

Український державний університет залізничного транспорту  
міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ГРОМОВ ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ

УДК 621.833: 629.423.2

## ДИСЕРТАЦІЯ

### **ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ТЯГОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕМОНТУ**

05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

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.

 В.І.Громов

Науковий керівник: БАБАЄВ Михайло Михайлович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Громов В.І.* Збільшення ресурсу тягових зубчастих передач за рахунок їх оптимізаційного проектування та ремонту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.07 – «Рухомий склад залізниць та тяга поїздів» (273 – Залізничний транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розробці науково-методичних положень і практичних рекомендацій щодо збільшення ресурсу тягових зубчастих передач залізничного тягового і моторвагонного рухомого складу.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, повноту їх апробації та опублікування, подано загальну характеристику роботи.

У розділі 1 «Обґрунтування перспективних напрямків збільшення ресурсу тягових зубчастих передач при їх проектуванні та ремонті» розглянуто особливості експлуатації тягових зубчастих передач (ТЗП) у складі тягових приводів тягового (ТРС) і моторвагонного (МВРС) рухомого складу. Визначено перспективні напрямки спрямованих на збільшення їх ресурсу досліджень.

За результатами аналізу відмов за період з 2015-2017 років тепловозів (серії 2ТЕ116), електровозів (серій ЧС2, ЧС7), електропоїздів (серій ЕР2, ЕР2Р), які працювали в РФ «Південна залізниця» АТ «Українська залізниця», на пошкодження тягового приводу (ТП) тепловозів і електровозів приходить до 31% усіх пошкоджень, тягового приводу електропоїздів – до 24%. При цьому пошкодження в розглянутих ТП тягових зубчастих передач складають: до 20% для тепловозів; до 39% для електровозів; до 63% - для електропоїздів. Для проведення досліджень у напрямку збільшення

надійності ТЗП розроблена універсальна блочно-ієрархічна схема для формалізованого описання окремих модулів конструкції тягових приводів у вигляді «І-АБО» дерев.

За результатами аналізу різних видів руйнувань, пошкоджень, інтенсивних зносів бокових поверхонь зубців шестерень і коліс ТЗП встановлено, що окрім особливих умов експлуатації, значну роль в їх виникненні відіграють параметри, встановлені ще на стадії проектування ТЗП (модуль і числа зубців, коефіцієнти зміщення, коефіцієнти форми зуба, коефіцієнти відносного ковзання профілів, коефіцієнти перекриття та інш.). Це обґрунтувало доцільність проведення досліджень, спрямованих на удосконалення існуючих методів проектування з метою визначення конструктивних параметрів шестерень і коліс, при яких забезпечуються кращі умови взаємодії зубців, відповідні характеристики зачеплення та збільшення технічного ресурсу ТЗП. При цьому до перспективних напрямків подальшого розвитку сучасних методів проектування ТЗП слід віднести: удосконалення процедури визначення оптимальних коефіцієнтів зміщення шестірні та колеса на основі побудови і аналізу відповідних блокувальних контурів; отримання і використання математичного описання зміни коефіцієнтів форми зубців в залежності від чисел зубців і коефіцієнтів зміщення для підвищення точності визначення показників міцності; розробку математичних описань для оцінювання впливу прийнятих при проектуванні рішень на величину розрахункового технічного ресурсу ТЗП.

Значна роль в забезпеченні надійності ТЗП відводиться визначенню ступенів зносу зубців шестерень і коліс при ремонтах, обґрунтуванню можливих варіантів їх заміни. Разом з тим прогнозування очікуваних залишкових ресурсів потребує оперативного вирішення складних завдань з визначення не тільки ступенів, а і особливостей зносу контактуючих поверхонь зубців, зміни їх геометричних параметрів і характеристик зачеплення. Це обґрунтувало необхідність розробки відповідного математичного забезпечення.

У розділі 2 «Збільшення ресурсу тягових зубчастих передач на основі удосконалення методів для їх оптимізаційного проектування та ремонту» представлені результати проведених досліджень з розробки методичного та математичного забезпечення для оптимізаційного проектування та ремонту ТЗП.

Сформульовано задачу оптимізаційного проектування ТЗП, виділено головний і вторинні критерії. Відзначено, що з урахуванням суттєвого впливу на характеристики зачеплення і показники ТЗП, в якості параметричних обмежень при проектуванні, доцільно розглядати коефіцієнти зміщення шестірні та колеса. Для запропонованого удосконаленого методу проектування ТЗП розроблено відповідне формалізованого описання задачі умовної багатомірної оптимізації з обмеженнями. Для вирішення задач вибору оптимальних величин коефіцієнтів зміщення запропоновано використання для досліджуваних ТЗП «блокувальних контурів» (БК) – комплексних графіків, на яких для конкретного сполучення чисел зубців шестірні і колеса нанесені відповідні обмежувальні та інформаційні лінії, що ураховують всі умови на проектування передачі. Для отримання БК при оптимізаційному проектуванні ТЗП тепловозів і електропоїздів з використанням методів математичного планування експерименту розроблені відповідні узагальнені математичні моделі.

З метою підвищення точності прогнозування показників згинної міцності зубців ТЗП, що проектується, були отримані формули для визначення коефіцієнтів форми зубців шестерень і коліс в залежності від числа зубців і коефіцієнтів зміщення.

В якості показників технічного ресурсу ТЗП доцільно розглядати відповідні пробіги локомотиву (моторної секції електропоїзду) до виникнення граничних зносів зубців шестірні та колеса. Використання прийнятих для використання в розрахунках відомих формул дозволяє не тільки визначити величини ресурсів, а ще і оцінити вплив на ці показники обраних при проектуванні конструктивних параметрів шестірні і колеса та

характеристики їх зачеплення. Результати пошукових досліджень показали, що за рахунок оптимізації таких параметрів може бути досягнуто суттєве (до 25%) збільшення ресурсу ТЗП.

Для математичного моделювання характеристик зачеплення шестерень та коліс ТЗП з різними ступенями та геометрією зносів контактуючих поверхонь зубців розроблені нові математичні описання. Запропоноване поетапне використання цих описань в представленому методі забезпечує знаходження точок контакту зубців, лінії і показників зачеплення, що має важливе значення для прогнозування показників міцності та залишкового ресурсу ТЗП.

Обґрунтовано, що при проведенні ремонтів ТЗП технічний стан шестірні та колеса доцільно визначати за величиною зносів зубців за їх постійними хордами. Це дозволить більш точно контролювати моменти їх наближення до граничних зносів, а також оцінювати залишковий ресурс з використанням відповідних формул.

У розділі 3 «Розрахунково-експериментальне дослідження резервів збільшення ресурсу тягових передач за рахунок їх оптимізаційного проектування та ремонту» результати робіт, виконаних з використанням розроблених науково-методичних положень.

За результатами оптимізаційного проектування ТЗП тепловозів серій М62, 2ТЕ116, ТЕП70 та електропоїздів серій ЕР2 и ЕР2Р конкретизовані оптимальні коефіцієнти зміщення шестірні та колеса передач, а також виявлені відповідні резерви збільшення ресурсу.

