

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

ГРОМОВ ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ



УДК 621.833: 629.423.2

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

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бабасв Михайло Михайлович,**  
Український державний університет залізничного транспорту,  
кафедра електроенергетики, електротехніки та  
електромеханіки, завідувач кафедри.

**Офіційні опоненти:** – доктор технічних наук, професор  
**Хворост Микола Васильович,**  
Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М.Бекетова, кафедра охорони праці та безпеки  
життєдіяльності, завідувач кафедри;

– кандидат технічних наук  
**Трихліб Олексій Дмитрович,**  
структурний підрозділ «Служба локомотивного  
господарства» регіональної філії «Південна залізниця»  
АТ «Укрзалізниця», відділ з нормування ПЕР, начальник  
відділу

Захист відбудеться «27» червня 2019 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий «21» травня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.В.Прохорченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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 ПАТ «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 ПАТ «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-дослідної роботи «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 задачі 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 задачі 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 наукове 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 урахувувати 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 досліджуваних 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 ЕР2 і ЕР2Р 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 ЕР2 з визначення особливостей зносу, оцінювання зміни геометрії контактуючих поверхонь зубців на їх залишковий ресурс передані для впровадження в ВП «Моторвагонне депо Харків» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця».

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 передач; [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. Дослідження, що висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

**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.).

Повністю результати дисертації заслухано та схвалено на розширеному засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

**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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 першому розділі розглянуто особливості експлуатації ТЗП у складі тягових приводів ТРС і МВРС. Визначено перспективні напрямки спрямованих на збільшення їх ресурсу досліджень. Вони передбачають використання в конструкції тягових передач знайдених при оптимізаційному проектуванні відповідних параметрів і показників зачеплення, уточнене визначення при ремонтах ступенів зносу зубців шестерень і коліс для оцінювання їх залишкового ресурсу.

За результатами аналізу відмов за період з 2015-2018 років тепловозів (серії 2ТЕ116), електровозів (серій ЧС2, ЧС7), електропоїздів (серій ЕР2, ЕР2Р), які працювали в регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Українська залізниця», на пошкодження тягового приводу (ТП) тепловозів і електровозів приходиться 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. Одержані результати підтверджують актуальність досліджень, спрямованих на забезпечення надійності ТЗП. Питанням розробки та удосконалення конструкції тягових приводів, розвитку методів проектування та ремонту ТЗП присвячені численні наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених. Вагомий внесок у цьому напрямку зробили: Бабанін О.Б., Басов Г.Г., Беляєв А.І., Бірюков І.В., Біндер Н.Я., Блохін Є.П., Боднар Б.Є., Гришко В.О., Далека В.Х., Errichello R., Іванов В.Н., Каліхович В.Н., Капіца М.І., Кириченко А.Ф., Маслієв В.Г., Медель В.Б., Мороз В.І.,

Molkenstruck S., Рибніков Є.К., Решетов Л.Н., Тартаковський Е.Д., Тернюк М.Е., Ткачук М.А., Winkelbach S., Wojnarowski J., Хворост М.В., Шацилло А.А. та інші.

Для проведення досліджень у напрямку збільшення надійності ТЗП розроблена універсальна блочно-ієрархічна схема у вигляді «І-АБО» дерева. Вона ураховує особливості конструкції не тільки тягових редукторів, а і модулів його з'єднання з ТЕД та колісною парою

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 інші). 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  $x_1$  і  $x_2$  на основі побудови і аналізу відповідних блокувальних контурів; отримання і використання математичного описання зміни коефіцієнтів форми зубців  $Y_{FSI,2}$  в залежності від чисел зубців  $z_{1,2}$  і коефіцієнтів зміщення  $x_{1,2}$  для підвищення точності визначення показників міцності; розробку математичних описань для оцінювання впливу прийнятих при проектуванні рішень на величину розрахункового технічного ресурсу ТЗП.

Аналіз сучасних методів ремонту тягових зубчастих передач, які знаходяться в експлуатації, показав, що 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 обґрунтовує необхідність розробки відповідного математичного забезпечення.

**У другому розділі** представлені результати проведених досліджень з розробки методичного та математичного забезпечення для оптимізаційного проектування та ремонту ТЗП.

Головною метою оптимізаційного проектування ТЗП є знаходження відповідних конструктивних параметрів, при яких забезпечуються найкращі умови взаємодії контактуючих профілів зубців шестірні та колеса, характеристики та показники зачеплення, очікуваний ресурс передачі. Запропонований удосконалений метод базується на використанні відповідного формалізованого описання задачі умовної багатомірної оптимізації з обмеженнями.

Встановлено, що при заданих міжцентровій відстані  $a_w$  і передаточному числі  $u_{12}$  ТЗП, обраних модулі  $m$  і числах зубців  $z_1, z_2$  на рівні основних конструктивних параметрів і показників зачеплення визначально впливають коефіцієнти зміщення шестерні  $x_1$  та колеса  $x_2$ . Тому їх доцільно розглядати як керовані фактори, інтервали зміни яких визначають параметричні обмеження і область можливих рішень  $D$ . В якості критеріальної оцінки оптимальності (яка характеризує умови взаємодії контактуючих профілів) доцільно розглядати ступінь вирівнювання максимальних коефіцієнтів питомих ковзань на ніжках зубців шестерні  $\lambda_{1max}$  та колеса  $\lambda_{2max}$  і різниця цих коефіцієнтів  $\Delta\lambda$  може розглядатись як головний критерій. Інші показники  $\varphi_j$  (залежності вторинних критеріїв та граничних умов від  $x_1$  і  $x_2$ ) розглядаються як функціональні обмеження, які виділяють

