

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЛЕЙБУК ЯРОСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 625.143.482

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНЕРЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛІЇ  
НА ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ З РУХОМИМ СКЛАДОМ**

05.22.06 – залізнична колія

27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне

джерело



Я.С. Лейбук

Науковий керівник

ПОТАПОВ Дмитро Олександрович,  
кандидат технічних наук, доцент  
Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Лейбук Я. С** Дослідження впливу інерційних характеристик колії на процеси взаємодії з рухомим складом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню впливу приведеної маси колії на рівень сил взаємодії залізничної колії і пасажирського рухомого складу у вертикальній площині в експлуатаційних умовах магістральних залізниць.

**Зміст дисертації.** У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, розглянуто наукову новизну, актуальність і практичне значення одержаних результатів.

В першому розділі наведені результати аналізу розвитку теорії взаємодії залізничної колії з рухомим складом. Проведений аналіз показав, що на теперішній час існує широкий спектр засобів для математичного моделювання процесів взаємодії залізничної колії та рухомого складу. Так, виходячи із задач, що розв'язуються, можливе використання комбінацій моделей, які побудовані на плоских розрахункових схемах статичної рівноваги між деформацією об'єкта та сили, що прикладена до нього, або просторових систем на базі розрахункових схем динамічної рівноваги на основі принципу Лагранжа-д'Аламбера. Також одним з висновків проведеного аналізу можна вважати факт поступового відходу від використання в математичних моделях розрахункової схеми залізничної колії у вигляді балки на суцільній пружній основі. Оскільки, на думку достатньо великої кількості дослідників, це дещо ідеалізує залізничну колію та її технічний стан. В якості альтернативи можливе використання просторових

моделей, в яких залізнична колія розглядається як балка, що спирається на окремі опори з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками.

Тому в рамках даного дослідження було прийнято рішення використовувати комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія», основи якої були розроблені для умов залізниць незагального користування проф. О.М. Даренським, з урахуванням дискретності підрейкової основи, а також нелінійності її пружно-дисипативних характеристик.

**В другому розділі** проведено адаптацію математичної моделі просторової динамічної системи «екіпаж-колія» проф. О.М. Даренського відповідно до завдань даного дослідження. Виходячи з перспектив підвищення швидкостей по окремих напрямках магістральних залізниць України, в якості розрахункових одиниць рухомого складу в роботі обрано пасажирські електропоїзди EJ 675 («Skoda»), HRCS2 («Hyundai Rotem»), ЕКр1 (ПАО «КВСЗ»), які експлуатуються на ділянках прискореного руху АТ «Укрзалізниця».

З точки зору формування в підсистемі «екіпаж» диференційних рівнянь динамічної рівноваги між прискореним рухом тіл з масою та обмеженнями, що накладаються на можливість їх сумісного переміщення, до однієї з ключових особливостей цих типів рухомого складу можна віднести наявність двохступеневого ресорного підвішування. В загальному випадку на електропоїздах ЕКр1, HRCS2, EJ675 для гасіння вертикальних і бічних сил перший ступінь ресорного підвішування складається з гвинтових пружин і гумових блоків, у другому – між рамою візка та кузовом використовуються пневматичні ресори.

Як базову, було прийнято схему чотиривісного екіпажа з урахуванням кінетичних та силових зв'язків між його елементами, зокрема реакцій комплектів першого та другого ступенів ресорного підвішування. Кузов і частини візка вважаються твердими тілами. Вертикальні силові й кінематичні

зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія» подані з урахуванням одностороннього зв'язку колеса і рейки, пружної й дисипативних реакцій колії. При русі екіпажу з постійною швидкістю кількість лінійних і кутових переміщень його елементів дорівнює сімнадцяти. Враховано можливість руху по колії коліс, що мають дисбаланс, нерівномірність прокату та повзуни і створюють ударні сили у стиках. Рейки розглядаються як балки, що спираються на окремі опори, які мають просторові пружно-дисипативні властивості.

Для врахування приведеної маси залізничної колії було розглянуто її вимушені коливання по довжині у відповідний момент часу під дією зовнішнього вертикального навантаження, що змінюється по гармонійному закону: Отримане в роботі рішення диференційного рівняння вертикальних переміщень рейки, враховує не тільки пружні (геометричні) характеристики підрейкових опор, а також і масу залізничної колії, яка бере участь у процесі вимушених коливань під дією зовнішніх навантажень.

**В третьому розділі** розроблені теоретичні підходи щодо визначення приведеної маси залізничної колії, математичний апарат для практичної оцінки величини цієї характеристики, а також проведено експериментальну перевірку отриманих результатів. Для числової реалізації відповідно до задач даного дослідження було адаптовано математичну модель напружено-деформованого стану залізничної колії, яка була розроблена проф. Д.М. Курганом, на основі динамічної задачі теорії пружності.

Одним з базових елементів в запропонованій моделі є визначення геометрії поширення напружень (і відповідних деформацій) у півпросторі залізничної колії від дії зовнішнього навантаження (колів рухомого складу).

Геометрія поширення напружень описується множиною векторів. Довжини векторів визначаються на кожному часовому кроці для всіх можливих напрямків поширення деформацій, які задаються кутами, що описують півпростір. Внесений в математичну модель відповідний розрахунковий модуль, дозволяє визначати приведену до точки контакту з

колесом маси рейкошпальної решітки та підшпальної основи в наступній послідовності: від сили, прикладеної до рейки, поширюються деформації і після декількох часових кроків моделювання передаються від підшви (і частково від бокових поверхонь) шпали до баласту; подальше поширення деформацій формує розрахункові сфери, кожна з яких є простір між початками і кінцями векторів на поточному кроці розрахунку з урахуванням обмежень границями об'єкту; фіксується маса (повна) і вертикальна деформація кожного елемента, який бере участь у взаємодії; визначається приведена маса кожної сфери, з точкою приведення до її вертикальної осі; визначається приведена маса шару до точки контакту колеса і рейки

Варіюючи вихідними даними (в першу чергу, фізико-механічними характеристиками підшпальної основи) були проведені розрахунки, які дозволили встановити, що для умов магістральних залізниць величина приведеної маси залізничної колії знаходиться в межах  $11 \div 15$  кН

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі було проведено експериментальні роботи по вимірюванню вертикальних прискорень в елементах залізничної колії на діючих ділянках регіональної філії «Південна залізниця». Фактичний стан колії на ділянках проведення експерименту знаходився у відповідності до вимог Правил технічної експлуатації залізниць України. Технічні характеристики (тип рейок, скріплень, баластного шару та ін.), були близькими до вихідних даних окремих варіантів проведених раніше теоретичних розрахунків.