Проведено комплексне розрахунково-експериментальне дослідження, спрямоване на визначення ступенів зносу та залишкового ресурсу ТЗП електропоїздів серії ЕР2. Отримані при обробці більш 2000 експериментальних вимірювань товщин зубців ТЗП електропоїздів серії ЕР2 результати дозволили визначити особливості формування зносів шестерень та коліс за постійною хордою, а також відповідних ресурсів. Аналіз результатів комплексних досліджень зі збільшення залишкового ресурсу при

ремонтах ТЗП електропоїздів серії EP2 показав, що при розгляданні можливих варіантів їх комплектації важливого значення набуває оцінка зміни основних показників міцності та якості зачеплення. Для цього були отримані на основі відповідних математичних планів у вигляді поліномів другого порядку узагальнені математичні моделі для визначення напружень згину зубців шестірні, контактних напружень при взаємодії зубців в полюсі зачеплення та коефіцієнту перекриття в залежності від зносів зубців шестірні та колеса за постійною хордою.

Отримані науково-прикладні результати конкретизують існуючі резерви збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач розглянутих серій ТРС і МВРС та напрямки їх практичної реалізації. Їх спрямованість на підвищення надійності ТЗП и тягових приводів в цілому дозволяє скоротити кількість позапланових ремонтів локомотивів і моторних секцій електропоїздів.

За результатами розрахункового оцінювання економічної ефективності запропонованих рішень з оцінювання залишкових ресурсів при ремонтах ТЗП електропоїздів серії EP2 оцінюваний економічний ефект складає 88300 грн. на один електропоїзд.

Ключові слова: тяговий рухомий склад, тяговий привод, тягова зубчаста передача, шестірня, зубчасте колесо, технічний ресурс, залишковий ресурс.

#### Список публікацій здобувача

##### **Основні наукові праці:**

1. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В., Громов В.І. Удосконалення технології проектування тягових зубчастих передач моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2013. №136. С. 44–49.

2. Братченко О.В., Громов В.І. Узагальнені математичні моделі для удосконаленої технології ремонту тягових зубчастих передач рухомого

складу. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2013. №139. С. 169–174.

3. Бабанін О.Б., Громов В.І. Прогнозування збільшення ресурсу тягових зубчатих передач електропоїздів за рахунок удосконалення технології ремонту. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2014. №147. С. 104–109.

4. Братченко О.В., Громов В.І. Особливості експериментального визначення ступенів зносу тягових зубчастих передач моторвагонного рухомого складу. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки»*. Київ. 2018. Т.29 (68). №2. С. 295 – 298.

*Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:*

5. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Розрахункове визначення кінематичних характеристик елементів конструкції технічних засобів транспорту методом перетворення координат. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2016. №159. С. 118 –125.

6. Громов В.І. Дослідження поверхонь відгуку показників міцності тягових зубчатих передач з різним ступенем зносу профілів зубців. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. №168. С. 37 – 44.

7. Тіщенко В.С., Громов В.І. Методичний аспект визначення особливостей зносів тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого складу. *Науково-технічний збірник Харківського національного університету міського господарства, серія: технічні науки та архітектура*. Харків. 2018 № 142. С. 64 – 67.

8. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Особливості вибору коефіцієнтів зміщення шестерні та колеса при оптимізаційному проектуванні тягових зубчастих передач. *Вісник Національного технічного університету*

*«Харківський політехнічний інститут»*, серія *«Машинознавство та САПР»*.  
Харків. 2018. № 25 (1301). С. 107 – 111.

9. Тіщенко В.С., Громов В.І., Одегов М.М. Розрахунково-експериментальне визначення ймовірностей появи різних за величиною зносів тягових зубчатих передач електропоїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2018. № 176. С. 23 – 29.

10. Павшенко А.В., Бобрицький С.В., Громов В.І. Модульно-декомпозиційне описання конструкції залізничних тягових приводів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2018. № 178. С. 7 – 13.

#### **Праці апробаційного характеру:**

11. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Аналітичне дослідження зачеплення в передачах з різним ступенем зносів зубців. Тези доповідей 75-ї міжнародній науково-технічній конференції УкрДУЗТ (м. Харків, 24–25 квітня 2013 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. №136. С. 312.

12. Братченко О.В., Громов В.І. Аналітичні залежності для математичного описання процесу зачеплення зубців тягової зубчатої передачі. Тези доповідей 76-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 15–17 квітня 2014 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. №143. С. 249.

13. Громов В.І. Дослідження особливостей експлуатації тягових зубчатих передач залізничного рухомого складу. Тези доповідей 77-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 21–23 квітня 2015 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. №151. С. 95.



14. Бабаєв М.М., Громов В.І. Особливості математичного моделювання характеристик зачеплення тягових зубчатих передач з урахуванням ступеня зносу зубців. Матеріали 30-ї міжнародної науково-практичної конференції *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* (м. Харків, грудень 2017 р.). Харків. 2017. №4. С. 49 – 50.

15. Бабаєв М.М., Громов В.І. Особливості автоматизованого визначення експлуатаційних зносів активних профілів зубців шестерень і коліс тягових зубчатих передач залізничного рухомого складу. Тези доповідей 79-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 25–27 квітня 2017 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. №169. С. 117 – 120.

16. Громов В.І. Математичні залежності для визначення коефіцієнтів форми зубця при оптимізаційному проектуванні тягових зубчатих передач. *International research and practice conference «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical sciences»* (Conference proceedings, December 27-28). 2017. Radom, Izdevnieciba «Baltija Publishing», p.p. 94- 97.

17. Тіщенко В.С., Громов В.І., Одегов М.М. Визначення та аналіз законів розподілу ймовірностей виникнення зносів тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого складу. Тези доповідей 80-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 24–26 квітня 2018 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. №177. С. 66.

#### **Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

18. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Новий спосіб вибору коефіцієнтів зміщення шестірні і колеса циліндричної прямозубої евольвентної зубчатої передачі зовнішнього зачеплення. *Свідчення про*

*реєстрацію авторського права на твір  
реєстрації 19.08.2013.*

*№ 50772. Дата*

19. Пат. на корисну модель 103077, Україна, МПК F16H 1/06 (2006.01)  
Спосіб визначення товщини зубця зубчатого колеса. В.І.Мороз,  
С.В.Бобрицький, В.І.Громов, О.В.Братченко. Заявка а2014 08648 від  
30.07.2014; опубл. 10.12.2015, бюл. №23.

20. Мороз В.І., Бобрицький С.В., Громов В.І., Анацький О.О.  
Комп'ютерна програма «Зубомір». *Свідоцтво про реєстрацію авторського  
права на твір № 63194. Дата реєстрації 24.12.2015.*

## ABSTRACT

*Gromov V.I.* Increase in the resource of traction gears due to their optimization design and repair. – Qualification scientific work Manuscript copyright.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.22.07 - rolling stock and traction of trains (273 - Railway transport). - Ukrainian State University of Railway Transport MES of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of scientific and methodological provisions and practical recommendations for increasing the resource of traction gears of railway traction and motor-vehicle rolling stock.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the research, reflects the scientific novelty and the practical value of the results obtained, completeness of their approbation and publication, gives a general description of the work.

In section 1 «Justification of perspective directions of increase of the resource of traction gears during their design and repair», features of the traction gear transmission (TGT) operation in the composition of traction drive traction (TRS) and motor-vehicle (MVRS) rolling stock are considered. The perspective directions aimed at increasing their resource of research are determined.

According to the results of the failure analysis for the period from 2015-2017, diesel locomotives, electric locomotives, electric trains, which worked in the Regional branch «Southern railway» of Ukrainian Railways, on traction damage drive diesel locomotives and electric locomotives accounted for 31% of all damages, traction drive electric trains - up to 24%. In this case, the damage in the considered traction gears is: up to 20% for diesel locomotives; up to 39% for electric locomotives; up to 63% for electric trains. To conduct research in the direction of increasing the reliability of TGT developed a universal block-hierarchical scheme for the formal description of separate modules of the design of traction drives in the form of «I-OR» trees.