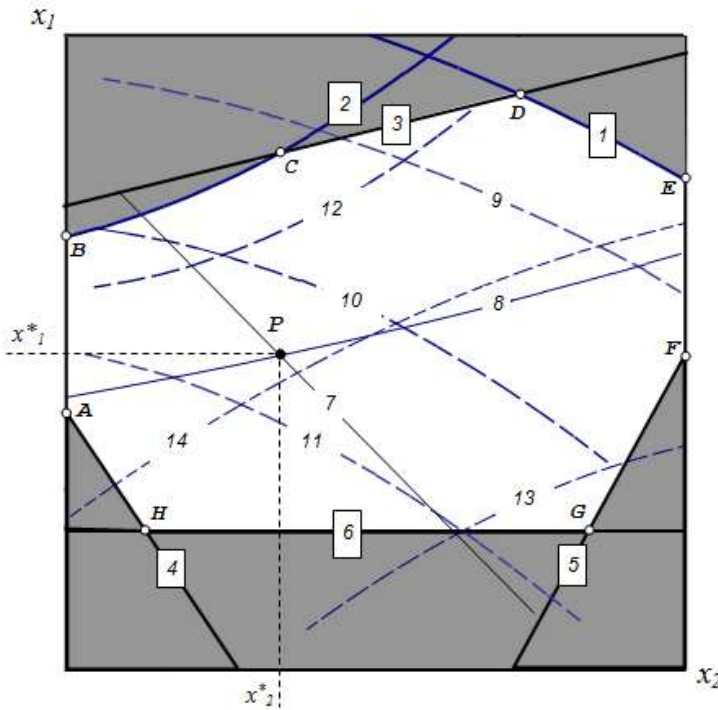


Рисунок 1 – Загальний вид БК для оптимізаційного проектування ТЗП

обраними інтервалами варіювання коефіцієнтів зміщення  $x_1$  і  $x_2$ . Пошук оптимальних величин коефіцієнтів зміщення шестірні  $x_1^*$  і колеса  $x_2^*$  (умовно відповідають точці  $P$  на графіку) повинні здійснюватись в межах БК  $A-B-C-D-E-F-G-H$  (незатемнена область графіка), окресленого шістьма обмежувальними лініями відповідних параметрів ТЗП: 1 –  $\varepsilon_{\alpha min} = 1,2$ ; 2 –  $S_{a1} / m = 0,25$ ; 3,4,5 – граничні умови відсутності інтерференції з боку шестерні та колеса; 6 –  $x_{1min}$ . Додаткові лінії: 7 – відношення заданої міжосьової відстані до модуля зубців  $a_w/m$ ; 8 – умова  $\Delta\lambda = |\lambda_{1max}| - |\lambda_{2max}| = 0$ ; 9 –  $\varepsilon_{\alpha} = 1,3$ ; 10 –  $\varepsilon_{\alpha} = 1,45$ ; 11 –  $\varepsilon_{\alpha} = 1,6$ ; 12 –  $S_{a1} / m = 0,4$ ; 13 –  $S_{a2} / m = 0,7$ ; 14 –  $S_{a2} / m = 0,8$ . Побудування БК передбачає наявність математичних моделей виду  $x_1 = f(x_2, z_1, u_{12})$ . Особливістю їх отримання є використання методів математичного планування експериментів. В основу проведених досліджень покладений ортогональний математичний план другого порядку для трьох змінних, що варіюються на трьох рівнях:  $x_2 = -0,5-1,3$ ;  $z_1 = 15-25$ ;  $u_{12} = 3-5$ . Математичні моделі отримані у вигляді поліномів другого порядку виду

$$x_1 = a_0 + a_1 \cdot x_2 + a_2 \cdot z_1 + a_3 \cdot u_{12} + a_{11} \cdot x_2^2 + a_{22} \cdot z_1^2 + a_{33} \cdot u_{12}^2 + a_{12} \cdot x_2 \cdot z_1 + a_{13} \cdot x_2 \cdot u_{12} + a_{23} \cdot z_1 \cdot u_{12}. \quad (2)$$

Результати перевірки адекватності отриманих математичних моделей за величиною дисперсії середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{x_1}$  підтвердили можливість їх використання в подальших дослідженнях.

Одним з показників міцності ТЗП є рівень розрахункових напружень згину зубців  $\sigma_{F1,2}$ , величина яких пропорційна коефіцієнту форми зубця  $Y_{FS1,2}$ . Для уточненого визначення коефіцієнтів форми зубців шестірні та колеса  $Y_{FS1,2}$  з використанням методів математичного планування експериментів отримані узагальнені математичні моделі виду  $Y_{FS1,2} = f(x_{1,2}, z_{1,2})$  у вигляді поліномів другого порядку

область допустимих рішень  $D_x$  вибору найкращих значень коефіцієнтів  $x_1$  і  $x_2$  за головним критерієм. Тоді математичний запис оптимізаційного проектування у вигляді мінімізації цільової функції приймає вид

$$\Delta\lambda(x_1, x_2) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$x_1, x_2 \in D_x \in D.$$

Для вирішення таких задач в дисертації запропоновано використання для досліджуваних ТЗП «блокувальних контурів» (БК) – комплексних графіків (рис.1), на яких для конкретного сполучення чисел зубців  $z_1$  і  $z_2$  в прямокутних координатах  $x_1$  і  $x_2$  нанесені відповідні обмежувальні ізолінії. Кожна з них відповідає певній граничній умові на проектування зубчастої передачі і конкретизує області, в яких обираються коефіцієнти  $x_1$  і  $x_2$  для чисел зубців  $z_1$  і  $z_2$ . Загальна область графіка обмежена



$$Y_{FS1} = 5,894 - 0,1293 \cdot z_1 - 3,918 \cdot x_1 + 0,002 \cdot z_1^2 + 0,875 \cdot x_1^2 + 0,0992 \cdot z_1 \cdot x_1; \quad (3)$$

$$z_1 \in [14;26]; x_1 \in [0;0,4].$$

$$Y_{FS1} = 4,908 - 0,0462 \cdot z_1 - 2,927 \cdot x_1 + 0,00031 \cdot z_1^2 + 0,55 \cdot x_1^2 + 0,0608 \cdot z_1 \cdot x_1; \quad (4)$$

$$z_1 \in [14;26]; x_1 \in [0,4;0,8].$$

$$Y_{FS2} = 3,7302 - 0,00158 \cdot z_2 - 0,5984 \cdot x_2 + 0,004 \cdot x_2^2 + 0,0046 \cdot z_2 \cdot x_2; \quad (5)$$

$$z_2 \in [60;80]; x_2 \in [-0,2;0,8].$$

Величина дисперсії середньоквадратичного відхилення для УММ (3) – (5) складає відповідно  $\sigma_{Y_{FS1}} = \pm 0,0221$ ,  $\sigma_{Y_{FS1}} = \pm 0,0159$ ,  $\sigma_{Y_{FS2}} = \pm 0,006$ , що свідчить про їх адекватність і придатність для використання в розрахунках на міцність ТЗП.

Оцінювання ресурсу для розглянутих варіантів при проектуванні ТЗП потребує визначення пробігів локомотива від початку експлуатації до виникнення граничних зносів зубців шестірні ( $L_1$ ) та колеса ( $L_2$ ). При цьому найбільш універсальними є рекомендації з встановлення граничних зносів зубців за граничними змінами їх товщин, які вимірюються за постійними хордами і для шестерень дорівнюють  $\Delta_{C1max} = 2,5$  мм, для коліс -  $\Delta_{C1max} = 3,0$  мм. При безаварійних умовах експлуатації технічний ресурс ТЗП визначається як механічними властивостями вибраних матеріалів, так і обраними при проектуванні конструктивними параметрами шестерні і колеса, геометрією профілів зубців, характеристиками їх зачеплення. Тому в якості основи для проведення розрахунків пробігів  $L_1$  і  $L_2$  були обрані наведені нижче формули

$$L_1 = \frac{\Delta_{C1max} \cdot f(HRC_1)}{n_{\delta 2} \cdot u_{12} \cdot f(h_m) \cdot f_1(A) \cdot f(\Delta_{C1max})}; \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{\Delta_{C2max} \cdot f(HRC_2)}{n_{\delta 2} \cdot f(h_m) \cdot f_2(A) \cdot f(\Delta_{C2max})}, \quad (7)$$

де:  $n_{\delta 2}$  - число взаємодій зубців колеса з зубцями шестерні за один оберт колісної пари;  $u_{12}$  - передаточне число ТЗП;  $f(HRC_{1,2})$ ,  $f(\Delta_{C1,2max})$ ,  $f(h_m)$ ,  $f(A)$ , - функції, які ураховують залежність інтенсивності зносу зубців шестерні та колеса відповідно від початкової твердості робочих поверхонь зубчастих коліс, зростання динамічних навантажень при збільшенні зносів зубців, товщини шару мастила, характеристик абразивних домішок (часток).

Проведений аналіз складових формул (6) і (7) показав, що найбільш суттєво з особливостями геометрії профілів зубців (які визначаються при проектуванні шестерень і коліс з різними коефіцієнтами  $x_1$  і  $x_2$ ) та особливостями їх взаємодії пов'язана складова  $f(h_m)$ , для визначення якої використовується формула

$$f(h_m) = \left[ 0,25 - \frac{1,6 \cdot 10^6 \cdot \alpha_e^{0,6} \cdot \mu_H^{0,5} \cdot v_{rk}^{0,6} \cdot \rho_r^{0,4}}{(k_{HV} \cdot k_{H\beta} \cdot F_n / b_w)^{0,2} \cdot v_{rc}^{0,8}} \right]^{4,4}, \quad (8)$$

де  $\alpha_e$ ,  $\mu_H$  - п'єзокоефіцієнт в'язкості і динамічна в'язкість мастила;  $k_{HV}$ ,  $k_{H\beta}$ ,  $F_n$ ,  $b_w$  - відповідно коефіцієнти динамічного навантаження в зачепленні та нерівномірності розподілу навантаження за довжиною контактних ліній; нормальна сила; робоча ширина зубчастих коліс;  $v_{rk}$ ,  $v_{rc}$  - швидкості кочення та сковзання в розрахунковій точці контакту зубців  $r$  (для розглянутих ТЗП за точку  $r$  приймається точка

початку двопарного контакту зубців на заповсюдженій ділянці лінії зачеплення);  $\rho_r$  - приведений радіус кривизни в точці  $r$ .

