61050 Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (057)730-10-63, e-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6941-2076.

**Annotation. Purpose.** Development of a constructive technological solution without a ballast construction of a tram tracks with increased indices of vibration isolation and electrical insulation properties and investigations of electrical resistance between tram rails and surrounding structures, as well as vibration on surrounding structures. **Methodology.** The object of the presented investigations is the construction of tram tracks with rails insulated from the under-rail base with polyurethane composite (ERS system). The electrical resistance in the rail-plate circuit is measured every 10 meters along the length of the test section. To measure the resistance a Sanwa PC510 digital multimeter was used. Copper-sulphate electrode for contact with concrete was used. For measurements of vibration on the surface of a reinforced concrete sub-rail base during the passage of a tram a vibration analyzer was used «Вибран-2.0». **Findings.** In order to make to reduce vibration of ERS and reduce consumption of the composite, special concrete liners were developed. Investigations of the electrical resistance between tram rails and surrounding structures, as well as vibration on surrounding structures, were carried out. It is established that the electrical resistance of ERS is four times higher and the vibrational effect is much lower than these factors for the conventional track. **Originality.** A method for measuring the resistance in the rail - plate circuit and measuring vibration on the under-rail base of the ERS tramway system is developed. The results of relevant field studies are obtained. **Practical value.** The use of developed rail inserts will significantly reduce the cost of the polyurethane composite and reduce vibration fluctuations in the construction of tram tracks through the ERS system. Increasing the resistance of the upper structure of the tramway will provide protection against electro-corrosion its elements, as well as the buildings and structures located along the way.

*Keywords:* tramway, leakage currents, vibration, noise

## Вступ

На електрифікованих ділянках залізниць, в метрополітенах, трамвайних коліях електрокорозією від дії струмів витоку та блукаючих струмів дуже інтенсивно пошкоджуються конструкції мостів, тунелів, підрейкових основ, інші конструкції елементів верхньої будови колії [1 – 4]. Під час руху поїздів, трамваїв, виникають значна вібрація та шум які, як відомо, несприятливо впливають на людину, довкілля, будівельні конструкції та споруди [5 – 6].

Електрокорозія, вібрація та шум в значній мірі обумовлені недосконалістю традиційної конструкції верхньої будови колії, яка складається із рейок та підрейкової основи (шпал, плит і т.п.). Такі конструкції, як правило, жорсткі, добре передають вібрацію та створюють шум та швидко втрачають електроізоляційні властивості.

На сьогодні дуже актуально стоїть завдання щодо зниження у населених пунктах струмів витоку, шуму та вібрації. Тому тема роботи, спрямована на аналіз віброізоляційних та електроізоляційних властивостей сучасних конструкцій підрейкових основ та розробку конструктивно-технологічного рішення безбаластного трамвайного полотна з високими показниками віброізоляційних та електроізоляційних властивостей є актуальною.

## Мета

Розробка конструктивно-технологічного рішення безбаластної конструкції трамвайної колії з підвищеними показниками віброізоляційних та електроізоляційних властивостей та дослідження електричного опору між трамвайними рейками та оточуючими конструкціями, а також вібрації на оточуючих конструкціях.

## Матеріали

Як матеріали для цього дослідження були обрані: дрібнозернистий важкий бетон класу за міцністю на стиск С 16/20; заливальна маса з поліуретанової смоли Edilon Corkelast®.

## Методика і результати

### Розробка конструкції прирейкових вкладишів

Для зниження електричних і вібраційних впливів в місті Харкові почали застосовувати конструкції трамвайних колій з рейками, що ізолювані від підрейкової основи поліуретановим композитом, а саме систему ізолюваної рейки (ERS).

Система ізолюваної рейки (система ERS) – це система кріплення рейок, яка забезпечує пружний перерозподіл навантаження, створюваного рейковими транспортними засобами, а також гасіння коливань і шуму, викликаних їхнім рухом. Рейки кріпляться в рейкових каналах бетонної плити основи за допомогою заливальної маси з поліуретанової смоли. Висока адгезія поліуретанової смоли до бетону й сталі дозволяє відмовитися від

безпосереднього прикріплення рейок до плити або сталевій конструкції.