According to the results of the analysis of various types of destruction, damage, intense wear of the lateral surfaces of the gears and wheels of the TGT, it has been established that in addition to the special conditions of operation, the parameters, established at the design stage of the TPP (the module and the number of teeth, displacement coefficients, coefficients forms of the tooth, coefficients of relative sliding of profiles, coefficients of overlap, etc.).

This substantiated the feasibility of conducting research aimed at improving existing design methods in order to determine the design parameters of gears and wheels, which provide better conditions for the interaction of the teeth, the corresponding characteristics of the clutch and increase the technical resource of the TGT. At the same time, the perspective directions of further development of modern methods of designing TGT should include: improving the procedure for determining the optimal gear shifting and wheel coefficients based on the construction and analysis of the corresponding blocking circuits; obtaining and using a mathematical description of changes in the coefficients of the shape of the teeth, depending on the number of teeth and displacement coefficients for increasing the accuracy of the determination of strength indicators; development of mathematical descriptions for estimating the influence of decisions taken on the design calculations on the value of the calculated technical resource of the TGT.

Significant role in ensuring the reliability of TGT is given to determining the degrees of wear of gear teeth and wheels during repairs, justifying possible variants of their replacement. However, the forecasting of the expected residual resources requires an operative solution of complex tasks to determine not only the degrees, but also the features of wear of contact surfaces of the teeth, changes in their geometric parameters and characteristics of the clutch. This substantiated the need for the development of appropriate mathematical support.

In section 2 «Increase of gear traction resource based on the improvement of methods for their optimization design and repair», the results of conducted researches on the development of methodological and mathematical support for optimization design and repair of TGT are presented.

The problem of optimization designing of the TGT is formulated, the main and secondary criteria are highlighted. It is noted that taking into account the significant influence on the characteristics of the coupling and indicators of the TGT, as parametric constraints in design, it is advisable to consider the gear ratios and wheels. For the proposed advanced method of designing the TGT an appropriate formalized description of the problem of conditional multi-dimensional optimization with constraints has been developed. In order to solve the problems of choosing the optimal values of the displacement coefficients, it is proposed to use for the investigated TPP "blocking circuits" (BK) - complex graphs, for which, for a specific combination of the number of teeth, the gears and wheels are applied, the corresponding limiting and information lines, taking into account all the conditions for the design of the transmission. In order to obtain BC in optimization design of TGT diesel locomotives and electric trains using the methods of mathematical planning of the experiment, appropriate generalized mathematical models have been developed.

As indicators of the technical resource of TGT, it is advisable to consider the corresponding run-ups of the locomotive (motor section of the electric train) to the occurrence of extreme wear of the gear teeth and wheels. Using adopted for use in the calculation of known formulas allows not only to determine the values of resources, but also to assess the impact on these indicators selected in the design of the design parameters of the gears and wheels and the characteristics of their engagement. The results of searches have shown that due to optimization of such parameters a significant (up to 25%) increase of the resource of the TGT can be achieved.

New mathematical descriptions have been developed for mathematical modeling of gearing gears and WHR wheels with different degrees and geometry of wear of contacting surfaces of teeth. The proposed phased use of these descriptions in the presented method ensures the location of the contact points of the teeth, the line and the indices of adhesion, which is important for predicting the strength and residual resource of the TPP.

It is substantiated that during technical repairs of the TPP the technical condition of the gears and wheels should be determined by the size of the tooth erosion by their constant chords. This will allow you to more accurately control the moments of their approach to extreme wear, as well as to estimate the residual resource using the appropriate formulas.

According to the results of the optimization of the design of the diesel locomotives and trains of certain series, the optimal gear ratios and gear ratios are specified, as well as the corresponding reserves for increasing the resource are identified.

According to the results of the optimization design of the diesel locomotives of the M62, 2TE116, TEII70 series and EP2 and EP2P series of electric trains, the optimal gear ratios and gear ratios are specified, as well as the corresponding reserves increase.

Complex computational and experimental research was conducted, aimed at determining the wear rates and the residual life of the EP2 electric train trains. The results obtained when processing more than 2000 experimental measurements of the thickness of the teeth thickness of the electric trains of the EP2 series allowed to determine the peculiarities of the formation of wear of gears and wheels at a constant chord, as well as the corresponding resources. The analysis of the results of complex studies to increase the residual resource during the repair of TGT electric trains EP2 series showed that when considering possible options for their assembly, an assessment of the change in the main indicators of strength and quality of engagement becomes important. For this purpose, based on the corresponding mathematical plans in the form of polynomials of the second order, generalized mathematical models for determining the bending forces of the gears of the gear, contact stresses at the interaction of the teeth at the coupling pole and the coefficient of overlap, depending on the wear of the gears of the gears and the wheels on a constant chord, were obtained.

The obtained scientific and applied results specify the existing reserves of increase of the technical resource of traction gears of the considered series of TRS

and MVRS and the directions of their practical implementation. Their focus on increasing the reliability of TGT and traction drives as a whole can reduce the amount of unscheduled repairs of locomotives and motor sections of electric trains.

According to the results of the estimated estimation of the economic efficiency of the proposed solutions for the estimation of residual resources during repairs of the TGT of electric trains of the EP2 series, the estimated economic effect is 88300 Hr on one electric train.

Key words: traction rolling stock, traction drive, traction gear transmission, gear, wheel, technical resource, residual resource.

#### List of contributions

##### References:

1. Moroz V.I., Bratchenko O.V., Bobrytsky SV, Gromov V.I. Improvement of technology of design of traction gear gears of motor-vehicle rolling stock. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2013, № 136. P. 44-49.
2. Bratchenko O.V., Gromov V.I. Generalized mathematical models for the advanced technology of repair of traction gear transmission of rolling stock. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2013, №. 139. P. 169-174.
3. Babanin O.B., Gromov V.I. Forecasting of increase of the resource of traction gear transmission of electric trains at the expense of improvement of the technology of repair. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2014, № 147. P. 104-109.
4. Bratchenko O.V., Gromov V.I. Features of the experimental determination of the wear rates of traction gears of the motor-vehicle rolling stock. *Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky, series «Technical sciences»*. 2018. Vol. 29 (68). № 2 P. 295-298.

*Publications in Ukrainian editions, which are included in international science-computer bases:*

5. Moroz V.I., Bratchenko O.V., Gromov V.I. Estimated determination of kinematics characteristics of structural elements of technical means of transport by the method of coordinate transformation. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2016. №159. P. 118-125.

6. Gromov V.I. Investigation of surfaces of response of indicators of durability of traction gears transmission with different degree of wear of teeth profiles. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2017. № 168. P. 37-44.

7. Tishchenko V.C., Gromov V.I. Methodical aspect of determining the characteristics of wear of traction gear transmission of motor-vehicle rolling stock. *Scientific and technical collection of Kharkiv National University of Urban Economics, series: technical sciences and architecture*. 2018, № 142. P. 64-67.

8. Moroz V.I., Bratchenko O.V., Gromov V.I. Features of the choice of coefficients of shifting gear and wheels when optimizing the design of traction gears transmission. *Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», series «Machine-building and CAD»*. 2018, № 25 (1301). P. 107 - 111.

9. Tishchenko V.C., Gromov V.I., Odegov M.M. Calculation-experimental determination of the probabilities of the appearance of various size of wear of traction gear transmission of electric trains. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2018. № 176. P. 23 - 29.

