

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В.А. Лазаряна

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Кузишина Андрія Ярославовича

УДК 629.4.017: 625.032.3

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**Удосконалення методів визначення основних динамічних показників  
моторвагонного рухомого складу на стадії проектування**

273 – залізничний транспорт

27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

А. Я. Кузишин

Науковий керівник

Костриця Сергій Анатолійович  
кандидат технічних наук, с.н.с.

**Дніпро - 2019**

## АНОТАЦІЯ

*Кузишин А.Я.* Удосконалення методів визначення основних динамічних показників моторвагонного рухомого складу на стадії проектування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт». – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2019.

У зв'язку з впровадженням в Україні сучасного рухомого складу швидкість руху пасажирських поїздів на залізницях України незмінно збільшується. При цьому важливого значення набувають наукові дослідження стійкості рухомого складу при його русі як в прямих, так і в криволінійних ділянках залізничної колії. Вивчення взаємодії колії та рухомого складу в процесі експлуатації дозволить встановити основні динамічні показники з метою забезпечення безпеки руху.

У роботі особлива увага приділяється визначенню рамних та направляючих сил при русі рухомого складу рейковою колією, що має допустиме відхилення від норм утримання. За значенням цих сил встановлюються основні динамічні показники рухомого складу, такі як коефіцієнти вертикальної та горизонтальної динаміки у буксовому і центральному ресорному підвішуванні, коефіцієнт запасу стійкості від сходу колеса з рейки. В результаті чого визначаються допустимі швидкості руху рухомого складу в залежності від стану рейкової колії з метою забезпечення безпеки руху.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше з використанням розробленої просторової математичної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 були встановлені величини направляючих сил, які дозволяють на стадії проектування оцінити силовий вплив рухомого складу на рейкову колію;

- вперше проведено порівняння динамічних показників дизель-поїзда ДПКр-2 отриманих згідно вимог нормативних документів, які діють на Україні та країнах Європейського Союзу. Порівняння проведено з метою гармонізації вказаних нормативних документів;

- розроблено просторову розрахункову схему та математичну модель коливань

вагона дизель-поїзда ДПКр-2 з урахуванням його конструктивних особливостей, що дозволяє визначати його основні динамічні показники та їх залежності від швидкості руху та стану рейкової колії;

- удосконалено метод визначення направляючої сили шляхом одночасного урахування поперечних сил крипа, а також кута нахилу направляючої сили до вертикальної осі, що дозволяє наблизити математичну модель дизель-поїзда до реальних умов навантаження.

Практичне значення розробленої методики полягає в можливості її використання в судовій залізнично-транспортній експертизі при проведенні експертних досліджень.

Розроблена математична модель коливань вагона дизель-поїзда дозволяє досить легко будувати механізм залізнично-транспортної пригоди у випадках сходу рухомого складу з рейкової колії.

Урахування особливостей конструкції вагона дизель-поїзда ДПКр-2 в розробленій математичній моделі дозволяє також визначати основні динамічні показники безпеки руху та максимально допустимі швидкості руху на етапі проектування.

Отримана методика впроваджена в практику проведення судових залізнично-транспортних експертиз Львівським науково-дослідним інститутом судових експертиз Міністерства юстиції України (від 20.03.2019 р.), під час ремонт та модернізації рухомого складу Львівським локомотиворемонтним заводом (від 12.03.2019 р.) та при визначенні на етапі проектування оптимальних параметрів підвішування нових типів рухомого складу Крюківським вагонобудівним заводом (від 21.03.2019 р.).

На підставі аналізу наукових досліджень щодо взаємодії колії та рухомого складу, існуючих показників безпеки від сходу колеса з рейки, які використовуються при аналізі динамічних характеристик рухомого складу, встановлено, що даним питанням присвячена значна кількість наукових робіт. Однак такі дослідження зазвичай потребують використання дуже складних моделей взаємодії колеса та рейки. В той же час методи, які покладені у основу розрахунків силових факторів в контактї колеса та рейки при вписуванні вагонів в криволінійні ділянки колії, є застарілими і не дозволяють отримати достовірні результати.

Провівши порівняння існуючих методів визначення сил взаємодії в системі «колесо-рейка» встановлено, що розбіжність результатів становить до 300%. Проблема вибору ефективного методу ускладнюється відсутністю достатньої кількості експериментальних даних.

