

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Львівський інститут
(назва факультету)

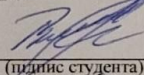
Рухомий склад залізниць і колія
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
«Бакалавр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Методи збільшення ресурсу колісних пар локомотивів у локомотивному депо «Львів-Захід»

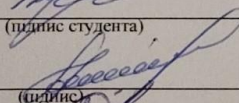
за освітньою програмою Локомотиви та локомотивне господарство
зі спеціальності: 273 “Залізничний транспорт”
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ЛГ 19117


(підпис студента)

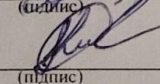
/Руслан ЗЛЕНКО/
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/ст. викладач, Андрій КУЗИШИН/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

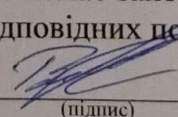
Нормоконтролер:


(підпис)

/викладач, Іван КРАВЕЦЬ/
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

Львів – 2022 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Lviv Institute

(faculty)

Rolling stock of railways and tracks

(department)

Explanatory Note

to Master's Thesis

«Bachelor»

(higher education degree)

on the topic: Methods for increasing the resource of wheel sets of locomotives in the locomotive depot «Lviv-West»

according to educational curriculum «Locomotives and locomotive economy»

in the Speciality: 273 «Railway transport»

(speciality and its code)

Done by the student of the group: LG19117

/Ruslan ZLENKO/

(name, surname)

Scientific Supervisor:

/senior lecturer, Andrii KUZYSHYN/

(position, name, surname)

Normative controller :

/teacher, Ivan KRAVETS/

(position, name, surname)

Supervisors

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)





(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

Lviv – 2022

ЗМІСТ

ПЕРЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ СПРЯМОВАНІ НА ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ В СИСТЕМІ «КОЛЕСО- РЕЙКА».....	9
1.1 Огляд сучасних енергозберігаючих технічних засобів, які використовуються на рухомому складі.....	9
1.2 Технологічні засоби модифікації контакту «КОЛЕСО-РЕЙКА»	14
1.3 Аналіз методів дослідження процесів взаємодії колеса з рейкою	24
2 МЕТОДИКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ «РУХОМИЙ СКЛАД-КОЛІЯ».....	29
2.1 Фізико-математичне моделювання системи «РУХОМИЙ СКЛАД-КОЛІЯ»..	29
2.2 Експериментальні стенди для дослідження динамічних властивостей системи «РУХОМИЙ СКЛАД-КОЛІЯ».....	30
2.3 Дослідження впливу різниці діаметрів бандажів на їх знос	32
3 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ЗАХОДІВ, ЯКІ СПРЯМОВАНІ НА ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ	37
3.1 Покращення умов вписування візків локомотивів в криві ділянки колій.....	37
3.2 Автоматизація процесу лубрикації контакту «КОЛЕСО-РЕЙКА».....	41
3.3 Визначення основних факторів, які впливають на ресурс колісних пар локомотивів	43
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	46
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	47

0041.190541.01.ВКР.ПЗ				
Зм	Арк	№ документа	Підпис	Дата
Розробив		Руслан ЗЛЕНКО		29.06.22
Консульт				
Керівник		Андрій КУЗИШИН		29.06.22
Т. контр.		Іван КРАВЕЦЬ		06.07.22
Іав.каф.		Олена БАЛЬ		1.06.22
Методи збільшення ресурсу колісних пар локомотивів у локомотивному депо «Львів-Захід»				
		Літера	Аркуш	Аркушів
			5	49
ЛІ УДУНТ				

**(ЗАВДАННЯ НА РОБОТУ (ОКРЕМИЙ ДОКУМЕНТ, ОДИН ЛИСТ З
ДВОХ СТОРІН ЗГІДНО ШАБЛОНУ)**

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
(БУДЕ РОЗРОБЛЕНО ГЗЯОП)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:

50 с., 18 рис., 2 табл., 23 джерел.

Об'єкт дослідження – колісні пари тягового рухомого складу.

Мета роботи – дослідження комплексної задачі, а саме розглянути технологічні, конструктивні схеми та засоби покращення умов взаємодії рухомого складу з рейками.

Методи дослідження – математичні методи дослідження умов взаємодії рухомого складу з рейковою колією, враховуючи значну кількість факторів.

Проаналізовано існуючі технологічні засоби, які спрямовані на збільшення ресурсу в системі «колесо-рейка». Використовуючи метод рангової кореляції було визначено основні фактори, які впливають на ресурс колісних пар локомотивів, та як наслідок запропоновано використовувати автоматичний гребне-рейкозмащувач.