Вимірювання прискорень в елементах залізничної колії проводилося за допомогою ADXL345 – мініатюрного акселерометру з високою роздільною здатністю і діапазоном вимірювання до  $\pm 16g$ . Модуль здатний вимірювати статичні прискорення, викликані гравітацією, а також динамічні прискорення, викликане рухом або ударами. Для настройки, обробки та реєстрації даних на базі акселерометра було розроблено пристрій з

використанням мікроконтролера AVR ATmega328P. Запис даних проводився на карту пам'яті microSD..

В обраному для спостережень перерізі колії за допомогою магніту на підшву кожної рейкової нитки було встановлено по одному пристрою. В якості джерела коливань було використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4, технічні можливості якого, дали змогу моделювати зовнішнє динамічне поїзне навантаження. Вимірювання проводились серіями у відповідності до робочих частот коливань стабілізатора, що дало змогу отримати достатній обсяг вихідних даних для побудови акселерограм. з подальшим визначенням спектральних характеристик, а також екстремальних значення прискорень в елементах залізничної колії.

Математичний апарат по визначенню приведеної маси залізничної колії в лабораторних умовах дозволив остаточно визначити цю величину, виходячи з отриманих даних експериментів.

Розбіжність між експериментальними та отриманими раніше теоретичними значеннями величини приведеної маси залізничної колії складає до 8%, що свідчить про адекватність запропонованої моделі.

**В четвертому розділі** наведено результати, проведених числовими методами, досліджень по визначенню рівня вертикальних сил взаємодії залізничної колії та електропоїздів ЕКр1, НRCS2 та EJ 675. З метою встановлення впливу приведеної маси залізничної колії на величину сил у вертикальній площині вихідні дані було розбито на дві групи. Єдиною відмінністю проведення розрахунків для варіантів першої групи (у порівнянні з другою) було відключення відповідних обчислювальних модулів для визначення приведеної маси залізничної колії. Всі інші вихідні дані були повністю ідентичними. В результаті проведених розрахунків були отримані величини вертикальних сил взаємодії для обраних рухомих одиниць в діапазоні швидкостей від 100 до 160 км/год., як із урахуванням приведеної маси залізничної колії, так і без неї.

Проведені розрахунки показали, що приведена маса залізничної колії чине вплив на величину вертикальних сил взаємодії з рухомим складом. Встановлено загальне зменшення величини цих сил для всіх обраних типів електропоїздів. Мінімальне (у процентному відношенні) зменшення для всього діапазону швидкостей зафіксоване для електропоїзда HRCS2 (4-12%), максимальне – для Екр1 (7-17%). При швидкості руху 140 км/год рівень вертикальних сил для електропоїздів EJ675, HRCS2, ЕКр1 знижується відповідно на 13, 11 та 15%.

**Ключові слова:** залізнична колія, приведена маса, підшпальна основа, ділянки прискореного руху, математична модель взаємодії залізничної колії і рухомого складу, безпека руху поїздів

## ABSTRACT

Investigation of the influence of track inertial characteristics on the processes of interaction with rolling stock. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.06 - a railway track (27 - transport). - Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of the influence of the reduced mass of the track on the level of forces of interaction of the railway track and passenger rolling stock in the vertical plane in the operating conditions of the main railways.

**The content of the dissertation.** The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose and objectives of the study, shows the relationship of work with scientific programs, plans and topics, considers the scientific novelty, relevance and practical significance of the results.

**The first Chapter** presents the results of the analysis of the development of the theory of interaction of the railway track with rolling stock. The analysis showed that at present there is a wide range of tools for mathematical modeling of the interaction of the railway track and rolling stock. Thus, based on the problems to be solved, it is possible to use combinations of models based on flat calculation schemes of static equilibrium between the deformation of the object and the force applied to it, or spatial systems based on calculation schemes of dynamic equilibrium based on the Lagrange principle. -d'Alembert. Also, one of the conclusions of the analysis can be considered the fact of gradual departure from the use in mathematical models of the calculation scheme of the railway track in the form of a beam on a solid elastic basis. Because, according to a large number of researchers, this somewhat idealizes the railway track and its technical condition. Alternatively, it is possible to use spatial models in which the railway track is considered as a beam resting on individual supports with nonlinear elastic-dissipative characteristics.

Therefore, in the framework of this study it was decided to use a set of mathematical models of the spatial dynamic system "crew-track", the basics of which were developed for the conditions of non-public railways prof. O. Darensky, taking into account the discreteness of the subrail base, as well as the nonlinearity of its elastic-dissipative characteristics.

**In the second Chapter** the adaptation of the mathematical model of the spatial dynamic system "crew-track" of prof. O. Darensky in accordance with the objectives of this study. Based on the prospects of increasing speeds in certain directions of the main railways of Ukraine, as electric units of rolling stock in the work selected passenger electric trains EJ 675 ("Skoda"), HRCS2 ("Hyundai Rotem"), EKr1 (PJSC "KVSZ"), which are operated on sections of accelerated traffic of JSC "Ukrzaliznytsia".

From the point of view of formation in the "crew" subsystem of differential equations of dynamic equilibrium between accelerated motion of bodies with mass



and restrictions imposed on the possibility of their joint movement, one of the key features of these types of rolling stock is the presence of two-stage spring suspension. In the general case, on electric trains EKp1, HRCS2, EJ675 the first stage of spring suspension consists of coil springs and rubber blocks for damping of vertical and lateral forces, in the second - pneumatic springs are used between the frame of the cart and the body.

As a basic, the scheme of the four-axle crew was adopted, taking into account the kinetic and force connections between its elements, in particular the reactions of the sets of the first and second stages of the spring suspension. The body and parts of the cart are considered solids. The vertical force and kinematic connections of the "crew" and "track" subsystems are presented taking into account the one-way connection of the wheel and the rail, the elastic and dissipative reactions of the track. When the crew moves at a constant speed, the number of linear and angular movements of its elements is equal to seventeen. The possibility of movement on the track of wheels that have imbalance, uneven rolling and sliders and create impact forces at the joints is taken into account. Rails are considered as beams resting on separate supports which have spatial elastic-dissipative properties.

To take into account the reduced mass of the railway track, its forced oscillations in length at the appropriate time under the action of external vertical load, which varies according to the harmonic law, were considered: as well as the mass of the railway track, which participates in the process of forced oscillations under the action of external loads.

**In the third Chapter** the theoretical approaches on definition of the resulted weight of a railway track, the mathematical device for a practical estimation of size of this characteristic are developed, and also the experimental check of the received results is carried out. For numerical implementation in accordance with the objectives of this study was adapted mathematical model of the stress-strain

state of the railway track, which was developed by prof. D. Kurgan, based on the dynamic problem of the theory of elasticity.