Система ERS застосовується з усіма профілями рейок, при тиску на вісь до 180 кН. Дана система застосовується для відособлених і спільних із проїзною частиною трамвайних колій, у безбаластних конструкціях з бетонною основою, на міжстанційних коліях, а також на інженерних спорудах.

Для збільшення ваги рейок (зниження вібраційних коливань і шуму) і зниження витрати поліуретанового композиту розроблені спеціальні прирейкові вкладиші, які виготовлені з дрібнозернистого важкого бетону класу за міцністю на стиск не нижче С 16/20 та водопоглиненням за масою не більш 12 %. (рис. 1).

Вкладиші встановлюють з обох боків шийки рейки, конструкція їх є універсальною, що дає можливість їх застосовувати як на прямих і криволінійних ділянках трамвайних колій, так і для жолобчатих трамвайних рейок різних виробників.

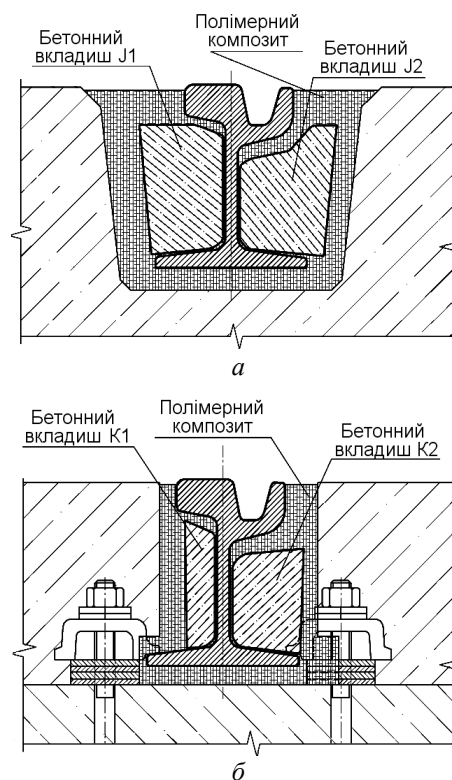


Рис. 1. Схема укладання вкладишів в колію: а – вкладиш в колії при збірній залізобетонній основі; б – вкладиш в колії при монолітній залізобетонній основі / Scheme of mounting liners in the track: a – liner in the track on composite reinforced base; b – liner in the track on solid reinforced base

Монтаж вкладишів здійснюють шляхом їх приклеюванням до шийки та підшви рейки, відповідно до робочого проекту, будь-яким водостійким полімерним клейовим складом, що здатен забезпечити незмінність проектного положення вкладишів на час заповнення рейкового

жолобу в залізобетонній основі полімерним заповнювачем та його полімеризації.

**Експериментальні дослідження електричного опору між трамвайними рейками і оточуючими конструкціями, а також вібрації на оточуючих конструкціях**

Електричний опір в ланцюзі рейка – плита виміряне за схемою, наведеною на рис. 2 через кожні 10 м по всій довжині дослідної ділянки. Для вимірювань електричного опору застосовано цифровий мультиметр Sanwa PC510 з діапазоном вимірювань від 5 Ом до 50 МОм. Для контакту мультиметру з бетоном застосовано вимірювальний електрод, наведений на рис. 3. За остаточний результат прийнято мінімальну визначену величину електричного опору.

Показники вібрації на поверхні залізобетонної основи виміряні за схемою, наведеною на рис. 4.