Результати роботи можуть бути використані під час проектування та експлуатації локомотивів, що дозволить збільшити ресурс їх колісних пар.

Ключові слова: КОЛІСНА ПАРА, РЕСУРС, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ПРОКОВЗУВАННЯ, КРИВА ДІЛЯНКА КОЛІЇ

**ПЕРЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ФМТ	Фрикційний модифікатор тертя
ККД	Коефіцієнт корисної дії
ММ	Мастильний матеріал
СЛ	Стационарний лубрикатор
ТФМС	Транспортні фрикційні механічні системи
РС	Рухомий склад
ТЕД	Тяговий електричний двигун
АГРЗ	Автоматичний гребне-рейкозмашувач

						Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Збільшення ресурсу колісних пар є стратегічно важливим завданням залізничної галузі. Визначення раціональних режимів взаємодії рухомого складу та колії, розробка систем, засобів і матеріалів, що знижують зношування елементів колії та ходових частин рухомого складу, удосконалення методів збільшення ресурсу колісних пар рухомого складу являють собою важливу практичну цінність. Реалізація цих завдань дозволяє забезпечити ряд позитивних ефектів: запобігання вкочування гребеня колеса на головку рейки; збільшення ресурсу колісних пар рухомого складу; зниження опору руху поїзда у кривих та прямих ділянках колії та, отже, економія паливно-енергетичних ресурсів; підвищення рівня безпеки руху залізничним транспортом; покращення екологічних показників залізничного транспорту (зниження шуму, вібрації, забруднення довкілля) та інших.

Від величини значення коефіцієнта тертя в контакті колесо-рейка залежать важливі техніко-економічні показники системи «залізничний рухомий склад – колія», а також надійність та довговічність її елементів.

Для реалізації сил тяги та утримання рухомого складу на рейках колесо має дві робочі поверхні: фрикційну (поверхню кола кочення) та антифрикційну – поверхню гребеня колісної пари. При виконанні процесу гребенезмазування, за рахунок відсутності конструктивної межі між поверхнями гребеня і кола кочення дуже висока ймовірність попадання мастильного матеріалу, особливо рідкого, на тягову поверхню. У разі попадання мастильного матеріалу на тягову поверхню колеса відбувається значне падіння коефіцієнта тертя, а відтак і коефіцієнта зчеплення.

У зв'язку з різними функціями, які повинні виконувати поверхні гребнів коліс та кола кочення вимоги до показників взаємодії поверхонь гребеня та кола кочення протилежні. Для забезпечення відносно низького рівня опору руху поїзда величина коефіцієнта тертя поверхонь гребеня колеса та бокової поверхні головки рейки лежить у діапазоні 0,12–0,14. З метою забезпечення максимального рівня тягового зусилля коефіцієнт тертя (зчеплення) має бути на

						Арк.
						8
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

рівні 0,27 та більше. При цьому має бути реалізований високий рівень постійності значень вищезгаданого коефіцієнта тертя.

Крім того, для виключення умов вкочування колеса та зниження величини інтенсивності зношування гребнів коліс та рейок, а також зниження рівня втрат тягової енергії, особливо в кривих ділянках колії потрібно максимально знизити тертя між гребенем колеса та боковою поверхнею головки рейки. Умови контактування робочих поверхонь коліс та рейок визначають багато в чому їхній ресурс.

Отже, метою даної роботи є дослідження комплексної задачі, а саме розглянути технологічні, конструктивні схеми та засоби покращення умов взаємодії рухомого складу з рейками.

Об'єктом дослідження в даній роботі є колісні пари тягового рухомого складу.

Предметом дослідження являються підходи щодо дослідження умов взаємодії колісної пари з рейковою колією, з точки зору збільшення їх ресурсу.

						Арк.
						9
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСОБІВ, ЯКІ СПРЯМОВАНІ НА ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ В СИСТЕМІ «КОЛЕСО-РЕЙКА»

1.1 Огляд сучасних енергозберігаючих технічних засобів, які використовуються на рухомому складі

Впровадження та ефективне використання енергозберігаючих технологій визначає динамічний розвиток залізничної галузі. Застосування сучасних енергозберігаючих технічних засобів та систем на рухомому складі забезпечує комплексну ефективність перевізного процесу у широкому діапазоні експлуатаційних факторів [1].

Застосування ефективних технологій змащування контакту гребеня колеса із рейкою забезпечує зниження до 10% витрат енергії на тягу локомотивів; дозволяє в 2-10 разів збільшити ресурс колісних пар, підвищити рівень безпеки в системі «колія – рухомий склад», особливо в кривих ділянках колії, значно знизити рівень шумового впливу на навколишнє середовище [2].