One of the basic elements in the proposed model is to determine the geometry of stress propagation (and corresponding deformations) in the half-space of the railway track from the action of external loads (rolling stock wheels).

The stress propagation geometry is described by a set of vectors. The lengths of the vectors are determined at each time step for all possible directions of strain propagation, which are given by the angles describing the half-space. The corresponding calculation module included in the mathematical model allows to determine the mass of the rail sleeper lattice and the sleeper base brought to the point of contact with the wheel in the following sequence: deformations propagate from the force applied to the rail and after several time steps ) sleepers to the ballast; the further propagation of deformations forms the calculation spheres, each of which is the space between the beginnings and ends of the vectors in the current calculation step, taking into account the constraints of the object boundaries; the mass (full) and vertical deformation of each element participating in interaction is fixed; the reduced mass of each sphere is determined, with the point of reduction to its vertical axis; the reduced mass of the layer to the point of contact of the wheel and the rail is determined

Varying the initial data (first of all, physical and mechanical characteristics of the sleeper base) calculations were performed, which allowed to establish that for the conditions of the main railways the value of the reduced mass of the railway track is within  $11 \div 15$  kN.

To assess the adequacy of the developed mathematical model, experimental work was carried out to measure the vertical accelerations in the elements of the railway track in the existing sections of the regional branch of the Southern Railway. The actual condition of the track at the sites of the experiment was in accordance with the requirements of the Rules of technical operation of the railways of Ukraine. Technical characteristics (type of rails, fasteners, ballast layer,

etc.) were close to the initial data of some variants of previously performed theoretical calculations.

Measurement of accelerations in the elements of the railway track was performed using ADXL345 - a miniature accelerometer with high resolution and measuring range up to  $\pm 16g$ . The module is able to measure static accelerations caused by gravity, as well as dynamic accelerations caused by motion or shock. A device using the AVR ATmega328P microcontroller was developed for setting up, processing and recording data on the basis of the accelerometer. Data was recorded on a microSD memory card.

In the selected cross-section of the track with a magnet on the sole of each rail thread was installed one device. As a source of oscillations, a dynamic track stabilizer DSP-C4 was used, the technical capabilities of which made it possible to model the external dynamic train load. The measurements were performed in series in accordance with the operating oscillation frequencies of the stabilizer, which allowed to obtain a sufficient amount of initial data for the construction of accelerograms. with subsequent determination of spectral characteristics, as well as extreme values of accelerations in the elements of the railway track.

Mathematical apparatus for determining the reduced mass of the railway track in the laboratory allowed to finally determine this value, based on the obtained experimental data.

The discrepancy between the experimental and previously obtained theoretical values of the value of the reduced mass of the railway track is up to 8%, which indicates the adequacy of the proposed model.

The fourth section presents the results of numerical methods of research to determine the level of vertical forces of the railway and electric trains EKr1, HRCS2 and EJ 675. In order to establish the influence of the reduced mass of the railway on the magnitude of forces in the vertical plane The only difference between the calculations for the options of the first group (compared to the second) was the disabling of the relevant computing modules to determine the reduced

mass of the railway track. All other initial data were completely identical. As a result of the calculations, the values of vertical interaction forces for the selected moving units in the speed range from 100 to 160 km / h were obtained, both taking into account the reduced mass of the railway track and without it.

The calculations showed that the reduced mass of the railway track has an effect on the magnitude of the vertical forces of interaction with the rolling stock. The general reduction of the magnitude of these forces for all selected types of electric trains is established. The minimum (in percentage) reduction for the whole speed range was recorded for the electric train HRCS2 (4-12%), the maximum - for Ekr1 (7-17%). At a speed of 140 km / h, the level of vertical forces for electric trains EJ675, HRCS2, EKr1 decreases by 13, 11 and 15%, respectively.

**Keywords:** railway track, reduced mass, underburden base, sections of accelerated traffic, mathematical model of interaction of railway track and rolling stock, train safety

#### **Список публікацій здобувача:**

1. Kurhan, D., Leibuk, Y. Research of the Reduced Mass of the Railway Track. *Acta Technica Jaurinensis*. 2020. 13(4). pp. 324–341.
2. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверева А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. 2019. № 15. С. 41–46.
3. Даренський О.М., Шраменко В.П., Тулей Ю.Л., Дудін О.А., Лейбук Я.С. Математична модель колії, яка має інерційні характеристики, під дією швидкісного рухомого складу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №4. С. 35–40.
4. Даренський О.М., Тулей Ю.Л., Овчинніков О. О., Лейбук Я.С. Числові дослідження динамічних поперечних сил у кривих, у зонах

нерівностей ланок колії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 51–58.

5. Даренский А.Н., Лейбук Я.С. Математическая модель колебаний железнодорожного пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. №2. С. 16–20.

6. Dmytro Potapov, Sergij Panchenko, Yaroslav Leibuk, Yuseph Tuley, Pavel Plis Effect of joint and isolated irregularities of the track on the wear of rails in curves. *MATEC Web of Conferences* 230. 2018. 01012.

7. Alexander Darenskiy, Volodymyr Vitolberg, Denis Fast, Andrii Klymenko, Yaroslav Leibuk A mathematical model of the rail track presented as a bar on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads. *MATEC Web of Conferences* 116. 2017. 03002

8. Даренський О.М., Лейбук Я.С., Клименко А.В. Математична модель коливань залізничної колії як балки, яка має інерційні характеристики. *6-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2017. Харків: УкрДУЗТ. С. 196–197.

9. Лейбук Я.С. Вынужденные колебания пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 80-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. 2018. С. 109.

10. Даренський О.М., Лейбук Я.С. Чисельні дослідження динамічних поперечних сил в кривих, в зонах нерівностей ланок колії. *7-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2018. С. 35–36.

11. Лейбук Я.С., Скорик О.О. Визначення приведеної маси колії за допомогою динамічного стабілізатора колії. *79 Міжнародна науково-*

*практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». 2019. С. 240–242.*

12. Лейбук Я.С. Урахування інерційних характеристик колії при визначенні сил її взаємодії з рухомим складом. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 78-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». 2016. С. 91–92.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 Аналіз існуючих моделей та методів досліджень	
взаємодії колії та рухомого складу.....	23
Історія питання .....	23
Характеристики колії, вплив на сили взаємодії з рухомим складом .....	30
Огляд існуючих моделей залізничних екіпажів.....	45
Власні та вимушені коливання колії при застосуванні розрахункової схеми рейок або балок на суцільній пружній основі.....	51
Висновки за розділом 1 та задачі дослідження.....	53
РОЗДІЛ 2 Математична модель просторової динамічної системи «екіпаж-колія».....	56
Загальні відомості щодо розрахункових рухомих одиниць .....	56
Розрахункова схема підсистеми «екіпаж», складання системи диференційних рівнянь її руху .....	67
Силкові та кінематичні зв'язки в підсистемі «екіпаж» .....	71
Вертикальні силкові і кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія».....	75
Розрахункові геометричні параметри колії.....	80
Власні поперечні коливання балок.....	84
Вимушені поперечні коливання балок .....	88
Вимушені коливання рейки, як балки на багатьох пружно- дисипативних опорах, під дією зовнішнього навантаження.....	89
Висновки за розділом 2 .....	103
РОЗДІЛ 3 Теоретичні основи визначення приведеної маси колії .....	105
Сучасні уявлення про визначення приведеної маси колії.....	105
Теоретичні положення математичної моделі для визначення	