В роботі запропоноване уточнення параметрів зачеплення в формулі (8), що передбачає використання характеристик зачеплення зубців при розглянутих варіантах оптимізаційного проектування ТЗП.

Ще більшого значення такі рішення набувають при вирішенні завдань з оцінювання залишкового ресурсу ТЗП при ремонтах, коли слід враховувати не тільки ступені зносу  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$ , а і відповідні особливості зміни геометрії контактуючих поверхонь зубців шестірні та колеса. Для цього на основі розглянутих формул була розроблена відповідна математична модель, яка при заданих конструктивних параметрах шестірні та колеса забезпечує розрахунки геометричних параметрів профілів зубців, отримання характеристик і показників зачеплення, відповідних значень пробігів  $L_1$  і  $L_2$ .

При проведенні досліджень додатково розглянуто особливості прогнозування залишкового ресурсу при проведенні ремонтів ТЗП. З урахуванням розглянутих підходів до визначення технічних ресурсів (пробігів  $L_1$  і  $L_2$ ) при проектуванні ТЗП залишковий ресурс також може бути визначеним у вигляді відповідних пробігів локомотиву (електропоїзду)  $L_{1,2\text{зал}}$  і  $L_{2\text{зал}}$ , які визначаються за формулою

$$L_{1,2\text{зал}} = L_{1,2} - L_{1,2K}, \quad (9)$$

де  $L_{1,2K}$  - пробіги локомотива, що відповідають досягненню зносів шестерні  $\Delta_{C1K}$  та колеса  $\Delta_{C2K}$  на момент контролю технічного стану ТЗП при ремонті. Для розрахунку величин  $L_{1,2K}$  можливо використовувати формули (6) і (7), підставляючи в них замість відомих значень  $\Delta_{C1\text{max}}$  і  $\Delta_{C2\text{max}}$  відповідні значення  $\Delta_{C1K}$  і  $\Delta_{C2K}$ .

Розглянута також можливість використання розповсюджених в техніці варіантів нелінійного прогнозування залишкового ресурсу. У відповідності до ТЗП відома розрахункова формула приймає вид:

$$L_{1,2\text{зал}} = L_{1,2K} \left[ \left( \frac{\Delta_{C1,2\text{max}}}{\Delta_{C1,2K}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right], \quad (10)$$

де  $\alpha$  - показник ступеня, що враховує швидкість зміни зносів зубців.

Встановлено, що відомі рекомендації з вибору показника ступеню  $\alpha$  для зубчастих коліс на рівні  $\alpha = 1,5$  носять узагальнений характер і не забезпечують потрібну точність при прогнозуванні залишкового ресурсу ТЗП з відповідними зносами зубців. Уточнення цього показника за результатами експериментальних досліджень забезпечує високу (похибка не перевищує 5%) точність прогнозних оцінок. Наприклад, для ТЗП електропоїздів серії ЕР-2 для виділених інтервалів пробігу встановлено, що значення показника  $\alpha$  для шестерень і коліс змінювались від  $\alpha = 1,45$  до  $\alpha = 1,75$ .

Експлуатаційні зноси активних профілів зубців шестерні та колеса обумовлюють суттєві зміни характеристик зачеплення ТЗП. Тому проведення розрахунків показників міцності передач з різними ступенями зносу зубців, розроблення рекомендацій раціонального формування ремонтних ТЗП потребує проведення досліджень з визначення характеру і величини зміни передаточного відношення  $u_{12}$ , дійсної величини коефіцієнту перекриття  $\varepsilon_\alpha$ , закономірностей зміни коефіцієнтів питомих ковзань. Окрім цього визначальний вплив на залишковий ресурс ТЗП оказує обраний при проведенні ремонтів варіант їх комплектування з розпарованих шестерень і коліс з різними ступенями зносу.

Вузловим моментом для проведення даних досліджень була розробка відповідних математичних описань, які забезпечують аналітичне визначення поточних координат точок контакту реальних профілів зубців за період їх зачеплення. Вирішувалась двоєдина задача з визначення граничних точок контакту (положення осей зубців шестірні та колеса в моменти початку та закінчення зачеплення) і координат поточних точок контакту в зачепленні. Для визначення положень осей зношених зубців шестерні та колеса ТЗП в моменти початку (на рис.2 точка контакту  $B_1$  на перетинанні кіл радіусів  $r_{a2}$  і  $r_{B_1}$ , шукані кути  $\psi_{1\Pi}$ ,  $\psi_{2\Pi}$ ) та закінчення зачеплення (на рис.2 точка контакту  $B_2$  на перетинанні кіл радіусів  $r_{a1}$  і  $r_{B_2}$ , шукані кути  $\psi_{13}$ ,  $\psi_{23}$ ) використовувався метод проєкцій замкнених векторних контурів на осі координат (метод В.А.Зінов'єва).

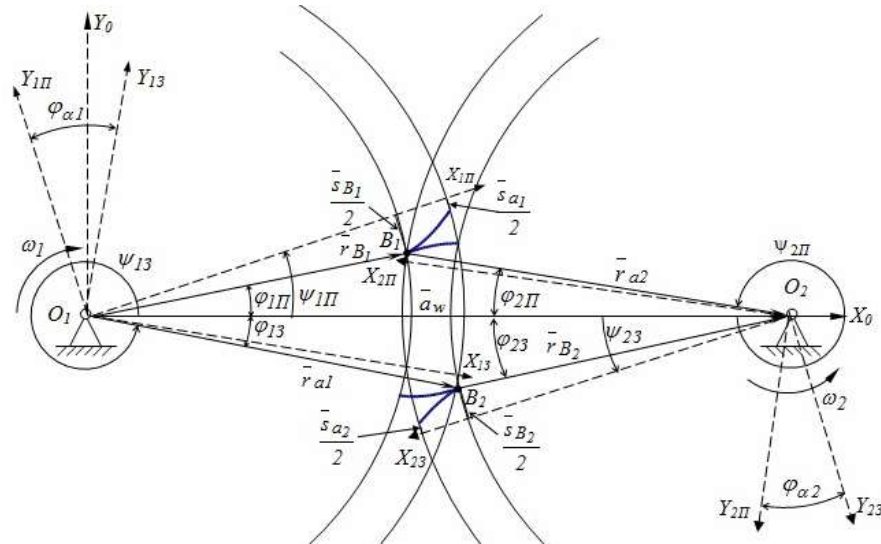


Рисунок 2 - До визначення граничних положень осей зношених зубців шестерні та колеса ТЗП

У відповідності до нього у прив'язці до ТЗП вводилась система координат  $X_0O_1Y_0$ , а геометричні параметри передачі  $r_{a1}$ ,  $r_{a2}$ ,  $r_{B_1}$ ,  $r_{B_2}$ ,  $a_w$  замінювались відповідними векторами  $\vec{r}_{a1}$ ,  $\vec{r}_{a2}$ ,  $\vec{r}_{B_1}$ ,  $\vec{r}_{B_2}$ ,  $\vec{a}_w$ . Для моментів початку та закінчення зачеплення зубців шестірні і колеса розглядалися векторні контури  $O_1B_1O_2O_1$  і  $O_1B_2O_2O_1$ , для яких умовами замкненості відповідно є

$$\vec{r}_{B_1} + \vec{r}_{a2} = \vec{a}_w; \quad \vec{r}_{B_2} + \vec{r}_{a1} = \vec{a}_w \quad (11)$$