10. Pavcheshenko A.V., Bobrytsky S.V., Gromov V.I. Modular-decomposition description of the construction of railway traction drives. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2018. № 178. P. 7 - 13.

Theses of lectures of 75-ї to the international scientific and technical conference of УкрДАЗТ (Kharkiv, on April, 24-25 in 2013)

**Issues scientific works, testifying the approbation research:**



11. Moroz V.I., Bratchenko O.V., Gromov V.I. An analytical study of engagement in transmissions with varying degrees of wear of the teeth. Abstracts of the 75th International Scientific and Technical Conference (Kharkiv, on April, 24-25 in 2013). *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2013, № 136. P. 312.

12. Bratchenko O.V., Gromov V.I. Analytical dependencies for the mathematical description of the process of engagement of the toothed tooth of traction gear transmission. Abstracts of the 76th international scientific and technical conference «Development of scientific and innovative activity in transport» (Kharkiv, on April, 15-17 in 2014). *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2014. № 143. P. 249.

13. Gromov V.I. Research of features of operation of traction gear transmission of railway rolling stock. Abstracts of the 77th international scientific and technical conference «Development of scientific and innovative activity in transport» (Kharkiv, on April, 21-23 in 2015). *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*. 2015. №151. P. 95.

14. Babayev MM, Gromov V.I. Features of mathematical modeling of traction gear traction characteristics taking into account the degree of wear of the teeth. *Materials of the 30th International Scientific and Practical Conference Information Control Systems in Railway Transport* (Kharkiv, on December in 2017). Kharkiv, 2017. № 4. P. 49 - 50.

15. Babayev MM, Gromov V.I. Features of automated determination of operational wear of active profiles of gear teeth and wheels of traction gear transmission of railway rolling stock. Abstracts of the 79th international scientific and technical conference «Development of scientific and innovative activity in transport» (Kharkiv, on April, 25-27 in 2017). *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2017. № 169. P. 117-120.

16. Gromov VI Mathematical dependences for determining the coefficients of the shape of the tooth when optimizing the design of traction gear transmission. *International research and practice conference «Modern methods, innovation and*

*experience of practical application in the field of technical sciences»* (Conference proceedings, December 27-28). 2017. Radom, Izdevnieciba «Baltija Publishing», P. 94- 97.

17. Tishchenko V.C., Gromov V.I., Odegov M.M. Definition and analysis of the laws of the distribution of probabilities of wear of traction gear gears of motor-vehicle rolling stock. Abstracts of the 80th international scientific and technical conference «Development of scientific and innovative activity in transport» (Kharkiv, on April, 24-26 in 2018). *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2018. № 177. P. 66.

**Issues scientific works, which present the additional results of the research:**

18. Moroz V.I., Bratchenko O.V., Gromov V.I. A new way of choosing the gear shifting coefficients and the wheels of a cylindrical straight-toothed geared gearbox of external coupling. *Certificate of registration of copyright in the work № 50772. Dated 19.08.2013.*

19. Pat. to useful model 103077, Ukraine, F16H 1/06 (2006.01) A method of determining the thickness of the toothed tooth. V.I. Moroz, S.V.Bobrytsky, V.I.Gromov, A.V.Bratchenko. Application a2014 08648 dated 30.07.2014; has published 10.12.2015, bullet. № 23.

20. Moroz V.I., Bobrytsky S.V., Gromov V.I., Anazky O.O. Computer program «Zubomer». *Certificate of registration of copyright for work № 63194. Dated 24.12.2015.*

## ЗМІСТ

ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ТЯГОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ПРИ ЇХ ПРОЕКТУВАННІ ТА РЕМОНТІ	27
1.1 Особливості використання ТЗП у складі тягових приводів рухомого складу залізниць	27
1.2 Аналіз методів проектування тягових зубчастих передач рухомого складу залізниць	41
1.3 Сучасні підходи до визначення ступенів зносу та ресурсу ТЗП при ремонтах	52
1.4 Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2 ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ТЯГОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДЛЯ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕМОНТУ	61
2.1 Формалізоване описання удосконаленого методу оптимізаційного проектування ТЗП	61
2.2 Визначення розрахункового ресурсу ТЗП при проектуванні	72
2.3 Математичне описання характеристик зачеплення ТЗП з різними ступенями зносу зубців	78
2.4 Визначення залишкового ресурсу ТЗП з різними ступенями зносу шестерні та колеса при ремонтах	93
2.5 Удосконалення технології експериментального визначення ступенів зносу зубців ТЗП	98
2.6 Висновки до розділу 2	104
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ТЯГОВИХ ПЕРЕДАЧ ЗА РАХУНОК ЇХ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕМОНТУ	106

3.1 Результати оптимізаційного проектування ТЗП тепловозів серій М62, 2ТЕ116, ТЕП70	106
3.2 Результати оптимізаційного проектування ТЗП електропоїздів серій ЕР2, ЕР2Р, ЕР2Т	115
3.3 Розрахунково-експериментальне дослідження з визначення ступенів зносу зубців та залишкового ресурсу ТЗП електропоїздів серії ЕР-2	121
3.3.1 Визначення особливостей та ступенів зносу зубців шестерень і коліс ТЗП електропоїздів ЕР-2	121
3.3.2 Визначення залишкового ресурсу ТЗП електропоїздів серії ЕР-2 при ремонтах	129
3.4 Оцінювання економічного ефекту від впровадження результатів дисертаційного дослідження	143
3.5 Висновки до розділу 3	150
ВИСНОВКИ	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
Додаток А Послідовність геометричного розрахунку циліндричних ТЗП	173
Додаток Б Послідовність розрахунків на міцність циліндричних ТЗП	177
Додаток В Математичні плани для отримання узагальнених математичних моделей для побудови відповідних ліній блокувальних контурів	185
Додаток Г Результати вимірів розмірів ділительних хорд шестерень і коліс ТЗП електропоїздів серії ЕР-2 за період 2014–2017 роки	192
Додаток Д Результати статистичного аналізу масивів вимірювань товщин зубців шестерень і коліс ТЗП електропоїздів серії ЕР-2	204
Додаток Е Результати експериментального визначення товщин по висоті зубців для шестірні та колеса для варіантів досліджуваних ТЗП електропоїзду серії ЕР-2	206
Додаток И Отримання та результати дослідження узагальнених	

математичних моделей для визначення показників міцності з різними ступенями зносу зубців шестерні та колеса ТЗП електропоїздів серії EP-2	211
Додаток К Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	215
Додаток Л Акт впровадження результатів дисертаційних досліджень у виробництво	219
Додаток М Акт впровадження результатів дисертаційних досліджень у навчальний процес	220

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Досягнення високого рівня показників функціонування залізниць України нерозривно зв'язано з рішенням науково-прикладної проблеми забезпечення надійності тягового (ТРС) і моторвагонного (МВРС) рухомого складу для здійснення вантажних і пасажирських перевезень. Разом з тим значний обсяг перевезень на мережах АТ «Українська залізниця» здійснюється переважно локомотивами та електропоїздами з наднормативними термінами експлуатації. Тому Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України №1555-р від 16 грудня 2009 року) та Державна програма оновлення рухомого складу на 2017-2021 роки (затверджена на засіданні АТ «Укрзалізниця» від 29 листопада 2016) передбачають оновлення, а також подовження термінів експлуатації існуючого рухомого складу на основі проведення відповідних науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт.