приведеної маси підшпальної основи.....	113
Моделювання роботи залізничної колії для визначення	
приведеної маси підшпальної основи.....	120
Товщина баласту.....	122
Модуль деформації ґрунту.....	123
Щільність ґрунту .....	124
Модуль деформації баласту .....	125
Щільність баласту .....	126
Швидкість руху.....	126
Експериментальне визначення величини приведеної	
маси залізничної колії .....	132
Висновки до розділу 3.....	138
РОЗДІЛ 4 Числові дослідження величини вертикальних сил взаємодії	
залізничної колії та електропоїздів EJ 675, HRCS2, ЕКР-1. ....	141
Опис алгоритму та програми для розрахунків.....	141
Результати числових досліджень.....	144
Висновки до розділу 4.....	149
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	154
Додаток А Результати експериментальних робіт по	
вимірюванню прискорень в елементах залізничної колії	
на дослідних ділянках .....	168
Додаток Б Результати числових досліджень вертикальних сил взаємодії	
залізничної колії та лектропоїздів EJ 675, HRCS2, ЕКр1 .....	174
Додаток В Впровадження матеріалів дисертаційної работ .....	190



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Взаємодію залізничної колії та рухомого складу можна розглядати як сукупність фізичних процесів, які виникають під час руху поїздів (вагонів, локомотивів) по рейкових коліях залізниць. Саме ці процеси багато в чому обумовлюють прийняття відповідних організаційно-технічних рішень на етапах проектування, будівництва, експлуатації та реконструкції залізничних ліній і безпосередньо впливають на один з основних показників роботи залізничного транспорту – безпеку руху.

Динамічний характер впливу рухомого складу на колію, особливості її профілю і плану, температурні впливи навколишнього природного середовища, неоднорідність фізико-механічних характеристик матеріалів, коливальні процеси, що виникають під час руху екіпажей, – все це свідчить про складність процесів взаємодії залізничної колії і рухомого складу. Тому при вивченні цього питання завжди виникає необхідність у вирішенні багатофакторних задач з великою кількістю невідомих. Крім того, необхідно враховувати, що фактори впливу на процеси взаємодії є змінними у часі і просторі.

До одного з таких факторів можна віднести саме інерційні характеристики залізничної колії, зокрема величину її маси, яка бере участь у взаємодії з рухомим складом в точці контакту з колесом (приведена маса залізничної колії). Багаторічні дослідження провідних вчених дозволили розробити теоретичні та експериментальні підходи щодо визначення ролі цієї характеристики на процеси формування напруженого стану залізничної колії. Але отримані результати, в своїй переважній більшості, не в повній мірі відповідають сучасним умовам експлуатації на магістральних залізницях України, особливо приймаючи до уваги перспективи підвищення швидкостей руху.

Впровадження в експлуатацію нових типів рухомого складу, матеріалів та конструкцій залізничної колії і, насамперед, забезпечення при цьому необхідного рівня безпеки руху – все це створює об'єктивні

передумови щодо продовження досліджень для розширення уявлень щодо впливу приведеної маси залізничної колії на силові показники взаємодії з рухомим складом. Тому дослідження впливу інерційних характеристик колії на процеси взаємодії з рухомим складом є актуальним науково-технічним завданням на даному етапі розвитку вітчизняної залізничної галузі.

***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.***

Дисертаційну роботу виконано відповідно до головних напрямків розвитку залізничного транспорту, які сформульовані в Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р.). Обраний напрямок досліджень пов'язаний з держбюджетною тематикою кафедри «Залізнична колія і транспортні споруди» Українського державного університету залізничного транспорту, зокрема з науково-дослідною роботою «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електрокорозійного і напружено-деформованого стану залізничних споруд і колій на їх надійність і безпеку руху» (номер державної реєстрації №ДР 0113U001031), а також з іншими, в яких здобувач був виконавцем і автором окремих розділів у звітах:

«Теоретичні дослідження можливості експлуатації пружного проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 українського виробництва при швидкостях руху більше 160 км/год» (№ ДР 01207U103523), ««Аналітичний огляд організаційно-технічних заходів при впровадженні перспективних елементів верхньої будови колії»» (№ ДР 0121U109192).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є встановлення впливу приведеної маси колії на величину сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу у вертикальній площині в експлуатаційних умовах магістральних залізниць, що передбачає розв'язання наступних задач:

- проаналізувати існуючі моделі для визначення сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу для різних умов експлуатації;

- внести зміни в просторову математичну модель динамічної системи «екіпаж-колія» з урахуванням особливостей конструкції пасажирського рухомого складу магістральних залізниць та вимушених коливань залізничної колії у вертикальній площині під дією зовнішніх навантажень;
- провести теоретичну оцінку та експериментальну верифікацію величини приведеної маси залізничної колії в умовах магістральних залізниць;
- дослідити чисельними методами сили взаємодії рухомого складу і колії у вертикальній площині для умов магістральних залізниць.

**Об’єкт досліджень** – процеси взаємодії залізничної колії та рухомого складу в умовах магістральних залізниць.

**Предмет досліджень** – вплив приведеної маси залізничної колії на сили взаємодії рухомого складу і колії у вертикальній площині в умовах магістральних залізниць.

**Методи досліджень.** В роботі використано комплексний метод досліджень. При проведенні аналітичних розрахунків було застосовано загальноприйняті методи розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість, теоретичної та будівельної механіки, а також основні положення теорії пружності. Експериментальні методи містять вимірювання прискорень цифровими акселерометрами на базі мікроконтролерів. Обробка даних та розрахунки виконувались із застосуванням програм Microsoft Excel, Mathcad та Matlab.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше величина приведеної маси залізничної колії визначена з урахуванням геометрії поширення напружень (відповідних динамічних деформацій) у півпросторі залізничної колії, який залучений до взаємодії з рухомим складом.

2. Удосконалено математичну модель по визначенню сил взаємодії рухомого складу і залізничної колії на дискретній підрейковій основі з

нелінійними пружно-дисипативними характеристиками за рахунок введення в модель інерційних характеристик колії.