Формули для визначення шуканих кутів, що визначають положення осей зубців шестерні і колеса в розглянуті моменти їх зачеплення отримані перетворенням проєкцій рівнянь (11) на осі координат  $O_1X_0$  і  $O_1Y_0$

$$\psi_{1\Pi} = \varphi_{1\Pi} + \arcsin[\bar{s}_{B_1} / (2 \cdot r_{B_1})]; \quad \psi_{2\Pi} = \varphi_{2\Pi} - \arcsin[\bar{s}_{a2} / (2 \cdot r_{a2})], \quad (12)$$

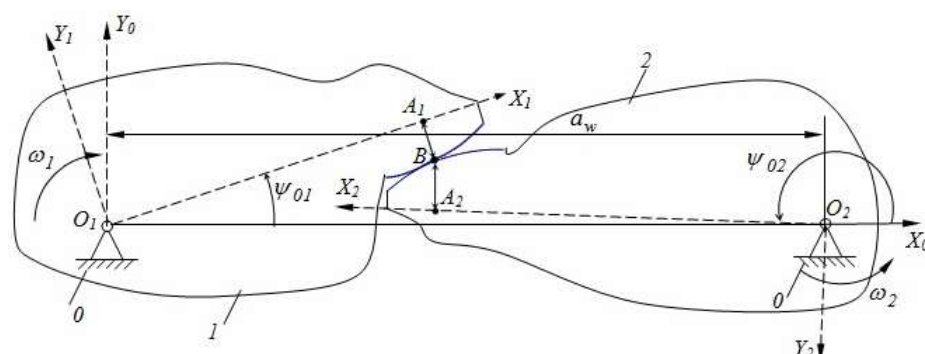
де  $\varphi_{1\Pi} = \arccos[(a_w^2 + r_{B_1}^2 - r_{a2}^2) / (2 \cdot a_w \cdot r_{B_1})]$ ;  $\varphi_{2\Pi} = \arccos[\sqrt{1 - (r_{B_1} \sin \varphi_{1\Pi} / r_{a2})^2}]$ .

$$\psi_{13} = \varphi_{13} - \arcsin[\bar{s}_{a1} / (2 \cdot r_{a1})]; \quad \psi_{23} = \varphi_{23} + \arcsin[\bar{s}_{B_2} / (2 \cdot r_{B_2})], \quad (13)$$

де  $\varphi_{13} = \arccos[(a_w^2 + r_{a1}^2 - r_{B_2}^2) / (2 \cdot a_w \cdot r_{a1})]$ ;  $\varphi_{23} = \arccos[\sqrt{1 - (r_{a1} \sin \varphi_{13} / r_{B_2})^2}]$ .

Аналітичні залежності для визначення координат в системі  $X_0O_1Y_0$  поточних точок контакту профілів зубців із встановленими товщинами за хордами кіл відповідних радіусів шестерні і колеса отримувались на основі методу перетворення координат (методу Г.Ф. Морошкіна). На рис.3 представлено фрагмент кінематичної схеми ТЗП. Шестерня 1 і колесо 2 утворюють із стійкою 0 оберталині кінематичні пари п'ятого класу  $O_1$ ,  $O_2$ . Робочі профілі зубців утворюють вищу кінематичну пару четвертого класу  $B$  (в площині - точка контакту). Координати проточної точки контакту  $B$  в системі координат  $X_1O_1Y_1$ :  $x_1 = O_1A_1 = l_{e1}$ ;  $y_1 = A_1B = S_{e1} / 2$  ( $S_{e1}$  - товщина зубця шестерні, визначена на

відстані  $l_{e1}$  від центру обертання  $O_1$ ). Координати поточної точки контакту  $B$  в системі координат  $X_2O_2Y_2$ :  $x_2 = O_2A_2 = l_{e2}$ ;  $y_2 = A_2B = \bar{S}_{e2}/2$  ( $\bar{S}_{e2}$  - товщина зубця шестерні, визначена на відстані  $l_{e2}$  від центру обертання  $O_2$ ).



Згідно даного методу матричний запис системи рівнянь перетворення координат точки контакту має вид

$$r_i = T_{ji} \cdot r_j, \quad (14)$$

де  $r_i$  - матриця-стовпець координат точки в основній системі

Рисунок 3 - До визначення координат поточних точок контакту профілів зубців шестерні та колеса ТЗП

координат;  $r_j$  - матриця-стовпець координат точки в новій системі координат;  $T_{ji}$  - матриця коефіцієнтів рівнянь.

На основі рівняння (14) отримані умови існування поточної точки  $B$  контактування профілів зубців шестерні та колеса

$$l_{e1} \cdot \cos \psi_{01} - (\bar{S}_{e1}/2) \cdot \sin \psi_{01} = l_{e2} \cdot \cos \psi_{02} - (\bar{S}_{e2}/2) \cdot \sin \psi_{02} + a_w; \quad (15)$$

$$l_{e1} \cdot \sin \psi_{01} + (\bar{S}_{e1}/2) \cdot \cos \psi_{01} = l_{e2} \cdot \sin \psi_{02} + (\bar{S}_{e2}/2) \cdot \cos \psi_{02}. \quad (16)$$

Використання отриманих математичних залежностей в дослідженнях ТЗП потребують аналітичних описання активних профілів зубців шестерні та колеса виду  $\bar{S}_{e1}/2 = f(l_{e1})$  ( $l_{e1} \in [r_{B1}; r_{a1}]$ ) і  $\bar{S}_{e2}/2 = f(l_{e2})$  ( $l_{e2} \in [r_{B2}; r_{a2}]$ ). Проведені дослідження показали, що при наявності результатів експериментального визначення товщини зубців за хордами відповідних кіл для розроблення таких описань доцільно використовувати інтерполяційну формулу Лагранжа.

Для вибору найбільш ефективного варіанту комплектації необхідно ураховувати не тільки відповідні зноси  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$ , а ще і попередні зміни геометричних параметрів їх контактуючих профілів по всій висоті зубців. Для вирішення такого завдання на основі використання отриманих математичних описань розроблено розрахунково-експериментальний метод. Він передбачає отримання характеристик і показників зачеплення ТЗП з різними ступенями зносу зубців на основі послідовного виконання наступних етапів:

- експериментальне отримання цифрових описань реальних контактуючих профілів зубців для визначення їх геометричних параметрів за всією висотою (на основі патентозахищеного способу);
- математичне описання отриманих експериментально розглянутих профілів зубців шестерні та колеса;
- математичне моделювання та аналіз характеристик і показників зачеплення зубців шестерні та колеса з різними ступенями зносу;
- розрахунок залишкових ресурсів ТЗП за уточненими величинами геометричних параметрів зубців з визначеними ступенями зносу та показників їх зачеплення.

Адекватність отриманих результатів перевірялась з використанням отриманих експериментально результатів дослідження ТЗП електропоїзду серії EP2 з визначеними ступенями і особливостями геометрії зносу зубців шестерні та колеса. Найбільша похибка не перевищувала 1%.

У третьому розділі представлені результати розрахунково-експериментального дослідження з визначення резервів збільшення ресурсу тягових зубчастих передач локомотивів і електропоїздів розглянутих серій за рахунок їх оптимізаційного проектування та ремонту.

При проведенні оптимізаційного проектування ТЗП тепловозів серій М62, 2ТЕ116, ТЕП70 і електропоїздів серій ЕР2, ЕР2Р за удосконаленим методом використовувались наведені в дисертації основні (базові) конструктивні параметри і технічні характеристики. Для визначення оптимальних величин коефіцієнтів зміщення шестерень  $x_1^*$  і коліс  $x_2^*$  були розроблені наведені в дисертації відповідні БК. Конкретизовані значення коефіцієнтів  $x_1^*$  і  $x_2^*$  суттєво відрізняються від значень коефіцієнтів  $x_1$  і  $x_2$  серійних ТЗП. Результати дослідження в повному обсязі для кожної ТЗП представлені в дисертації. Вони показують, що для всіх розглянутих ТЗП при використанні знайдених для оптимальних значень коефіцієнтів  $x_1^*$  і  $x_2^*$  конструктивних параметрів шестерень і коліс покращуються характеристики і показники зачеплення, умови взаємодії контактуючих поверхонь. В кінцевому результаті за рахунок оптимізаційного проектування при виконанні всіх заданих умов і обмежень, забезпеченні згинної і контактної міцності зубців передач може бути досягнуто суттєве збільшення ресурсу ТЗП: для ТЗП тепловозів серії М62 – до 18-20%, 2ТЕ116 – до 2-8%, ТЕП70 – до 16%; електропоїздів серії ЕР2 і ЕР2Р – до 11-23%.