Розважування екіпажної частини локомотивів покращує умови взаємодії тягового рухомого складу з верхньою будовою колії, забезпечуючи зменшення втрат тягової потужності при проходженні кривих та прямих ділянок колії. Розважування полягає в рівномірному розподілі маси локомотива на кожне колесо і впливає на силу натиснення колісної пари на головку рейки при проходженні локомотива в кривій, що значно підвищує стійкість локомотива до буксування. На локомотивах проводиться поздовжнє та поперечне розважування по колесах та осях кожної секції.

Використання раціональних способів обточування колісних пар та шліфування рейок, оптимізація та застосування енергооптимальних профілів бандажів колісних пар та рейок дозволяє покращити умови взаємодії колісних пар з рейками та зменшити знос гребнів колісних пар та головок рейок. Геометрія вихідних профілів коліс та рейок, а також динаміка її зміни значно впливають на експлуатаційні витрати. Навіть незначні зміни геометрії системи колесо-рейка мають значні наслідки.

						Арк.
						10
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Формування раціональних профілів коліс та рейок, їх збереження, забезпечують реалізацію умов формування тенденції зниження бокових сил та напружень при взаємодії коліс та рейок, а також динамічного впливу рухомого складу на рейкову колію.

Так прокат (знос поверхні кола кочення) коліс збільшує витрати тягової енергії і, відповідно, витрати енергоносіїв, інтенсивно збільшується знос гребнів коліс і рейок, відбувається зростання поперечних сил у системі колія - рухомий склад, підвищується ймовірність сходу рухомого складу з рейок. Ненормативне зношування поверхні кола кочення колеса локомотива створює небезпеку сходу та руйнування елементів колії та рухомого складу при проходженні стрілочних переводів, перехідних стиків та інших місць залізничної колії. Внаслідок вищесказаного прокат може стати однією з основних причин погіршення стану внутрішніх рейок кривих. Колеса з ненормативним прокатом і тонким гребенем у кривих з номіналом вище 1520 мм можуть викликати високу контактну напруженість через неузгоджені геометрії коліс і рейок, а також через збільшення кутів набігання коліс на рейки. Експлуатація колісних пар з дефектами на поверхнях кіл кочення коліс може призвести до руйнування коліс через інтенсивні динамічні навантаження, а також пошкодження елементів колії і рухомого складу. Динамічна взаємодія коліс локомотивів знижує термін служби шпал (особливо залізобетонних та найбільш інтенсивно залізобетонних шпал, що лежать на штучних спорудах залізничної колії). Інтенсивно зношуються і самі колеса. Дані явища ведуть до зростання витрат на поточне утримання колії та рухомого складу.

Динамічні явища при взаємодії колії та рухомого складу призводять до розладу елементів ходової частини локомотивів, зокрема елементів гальмівної системи, збільшуються втрати тягової потужності локомотива. Обточування коліс для відновлення номінального профілю продовжує ресурс колісних пар. Так, наприклад, після зношування поверхні кола кочення по радіусу більш ніж на 2,28 мм на ряді залізниць світу проводять обточування коліс. Ця технологія, а також ряд інших заходів можуть призвести до помітного продовження

						Арк.
						11
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

довговічності та працездатності колісних пар. Зокрема застосування інноваційних ефективних технологій використання фрикційних модифікаторів тертя ФМТ, альтернативних технологій підвищення сили тяги шляхом подачі піску під колеса локомотивів, забезпечує зниження на 2-3% втрат тягової енергії, в 3-5 разів знижується інтенсивність зношування, а також значно знижується інтенсивність динамічних навантажень, повністю усуваються фрикційні автоколивання в силовому приводі за рахунок динамічних процесів, що виникають при руйнуванні колесом частинок піску. Асоціація американських залізниць, Центр транспортних технологій, фахівці залізничного транспорту Великобританії працюють у галузі визначення раціональних допусків на профілі коліс, а також оптимізації геометрії самих профілів коліс та рейок, а також геометрії залізничних колій у поперечному та поздовжньому напрямках, а також над визначенням раціональних значень колії, у тому числі у кривих ділянках колії. При цьому особлива увага приділяється контакту (точніше фактичній площі дотику колеса та рейки). При цьому основним завданням (цільовою функцією оптимізації) є завдання забезпечення значень контактних напружень нижче граничних значень (рисунок 1.1).