3. Доповнено теоретичні підходи по визначенню приведених мас баластного шару, земляного полотна і залізничної колії в цілому, що дозволило врахувати вплив окремих конструктивних параметрів залізничної колії та швидкостей руху на її приведену масу.

**Практична значимість отриманих результатів** полягає в наступному:

- отримані в роботі результати створюють передумови для оцінки можливості підвищення швидкостей на діючих дільницях прискореного руху АТ «Укрзалізниця», а також дозволяють більш точно визначати напружений стан залізничної колії, зокрема при введенні в експлуатацію на магістральних залізницях України нових типів рухомого складу та конструкцій колії

- результати дослідження використовуються в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці фахівців освітнього рівня «магістр» спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами, які надано в додатках до дисертації.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Всі наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертації, є в достатній мірі обґрунтованими і достовірними, що обумовлено коректністю постановки й розв'язання поставлених задач. Достовірність наукових результатів обумовлена використанням надійних незалежних методів теоретичних та експериментальних досліджень, в тому числі основних положень теорії пружності, будівельної та теоретичної механіки, методів розрахунку залізничної колії на міцність та стійкість, що підтверджується узгодженістю

між собою теоретичних та експериментальних даних досліджень, а також з результатами інших дослідників за цими питаннями.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні результати отримані автором самостійно (критичний аналіз літературних та інших джерел за тематикою дослідження, експериментальні роботи по визначенню приведеної маси залізничної колії, адаптація просторової моделі динамічної системи «екіпаж-колія» з урахуванням конструктивних особливостей пасажирського рухомого складу магістральних залізниць та інерційних характеристик залізничної колії, дослідження числовими методами рівня вертикальних сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу), а також у співавторстві. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідались і отримали схвалення на 5 міжнародних науково-технічних конференціях: VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19-21 квітня 2017 р.), VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», що присвячена 110-річчю зі дня народження Заслуженого діяча науки і техніки України д.т.н., професора Ангелейка В.І. (м. Харків, 14-16 листопада 2018 р.), на 80-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 24-26 квітня 2018 р.), 78-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». (м. Харків, 26-28 жовтня 2016 р.), 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16-17 травня 2019 р.).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась та обговорювалась на засіданні кафедри «Залізнична колія і транспортні споруди» (м. Харків, 23

листопада 2020 р.) та міжвузівському семінарі Українського державного університету залізничного транспорту щодо апробації результатів дисертаційних досліджень (18 лютого 2021 р.)

**Публікації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 12 наукових працях, з яких: 3 статті у виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та Європейського союзу, з яких 2 – індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus; 4 статті у виданнях, що входять до переліку фахових видань України та 5 праць апробаційного характеру.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, основних висновків, списку використаних джерел із 138 найменувань на 14 сторінках, містить 153 сторінок основного тексту, 45 рисунків, 15 таблиць, 3 додатка.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петров Н.П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе. Записки РТО, книга II. С.-Петербург, 1903. 89 с.
2. Петров Н.П. Постепенное развитие и современное состояние вопроса о напряжениях, вызываемых в рельсе вертикальными силами. *Железнодорожное дело*. 1904, Вып. 5. С. 43 – 51.
3. Тимошенко С.П. К вопросу о прочности рельсов. Прочность и колебания элементов конструкций. Москва, 1975. С. 322 – 358.
4. Годицкий-Цвирко А.М. Взаимодействие пути и подвижного состава. Монография. Москва, 1931. 215 с.
5. Марье Г. Взаимодействие пути и подвижного состава. *Труды Науч.- эксперимент. конструкт. ин-та ЦНТУ НКПС*. 1933, Вып. 2. 336 с.
6. Ершков О.П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов. *Труды ВНИИЖТ*. 1955, Вып. 97. С. 189 – 325.
7. Вериго М.Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава. *Труды ВНИИЖТ*. 1955, Вып. 97. С. 25-288.
8. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва, 1956. 280 с.
9. Щепотин К.И. О природе формирования модуля упругости рельсового основания. *Вопросы устройства и работы железнодорожного пути*. 1964, Вып. 40. С. 211 – 237
10. Даниленко Э.И. Расчетно-теоретический метод определения упруго-динамических параметров для обычной конструкции пути и многониточных. *Межвузовский сборник научных трудов. Исследования взаимодействия пути и подвижного состава*. 1997. С. 32 – 41.
11. Даниленко Э.И., Гнатенко В.П., Черник В.И., Шавловский Н.Н. Некоторые теоретические и практические вопросы, связанные с внедрением стрелочных переводов на железобетонных брусках. *Межвузовский сборник*

научных трудов. *Исследования взаимодействия пути и подвижного состава*. 1997. С. 20 – 31.

12. Е.І. Даніленко, В.В. Рибкін. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. Київ, 2006. 168 с.

13. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. Москва, 1954. 70 с.

14. Тимошенко С.П. О динамических напряжениях в рельсах. Статические и динамические проблемы теории упругости. Киев, 1975. С. 28 – 44.

15. Холодецкий А.А. Об износе железнодорожных рельсов в зависимости от напряжений, появляющихся в них при действии подвижной нагрузки. *Инженер*. 1888, Вып. 6. С. 224 – 235.

16. Ангелейко В.И. О предпосылках для разработки наставления по расчету верхнего строения пути. *Техника железных дорог*. 1949, Вып. 6. С. 12 – 24.

17. Ангелейко В.И. К вопросу о влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе. Харьков, 1953. 131 с.

18. Ангелейко В.И. О влиянии поперечных горизонтальных сил на напряжения в рельсе. *Труды ХИИТ*. 1956, Вып. 26. С. 112 – 142.

19. Ангелейко В.И. Вывод основных уравнений для расчета рельса в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Харьков, 1958. 38 с.

20. Шахунянц Г.М. Расчеты элементов верхнего строения пути на прочность. Москва, 1939. 154 с.

21. Даніленко Е.І. Сучасні рейкові пружні скріплення і особливості вимог до вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах. *Залізничний транспорт України*. 2002, Вып. 6. С. 3 – 12.

22. Даніленко Е.І. Вибір раціональних параметрів пружності для вітчизняних скріплень на залізобетонних шпалах. *Збірник наукових праць КУЕТТ*. 2003, Вып. 1 – 2. С. 4 – 17.

23. Даніленко Е.І. Дослідження проміжних рейкових скріплень для залізобетонних шпал на витривалість при впливі циклічного навантаження.



*Збірник наукових праць КУЕТТ. 2005. С. 26 – 38.*

24. Даниленко Е.І. Забезпечення поперечної стійкості колії проти розпирання при сучасних конструкціях проміжних рейкових скріплень.