Для аналізу динамічних показників сучасного дизель-поїзда ДПКр-2 була розроблена його просторова розрахункова схема та математична модель. Проведено дослідження коливань вагона дизель-поїзда під час його руху по рейковій колії, яка має нерівності як у вертикальній, так і в горизонтальній площині згідно нормативних документів по утриманню колії.

Проведено аналіз впливу швидкості руху вагона дизель-поїзда ДПКр-2 та стану рейкової колії на величину рамної сили. Чисельні значення рамної сили отримані під час руху дизель-поїзда по рейковій колії, яка має відмінну оцінку утримання та не перевищують нормативного значення 36 кН.

Досліджено вплив швидкості руху екіпажу на величину поперечних сил крипа. Встановлено, що при визначенні направляючої сили нехтування поперечними силами крипа може призвести до хибних результатів при розрахунку показників безпеки від сходу колеса з рейки.

Удосконалено метод визначення направляючої сили шляхом одночасного урахування дії поперечних сил крипа та кута нахилу направляючої сили до вертикальної осі. Отримані чисельні значення направляючої сили під час руху вагона дизель-поїзда ДПКр-2 по рейковій колії, яка має відмінну оцінку утримання не перевищують нормативного значення 81 кН. Встановлено, що при визначенні направляючої сили необхідно контролювати зазор між гребенем колеса та головкою рейки, що без комп'ютерного моделювання здійснити важко. Проведено порівняння результатів визначення направляючої сили різними методиками.

Використовуючи комп'ютерне середовище Maple18 та математичні моделі було розроблено програмне забезпечення, яке дає змогу враховувати геометричні параметри рейкової колії та рухомого складу при визначенні основних динамічних показників рухомого складу. Проведено оцінку та порівняння динамічних показників вагона дизель-поїзда ДПКр-2 отриманих згідно вимог нормативних документів, які діють на

Україні та країнах Європейського Союзу.

Встановлено максимально допустимі швидкості руху вагона дизель-поїзда ДПКр-2 в залежності від плавних відхилень рейкової колії, а також її перекосів на довжині до 20 м. При цьому стан рейкової колії розглядався як: відмінний, добрий, задовільний, незадовільний. Досліджено максимально допустиму швидкість руху вагона дизель-поїзда ДПКр-2 при заданій горизонтальній нерівності рейкової колії.

При порівнянні експериментального та теоретичного значень рамної сили та коефіцієнта запасу стійкості від сходу колеса з рейки на першій колісній парі вагона дизель-поїзда при швидкості його руху 30 м/с спостерігається їх практичне співпадіння, що говорить про адекватність математичної моделі та проведених розрахунків, оскільки розбіжності результатів становлять 7,2% та 6% відповідно.

Ключові слова: колісна пара, математична модель, рамна та направляюча сили, динамічні показники, критерії безпеки руху, рухомий склад, рейкова колія.

Список публікацій здобувача:

**- включених до міжнародної наукометричної бази «Scopus»:**

Kuzyshyn A. Research of safety indicators of diesel train movement with two-stage spring suspension / A. Kuzyshyn, A. Batig, S. Kostritsa [et al.]. // BulTrans 2018: 10th Intern. Sci. Conf. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies. – Sozopol: 2018. – Vol. 234.

Kovalchuk V. Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains / V. Kovalchuk, A. Kuzyshyn, S. Kostritsa [et al.]. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. – No. 6/7 (96). – P. 19-25.

**- включених до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus»:**

Болжеларський Я.В. Порівняння методів розрахунку бокової сили від дії колеса електровоза на головку рейки / Я.В. Болжеларський, А.Я. Кузишин // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. – No. 11. – P. 55-64.

Кузишин А.Я. Визначення рамної сили електровоза ВЛ80 / А.Я. Кузишин // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. 2017. – No. 3(69). – P. 32-44.

Кузишин А. Я. Побудова механічної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 та її особливості / А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн.

трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2017. – № 6 (72). – С. 20-30.

Костриця С. А. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 / С. А. Костриця, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2018. – № 1 (73). – С. 15–25.

Kuzyshyn A. Evaluation of dynamic characteristics of DPKr-2 diesel train on straight sections of railway track / A. Kuzyshyn, A. Batig // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. 2017. – No. 3 (2). – P. 103-113.

**- в іноземних виданнях:**

Кузишин А.Я. Дослідження максимально допустимих швидкостей руху вагона дизель-поїзда ДПКр-2 у прямій ділянці колії / А.Я. Кузишин, С.А. Костриця, А.В. Батіг // Web of Scholar. 2018. – No. 5. – P. 31-36.