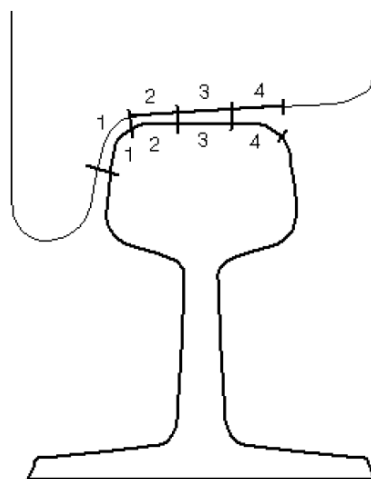


Рисунок 1.1 – Зони рейок та коліс з різним характером зносу залежно від рівня контактних напружень

Знаючи значення контактних напружень, це дозволяє з великим ступенем достовірності прогнозувати: інтенсивність зношування робочих поверхонь коліс

						Арк.
						12
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

та рейок, рівень втрат тягової енергії, ймовірність втомних явищ та пошкоджень, а також знижувати витрати на експлуатацію системи «колесо-рейка», забезпечуючи при цьому рівень контактних напружень нижче допустимого. Забезпечення оптимальних допусків на геометрію профілів колеса та рейки покращує умови взаємодії контактних зон, що збільшує термін служби коліс та рейок [3].

Додатковими заходами, що дозволяють суттєво знизити знос колісних пар та рейок, є технології магнітоплазмового зміцнення бандажів колісних пар локомотивів у зоні зносу. Установки для термічного зміцнення колісних пар дозволяють проводити зміцнення гребнів бандажів колісних пар як з викочуванням, так і без викочування з-під локомотива. Зміцнення піддається зона зносу, тобто зона переходу від робочої поверхні гребеня до поверхні кочення.

Пристрій для безабразивної ультразвукової обробки металів призначений для фінішної обробки на типовому верстатному обладнанні конструктивних форм поверхонь, забезпечує обробку поверхонь виробів до отримання заданого рівня шорсткості з одночасним зміцненням структури поверхонь. Зміцнення бандажу засноване на високому питомому тиску в зоні контакту інструменту та бандажу, ефекті місцевої деформації металу, внаслідок чого відбувається зміна кристалічної решітки та підвищення твердості оброблюваної поверхні з 320 до 410 НВ. Дані заходи забезпечують обробку поверхонь бандажів колісних пар з підвищенням їхньої твердості та зносостійкості [4].

Реостатні випробування – найважливіша частина системи технічного утримання та ремонту тепловозів. Якість виконання реостатних випробувань визначає надійність та економічність роботи тепловозів в експлуатації.

Застосування антифрикційних мастильних матеріалів з різними присадками у внутрішніх вузлах тертя механізмів дозволяє знизити втрати енергії в них, відповідно підвищити ресурс і ККД механічних систем [5].

До ресурсозберігаючих технологій на тяговому рухомому складі також відноситься застосування рекуперативного та реостатного гальмування, системи ослаблення поля, які дозволяють економити електроенергію та гальмівні колодки рухомого складу.

						Арк.
						13
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Відомо, що тягові електричні двигуни постійного струму мають властивість зворотності, тобто можуть працювати в режимі генераторів. З метою економії тягової енергії останні серії електровозів здійснюють режим рекуперації при прямуванні по ділянках з ухилом та при гальмуванні, тобто тягові електродвигуни працюють у режимі генераторів. В даному випадку кінетична енергія та потенціальна, перетворюються на електричну та передаються в контактну мережу на підстанцію. Гальмування та передача рекуперативної енергії, при роботі електродвигуна в генераторному режимі, на резистори та перетворення її на теплову називається реостатним гальмуванням.

Застосування ослаблення поля (послаблення збудження) дозволяє плавно та енергоефективно збільшувати швидкість двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Будь-яка машина постійного струму є одночасно двигуном, так і генератором. Виникає проти-ЕРС, що обмежує струм, яка також спрямована протилежно до напруги, що прикладається до обмоток електродвигуна. При підключенні резисторів паралельно до обмоток збудження (шунтування) знижується проти-ЕРС і, отже, струм якоря зростає, збільшуючи його швидкість обертання. Поле, яке створюється обмотками збудження, стає менше, а поле, яке створюється якорем – більше. Ослаблення збудження на малих оборотах призводить до зменшення сили тяги та зниження прискорення при розгоні, що використовується для плавного рушення з місця рухомого складу.