Одним з напрямків таких досліджень є забезпечення надійності, технічного ресурсу основних модулів конструкції ТРС і МВРС. До них відноситься тяговий привід в цілому та функціонуюча в його складі тягова зубчаста передача (ТЗП). При цьому досвід проведення ремонтів ТЗП засвідчив, що з причин досягнення граничних зносів зубців передчасно відбраковуються понад 90% шестерень і близько 60% коліс. Тобто, особливості зношування активних поверхонь зубців слід вважати одним з основних факторів впливу на технічний ресурс ТЗП, від якого суттєво залежить ресурс тягового приводу.

Тому актуальність дисертаційної роботи визначається її спрямованістю на збільшення ресурсу тягових зубчастих передач ТРС і МВРС залізниць України за рахунок їх оптимізаційного проектування і ремонту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у відповідності до Державної програми

оновлення рухомого складу на 2017-2021 роки (затверджена на засіданні АТ «Укрзалізниця» від 29 листопада 2016), Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України №1555-р від 16 грудня 2009 року), а також науково-дослідній роботі «Розроблення теоретичних та експериментальних методів дослідження структури, кінематики і динаміки механічних систем сучасного залізничного рухомого складу» (ДР0113U001028), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення наукового завдання збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач ТРС і МВРС залізниць на основі їх оптимізаційного проектування і ремонту.

Для досягнення цієї мети визначені такі основні завдання дослідження:

- провести аналіз експлуатаційних пошкоджень основних модулів конструкції сучасних ТРС і МВРС залізниць;
- розробити формалізоване описання конструкції ТЗП для урахування особливостей їх використання у складі тягових приводів ТРС і МВРС різних серій;
- визначити перспективні напрямки подальшого удосконалення існуючих методів для оптимізаційного проектування і ремонту ТЗП, спрямованих на збільшення їх технічного ресурсу;
- розробити удосконалений метод оптимізаційного проектування тягової зубчастої передачі, спрямований на визначення таких конструктивних параметрів шестірні та колеса, при яких досягаються найкращі умови взаємодії зубців, характеристики і показники їх зачеплення, відповідний технічний ресурс ТЗП;
- удосконалити технологію визначення при ремонтах особливостей зміни геометрії контактуючих поверхонь зубців шестерень і коліс з різними ступенями зносу;

– розробити процедуру визначення при ремонтах залишкового для різних варіантів комплектації ТЗП шестернями та колесами з різними ступенями зносу;

– провести дослідження з визначення резервів збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач для ТРС і МВРС визначених серій;

– оцінити економічну ефективність впровадження результатів дисертаційної роботи на ремонтних підприємствах залізниць.

*Об'єкт дослідження* – процес проектування та ремонту тягових зубчастих передач тягового та моторвагонного рухомого складу залізниць.

*Предмет дослідження* – резерви збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач за рахунок їх оптимізаційного проектування; вплив зміни геометричних параметрів контактуючих поверхонь при різних ступенях зносу зубців шестерень і коліс на характеристики зачеплення та залишковий ресурс тягових зубчастих передач.

**Методи дослідження.** Проведені дослідження базуються на використанні: класичних положень з теорії та методів проектування локомотивів, МВРС та методів аналізу багаторівневих ієрархічних систем при розробці формалізованого описання конструкції ТЗП у складі тягових приводів різних класів; методів теорії оптимізації при розробці удосконаленого методу для оптимізаційного проектування ТЗП; методів перетворення координат (методу Г.Ф.Морошкіна) і проєкцій замкненого векторного контуру (методу В.А.Зінов'єва) з теорії механізмів і машин для отримання характеристик зачеплення зубців з різними ступенями зносу шестерень і коліс; методів математичного планування експерименту при отриманні узагальнених математичних моделей визначення параметрів зачеплення та показників міцності ТЗП; методів лінійної алгебри для матричних описань масивів з результатами визначення експлуатаційних зносів шестерень та коліс ТЗП.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання збільшення технічного ресурсу



тягових зубчастих передач за рахунок удосконалення їх конструкції на основі визначених при оптимізаційному проектуванні конструктивних параметрів шестерень і коліс та проведення ремонтів з урахуванням наявних особливостей зносу контактуючих поверхонь зубців і їх впливу на залишковий ресурс ТЗП.

При цьому вперше:

– для визначення особливостей функціонування ТЗП у складі тягових приводів ТРС і МВРС розроблено формалізоване блочно-ієрархічне описання їх конструкції у вигляді «І-АБО» дерева. Його використання в спрямованих на збільшення ресурсу дослідженнях дозволить урахувати конструкційні особливості з'єднань елементів ТЗП з тяговим електродвигуном і колісною парою;

– запропоновано удосконалений метод оптимізаційного проектування ТЗП, який базується на відповідному формалізованому описанні задачі умовної багатомірної оптимізації з обмеженнями, отримано математичні описання, які забезпечують знаходження оптимальних значень конструктивних параметрів шестерень і коліс, при яких досягаються найкращі умови взаємодії зубців, характеристики зачеплення і збільшений технічний ресурс досліджуємих ТЗП;

– запропоновано новий експериментально-розрахунковий метод визначення при ремонтах особливостей зміни геометричних параметрів контактуючих поверхонь зубців при різних ступенях зносу шестерень і коліс та оцінювання їх впливу на характеристики їх зачеплення і залишковий ресурс ТЗП. Отримано нові математичні описання для визначення точок контакту, лінії і показників зачеплення зубців з розглянутими профілями.

Удосконалено:

– структуру і зміст здійснюваних при проектуванні розрахунків ТЗП. Запропоновано при розрахунках з визначення напружень згину зубців використовувати отримані формули для уточненого визначення коефіцієнтів форми зубців в залежності від числа зубців і обраних коефіцієнтів зміщення.

При проведенні розрахунку очікуваного технічного ресурсу ТЗП доцільно урахувати вплив на його величину і показники міцності особливостей геометрії контактуючих профілів зубців, що забезпечують отримані в роботі відповідні математичні описання;

– технологію визначення при ремонтах ступенів і особливостей зносу зубців шестерень і коліс ТЗП. Ступінь зносу доцільно визначати за зміною товщини зубців за постійною хордою. Для визначення геометричних особливостей зносу доцільно використовувати розроблений за участю автора патенто захищений метод експериментального отримання і обробки цифрових описань профілів по всій висоті зуба.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати оптимізаційного проектування тягових зубчастих передач тепловозів серій М62, 2ТЕ116, ТЕП70 та електропоїздів серій EP2 і EP2P орієнтовані на практичне використання для удосконалення конструкції існуючих ТЗП при їх модернізації з метою реалізації визначених резервів збільшення технічного ресурсу.

Використання рекомендацій з визначення ступенів зносу шестерень і коліс при деповських ремонтах на основі вимірювань товщин їх зубців за постійними хордами забезпечує уточнене визначення моментів наближення зносів до граничних значень і очікуваних залишкових ресурсів ТЗП.

Отримані результати розрахунково-експериментального дослідження ТЗП електропоїздів серії EP2 з визначення особливостей зносу, оцінювання зміни геометрії контактуючих поверхонь зубців на їх залишковий ресурс передані для впровадження в моторвагонному депо «Харків» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Українська залізниця».

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 273 – Залізничний транспорт.