Важливу складову дисертаційної роботи представляє розрахунково-експериментальне дослідження з визначення ступенів зносу та залишкового ресурсу ТЗП електропоїздів серії ЕР2. На етапі експериментальних досліджень були оброблені результати численних (понад 2000) обмірів зубців шестерень і коліс при ремонтах електропоїздів серій ЕР2, ЕР2Р, ЕР2Т у період з 2014 по 2018 роки в ремонтних підрозділах регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця». Для отримання необхідних для ТЗП електропоїздів серії ЕР2 даних при обробці зведеного початкового масиву використовувались розроблені матричні описання, елементами яких були: дати і результати вимірювань товщин зубців шестерень і коліс за ділильними хордами, номери шестірні та колісної пари, терміни часу між черговими замірами (в добах), визначені величини відповідних зносів. В результаті для електропоїздів ЕР2 були отримані масиви значень зносів зубців шестерень  $\Delta_{III}$  ( $\Delta_I$ ) і коліс  $\Delta_K$  ( $\Delta_2$ ) в залежності від часу  $\Delta t$  (в добах). Обробка цих масивів з використанням MS EXCEL забезпечила отримання показаних на рис.4 кривих виду  $\Delta_{III} = f(\Delta t)$  і  $\Delta_K = f(\Delta t)$ .

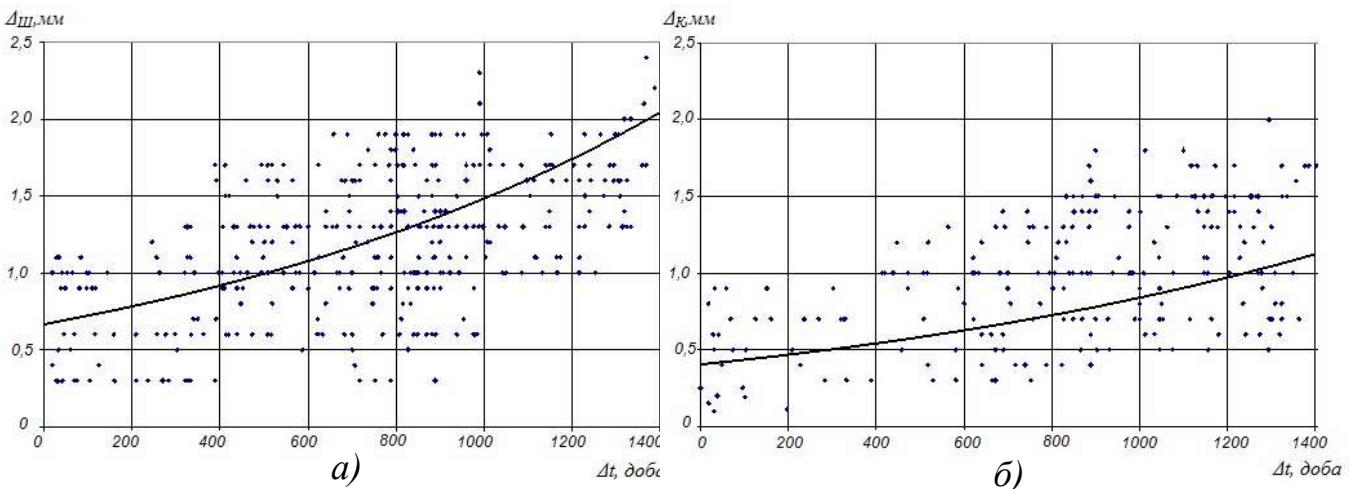


Рисунок 4 - Графік зміни зносів зубців ТЗП за ділильною хордою за розглянутий період експлуатації електропоїздів серії ЕР2: а – шестерні; б – колеса



Для розрахунку за формулами (6) і (7) залишкового ресурсу отримані математичні залежностей виду  $\Delta_{C1} = f(\Delta_{Ш})$  і  $\Delta_{C2} = f(\Delta_K)$ .

З метою конкретизації параметра напрацювання ТЗП у складі електропоїздів здійснено перехід від добового обліку напрацювання  $t$  до відповідних пробігів  $L_1$  і  $L_2$  до появи певних зносів шестерні  $\Delta_{C1}$  і колеса  $\Delta_{C2}$ . За результатами аналізу характерних особливостей експлуатації електропоїздів серії EP2 в регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Українська залізниця» прийнята для визначення напрацювання усереднена величина їх середньодобового пробігу. З урахуванням того, що на початок розглянутого періоду у відповідності до наявних зносів зубців ТЗП ( $\Delta_{C1} = 0,92$  мм,  $\Delta_{C2} = 0,4$  мм) пробіг складав біля 600 тис. км, це значення прийнято за початок відліку напрацювання ( $\Delta L_{1,2}$ ) шестерень і коліс у розглянутому періоді їх експлуатації. При таких умовах були отримані криві формування зносів  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$  в залежності від пробігів електропоїзду за розглянутий період експлуатації  $\Delta L_{1,2}$  та їх математичні описання.

Отримані експериментальні дані дозволили перевірити точність математичного моделювання експлуатаційних зносів та залишкового ресурсу ТЗП з використанням розроблених математичних описань. Встановлено, що найбільша розбіжність розрахункових та експериментальних результатів визначення зносів зубців в залежності від пробігу електропоїзду не перевищує 5%. Для досліджуваних ТЗП були проведені розрахунки з визначення пробігів електропоїздів  $L_{1,2}$  при досягненні відповідних зносів зубців  $\Delta_{C1,2}$  в інтервалі від 0 до  $\Delta_{C1,2max}$ . Результати представлені на рис.5. Нанесені на криві виділені експериментальні точки додатково підтверджують достовірність описань в розглянутий інтервал експлуатації електропоїздів. З їх

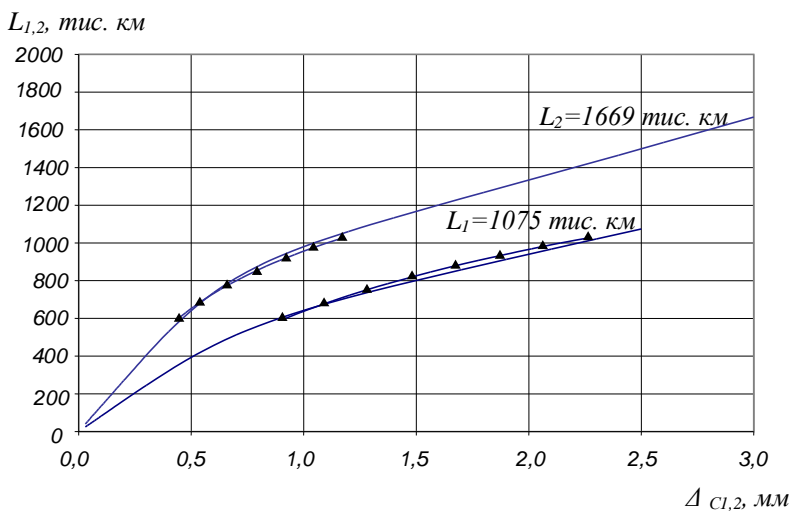


Рисунок 5 – До визначення залишкового ресурсу при ремонтах ТЗП електропоїздів серії EP2 (▲—▲—▲ експериментальні дані)

використанням проведено дисертаційне дослідження з визначення залишкових ресурсів для різних варіантів ТЗП, які знаходяться в експлуатації, з не розпарованими і розпарованими шестірнями та колесами. До висвітлених в роботі результатів входять і дослідження ТЗП при не розпарованій комплектації шестерень і коліс.