Єдина комплексна система управління та забезпечення безпеки руху на тяговому рухомому складі поєднує у своєму складі та поєднує функціонування системи автоведення, системи автоматичного управління гальмуванням поїзда, комплексного локомотивного пристрою безпеки та телемеханічної системи контролю пильності машиніста. Через комплексний підхід система дозволяє забезпечити збільшення пропускної спроможності на ділянках залізниць на 13%, а швидкості руху на 5-6,5%, скорочення інтервалу між поїздами, виявлення та реєстрацію значних відступів в утриманні колії та екіпажу тягового рухомого складу, підвищуючи таким чином енергоефективність та безпеку перевізного процесу [6].

						Арк.
						14
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

1.2 Технологічні засоби модифікації контакту «колесо-рейка»

Розглянемо технологічний процес, який спрямований на збільшення ресурсу системи «колесо-рейка», – зокрема лубрикацію (антифрикційне модифікування) на мережі залізниць. Світовий досвід показує, що застосування антифрикційного модифікатора – мастильного матеріалу (ММ) – найбільш ефективний спосіб захисту від підвищеного зношування гребнів коліс і бокових поверхонь головок рейок [7-9].

Перша технологічна схема лубрикації реалізується в стаціонарних лубрикаторах (СЛ), що встановлюються перед кривими малого радіусу, в яких реалізується контактна схема нанесення ММ на поверхню тертя гребнів коліс та рейок.

Стаціонарний колійний лубрикатор СПР-02 (рисунок 1.2-1.3), виготовлений з метою створення рейкозмащувача нового покоління, що дозволяє суттєво, на порядок, збільшити ефективність роботи стаціонарних колійних лубрикаторів у порівнянні з обладнанням, що вже існувало в експлуатації.

Важливою характеристикою системи СПР-02 є відсутність прямого контакту робочих органів системи та елементів рухомого складу. Ця особливість є позитивним фактором, оскільки збільшує надійність системи. У системі СПР-02 використовується безконтактна схема виявлення коліс, для чого використовуються індуктивні безконтактні датчики. На відміну від інших лубрикаторів у системі СПР-02 немає живильної пластини, що усуває обмеження щодо його монтажу. У зв'язку з вищесказаним можна зробити висновок про можливість встановлення системи СПР-02 у середині кривої.



Рисунок 1.2 – Стаціонарний рейкозмащувач СПР-02

						Арк.
						15
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Шафа стаціонарного рейкозмащувача СПР-02

Лубрикатор СПР-02 реалізує подачу мастильного матеріалу в контакт колеса з рейкою як на парному, так і непарному напрямках. Мастильний матеріал системою СПР-02 подається за допомогою форсунок (три форсунки). Форсунки включаються автоматично послідовно і змащують весь гребінь коліс, що обробляється, що підвищує ефективність технології лубрикації контакту гребеня колеса і бокової поверхні головки рейки. Для забезпечення якісної лубрикації форсунки працюють у спеціальному режимі, який реалізує автоматична система за спеціальною програмою та алгоритмом роботи форсунок на парному та непарному напрямках та не залежать один від одного. Системи СПР-02 експлуатуються без обслуговуючого персоналу на перегонах з великою вантажонапруженістю, тим самим істотно знижуючи вплив людського фактору на ефективність роботи системи.

Дана схема має низку переваг, серед яких у першу чергу слід виділити можливість використання пластичних (консистентних) ММ, відсутність високих динамічних навантажень на конструкцію лубрикатора, відносна простота заправки ММ систем та практично необмежений об'єм разової заправки. У той же час дані системи мають ряд недоліків. Так нерідко

						Арк.
						16
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

спостерігаються випадки видавлювання ММ на тягову поверхню та в баласт, забруднюються безпосередньо прилеглі ділянки рейок. Замаслювання баластної призми призводить до змін її дренажних властивостей, демпфуючих характеристик, а також до просідання шпал.

Змащування рейок втрачає ефективність на відстані понад 1000 м від лубрикатора. Температурна залежність в'язкості ММ та пов'язані з цим проблеми експлуатації стаціонарних лубрикаторів, великі витрати на обслуговування (заправка ММ, а також енергія для їх роботи), активне скидання ММ із гребнів коліс відцентровими силами, особливо на підвищених швидкостях руху рухомого складу (60 км/год і більше). Наявність явища скидання відцентровими силами ММ практично виключає застосування цих систем на ділянках із підвищеним швидкісним рухом.