**Особистий внесок здобувача.** У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем проведена така робота: [1] – запропонований удосконалений метод оптимізаційного проектування ТЗП; [2,6,16,18] – конкретизовані перспективні роботи з подальшого удосконалення існуючих методів проектування та ремонту ТЗП; [3,8,13] – проведено дослідження з визначення резервів збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач; [4,7,9,17] – проаналізовані результати експериментальних досліджень з визначення особливостей формування експлуатаційних зносів зубців шестерень і коліс ТЗП сучасного МВРС, а також їх вплив на залишковий ресурс передачі; [5,7,11,12,14] – отримані та апробовані нові математичні описання для визначення точок, лінії і показників зачеплення зубців ТЗП з розглянутими профілями; [10] – розроблене формалізоване описання конструкції ТЗП у вигляді «І-АБО» дерева; [15,19,20] – запропоновані нові технічні рішення і відповідне програмне забезпечення для удосконалення технології визначення при ремонтах особливостей зміни геометрії контактуючих поверхонь зубців шестерень і коліс з різними ступенями зносу.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-технічних конференціях: 75–77 міжнародних науково-технічних конференціях УкрДАЗТ (м. Харків, квітень 2013–2015 р.р.); 79–80 міжнародних науково-технічних конференціях УкрДУЗТ «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, квітень 2016–2018 р.р.); 30 міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, грудень 2017 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical sciences» (Польща, м. Радом, грудень 2017 р.).

**Публікації.** Відповідно до теми дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 10 наукових статей у фахових виданнях, затверджених

МОН України, з яких 6 включено до міжнародних наукометричних баз, 7 праць апробаційного характеру та 3 додаткові праці, з яких 1 патент України на корисну модель і 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг дисертації складає 220 сторінок, з яких обсяг основного тексту – 137 сторінок, наведено 53 рисунки та 19 таблиць за текстом, список використаних джерел із 124 найменувань, 10 додатків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В., Громов В.І. Удосконалення технології проектування тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2013. №136. С. 44–49.
2. Братченко О.В., Громов В.І. Узагальнені математичні моделі для удосконаленої технології ремонту тягових зубчатих передач рухомого складу. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2013. №139. С. 169–174.
3. Бабанін О.Б., Громов В.І. Прогнозування збільшення ресурсу тягових зубчатих передач електропоїздів за рахунок удосконалення технології ремонту. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2014. №147. С. 104–109.
4. Братченко О.В., Громов В.І. Особливості експериментального визначення ступенів зносу тягових зубчастих передач моторвагонного рухомого складу. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки»*. Київ. 2018. Т.29 (68). №2. С. 295 – 298.
5. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Розрахункове визначення кінематичних характеристик елементів конструкції технічних засобів транспорту методом перетворення координат. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2016. №159. С. 118 –125.
6. Громов В.І. Дослідження поверхонь відгуку показників міцності тягових зубчатих передач з різним ступенем зносу профілів зубців. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2017. №168. С. 37 – 44.
7. Тіщенко В.С., Громов В.І. Методичний аспект визначення особливостей зносів тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого

складу. *Науково-технічний збірник Харківського національного університету міського господарства, серія: технічні науки та архітектура*. Харків. 2018 № 142. С. 64 – 67.

8. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Особливості вибору коефіцієнтів зміщення шестерні та колеса при оптимізаційному проектуванні тягових зубчастих передач. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Машинознавство та САПР»*. Харків. 2018. № 25 (1301). С. 107 – 111.

9. Тіщенко В.С., Громов В.І., Одегов М.М. Розрахунково-експериментальне визначення ймовірностей появи різних за величиною зносів тягових зубчастих передач електропоїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2018. № 176. С. 23 – 29.

10. Павшенко А.В., Бобрицький С.В., Громов В.І. Модульно-декомпозиційне описання конструкції залізничних тягових приводів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків. 2018. № 178. С. 7 – 13.

11. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Аналітичне дослідження зачеплення в передачах з різним ступенем зносів зубців. Тези доповідей 75-ї міжнародній науково-технічній конференції УкрДУЗТ (м. Харків, 24–25 квітня 2013 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. №136. С. 312.

12. Братченко О.В., Громов В.І. Аналітичні залежності для математичного описання процесу зачеплення зубців тягової зубчатої передачі. Тези доповідей 76-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 15–17 квітня 2014 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. №143. С. 249.

13. Громов В.І. Дослідження особливостей експлуатації тягових зубчастих передач залізничного рухомого складу. Тези доповідей 77-ї

міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 21–23 квітня 2015 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2015. №151. С. 95.

14. Бабаєв М.М., Громов В.І. Особливості математичного моделювання характеристик зачеплення тягових зубчатих передач з урахуванням ступеня зносу зубців. Матеріали 30-ї міжнародної науково-практичної конференції *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* (м. Харків, грудень 2017 р.). Харків. 2017. №4. С. 49 – 50.

15. Бабаєв М.М., Громов В.І. Особливості автоматизованого визначення експлуатаційних зносів активних профілів зубців шестерень і коліс тягових зубчатих передач залізничного рухомого складу. Тези доповідей 79-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 25–27 квітня 2017 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. №169. С. 117 – 120.

16. Громов В.І. Математичні залежності для визначення коефіцієнтів форми зубця при оптимізаційному проектуванні тягових зубчатих передач. *International research and practice conference «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical sciences»* (Conference proceedings, December 27-28). 2017. Radom, Izdevnieciba «Baltija Publishing», р.р. 94- 97.

17. Тіщенко В.С., Громов В.І., Одегов М.М. Визначення та аналіз законів розподілу ймовірностей виникнення зносів тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого складу. Тези доповідей 80-ї міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 24–26 квітня 2018 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. №177. С. 66.

18. Мороз В.І., Братченко О.В., Громов В.І. Новий спосіб вибору коефіцієнтів зміщення шестірні і колеса циліндричної прямозубої евольвентної зубчатої передачі зовнішнього зачеплення. *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50772. Дата реєстрації 19.08.2013.*

19. Пат. на корисну модель 103077, Україна, МПК F16H 1/06 (2006.01) Спосіб визначення товщини зубця зубчатого колеса. В.І.Мороз, С.В.Бобрицький, В.І.Громов, О.В.Братченко. Заявка а2014 08648 від 30.07.2014; опубл. 10.12.2015, бюл. №23.

20. Мороз В.І., Бобрицький С.В., Громов В.І., Анацький О.О. Комп'ютерна програма «Зубомір». *Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 63194. Дата реєстрації 24.12.2015.*

21. Карпов В.М., Никифорок О.І. Стан, проблеми та перспективи оновлення рухомого складу України. *Збірник наукових праць науково-дослідного економічного інституту «Формування ринкових відносин в Україні»*. Київ. 2012. № 6 (133). С. 160-166.

22. Горбунов Н.И., Ковтанец М.В., Демин Р.Ю. Методология инновационного развития железнодорожного транспорта. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Луганськ. 2014. №3 (210). С. 22-27.

23. Колодяжный П.В. Эксплуатационные повреждения зубчатых передач тягового подвижного состава и технологии их упрочнения при изготовлении. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Луганськ. 2011. Ч.2. №1 (155). С. 88-96.

24. Бобровицкий В.И., Сидоров В.А. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт. Донецк: Юго-Восток, 2011. 238 с.

25. Колодяжный П.В. Повышение износостойкости зубчатых колес локомотивов путем выбора технологических способов упрочняющей обработки. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Луганськ. 2015. №1 (218). С. 33-37.



26. Старжинский В.Е., Солитерман Ю.Л., Гоман А.М., Осипенко С.А., Арнаутов К.Б. Анализ видов повреждений зубчатых колес и подготовка проекта стандарта по их классификации и описанию. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Проблеми механічного привода»*. Харків. 2006. № 22 . С. 70 – 77.