Batig A. Studying the interaction between the rolling stock and the railway track in the railway forensic science / A. Batig, A. Kuzyshyn // Criminalistics and forensic expertology: 13th International Conference. – Vilnius: Sep. 2017. – Vol. II.– P. 427-442.

**- включених до фахових видань, затверджених МОН України:**

Кузишин А.Я. Аналіз існуючих підходів щодо розрахунку критеріїв безпеки руху на залізничному транспорті / А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2018. – No. 4 (6). – P. 50–56.

Кузишин А.Я. Класифікація та перспективи розвитку пневматичного підвішування на залізничному транспорті / А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // Транспортні системи та технології. 2018. – No. 32. – P. 183–194.

**- які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на наукових конференціях та семінарах:**

Батіг А.В. Дослідження взаємодії рухомого складу та рейкової колії при проведенні судових залізнично-транспортних експертиз / А.В. Батіг, А.Я. Кузишин // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої 15-річчю створення Дніпропетровського науково-дослідного інституту судових експертиз. – Дніпро: 14-15 червня 2017. – P. 147-149.

Батіг А.В. Дослідження динаміки рухомого складу шляхом побудови його математичних моделей / А.В. Батіг, А.Я. Кузишин // Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю від дня народження докто-

ра юридичних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України М.В. Салтевського. – Харків: 7-8 листопада 2017. – Р. 168-169.

Костриця С.А. Дослідження динамічних показників вагона дизель-поїзда ДПКр-2 / С.А. Костриця, С.С. Довганюк, А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // матеріали 78 міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» Дніпропетровський національний університет зал транс. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро: 17-18 травня 2018. – Р. 73-75.

Костриця С.А. Дослідження різних методів щодо можливості визначення сходу колісної пари з рейок / С.А. Костриця, J. Kalivoda, А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // матеріали 78 міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» Дніпропетровський національний університет зал транс. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро: 17-18 травня 2018. – Р. 75-77.

Кузишин А.Я. Застосування програмного комплексу «Універсальний механізм» при дослідженні причин сходу рухомого складу з рейок / А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 90-річчю від дня народження видатного вченого криміналіста, професора Л.Ю. Ароцкера. – Харків: 25 травня 2017. – Р. 132-133.

Кузишин А.Я. Питання сходу колеса з рейки у судовій залізнично-транспортній експертизі / А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // матеріали 1-ї міжнародної науково-практичної конференції «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті» Дніпропетровський національний університет зал транс. ім. акад. В. Лазаряна. – Львів: 18-19 червня 2018. – Р. 61-62.

Урсуляк Л.В. Підвищення безпеки руху сучасного рухомого складу шляхом удосконалення методів визначення параметрів його взаємодії з рейковою колією / Л.В. Урсуляк, С.А. Костриця, А.Я. Кузишин, А.В. Батіг // матеріали 78 міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» Дніпропетровський національний університет зал транс. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро: 17-18 травня 2018. – Р. 84-86.

**- які додатково відображають наукові результати дисертації:**

Болжеларський Я.В. Огляд методів динамічного вписування локомотивів у перехідні та кругові криві / Я.В. Болжеларський, С.С. Довганюк, А.Я. Кузишин // Залі-

**ABSTRACT**

Kuzyshyn A.Ya. The methods improvement for determining the main dynamic parameters of motor-vehicle rolling stock at the design stage. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for Ph.D. degree in specialty 273 “Railway Transport”. – Dniprovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2019.

Due to the introduction of modern rolling stock in Ukraine, the speed of passenger trains on the railways of Ukraine increases considerably. At the same time, scientific studies of the stability of rolling stock during its movement, both on the straight and on the curvilinear sections of railway track become important. The study of the interaction of track and rolling stock in the course of operation will allow to establish the main dynamic parameters in order to improve safety traffic.

In the work, special attention is paid to determining frame and guiding forces while rolling stock movement on rail track with tolerance deviation from the maintenance rules. According to the values of these forces, the most important dynamic parameters of rolling stock are determined, such as the coefficients of vertical and horizontal dynamics in the axlebox and central spring suspensions, the coefficient of stability against wheel derailment. As a result, the admissible speeds of rolling stock are determined, depending on the technical condition of rail track, with the purpose of ensuring safety traffic.