Друга технологічна схема лубрикації є безконтактною, тобто ММ наноситься на робочі поверхні головки рейки та колеса робочим органом, що знаходиться на базовому рухомому складі. Так наприклад:

- системи пересувних рейкозмащувачів;
- бортові лубрикатори;
- системи, що знаходяться в стаціонарному стані (наприклад, СЛ), при цьому між вихідним отвором робочого органу і поверхнею, що змащується, є повітряний зазор від 10 до 20 мм.

Системи призначені для нанесення консистентних рідких ММ на внутрішню бокову поверхню рейок або гребінь колеса з метою:

- зниження зносу робочих поверхонь рейки та колеса рухомого складу;
- збільшення пробігу колісних пар рухомого складу до ремонту, пов'язаного з обточуванням коліс;
- зниження енергетичних витрат на тягу поїздів;
- зниження високочастотних шумів, що виникають у контакті «колесо-рейка»;
- збільшення терміну служби рейок.

Існує ряд недоліків при використанні локомотивів-рейкозмащувачів.

						Арк.
						17
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Перший і головний недолік – існуюча технологія лубрикації з використанням локомотивів-рейкозмащувачів, при якій дві - три нитки графіка визначені для їх проходу, значно ускладнює процес ущільнення графіка руху і перешкоджає зростанню інтенсивності перевізного процесу, так як необхідно введення обмеження швидкості руху локомотива-рейкозмащувача при виконанні ним технологічного процесу лубрикації. У літній період, коли необхідно надавати «вікна» для колійних робіт, графік роботи засобів лубрикації падає на 50-60%, при цьому інтенсивність зношування гребнів колісних пар локомотивів зростає на 25-30%, а ущільнення графіка руху виявляється під великим питанням.

До інших недоліків можна віднести обмеження по швидкості руху пересувних рейкозмащувачів (у технологічному режимі змащування відбувається при 40–60 км/год), обмежений ресурс ММ (видалення мастильного шару з бокової грані рейки відбувається задовго до наступного проходу рейкозмащувача, особливо на ділянках зі складним профілем колії) . Окремо як один з істотних недоліків використання локомотивів-рейкозмащувачів варто виділити питомі високі витрати на лубрикацію рейок, експлуатацію рейкозмащувача, капітальні витрати на модернізацію рухомого складу, що значно знижують ефективність даних технічних засобів і роблять нерентабельним їх використання на ділянках з малою інтенсивністю руху.

При безконтактній схемі подачі ММ в зону контакту «колесо-рейка» і наявності зазору в діапазоні до 5 мм сумарна швидкість вітрового навантаження і швидкість руху рухомого складу призводять до явища викиду ММ із зони тертя і в ряді випадків виключає попадання ММ на поверхню тертя. Таким чином, ММ забруднює баластну призму і потрапляє на тягову поверхню, призводячи до негативних наслідків.

Усі ММ, що подаються дистанційно, не призначені для роботи у відкритих вузлах тертя, також для подачі вони повинні мати характеристики рідкого ММ або, в крайньому випадку, консистентного, а рідкий ММ не є ефективним у відкритих вузлах тертя. Рідкий ММ ефективно працює у закритих вузлах тертя в режимах граничного та рідинного тертя (у зубчастих передачах, підшипниках

						Арк.
						18
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

ковзання тощо). Виникнення таких режимів тертя у відкритій системі «колесо-рейка» дуже утруднене під час експлуатації.

Для більшої ефективності рідкі ММ, після нанесення на поверхню тертя, вимагають часу на утворення робочого стану, тобто вони повинні висохнути. Таким чином, у динаміці робочий стан рідкого ММ-покриття не встигає повноцінно сформуватися, до того ж відцентрові сили розносять частину ММ.

Контактні навантаження в системі «колесо-рейка» часто перевищують допустимий рівень контактних напружень, що веде до пластичного деформування матеріалів коліс і рейок, викликаючи такі явища, як гострокінцевий накат у коліс при деформації матеріалу колеса і напливи нижньої частини бокової поверхні головки рейки.

Гострокінцевий накат виникає в результаті зношення та зниження механічних характеристик робочих поверхонь гребеня колеса та бокової поверхні головки рейки. У зв'язку з перевищенням нормативних рівнів контактних напружень гребінь колеса та головка рейки деформуються, утворюючи дефект та гострокінцевий накат (рисунок 1.4), а на головці рейки – напливи нижньої частини.