27. Liu L. and Zio E. Dynamic Reliability Assessment and Prognostics with Monitored Data for Multiple Dependent Degradation Components. In book: *Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice: 2016*, pp. 736–741.

28. Бирюков И.В., Беляев А.И., Рыбников Е.К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. Москва: Транспорт, 1986. 256 с.

29. Повышение надежности экипажной части тепловозов/ А.И. Беляев и др; под ред. Л.К. Добрынина. Москва: Транспорт, 1984. 248 с.

30. Решетов Л.Н.. Самоустанавливающиеся механизмы. Справочник.- 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1985. 272 с.

31. Медель В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика. Учебник для институтов ж.д. транспорта. Москва: Транспорт, 1974. 232 с.

32. Калихович В.Н. Тяговые приводы локомотивов: устройство, обслуживание, ремонт. Москва: Транспорт, 1983. 111с.

33. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Новий підхід до класифікації тягових приводів рухомого складу залізниць. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк, 2012. № 29. С. 162-166.

34. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Структурна формула тягового приводу рухомого складу. *Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 52362*. Зареєстровано 29.11.2013.

35. Мороз В.І., Братченко О.В., Ліньков В.В. Основи конструювання і САПР. Харків: Нове слово, 2003. 194 с.

36. Братченко О.В. Блочно-ієрархічне описання конструкції сучасних тепловозів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2010. № 119. С. 136-141.
37. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход. Москва: Мир, 1981. 456 с.
38. Zwicky F. Discovery, Invention, Research through the morphological Approach. New-York: Macmillan Co., 1969. 265 p.
39. Боднар Б.Є., Нечаєв Є.Г., Бобир Д.В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп./ за ред. Б.Є. Боднар. Дніпропетровськ: Ліра ЛТД, 2010. 358 с.
40. Михальченко Г.С., Кашников В.Н., Коссов В.С., Симонов В.А. Теория и конструкция локомотивов: Учебник для вузов ж.-д. трансп. /под ред. Г.С.Михальченко. Москва: Маршрут, 2006. 584 с.
41. ОСТ 24.149.03-89. Колеса зубчатые передач тягового подвижного состава магистральных железных дорог [Срок действия с 1990-01-01]. Технические условия. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1989. 9 с.
42. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Уточнена методика проектувальних розрахунків тягових зубчастих передач моторвагонного рухомого складу. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2009, Вип. 107. С. 153-158.
43. Шацилло А.А. Тяговый привод электроподвижного состава. Москва: Транспорт, 1961. 222 с.
44. [Минов Д. К.](#) Механическая часть электрического подвижного состава (устройство, теория, проектирование). Москва - Ленинград: Госэнергоиздат, 1959. 381 с.
45. Иосилевич Г.Б. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. Москва: Машиностроение, 1988.368 с.

46. ГОСТ 16532-70. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. [Срок действия с 1972-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1983. 43 с.
47. ГОСТ 21354-87. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. [Срок действия с 1989-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1988. 128 с.
48. ГОСТ 9563-60. Основные нормы взаимозаменяемости. Колеса зубчатые. Модули. [Срок действия с 1962-07-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1994. 3 с.
49. Мороз В.І., Братченко О.В., Павшенко А.В. Теорія механізмів і машин: Дослідження та проектування механізмів типових технічних засобів залізничного транспорту. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2013. 158 с.
50. Кореняко А.С. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин. Киев: Вища школа, 1987. 332 с.
51. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Особливості визначення коефіцієнтів зміщення зубчатих коліс тягових передач рухомого складу залізниць / *Науковий простір Європи-2009. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції Przemysl: Nauka I studia*, 2009. Вип. 18. С. 30-33.
52. Litvin F. L. Development of Gear Technology and Theory of Gearing. NASA RP-1406, 1998. 113 p.
53. Киницький, Я.Т. Теорія механізмів і машин. Київ: Наукова думка, 2002. 660 с.
54. Болотовская Т.П., Болотовский И.А., Бочаров Г.С. Справочник по корригированию зубчатых колес. Свердловск: Машгиз, 1962. 215 с.
55. ГОСТ 13755-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передатки зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур. [Срок действия с 1981-07-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1981. 4 с.

56. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм. (ГОСТ 9238-83, MOD). [Чинний від 2012-12-01]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2011. 44 с.

57. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Нова методика визначення експлуатаційних зносів профілів зубців та підбору парних коліс тягових зубчатих передач. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2010, Вип. 117. С. 12-16.

58. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач/ под ред. Д.Н.Решетова. Москва: Машиностроение, 1968. 288 с.

59. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. [Срок действия с 1973-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1989. 39 с.

60. ГОСТ 801-78. Сталь подшипниковая. Технические условия. [Срок действия с 1980-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1978. 15 с.

61. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. [Срок действия с 1991-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1996. 17 с.

62. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. Москва: Машиностроение, 1981. 232 с.

63. Михайлов Г.И. Об оптимизации и дальнейшей систематизации технических требований в ГОСТ 30803 «Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава». *ИПЕМ: Техника железных дорог*. Москва. 2017. № 2 (38). С. 19-25.

64. ISO 6336-5-2003. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 5: Strength and quality of materials.

65. Інструкція по магнітному контролю відповідальних деталей тягового рухомого складу залізниць України ЦТ – 0066. Київ, 2003. 91 с.
66. Інструкція з ультразвукової дефектоскопії відповідальних деталей та нероз'ємних вузлів при ремонтах ТРС і МВРС ЦТ – 0069. Київ, 2003. 225 с.
67. Інструкція з технічного обслуговування і поточного ремонту вузла малої шестерні і пружної муфти електропоїздів.– Київ, 2003. 68 с.
68. Правила капітального ремонту КР-1, КР-2 електропоїздів і електросекцій ЕР-1, ЕР-2 в/і, ЕР-9 в/і ЦТ – 0113. Київ, 2004. – 252 с.
69. Шамагін В. О. Технологія ремонту рухомого складу. Ч. II: Навч. посібник. Київ: Дельта, 2008. 396 с.
70. Хрущев М.М. Лабораторные методы испытания материалов зубчатых колес. Москва: Машиностроение, 1966. 152 с.
71. Онищенко В.П., Голдобин В.А. Применение компьютерных технологий для определения износа зубьев зубчатых колес. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Проблеми механічного привода»*. 2004. № 30. С. 176 – 184.
72. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Нова методика визначення експлуатаційних зносів профілів зубців та підбору парних коліс тягових зубчатих передач. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2010. № 117. С.12-16.
73. Пат. 94015, Україна, МПК F16H 1/06 (2006.01). Спосіб визначення товщини зубця симетрично розташованого відносно опор прямозубого зубчатого колеса. В.І.Мороз, О.В.Братченко, С.В.Бобрицький. №201009172; Заявка 21.07.2010; опубл. 25.03.2011, бюл. № 6.
74. Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, Friedrich M. Wohl. Low-cost laser rang scanner and fast surface registration approach. DAGM. 2006. LNCS 4174. P.718-728.

75. Кузнецова А.В. Измерение износа зубьев конических передач с круговыми двояко-вогнутыми зубьями методом лазерного сканирования. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Луганськ. 2011. №11 (165). Ч.2. С.77-85.

76. Кузнецова А.В. Підвищення ресурсу конічних передач з двоопукло-ввігнутими зубцями вибором раціональних параметрів зачеплення: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2014. 23 с.