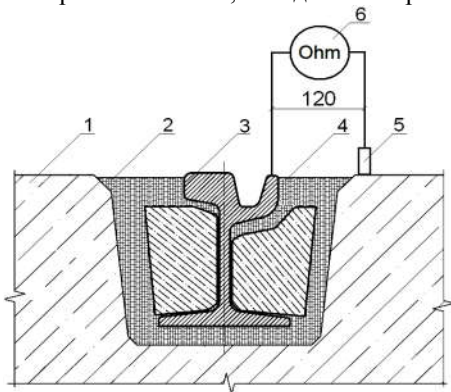


Рис. 2. Схема вимірювання опору в ланцюзі рейка – бетон: 1 – залізобетонна підрейкова основа; 2 – полімерний заповнювач; 3 – рейка; 4 – прирейковий вкладиш; 5 – вимірювальний електрод (рис. 3); 6 – вимірювальний прилад / Diagram of measuring resistance in the rail-concrete circuit: 1 – reinforced rail base; 2 – polymeric filler; 3 – rail; 4 – rail liner; 5 – measuring electrode (Fig. 3); 6 – measuring device

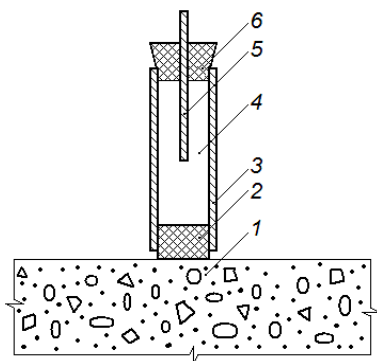


Рис. 3. Вимірювальний електрод для контакту з бетоном: 1 – залізобетонна підрейкова основа; 2 – пориста гума; 3 – діелектричний корпус; 4 – насичений розчин мідного купоросу  $CuSO_4 \times 5H_2O$ ; 5 – мідний стержень; 6 – гумова пробка / Measuring electrode for contact with concrete: 1 – reinforced rail base; 2 – porous rubber; 3 – dielectric case; 4 – saturated copper-sulphate solution  $CuSO_4 \times 5H_2O$ ; 5 – copper rod; 6 – rubber plug

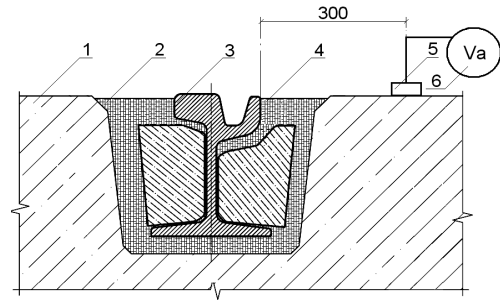


Рис. 4. Схема вимірювання вібрації: 1 – залізобетонна підрейкова основа; 2 – полімерний заповнювач; 3 – рейка; 4 – прирейковий вкладиш; 5 – вібродатчик; 6 – віброаналізатор / Diagram of vibration measurement: 1 – reinforced rail base; 2 – polymeric filler; 3 – rail; 4 – rail liner; 5 – vibration sensor; 6 – vibration analyzers

Для вимірювань вібрації застосовано віброаналізатор «Вибран-2.0», що має наступні характеристики: вимірювані параметри вібросигналів – віброшвидкість, вібропереміщення; діапазон частот – 0,5 – 1000 Гц; діапазон вимірювання віброшвидкості – 0,1 – 300 мм/с.

Вимірювання виконано під час проходження рухомого складу. За остаточні результати прийнято середнє значення з визначених величин віброшвидкості та вібропереміщення.

Приклад отриманих віброграм та частотних спектрів вібрації наведено на рис. 5.

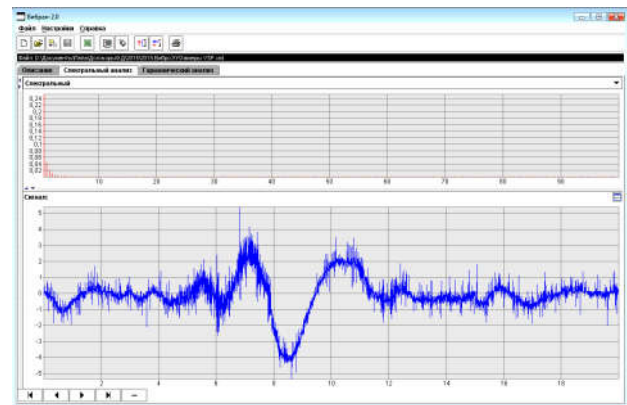


Рис. 5. Віброграма та частотний спектр вібрації плити № 7 при русі трамваю по перехрестю в бік вул. Клочківській (м. Харків). Середньоквадратичне значення віброшвидкості  $V_{msv} = 0,705$  мм/с, вібропереміщення  $S = 0,259$  мм / Vibrorecord and vibration frequency spectrum of Plate 7 when a tram moves along the crossroad toward Klochkivska street (city of Kharkiv). The root-mean-square value of vibration velocity is  $V_{msv} = 0,705$  mm/sec. The vibration displacement is  $S = 0,259$  mm