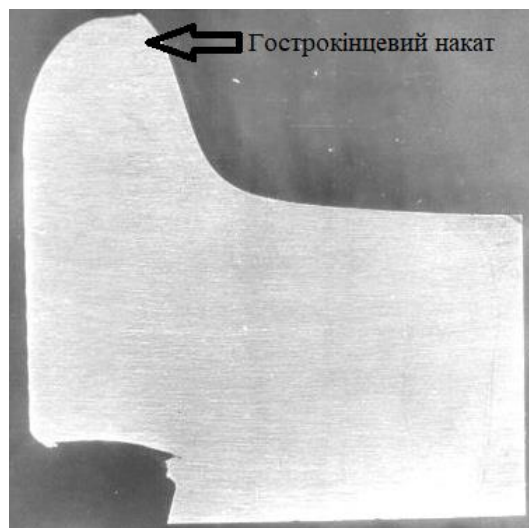


Рисунок 1.4 – Гострокінцевий накат – поперечний переріз зношеної поверхні гребеня колеса

Контактні поверхні гребеня та рейки в результаті їх ненормативного зносу набувають форми, що значно відрізняється від первісної. Зміщення матеріалу

						Арк.
						19
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

бокової поверхні головки рейки відбувається вниз, і у зоні закруглення формуються напливи з допомогою деформації матеріалу рейки (рисунок 1.5). Внаслідок названих вище деформаційних процесів, а також активного зношування відбувається зміна початкового профілю рейки.

Довговічність робочих поверхонь колеса та рейки підвищується при усуненні схоплювань I та II роду (атермічного та термічного). Виникнення, як наслідок, заїдань можна усунути на основі використання оптимальних схем лубрикації. Введенням в контакт робочих поверхонь колеса та рейки третього тіла у вигляді фрикційного та антифрикційного модифікаторів виключається пряме контактування поверхонь матеріалів колеса та рейки [10].



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд поверхні бокової грані рейки

Саме тому у системі тертя «колесо-рейка» має бути ММ із спеціальними властивостями за несучими характеристиками, що ефективно працює при контактних навантаженнях до 2-3 ГПа. Рідкі та консистентні ММ не мають таких несучих характеристик.

До недоліків при змащуванні твердими ММ відносяться:

- високий рівень динамічних навантажень, що впливають на конструкцію лубрикатора при його монтажі на вісь колісної пари;
- погана сумісність твердих ММ різного складу;
- можливість видавлювання рідкої фракції із твердого ММ під впливом

						Арк.
						20
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

високих тисків.

Однак можна відзначити такі переваги твердих ММ:

- мають високий економічний показник;
- зручні у зберіганні та використанні;
- легко дозуються залежно від експлуатаційних характеристик ділянки;
- не переносяться на поверхню кочення;
- не впливають на контактну-втомну ушкодженість матеріалів рейок і коліс, що властиво рідким ММ.

У складі плівкових ММ антифрикційних добавок може бути набагато більше ніж рідких і твердих компонентів. Полімерні плівки зберігаються на рейці набагато довше, періодичність їхнього нанесення може досягати 30 днів і більше [11]. В експлуатаційних умовах полімерна плівка зберігається на рейці в'ятеро довше, ніж звичайний пластичний ММ. Аналіз закордонного використання ММ показує, що визначальним ефективну роботу системи змащування фактором є вид ММ [12-13]. Таким чином, ретельний підбір характеристик ММ є необхідною умовою ефективної взаємодії колеса з колією. При цьому доцільніше використовувати тверді ММ [14-15].

На сьогоднішній день питання розробки нових технологій лубрикації, що відповідають сучасним вимогам, в умовах зростання швидкостей рухомого складу та вантажонапруженості ділянок мережі залізниць є відкритим. Сучасні вимоги щодо технологічності, ефективності та практичності систем лубрикації, при забезпеченні відповідних екологічних показників, включають такі властивості, як широкий діапазон температур експлуатації, можливість використання у всіх швидкісних режимах, точність локалізації ММ, при збереженні сталості його властивостей, складу і стану і високий ресурс разового нанесення. Крім того, необхідне впровадження комплексної технології гребне-рейкозмащування, яка заснована на використанні пасажирських поїздів (приміських електропоїздів та поїздів далекого прямування) як базовий рухомий склад, що здійснює процес лубрикації рейок головних колій, та маневрових тепловозів для лубрикації станційних колій.

						Арк.
						21
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Ефективним напрямком покращення умов контактування колеса з рейкою є фрикційні та антифрикційні модифікатори поверхонь тертя, що використовуються в Канаді, Франції та США (Centra с VHPF, HPF, LCF), створені компанією Portec Railway Maintenance Products і фірмою Kelsan Lubricants (рисунок 1.6-1.7) [16-17].