77. Мороз В.І. Генетичний та методологічний аспект створення технічних засобів нового покоління для залізничного транспорту. *Залізничний транспорт України*. Київ. 2000. № 5-6. С. 61-62.

78. Мороз В.І., Братченко О.В., Ліньков В.В. Методика згортання векторного критерію при оптимізаційному проектуванні зубчатих механізмів тепловозних двигунів із застосуванням узагальнених математичних моделей. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2001, № 45. С. 77-82.

79. Мороз В.І., Братченко О.В., Бобрицький С.В. Особливості визначення коефіцієнтів зміщення зубчатих коліс тягових передач рухомого складу залізниць. *Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Науковий простір Європи-2009»*. Przemysl: Nauka I studia, 2009. № 18. С. 30-33.

80. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації: Навчальний посібник. Черкаси: Брама-Україна, 2005. 608 с.

81. Мороз В.І., Братченко О.В., Астахова К.В. Основи конструювання і САПР технічних засобів залізничного транспорту. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2009. 136 с.

82. Налимов В.В. Теория эксперимента. Москва: Наука, 1971. 207 с.

83. Рафалес-Ламарка Э.Э., Николаев В.Г. Некоторые методы планирования и анализа биологических экспериментов. Киев: Наукова думка, 1971. 120 с.

84. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техника, 1975. 168 с.
85. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. Москва: Наука, 1987. 320 с.
86. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: методы планирования эксперимента/ пер. с англ. под ред. Э.К.Лецкого. Москва: Мир, 1981. 520 с.
87. Филонов С.П. и др. Тепловоз 2М62: экипажная часть, электрическое и вспомогательное оборудование. Москва: Транспорт, 1987. 184 с.
88. Максименцев В. А. Тепловоз 2ТЭ10Л: руководство по эксплуатации и обслуживанию. Москва: Транспорт.1969. 320 с.
89. Ткачев А.А. Прогнозное проектирование эвольвентных цилиндрических передач. *Интеллектуальные системы в производстве*. Москва. 2011. №2(18). С. 173–178.
90. Двигуни внутрішнього згорання: серія підручників у 6 т. Надійність ДВЗ/ за ред.: А.П.Марченка, А.Ф.Шеховцова. Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2004. Т.6. 421 с.
91. Попов О.П., Кіпрєєв Ю.М. Особливості проектування сучасних зубчастих передач. *Машинознавство*. Київ. 2011. №7-8 (169-170). С. 45-47.
92. ГОСТ 30479-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования. [Срок действия с 1998-07-01]. Изд. офиц. Москва: Госстандарт, 1997. 12 с.
93. Бобрицкий С.В. Дослідження особливостей зносу тягових зубчатих передач електропоїздів серії ЕР-2. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2014. №145. С. 125 – 129.

94. Беляев А.И., Иванов В.В., Кононов В.Е. Снижение концентрации напряжений в зубьях прямозубых консольных передач. *Вестник ВНИИЖТ*. Москва. 1970. №7. С.13-16.
95. Дроздов Ю.Н., Туманишвили Т.И. Толщина смазочного слоя. *Вестник машиностроения*. Москва. 1978. №2. С.8-10.
96. Авиационные поршневые двигатели: кинематика, динамика и расчет на прочность/ С.В.Серенсен и др.; под ред.: И.Ш.Неймана, Т.М.Мелькумова. Москва: Оборонгиз. 1950. 870 с.
97. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. Москва: Наука, 1979. 832 с.
98. Далека В.Х., Зубенко Д.Ю. Исследование динамики износа зубчатых тяговых передач электроподвижного состава. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2004. №4(10). С.19-21.
99. Чернець М.В., Береза В.В. Вплив параметрів циліндричної прямозубої передачі на її довговічність і зношування зубців. *Науково-технічний збірник НАУ*. Київ. 2010. №53. С.176-184.
100. Бобрицький С.В. Удосконалення технології проектування та ремонту тягових зубчатих передач моторвагонного рухомого складу: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2012. 20 с.
101. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. Москва: Наука, 1979. 576 с.
102. Левитская О.Н., Левитский Н.И. Курс теории механизмов и машин. Москва: Высшая школа, 1985. 279 с.
103. Фролов, К.В. Теория механизмов и машин. Москва: Высшая школа, 1987. 496 с.
104. Кожевников, С.Н. Теория механизмов и машин. Москва: Машиностроение, 1971. 591 с.
105. Зиновьев В.А. Курс теории механизмов и машин. Москва: Наука, 1975. 384 с.



106. Морошкин Г.Ф. Уравнения динамики простых систем с интегрируемыми соединениями. Москва: Наука, 1981. 116 с.
107. Братченко О.В. Особливості використання методу перетворення координат в дослідженнях кінематики кривошипно-шатунних механізмів. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк. №37. С. 115-120.
108. Korn G., Korn T. *Mathematical handbook. For scientist and engineers*. NY: McGraw-Hill Book Company, 1968. 831 p.
109. Ротбарт Г.А. Кулачковые механизмы: проектирование, динамика и вопросы точности изготовления/ пер. с англ. под ред. Н.И.Колчина. Ленинград: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1960. 335 с.
110. Гаврилов С.А., Ишин Н.Н., Гоман А.М., Скороходов А.С., Дакало Ю.А. Оценка остаточного ресурса зубчатых передач в процессе эксплуатации. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Машинознавство та САПР»*. Харків. 2018. № 25 (1301). С. 44 – 47.
111. Ишин Н. Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач. Минск: Беларус. навука, 2013. 432 с.
112. Кудрявцев В.Н., Державец Ю.А., Арефьев И.И. Курсовое проектирование деталей машин: учебн. пособие. Ленинград: Машиностроение, 1984. 400 с.
113. Далека В.Х., Зубенко Д.Ю. Прогнозування ресурсу тягових приводів електропоїздів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Проблеми механічного привода»*. Харків. 2004. № 42 . С. 43 – 52.
114. Зубенко Д.Ю. Прогнозування ресурсу тягових передач електропоїздів метрополітену. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2004. №64. С. 117-123.

115. Филонов С.П., Гибалов А.И., Никитин Е.А. и др. Тепловоз 2ТЭ116. Москва: Транспорт, 1996. 334 с.
116. Быков В.Г., Морошкин Б.Н. и др. Пассажирский тепловоз ТЭП70. Москва: Транспорт, 1976. 232 с.
117. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. Москва: Транспорт, 1986. 359 с.
118. Геворкян Ю.Л., Григорьев А.Л. Основы линейной алгебры и ее приложений в технике: Учебник. Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 542 с.
119. Балака Е.И., Бойко И.Г. и др. Оценка экономической эффективности инвестиций в мероприятия научно-технического прогресса пособие / под ред. В.Л. Диканя. – Харьков: Основа, 1995. 254 с.
120. Методичні рекомендації з формування вартості продукції (робіт, послуг) у промисловості. Київ: ДП «Державний інститут комплексних техніко - економічних досліджень» міністерства промислової політики України, 2007. 306 с.
121. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно - технического прогресса на железнодорожном транспорте. Москва: Транспорт, 1991. 239 с.
122. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. Москва: Дело, 2002. 194 с.
123. Довбня С.Б. Новий підхід до оцінки економічної ефективності інвестиційних проектів. *Фінанси України*. Київ, 2007. № 7. С. 62-71
124. Сборник типовых технически обоснованных норм времени на слесарные работы при профилактическом осмотре и деповском ремонте электропоездов серии ЭР 2. Москва: Транспорт, 1971. 520 с.