При визначенні варіантів комплектування ТЗП з розпарованими шестернею і колесом необхідно урахувати не тільки величини їх зносів  $\Delta_{C1,2}$ , а і відповідні зміни геометричних параметрів контактуючих профілів зубців, характеристик зачеплення, показників міцності передачі, оцінювати їх вплив на залишковий ресурс. Розглянуто декілька варіантів експлуатованих ТЗП. Для кожного розглянутого варіанту проводилось комплексне дослідження, яке охоплювало експериментальне визначення геометричних параметрів контактуючих профілів, математичне моделювання характеристик і показників зачеплення, прогнозування залишкового ресурсу. Відповідні результати в повному обсязі представлені в дисертації. Їх аналіз показав, що особливої уваги заслуговують варіанти, коли ступені зносів зубців наближаються до їх

граничних значень ( $\Delta_{C1,2max}$ ). При цьому розглядалась ТЗП з нульовим залишковим ресурсом шестірні, що визначало необхідність ремонту вузла шестірні шляхом заміни шестірні на нову або ремонту з достатнім залишковим ресурсом.

Для першого варіанту, коли  $\Delta_{C2K} = 1,25 \text{ мм}$  і  $L_{2зал} = 594 \text{ тис. км}$  була обрана відповідна ремонтна шестірня, яка мала ( $\Delta_{C1K} = 1,25 \text{ мм}$ ) і  $L_{1зал} = 594 \text{ тис. км}$ . Для другого варіанту обрана нова шестірня –  $\Delta_{C1} = 0$  і  $L_{1зал} = L_1$ . Тоді на момент напрацювання  $\Delta_{C2K} = \Delta_{C2max} = 3,0 \text{ мм}$  ( $L_{2зал} = 0$ ), шестірня буде мати  $\Delta_{C1K} = 0,9 \text{ мм}$  і  $L_{1зал} = 475 \text{ тис. км}$ . Як і в першому варіанті забезпечується ресурс і додатково залишається визначений ресурс  $L_{1зал}$ . (можливість її подальшого використання в якості відповідної ремонтної шестірні).

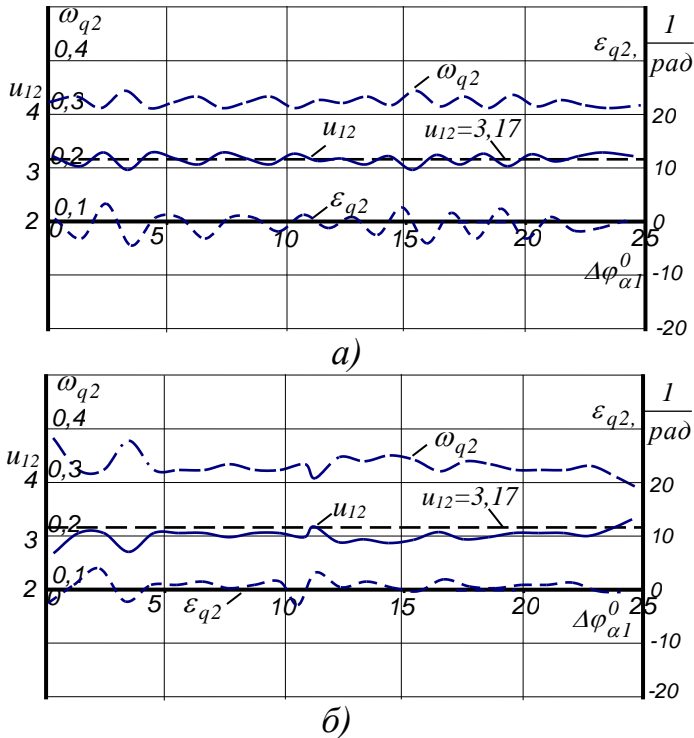


Рисунок 6 – Результати дослідження кінематики варіантів комплектації ТЗП електропоїзду ЕР2: а – першого варіанту; б – другого варіанту

при підбиранні ремонтних пар тільки за величинами зносів  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$ , його зменшення може бути від 2,5-3% (при малих і середніх ступенях  $\Delta_{C1,2}$ ) до 10-13% (при наближених до граничних зносів  $\Delta_{C1,2}$ ).

При прийнятті рішень, пов'язаних із зміною комплектації шестерень і коліс при ремонтах, важливого значення набуває контроль зміни основних показників міцності ТЗП. З цією метою були отримані наведені нижче математичні залежності для розрахунків напружень згину зубців шестерні  $\sigma_{F1}$ , контактних напружень передачі в полюсі зачеплення  $\sigma_H$ , а також коефіцієнта перекриття  $\varepsilon_\alpha$ :

$$\sigma_{F1} = 226,56 + 79,9 \cdot \Delta_{C1} - 100,63 \cdot \Delta_{C2} - 23,64 \cdot \Delta_{C1}^2 + 60,44 \cdot \Delta_{C2}^2 - 2,36 \cdot \Delta_{C1} \cdot \Delta_{C2}; \quad (15)$$

$$\sigma_H = 672,5 + 129,6 \cdot \Delta_{C1} + 0,67 \cdot \Delta_{C2} - 18,9 \cdot \Delta_{C1}^2 + 35,33 \cdot \Delta_{C2}^2 - 23,2 \cdot \Delta_{C1} \cdot \Delta_{C2}; \quad (16)$$

$$\varepsilon = 1,54 - 0,0312 \cdot \Delta_{C1} - 0,02667 \cdot \Delta_{C2} - 0,000534 \cdot \Delta_{C1} \cdot \Delta_{C2}. \quad (17)$$

Для урахування впливу визначених експериментально змін геометричних параметрів контактуючих профілів на залишковий ресурс ТЗП було проведено математичне моделювання відповідних кінематичних характеристик за період зачеплення зубців. Отримані для розглянутих варіантів результати показані на рис.6.

Видно, що у порівнянні з першим у другому варіанті мають місце менші рівні відхилень передаточного відношення  $u_{12}$  та коливань аналогів кутової швидкості  $\omega_{q2}$  і кутового прискорення  $\varepsilon_{q2}$  колеса. Відповідні зменшення залишкового ресурсу шестірні не перевищує 3% (для першого варіанту до 8%). На основі аналізу аналогічних результатів для всіх досліджуваних ТЗП встановлено, що зміни геометрії контактуючих поверхонь при різних ступенях зносу оказує негативний вплив на їх залишковий ресурс. У порівнянні з очікуваними величинами, отриманими

Після підтвердження адекватності (перевірка за величиною дисперсії середньоквадратичного відхилення) залежності (15)–(17) використовувались для визначення відповідних показників при ремонтному комплектуванні ТЗП шестірнями та колесами з різними ступенями зносу. З використанням залежностей (15)–(17) були отримані наведені в дисертації відповідні поверхні відгуку, їх бінарні перерізи та комплексний графік, який об'єднує бінарні перерізи для кожного з показників і дозволяє одночасно визначати їх величини для розглянутого варіанту комплектації ТЗП.

Отримані науково-прикладні результати конкретизують існуючі резерви збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач розглянутих серій ТРС і МВРС і напрямки їх практичної реалізації. Їх спрямованість на підвищення надійності ТЗП і тягових приводів в цілому дозволить 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 ЕР2 оцінюваний економічний ефект складає 88300 грн. на один електропоїзд.

## ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено наукове 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. На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Аналіз конструкції і особливостей експлуатації тягових приводів ТРС і МВРС підтвердив значну роль ТЗП в забезпеченні їх надійності. При проведенні досліджень з підвищення ресурсу ТЗП необхідно урахувати особливості конструкції модулів її з'єднання з ГЕД та колісною парою. В якості потрібних для вирішення таких завдань формалізованих описань конструкції тягового приводу доцільно використовувати запропоноване блочно-ієрархічне описання у вигляді «І-АБО» дерева.