Усреднені результати порівняльних експериментальних випробувань трамвайної колії влаштованої за традиційною технологією, баластна колія із залізобетонними шпалами, та колії за системою ізольованої рейки наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати експлуатаційних випробувань  
прирейкових вкладишів / Results of operational  
tests on rail liners**

Найменування показника (параметру)	Фактичне значення параметру (показника) за результатами вимірювань	
	Традиційна колія	Коля за системою ізолюваної рейки
Електричний опір в ланцюзі рейка – плита, МОм	1	3,9
Електричний опір в ланцюзі рейка – ґрунт, МОм	0,016	–
Показники вібрації: Віброшвидкість $V_{скз}$ , мм/с	0,85	0,62
Вібропереміщення $S$ , мм	0,27	0,22

Наведені результати експериментальних досліджень свідчать про те, що електричний опір колії з ізолюваними рейками в чотири рази вище, а вібраційний вплив близько 20 % нижчий, ніж у колії

традиційної конструкції. Що в свою чергу дозволяє прогнозувати зменшення величини струмів витoku з рейкової колії, електрокорозійного пошкодження конструкцій колії та оточуючих конструкцій і зменшення акустичного та вібраційного навантаження на людину, довкілля, будівельні конструкції та споруди.

### Висновки

Для зменшення вібрації і шуму в конструкції трамвайних колій за системою ізолюваної рейки (ERS) і зниження витрати поліуретанового композиту були розроблені спеціальні бетонні прирейкові вкладиші. Проведено дослідження електричного опору між трамвайними рейками і оточуючими конструкціями, а також вібрації на оточуючих конструкціях. Встановлено, що електричний опір колії з ізолюваними рейками в 4 рази вище, а вібраційний вплив набагато нижче, ніж у традиційної колії.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Плагин А.Н. Электрокоррозия железобетонных мостов и других искусственных сооружений / [А.Н. Плагин, А.А. Скорик, А.А. Плагин и др.] // *Залізничний транспорт України*. – 2004. – № 1. – С. 11 – 13 / A.N. Plugin, O.O. Skoryk, A.A. Plugin etc., *Railway transport of Ukraine*, **1**, 11–13, (2004).
2. Шуба Т. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні / [Т. Шуба, В. Чистяк, В. Перестюк та ін.] // *36.наук.праць УкрДАЗТ*. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 122. – С. 201 – 221 / T. Shuba, V. Chystiak, V. Perestiuk, O. Yeliakina, O. Zabiiaaka, and A. Plugin, *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, **122**, 201–221, (2011).
3. Plugin D.A. Electro-corrosion of constructions of bridges on electrified by a direct current sections of railways / [D.A. Plugin, A.N. Plugin, Al.A. Plugin, and O.S. Borzyak] // *Nauka i Studia. Techniczne nauki budownictwo i architektura nowoczesne informacyjne technologie*. – *Przemysł*, 2013. – № 30 (98). – С. 69 – 77.
4. Plugin D.A. Electro-corrosion of constructions of railway tunnels / [D.A. Plugin, A.N. Plugin, Al.A. Plugin, and O.S. Borzyak] // *Aplikovane vědecke novinky* – 2013. – Praha, 2013. – P. 52 – 58. – Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/22\\_PNR\\_2013/Stroitelstvo/4\\_142971.doc.htm](http://www.rusnauka.com/22_PNR_2013/Stroitelstvo/4_142971.doc.htm).
5. Nelson J. A prediction procedure for rail transportation groundborne noise and vibration [Електронний ресурс] / J. Nelson, H. Saurenman // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1143 (1987), pp. 26 – 35. – Режим доступу: [http://www.adc40.org/docs/paper\\_award/1988%20Paper%20Award.pdf](http://www.adc40.org/docs/paper_award/1988%20Paper%20Award.pdf). – Дата звернення 20.02.18.
6. Connolly D.P. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model [Електронний ресурс] / D.P. Connolly, G. Kouroussis, A. Giannopoulos, O. Verlinden, P.K. Woodward, and M.C. Forde // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – Vol. 58, March 2014, P. 37 – 47. Режим доступу: [http://ac.els-cdn.com/S0267726113002662/1-s2.0-S0267726113002662-main.pdf?\\_tid=13354d60-0d78-11e7-a6e6-00000aab0f02&acdnat=1490019682\\_03a2cc89160e44e3dacde539b25373e1](http://ac.els-cdn.com/S0267726113002662/1-s2.0-S0267726113002662-main.pdf?_tid=13354d60-0d78-11e7-a6e6-00000aab0f02&acdnat=1490019682_03a2cc89160e44e3dacde539b25373e1). – Дата звернення 20.02.18.