*Збірник наукових праць ДЕУТУТ. 2008, Вип. 12. С. 40 – 41.*

25. Даниленко Е.І. Сучасний підхід до визначення сил взаємодії колії та рухомого складу в зоні стрілочного переводу. *Вістник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2003, Вип. 2. С. 6 – 10.*

26. Даниленко Э.И., Гниломедов В.В., Мналимов Т.М. Определение сил взаимодействия на крестовинах с различной массой и жесткостью. *Деп. рук. РЖ ВИНТИ АН СССР “Железнодорожный транспорт”*. 1983, Вип. 10. 11 с.

27. Даниленко Э.И., Гниломедов В.В., Абросимов В.И. Силовое взаимодействие подвижного состава и крестовин с непрерывной поверхностью катания. *Межвузовский сборник научных трудов*. 1983. С. 98 – 107.

28. Даниленко Э.И., Коган А.Г., Щур Э.А. Определение допускаемых напряжений в литых крестовинах из высокомарганцевистой стали. *Вестник ВНИИЖТа*. 1989, Вип. 5. С. 44 – 48.

29. Яковлев В.Ф. Специальные конструкции пути промышленных железных дорог. Ленинград, 1981. 43 с.

30. Першин С.П. Вертикальная жесткость пути и его надежность. *Путь и путевое хозяйство*. 1996, Вип. 8. С. 8 – 10.

31. Волошко Ю.Д. Расчет рельса как балки на дискретных упругих опорах со случайными характеристиками. *Труды ДИИТ*. 1977, Вип. 196/19. С. 93 – 98.

32. Инструктивные указания по определению эффективности внедрения систем управления качеством работы предприятий железнодорожного транспорта, эксплуатационная деятельность. Москва, 1991. 104 с.

33. Даренський О.М. Статические характеристики случайных вертикальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта.

*ІКСЗТ*. 2007, Вип. 3. С. 2 – 4.

34. Даренський О.М. Оценка влияния кривых на статистические характеристики горизонтальных неровностей пути в условиях промышленного транспорта. *ІКСЗТ*. 2007, Вип. 4. С. 2 – 4.

35. Балака Є.І. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті. Харків, 2005. 210 с.

36. Даренський О.М. Статистические характеристики силовых неровностей продольного профиля пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 30т. *ІКСЗТ*. 2008, Вип. 2. С. 17 – 20.

37. Даренський О.М. Влияние осевых нагрузок на статистические характеристики геометрических неровностей плана и профиля пути промышленного транспорта. *ІКСЗТ*. 2008, Вип. 3. С. 43 – 47.

38. Даренський О.М. Влияние геометрических неровностей пути на величины изгибных напряжений в рельсах. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2008, Вип. 99. С. 167 – 176.

39. Климов В.И., Рыбкин В.В. Статический расчет пути как балки на опорах с нелинейной жесткостью. *Труды ДИИТ*. 1984, Вип. 235/26. С. 3 – 8.

40. Никеров Н.С. Исследование сил взаимодействия рельсовых нитей и подрельсовых шпальных оснований. *Труды ЛИИЖТ*. 1977, Вип. 416. С. 40 – 47.

41. Никеров Н.С., Гнилomedов В.В. Метод расчёты пути на горизонтальные продольные силы. *Труды ЛИИЖТ*. 1977, Вип. 416. С. 26 – 35.

42. Семёнов И.И., Никеров Н.С. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути на основе пространственной расчетной схемы. *Труды ЛИИЖТ*. 1971, Вип. 328. С. 43 – 61.

43. Никеров Н.С. Изгибные напряжения в рельсах и давления на шпалы при воздействии на путь миксерных чугуновозов. *Межвузовский сборник научных трудов*. Ленинград, 1978. С. 13 – 17.

44. Белых К.Д., Гонтаровский П.П. Вариационный метод расчета рельса как пространственной конструкции верхнего строения пути. *Труды ДИИТ*. 1972, Вип. 138. С. 129 – 138.

45. Белых К.Д. К вопросу расчета рельса по методу предельных состояний на базе пространственной расчетной схемы в условиях промтранспорта. *Труды ДИИТ*. 1975, Вып. 167/16. С. 113 – 119.
46. Белых К.Д., Уманов М.К., Малышко Г.Н. О нагрузках от колёс при расчете железнодорожного пути. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1976, Вып. 5. С. 78 – 79.
47. Белых К.Д. Теория расчета и исследование напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на металлургических заводах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ленинград, 1979. 41 с.
48. Першин С.П. Вертикальная жесткость пути и его надежность. *Путь и путевое хозяйство*. 1996, Вып. 8. С. 8 – 10.
49. Клименко Л.В. Расчет пути с учетом неравноупругости подрельсового основания. *Путь и путевое хозяйство*. 2005, Вып. 6. С. 34 – 35.
50. Бугаець Н.В. Результати експериментальних робіт з визначення напружень у баластному шарі і на основній площадці земляного полотна в умовах промислового залізничного транспорту. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. 2010, Вып. 119. С. 199 – 204.
51. Бугаець Н.В. Вплив експлуатаційних характеристик промислових залізниць на змінення коефіцієнта постілі шпал. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2012, Вып. 9 (180). С. 254 – 257.
52. Клименко А.В. Особенности расчетов взаимодействия пути и подвижного состава в зоне рельсовых стыков при дискретном подрельсовом основании. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2013, Вып. 9 (198). С. 49 – 53.
53. Клименко А.В. Чисельні дослідження сил взаємодії спеціального та спеціалізованого рухомого складу в зоні рейкових стиків. *Сборник научных трудов «S-world»*. 2014, Вып. 3 (36). С. 7–12.
54. Керр А., Зарембски А. Новые уравнения для реакции пути на шпалах в поперечной плоскости. *Железные дороги мира*. 1987, Вып. 10. С. 52 – 58.