Scientific novelty of the obtained results:

– for the first time, with the use of the developed spatial mathematical model of a car of diesel train DPKr-2, the guiding force values have been determined that allow to estimate the force influence of rolling stock on railway track at the design stage;

– for the first time, the comparison of dynamic parameters of diesel-train DPKr-2 has been conducted according to the requirements of normative documents, which are valid in Ukraine and the European Union countries. The comparison is carried out with the aim of harmonizing these normative documents;

– the spatial analysis scheme and the mathematical model for the calculation of DPKr-2 diesel train car oscillation have been developed with the consideration of its de-

sign features, which allows to determine its main dynamic parameters and their dependence on the speed of train car movement and railway track condition;

– the method of determining the guiding force is improved by simultaneous consideration of transverse forces of the creep, as well as the inclination angle of the guiding force to the vertical axis, which allows to approximate the mathematical model of the diesel train to real conditions of loading.

The practical significance of the developed methodology lies in the possibility of its use in forensic railway-transport expertise in conducting expert investigations.

A mathematical model of oscillations of the car of diesel-train has been developed which makes it quite easy to build a train accident mechanism in cases of rolling stock derailment from a track.

Taking into account the design features of the diesel-train car DPKr-2 in the developed mathematical model also allows to determine the main dynamic indicators of traffic safety and the maximum allowable speeds at the design stage.

The resulting technique has been introduced into the practice of conducting forensic railway-transport expertise of the Lviv Scientific Research Institute of Forensic Science of the Ministry of Justice of Ukraine (from 20.03.2019), while repairing and modernizing rolling stock of the Lviv Locomotive Repair Plant (from 12.03.2019), determining, at the design stage, the optimal parameters for suspending new types of rolling stock of the Kryukiv Railway Car Building Works (from 21.03.2019).

Based on the analysis of scientific research on the interaction of the track and rolling stock, the existing safety indicators from the derailment of the wheel from the rail, which are used in the analysis of the dynamic characteristics of rolling stock, it has been established that a significant number of scientific papers are devoted to this issue. However, such studies usually require the use of very complex models of wheel and rail interaction. At the same time, the methods that form the basis for calculations of the force factors arising at the contact of the wheel and rail when performance of car on a curve are outdated and do not allow to obtain reliable results.

Having compared the existing methods of determining interaction forces of the “wheel-rail” system, it was found out that the difference in results is up to 300%. The

problem of choosing an effective method is aggravated by the lack of sufficient number of experimental data.

To analyze the dynamic parameters of modern diesel train DPKr-2, its spatial analysis scheme and the mathematical model were developed. The study of diesel train car oscillation during its movement along railway track was carried out, where the track had unevenness both in the vertical and horizontal plane in accordance with the normative documents on track maintenance.

The analysis of the influence of car velocity of diesel train DPKr-2 and the state of railway track on the magnitude of frame force was carried out. The numerical values of frame force obtained during diesel train movement along railway track with excellent assessment of maintenance do not exceed regulatory value of 36 kN.

The influence of train speed on the value of transverse forces of the creep is investigated. It is established that neglecting transverse forces in determining the directing force can lead to false results while calculating safety parameters against wheel derailment.

The method of determining the directing force is improved by simultaneous accounting the action of transverse forces of the creep and the angle of inclination of the directing force to the vertical axis. The received numerical values of the directing force during diesel train DPKr-2 car movement along railway track with excellent assessment of maintenance do not exceed normative value of 81 kN. It has been established that while determining the directing force it is necessary to control the gap between the wheel flange and the rail head, which is difficult to perform without computer simulation. The comparison of the results of guiding force determination with different methods was carried out.

Using computer environment Maple18 and mathematical models, software has been developed that allows to account geometric parameters of railway track and rolling stock when determining basic dynamic parameters of rolling stock. The evaluation and comparison of dynamic parameters of a car of diesel train DPKr-2 were conducted in accordance with the requirements of regulatory documents in force in Ukraine and in the countries of the European Union.

The maximum permissible speeds of a car of diesel train DPKr-2 have been established, depending on the smooth deviations of railway track, as well as its obliquity in the

length to 20 m. In this case, the condition of railway track was considered as: excellent, good, satisfactory, unsatisfactory. The maximum tolerance of the speed of diesel train-DPKr-2 car with the given horizontal unevenness of railway track has been investigated.

When comparing the experimental and theoretical values of frame force and the coefficient of stability against wheel derailment on the first wheel pair of the diesel train car at its speed of 30 m / s, their practical coincidence is observed, which indicates the adequacy of the mathematical model and conducted calculations, as the difference in results is 7.2% and 6% respectively.

Key words: wheel pair, mathematical model, frame and directing forces, dynamic parameters, traffic safety criteria, rolling stock, railway track.