### REFERENCES

1. Plugin A.N., Skoryk O.O., Plugin A.A. etc. *Elektrokorroziya zhelezobetonnyh mostov i drugih iskusstvennyh sooruzheniy* [Electro-corrosion of reinforced concrete bridges and other artificial structures]. *Zalznichniy transport Ukrayini* [Railway transport of Ukraine]. 2004, no. 1, pp. 11–13. (in Ukrainian).
2. Shuba T., Chystiak V., Perestiuk V., Yeliakina O., Zabiiaaka O., and Plugin A. *Dosvid zastosuvannya novih konstruktsiy bezbalastnogo zaliznichnogo polotna u Polschi ta otsinka perspektiv yih zastosuvannya v Ukrayini* [The experience of using new structures without a ballast railroad in Poland and assessing the prospects for their application in Ukraine]. *UkrDAZT*. Harkiv, 2011, no. 122, pp. 201–221. (in Ukrainian).

3. Plugin D.A., Plugin A.N., Plugin A.I.A., and Borzyak O.S. *Electro-corrosion of constructions of bridges on electrified by a direct current sections of railways*. *Nauka i Studia. Techniczne nauki budownictwo i architektura nowoczesne informacyjne technologie*. Przemysł, 2013, no. 30 (98), pp. 69–77. (in Poland).
4. Plugin D.A., Plugin A.N., Plugin A.I.A., and Borzyak O.S. *Electro-corrosion of constructions of railway tunnels*. *Aplikovane vědecke novinky*. Praha, 2013, pp. 52–58. Available at: [http://www.rusnauka.com/22\\_PNR\\_2013/Stroitelstvo/4\\_142971.doc.htm](http://www.rusnauka.com/22_PNR_2013/Stroitelstvo/4_142971.doc.htm). (in Czech Republic).
5. Nelson J. and Saurenman H. *A prediction procedure for rail transportation groundborne noise and vibration*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1143 (1987), pp. 26–35. Available at: [http://www.adc40.org/docs/paper\\_award/1988%20Paper%20Award.pdf](http://www.adc40.org/docs/paper_award/1988%20Paper%20Award.pdf).
6. Connolly D.P., Kouroussis G., Giannopoulos A., Verlinden O., Woodward P.K., and Forde M.C. *Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – Vol. 58, March 2014, pp. 37–47. Available at: [http://ac.els-cdn.com/S0267726113002662/1-s2.0-S0267726113002662-main.pdf?\\_tid=13354d60-0d78-11e7-a6e6-00000aab0f02&acdnat=1490019682\\_03a2cc89160e44e3dacde539b25373e1](http://ac.els-cdn.com/S0267726113002662/1-s2.0-S0267726113002662-main.pdf?_tid=13354d60-0d78-11e7-a6e6-00000aab0f02&acdnat=1490019682_03a2cc89160e44e3dacde539b25373e1).