55. Кравченко Н.Д. Условия работы рельсовой нити при воздействии боковых нагрузок. Москва, 1977. 38 с.
56. Яковлев В.Ф. Исследование упруго-динамических характеристик пути и определение динамических вертикальных сил в крестовине. *Труды ЛИИЖТ*. 1964, Вып. 222. С. 36 – 49.
57. Полетаев В.И. О методах определения упруго-динамических характеристик пути в вертикальной плоскости. *Труды ЛИИЖТ*. 1969, Вып. 296. С. 63 – 75.
58. Бурчак Г.П., М.В. Вольнов Определение инерционных и диссипативных характеристик пути из опыта на вынужденном колебании. *Труды МИИТ*. 1976, Вып. 542. С. 43 – 68.
59. Ершков О.П. Изгиб и кручение рельса под действием горизонтальных поперечных сил. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н.. Москва, 1951. 26 с.
60. Даниленко Э.И. Результаты динамикопрочностных и эксплуатационных испытаний крестовин типа Р65 марки 1/9. *Межвузовский сборник научных трудов*. Дніпропетровськ, 1991. С. 45 – 60.
61. Даніленко Е.І. Графоаналітичний метод визначення динамічних сил взаємодії в зоні нерівностей на хрестовинах з залізобетонними брусами на основі аналізу їх параметрів. *Збірник тез доповідей 3-ї Науково-практичної конференції КУЕТТ*. 2005. 6 с.
62. Поньрко В.Н. К вопросу определения приведенной массы пути при нелинейной жесткости пути. *Труды ДИИТ*. 1982, Вып. 223/24. С. 86 – 92.
63. Современные конструкции верхнего строения железнодорожного пути. Москва, 1975. 280 с.
64. Золотарский А.Ф., Евдокимов Б.А., Исаев Л.Г., Крысанов Л.Г. Железобетонные шпалы для рельсового пути. Москва, 1980. 270 с.
65. Работа шпалы и рельса под статической нагрузкой. *Тр. МИС ЦПТДУ НКПС*. 1931, Вып. 146. 119 с.

66. Сергеев Б.Н. Упрощенные методы полевых испытаний рельсового пути. *Тр. НИИ пути*. Москва, 1933. С. 9 – 27.
67. Фришман М.А. Еще раз об определении модуля упругости подрельсового основания. *Труды ДИИТ*. 1965, Вып. 57. С. 4 – 8.
68. Лысюк В.С. Вероятностные исследования жесткости пути. *Вестник ВНИИЖТ*. 1981, Вып. 6. С. 53 – 56.
69. E. Winkler. Der Eisenbahnoberbau nach den vortriigen iiber Eisenbahn buu gehalten an der k. k. technischen Hochschule in Wien. Prag, 1875. s 54.
70. Бабков В.Ф. Об истинном авторе одной гипотезы. *Строительство дорог*. 1950, Вып. 5. С. 24 – 26.
71. Васютинский А.А. Наблюдения над временными деформациями верхнего строения пути на Варшаво-Венской железной дороге. *Труды XV съезда инженеров службы пути*. Москва, 1858. С. 12 – 17.
72. Стецкевич И.Р. Об опытах над устойчивостью верхнего строения пути при проходе поездов. *Протоколы XII совмещенного съезда инженеров службы пути русских железных дорог*. Москва, 1894. С. 65 – 72.
73. Ершков О.П. Исследование жесткости железнодорожного пути и ее влияние на работу рельсов в кривых участках. *Труды ЦНИИ МПС*. 1964, Вып. 264. С. 39 – 48.
74. Вериго М.Ф. К вопросу о процессах взаимодействия необрессоренных масс и пути. *Вестник ВНИИЖТ*. 1969, Вып. 6. С. 22 – 25.
75. Шмидт К.М. Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом. *Сб. НИИ пути и путевого хозяйства*. Москва, 1941. С. 87 – 109.
76. Шахунянц Г.М., Коншин А.А., Коншин Г.Г. Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой. *Тр. МИИТ*. 1968, Вып. 178. С. 20 – 59.
77. Гасанов А.И. О приведенной массе пути. *Вестник ВНИИЖТ*. 1968, Вып. 6. С. 52 – 53.

78. Яковлев В.Ф., Семенов И.И. Исследование упруго-динамических характеристик пути и определение вертикальных динамических сил в пространстве. *Труды ЛИИЖТ*. 1964, Вып. 222. С. 106 – 137.
79. Яковлев В.Ф. Определение расчетных параметров пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью вибромашины. *Труды ЛИИЖТ*. 1971, Вып. 326. С. 66 – 85.
80. Вітольберг В.Г. Прогнозування ресурсу роботи залізобетонних шпал типу сб 3-0 в умовах залізничних колій незагального користування Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Київ. 2013. 23 с.
81. Тулей Ю.Л. Раціоналізація норм улаштування рейкової колії в кривих малих радіусів для підвищення ресурсів роботи рейок Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Харків. 2018. 25 с.
82. Клименко А. В. Підвищення ресурсів роботи залізничних колій незагального користування за рахунок вдосконалення утримання рейкових стиків. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. – Київ. – 2015. – 26 с.
83. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Д. : Новая идеология, 2002. – 240 с.
84. Математическое описание силового взаимодействия колес и рельсов / Л. Н. Дегтярева, Ю. И. Осенин, С. В. Мямлин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 21–24.
85. Myamlin S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137.
86. Myamlin S. et al. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie //Transport. – 2015. – Т. 30. – №. 1. – С. 88-92.
87. Мямлин С. В. Математична модель коливань колісної пари з незалежним обертанням коліс в горизонтальній площині / S. Myamlin, O. Kirilchuk, V. Metyzhenko // Наука та прогрес транспорту. Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – N 4(64). - С. 134-141.

88. Курган Д.М. Методологія розрахунків залізничної колії при взаємодії з швидкісним рухомим складом // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора тех. н. – Дніпро. – 2017. – 378 с.

89. Курган Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі розповсюдження напружень в залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – № 5(65). – С. 101–113.

90. Курган Д. М. Визначення динамічного навантаження від колеса на рейку для швидкісних поїздів / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 3 (57). – С. 118–128.

91. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.

92. Курган М. Б. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні : монографія / М. Б. Курган, Д. М. Курган // –Дніпро : Вид-во ДНУЗТ, 2016. – 283 с.

93. Kurhan D. Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State / D. Kurhan // Acta Technica Jaurinensis. – 2016. – Т. 9. – №. 1. – С. 83–96.

94. Kurhan D. M. Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement / D. M. Kurhan // Science And Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2015. – № 2(56). – P. 136–145.

95. Курган Д. Моделирование взаимодействия пути и подвижного состава с учетом времени прогиба подрельсового основания / Д. Курган // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. /

Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – Вып. 3. – С. 167–175.

96. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісн. Дніпропетр. нац. Ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.

97. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП- 0269 / Е. І. Даніленко, А. М. Орловський, О. М. Патласов, М. І. Карпов, В. П. Шраменко, О. І. Белорусов, В. О. Яковлєв, В. М. Молчанов, К. В. Корноухова, М. Б. Курган, Д. М. Курган, В. М. Твердомед, Р. М. Йосифович, О. О. Сорока. – Київ, 2012. – 456 с.

98. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 1. – 456 с.

99. Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.

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

101. Даниленко Э. И. Стрелочные переводы железных дорог Украины (Технология производства, эксплуатация в пути, расчеты и проектирование) / Э. И. Даниленко, А. П. Кутах, С. Д. Тараненко : Киевский ин-т ж.-д. трансп. – К.: 2001. – 296 с.