2. В якості показників технічного ресурсу ТЗП доцільно розглядати напрацювання шестірні і колеса у вигляді відповідних пробігів  $L_{1,2}$  локомотиву (моторної секції електропоїзду) від початку експлуатації до виникнення граничних зносів зубців. Величину залишкового ресурсу  $L_{1,2\text{зал}}$  при ремонтах ТЗП доцільно також визначати як відповідні різниці між пробігами  $L_{1,2}$  та пробігами  $L_{1,2K}$  на момент контролю технічного стану ТЗП. Запропоновані в дисертаційній роботі математичні описання для розрахункового визначення  $L_{1,2}$  і  $L_{1,2\text{зал}}$  досліджуваних ТЗП в залежності від ступенів зносу шестерень і коліс дозволяють проводити оцінювання впливу проектних і ремонтних пропозицій на підвищення їх ресурсу.

3. За результатами аналізу існуючих методів проектування тягових передач в них виявлена відсутність спрямованості на пошук оптимальних конструктивних параметрів шестірні і колеса, при яких забезпечуються найбільші (при заданих умовах на проектування) значення технічного ресурсу ТЗП. Для визначення таких параметрів запропонований удосконалений метод оптимізаційного проектування ТЗП, який базується на відповідному формалізованому описанні задачі умовної багатомірної оптимізації з обмеженнями. При використанні отриманих математичних описань для побудови відповідного блокувального контуру визначаються оптимальні коефіцієнти зміщення для шестірні  $x_1^*$  і колеса  $x_2^*$ , при яких досягаються найкращі умови взаємодії зубців, характеристики зачеплення і ресурсу ТЗП.



4. За результатами оптимізаційного проектування ТЗП тепловозів серій М62, 2ТЕ116, ТЕП70 і електропоїздів серій ЕР2 і ЕР2Р конкретизовані значення коефіцієнтів зміщення  $x_1^*$  і  $x_2^*$  і відповідні резерви збільшення ресурсу в порівнянні з отриманими при конструюванні коефіцієнтами  $x_1$  і  $x_2$  ТЗП, що знаходяться в експлуатації. При оцінюванні очікуваного ресурсу ТЗП за величиною ресурсу зубчатого колеса його збільшення складає: для тепловозів М62 – до 20%, 2ТЕ116 – до 8%, ТЕП70 – до 16%; для електропоїздів ЕР2 і ЕР2Р – до 11%.

5. Для оцінювання технічного стану і залишкового ресурсу ТЗП при ремонтах доцільно використовувати визначені зноси зубців шестірні  $\Delta_{C1}$  і колеса  $\Delta_{C2}$  за постійними хордами. В порівнянні з прийнятим на ремонтних підприємствах залізниць контролем зносів зубців  $\Delta_1$  і колеса  $\Delta_2$  за ділильними хордами це забезпечить більш точне (на 30-50%) визначення моментів наближення зносів шестерень та коліс до їх граничних значень (контроль умов  $\Delta_{C1} \leq \Delta_{C1max} = 2,5$  мм,  $\Delta_{C2} \leq \Delta_{C2max} = 3,0$  мм) та величини бокового зазору  $\delta$  в зачепленні (контроль умови  $\delta \leq [\delta] = 3,2$  мм). В дослідженнях з відслідкування особливостей формування зносів  $\Delta_{C1,2}$  в визначених ТЗП доцільно використовувати запропоновані матричні описання для обробки масивів з результатами обміру зубців при ремонтах. При цьому зв'язок між результатами обмірів товщин зубців за постійними і ділильними хордами забезпечують отримані математичні залежності виду  $\Delta_{C1,2} = f(\Delta_{I,2})$ .

6. Отримані при опрацюванні понад 2000 експериментальних вимірів товщин зубців ТЗП електропоїздів серії ЕР2 результати дозволили встановити особливості формування зносів зубців шестерень  $\Delta_{C1}$  і коліс  $\Delta_{C2}$  і відповідних ресурсів  $L_1$  і  $L_2$ . З порівняльного аналізу з відповідними розрахунковими величинами встановлено, що найбільша розбіжність результатів не перевищує 5%. В межах розглянутого періоду експлуатації формування зносів  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$  повністю відповідає ділянці сталих зносів «кривої Лоренца». При проведенні ремонтів і прогнозуванні залишкового ресурсу ТЗП необхідно ураховувати, що інтенсивність зношування зубців шестірні суттєво (в 1,6–2 рази) перевищує інтенсивність зношування зубців колеса. Тому забезпечення наближеного до ресурсу колеса  $L_2$  потрібного ресурсу ТЗП передбачає подовження ресурсу вузла шестірні за рахунок використання при ремонтах замість зношеної нової або менш зношеної шестерні з достатнім залишковим ресурсом  $L_{Iрем}$ .

7. Визначальний вплив на залишковий ресурс ТЗП оказує обраний при проведенні ремонтів варіант їх комплектування з розпарованих шестерень і коліс, які мають різні ступені зносу. Для вибору найбільш ефективного варіанту комплектації необхідно ураховувати не тільки відповідні зноси  $\Delta_{C1}$  і  $\Delta_{C2}$ , а ще і попередні зміни геометричних параметрів їх контактуючих профілів по всій висоті зубців. Тому для вирішення такого завдання пропонується використовувати розроблений розрахунково-експериментальний метод, який передбачає: експериментальне отримання цифрових описань реальних контактуючих профілів зубців для визначення їх геометричних параметрів та поетапне використання отриманих математичних описань для визначення їх точок контакту, лінії і показників зачеплення, прогнозування залишкового ресурсу ТЗП з розглянутими варіантами комплектування шестерень і коліс. За результатами дослідження впливу на прогнозований залишковий ресурс різних варіантів комплектування ТЗП електропоїздів серії ЕР2 встановлено, що негативний вплив зміни геометрії профілів в експлуатації приводить до зменшення (в порівнянні з очікуваними, коли підбір пар здійснювався тільки за величиною  $\Delta_{C1,2}$ ) залишкового ресурсу від 2,5–3% (при малих і середніх зносах  $\Delta_{C1,2}$ ) до 13% (при наблизених до граничних зносах  $\Delta_{C1,2}$ ).

8. Аналіз результатів комплексних досліджень, спрямованих на збільшення залишкового ресурсу при ремонтах ТЗП електропоїздів серії EP2 показав, що при розгляданні можливих варіантів їх комплектації шестернями і колесами з різними ступенями зносу важливого значення набуває визначення очікуваних змін основних показників міцності. Для цього доцільно використовувати отримані на основі відповідних математичних планів у вигляді поліномів другого порядку узагальнені математичні моделі для визначення напружень згину зубців шестірні  $\sigma_{F1}$ , контактних напружень при взаємодії зубців в полюсі зачеплення  $\sigma_H$  та коефіцієнту перекриття  $\varepsilon_\alpha$  в залежності від зносів зубців шестірні  $\Delta_{C1}$  і колеса  $\Delta_{C2}$ . Так, при аналізі можливих варіантів ремонту ТЗП, коли колесо мало знос  $\Delta_{C2} = 1,25 \text{ мм}$  і  $L_{\text{зал}} = 594 \text{ тис. км}$ , а знос шестірні досягав граничного зносу ( $\Delta_{C1} = 2,5 \text{ мм}$ ) перший варіант передбачав заміну зношеної шестірні на ремонт з  $\Delta_{C1\text{рем}} = 1,25 \text{ мм}$ . При цьому забезпечувався потрібний залишковий ресурс ТЗП ( $L_{\text{рем}} = L_2$ ) і показники міцності  $\sigma_{F1} = 254 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_H = 825 \text{ МПа}$  та коефіцієнт перекриття  $\varepsilon_\alpha = 1,48$ . Другий варіант ремонту – заміну на нову шестірню ( $\Delta_{C1\text{рем}} = 0$ ). При цьому  $\sigma_{F1} = 210 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_H = 730 \text{ МПа}$ ,  $\varepsilon_\alpha = 1,52$ . Характеризується більш прийнятними показниками міцності, зачеплення, меншими знижками залишкового ресурсу.