102. Даніленко Е. І. Розрахунок характеристик жорсткості та пружності рейкової нитки при крученні під дією вертикальних і горизонтальних сил // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2016. – № 5(65). - С. 79-91.

103. Даніленко Е. І. Експериментальні дослідження характеристик горизонтальної поперечної жорсткості і модуля пружності залізничної колії



при різних конструкціях рейкових скріплень / Е. І. Даніленко, В. П. Велінець // Залізн. трансп. України. – 2015. – № 4. – С. 3–11.

104. Даніленко Е. І. Новітні дослідження бічної пружності рейкових ниток при спільній дії вертикальних і горизонтальних сил // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 65–77.

105. Даниленко Э. И. Теоретическое решение задачи по определению реального бокового модуля упругости пути, при совместном действии на рельсовую нить горизонтальных и вертикальных сил / Э. И. Даниленко, В. П. Велинец // Зб. наук. пр. Держ. економ.-техн. унту трансп. Серія: Трансп. системи і технології. – Київ, 2014. – Вип. 24. – С. 106–122.

106. Kurhan D. Modeling the Dynamic Response of Railway Track / D. Kurhan, M. Kurhan // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708. – p. 012013.

107. Electric multiple units series 675 Ukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.skoda.cz/en/references/electric-multiple-units-series-675-ukraine/?from=prod> – Назва з екрана. – Перевірено: 02.04.2020.

108. EJ 675 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/EJ\\_675](https://uk.wikipedia.org/wiki/EJ_675) – Назва з екрана. – Перевірено: 02.04.2020.

109. Ukraine Intercity Express EMU [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.hyundai-rotem.co.kr/Eng/Business/Rail/Business\\_Record\\_View.asp?brid=53](https://www.hyundai-rotem.co.kr/Eng/Business/Rail/Business_Record_View.asp?brid=53) – Назва з екрана. – Перевірено: 05.03.2020.

110. HRCS2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/HRCS2> – Назва з екрана. – Перевірено: 12.03.2020.

111. Швидкісний двосистемний електропоїзд ЕКр-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kvsz.com/index.php/ua/produksiya/pasazhirske-vagonobuduvannya/motorvagonnij-rukhomij-sklad/item/1902-shvydkisnyi-dvosystemnyi-elektropoizd-ekr-1> – Назва з екрана. – Перевірено: 15.03.2020.

112. ЕКр1 «Тарпан» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/ЕКр1\\_«Тарпан»](https://uk.wikipedia.org/wiki/ЕКр1_«Тарпан») – Назва з екрана. – Перевірено: 02.04.2020.

113. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т. / И.П. Киселев и др.; под ред. И.П. Киселев. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – Т.1. – 308 с.

114. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие: в 2 т. / И.П. Киселев и др.; под ред. И.П. Киселев. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – Т.2. – 272 с.

115. Теорія та конструкція рухомого складу високошвидкісного транспорту : підручник / С. В. Панченко, О. Б. Бабанін, А. О. Каграманян, Ю. М. Дацун. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. - 362 с.

116. Digital Accelerometer ADXL345 Data Sheet. // Analog Devices, Inc. ©2009–2015. 24 с.

117. [www.vibration.ru](http://www.vibration.ru). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://vibration.ru> – Назва з екрана. – Перевірено: 02.04.2020.

118. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://russianelectronics.ru/3-osevye-mikromehhanicheskie-akselerometry-adxl345-i-adxl346-s-mikropotrebleniem-i-detektorom-sobytij/> – Назва з екрана. – Перевірено: 18.03.2020.

119. Гурский Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский – Москва : Высш. школа. 1971. – 328 с.

120. Рибкін В. В. Надійність залізничної колії : навчальний посібник / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 154 с.

121. Fandos M.M Investigation and Classification of Bogie Designs and their Potential to Adopt Lightweight Structures by Means of a Database // Bachelor Thesis Institute of Vehicle System Technology Rail System Technology – 2018. – 81p.

122. Çağlar Uyulan, Metin Gokasan Nonlinear Dynamic Characteristics of the Railway Vehicle// *Nonlinear Engineering* – 2017; №6(2). – p. 123–137.
123. Chenyi Zhou, Liang Gao, Hong Xiao, Bowen Hou Railway Wheel Flat Recognition and Precise Positioning Method Based on Multisensor Arrays// *Applied Sciences*. – <http://dx.doi.org/10.3390/app10041297>
124. Connolly D. P. Benchmarking railway vibrations–Track, vehicle, ground and building effects // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Т. 92. – С. 64-81.
125. Connolly D. P. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2014. – Т. 58. – С. 37-47.
126. Connolly D. Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Т. 44. – С. 557-564.
127. Kurhan, D., Leibuk, Y. Research of the Reduced Mass of the Railway Track. *Acta Technica Jaurinensis*. 2020. 13(4). pp. 324–341.
128. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверева А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. 2019. № 15. С. 41–46.
129. Даренський О.М., Шраменко В.П., Тулей Ю.Л., Дудін О.А., Лейбук Я.С. Математична модель колії, яка має інерційні характеристики, під дією швидкісного рухомого складу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №4. С. 35–40.
130. Даренський О.М., Тулей Ю.Л., Овчинніков О. О., Лейбук Я.С. Числові дослідження динамічних поперечних сил у кривих, у зонах нерівностей ланок колії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 51–58.
131. Даренский А.Н., Лейбук Я.С. Математическая модель колебаний железнодорожного пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. №2. С. 16–20.

132. Dmytro Potapov, Sergij Panchenko, Yaroslav Leibuk, Yuseph Tuley, Pavel Plis Effect of joint and isolated irregularities of the track on the wear of rails in curves. *MATEC Web of Conferences* 230. 2018. 01012.

133. Alexander Darenskiy, Volodymyr Vitolberg, Denis Fast, Andrii Klymenko, Yaroslav Leibuk A mathematical model of the rail track presented as a bar on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads. *MATEC Web of Conferences* 116. 2017. 03002

134. Даренський О.М., Лейбук Я.С., Клименко А.В. Математична модель коливань залізничної колії як балки, яка має інерційні характеристики. *6-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2017. Харків: УкрДУЗТ. С. 196–197.

135. Лейбук Я.С. Вынужденные колебания пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 80-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. 2018. С. 109.

136. Даренський О.М., Лейбук Я.С. Чисельні дослідження динамічних поперечних сил в кривих, в зонах нерівностей ланок колії. *7-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2018. С. 35–36.

137. Лейбук Я.С., Скорик О.О. Визначення приведеної маси колії за допомогою динамічного стабілізатора колії. *79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 2019. С. 240–242.

138. Лейбук Я.С. Урахування інерційних характеристик колії при визначенні сил її взаємодії з рухомим складом. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 78-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. 2016. С. 91–92.