9. Розрахований економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи з визначення залишкового ресурсу ТЗП МВРС на підприємствах регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Українська залізниця» складає 88300 грн. на один електропоїзд.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні наукові праці:

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.

*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., Одогов 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 УкрДАЗТ (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. Тищенко 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. *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.*

### **АНОТАЦІЯ**

Громов В.І. Збільшення ресурсу тягових зубчастих передач за рахунок їх оптимізаційного проектування та ремонту. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад та тяга поїздів. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено питанню забезпечення надійності тягового (ТРС) та моторвагонного (МВРС) рухомого складу за рахунок збільшення технічного ресурсу тягових зубчастих передач (ТЗП) на основі їх оптимізаційного проектування і ремонту. Проаналізовано особливості використання ТЗП у складі тягових приводів сучасних тепловозів і електропоїздів. Розроблено формалізоване блочно-ієрархічне описання конструкції ТЗП у вигляді «І-АБО» - дерева, яке доцільно використовувати при вирішенні задач з їх удосконалення. Виділені перспективні напрямки удосконалення існуючих методів проектування і ремонту ТЗП. Запропоновано удосконалений метод для оптимізаційного проектування ТЗП, використання якого дозволило визначити оптимальні значення конструктивних параметрів шестерень і коліс тягових передач ТРС і МВРС розглянутих серій, при яких досягається суттєве збільшення їх технічного ресурсу.

Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення показників роботи ТЗП при їх ремонтних комплектуваннях шестернями та колесами з різними ступенями зносу. Отримано необхідні математичні описання для визначення геометричних параметрів контактуючих профілів зубців, моделювання характеристик та показників їх зачеплення, прогнозування та забезпечення потрібного залишкового ресурсу при ремонтах ТЗП. Достовірність та практична значимість теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

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

## АННОТАЦИЯ

Громов В.И. Увеличение ресурса тяговых зубчатых передач за счет их оптимизационного проектирования и ремонта. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав и тяга поездов. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена вопросу обеспечения надежности тягового (ТПС) и моторвагонного (МВПС) подвижного состава за счет увеличения технического ресурса тяговых зубчатых передач (ТЗП) на основе их оптимизационного проектирования и ремонта.

Проанализированы особенности использования ТЗП в составе тяговых приводов современных тепловозов и электропоездов. Разработано формализованное блочно-иерархическое описание конструкции ТЗП в виде «И-ИЛИ» - дерева, которое целесообразно использовать при решении задач по их усовершенствованию. Выделены перспективные направления усовершенствования существующих методов проектирования и ремонта ТЗП.

Предложен усовершенствованный метод для оптимизационного проектирования ТЗП, который базируется на разработанном формализованном описании задачи условной многомерной оптимизации с ограничениями, использовании соответствующего блокирующего контура и обеспечивает определение коэффициентов смещения шестерни и колеса, при которых достигаются наилучшие условия взаимодействия зубьев, характеристики и показатели их зацепления. При этом разработаны математические зависимости, позволяющие получать блокирующие контуры для оптимизационного проектирования ТЗП разных серий ТПС и МВПС. В качестве показателей технического ресурсу ТЗП рассматриваются соответствующие пробеги локомотива (моторной секции электропоезда) до возникновения предельных износов зубьев шестерни и колеса. Для определения таких пробегов предложено использование уточненных формул, позволяющих оценивать влияние выбираемых при проектировании конструктивных параметров шестерни и колеса, а также характеристик их зацепления. За счет оптимизации таких параметров может быть достигнуто существенное увеличение ресурса ТЗП. Для математического моделирования характеристик зацепления шестерен и колес ТЗП с разными степенями и геометрией износа контактирующих поверхностей зубьев разработаны новые математические описание. Поэтапное использование таких описаний в соответствии с предложенным методом обеспечивает определение точек контакта зубьев, линии и показателей зацепления, что имеет большое значение для прогнозирования показателей прочности и остаточного ресурса ТЗП. Показано, что при проведении ремонтов ТЗП техническое состояние шестерни и колеса целесообразно оценивать по величине износов зубьев по постоянной хорде. Это позволяет более точно контролировать моменты их приближения к предельным износам, а также определять остаточный ресурс.

По результатам оптимизационного проектирования ТЗП тепловозов серий М62, 2ТЭ116, ТЭП70 и электропоездов серий ЭР2 и ЭР2Р конкретизированы оптимальные коэффициенты смещения шестерни и колеса передач, а также соответствующие резервы увеличения ресурса.

Проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование, направленное на определение степеней износа и остаточного ресурса ТЗП электропоездов серии ЭР2. Полученные при обработке более 2000 экспериментальных измерений толщин зубьев ТЗП электропоездов серии ЭР2 результаты позволили установить особенности формирования износов шестерен и колес по постоянной хорде, а также соответствующих ресурсов. Анализ результатов комплексных исследований по увеличению остаточного ресурса при ремонтах ТЗП электропоездов серии ЭР2 показал, что при рассмотрении возможных вариантов их комплектации важное значение приобретает оценка изменения основных показателей прочности и зацепления. Для этого были получены на основе соответствующих математических планов в виде полиномов второго порядка обобщенные математические модели для определения напряжений изгиба зубьев шестерни, контактных напряжений при взаимодействии зубьев в полюсе зацепления и коэффициента перекрытия в зависимости от износов зубьев шестерни и колеса по постоянной хорде.

Полученные научно-прикладные результаты конкретизируют существующие резервы увеличения технического ресурса тяговых зубчатых передач рассмотренных серий ТПС и МВПС и направления их практической реализации. Их направленность на повышение надежности ТЗП и тяговых приводов в целом позволяет сократить количество внеплановых ремонтов локомотивов и моторных секций электропоездов.

*Ключевые слова:* тяговый подвижной состав, тяговый привод, тяговая зубчатая передача, шестерня, зубчатое колесо, технический ресурс, остаточный ресурс.

## ABSTRACT

Gromov V.I. Increase in the resource of traction gears due to their optimization design and repair. - Manuscript.

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

The dissertation is devoted to the issue of ensuring the reliability of the traction (TRS) and motor van (MVRS) rolling stock by increasing the technical resource of traction gears transmission (TGT) on the basis of their optimization designing and repair. The peculiarities of using TGT in the composition of traction drives of modern locomotives and electric trains are analyzed. The formalized block-hierarchical description of their design in the form of "I-OR" of a tree is developed, which is expedient to use in solving problems with their improvement. The perspective directions of improvement of existing methods of designing and repairing the TGT are singled out. An improved method for optimization designing of the TGT was proposed, the use of which allowed to determine the optimal values of the design parameters of gears and wheels of traction transmissions of the TRS and MVRS of the considered batches, at which a significant increase in their technical resource is achieved.

The design and experimental method of determination of the performance indicators of the TGT at their repairs with gears and wheels with different degrees of wear is developed. Necessary mathematical descriptions for determination of geometric parameters of contacting teeth profiles, modeling of characteristics and indicators of their engagement, forecasting and providing the necessary residual resource during TGT repairs are obtained. The reliability and practical significance of theoretical studies is confirmed by the results of relevant experimental studies.

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

ГРОМОВ ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ

УДК 621.833: 629.423.2

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

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



проф. Братченко О.В.

---

Підписано до друку «16» травня 2019 р.  
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.  
Умовн. – рук. арк. 0,9. Обл.–вид. арк. 1,1.  
Замовлення №199. Тираж 150 прим.

---

Видавництво УкрДУЗТ. Свідоцтво ДК № 6100 від 21.03.2018 р.  
Друкарня УкрДУЗТ: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7