Модифікатори тертя поділяються на три основні групи: LCF – з коефіцієнтом тертя менше ніж 0,2; HPF – з коефіцієнтом тертя 0,2 ... 0,4; VHPF – з коефіцієнтом тертя 0,4 і більше при значних проковзуваннях колеса. Нове покоління модифікаторів тертя зазвичай застосовують у формі стрижня і наносять на колеса за допомогою лубрикаторів, що встановлюються на локомотивах, або рідкому вигляді наносять за допомогою ручних аплікаторів на рейки. Передбачається, що модифікатори тертя мають хороші утримуючі здібності та достатню водостійкість, щоб витримувати багаторазові контактні дії (зберігатися на поверхні головки рейки після проходження 4000 коліс). Величина тертя залежить від товщини шару, який створює кожен з модифікаторів та швидкості проковзування коліс рухомого складу.



Рисунок 1.6 – Модифікатори тертя VHPF, HPF, LCF



Рисунок 1.7 – Рідкі модифікатори тертя Centra с HPF, LCF та пристрої для їх нанесення: ліворуч – Centra с HPF, праворуч – Centra с LCF

						Арк.
						22
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Спеціалізовані модифікатори тертя типу HRF ефективно покращують умови тертя і зменшують рівень шуму на колії з рейками, схильними до хвилеподібного зносу і проковзування коліс. Тим не менш, кожен модифікатор тертя такого типу не може задовольняти широкий набір вимог охорони навколишнього середовища та експлуатації колії. У разі застосування модифікаторів такого типу з коефіцієнтом тертя більше 0,2 виникають проблеми, пов'язані з прихоплення локомотивних коліс, динамічним гальмуванням, хвилеподібним зносом рейок. До цього часу ще розроблено практичні методи ступінчастого зниження необхідного для локомотивів високого коефіцієнта тертя середнього рівня, прийняттого для вагонів.

У випадках, коли використовуються фрикційні модифікатори тертя з залишковим ефектом адгезійних зв'язків, виникає додатковий опір руху поїзда, тобто колеса вагонів, що прямують за локомотивом, «прилипають» до рейок. Крім того, при одночасному використанні як активізатора зчеплення піску і подачі модифікатора тертя, що володіє підвищеними адгезійними властивостями, відбувається налипання піску на поверхні тертя колеса, в тому числі на гребінь, що створює умови для абразивного зношування в зоні контакту колеса з рейкою.

У роботі [18] пропонується при вписуванні в криву використовувати антифрикційний модифікатор тертя з метою зниження поперечних сил крипа, спрямованих у бік зовнішньої рейки.

За допомогою лубрикації гребнів коліс та бокової поверхні зовнішньої рейки пропонується зменшити знос коліс та рейок, знизити витрату паливно-енергетичних ресурсів на тягу поїздів, підвищити стійкість колеса від вкочування на головку рейки, а також покращити екологічні показники у роботі залізниць завдяки зниженню рівня шуму.

Комбінована лубрикація передбачає регулювання трибологічного стану контактних поверхонь. Для цього на бокову грань головки зовнішньої рейки в кривій наноситься мастильне покриття (лубрикант), що знижує коефіцієнт тертя до значень, при яких процес схоплювання металів колеса та рейки не

						Арк.
						23
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

відбувається. На поверхню кочення внутрішньої рейки в кривій наноситься мастильне покриття (модифікатор тертя). Відбувається стабілізація коефіцієнта тертя на рівні, з одного боку, що знижує опір руху наступного за рейкозмащувачем складу, а з іншого боку, що забезпечує необхідний коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою. Причому лубрикант можна наносити як перед колісною парою, так і разом із модифікатором тертя після останньої колісної пари локомотива. Підвищити ефективність лубрикації можна додатковим нанесенням тертя модифікатора на поверхню кочення внутрішньої рейки. Комбінована лубрикація, на відміну від традиційної, знижує боковий вплив рухомого складу на рейкову колію.

Зменшення впливу рухомого складу на колію у перпендикулярному напрямку до осі рейки відбувається шляхом перерозподілу по колесах сил поздовжнього та поперечного крипу. При цьому реалізується момент, який повертає колісну пару і візок від зовнішньої рейки, і зменшуються поперечні сили крипа, спрямовані у бік зовнішньої рейки. Система комбінованої лубрикації суттєво знижує боковий вплив на колію рухомого складу, що безпосередньо підвищує безпеку руху.

Зростання ефективності системи «колія – рухомий склад» досягається головним чином за рахунок збільшення вагових норм і швидкостей руху поїздів, що визначає високий рівень вимог до максимальних фрикційних якостей поверхонь кочення коліс локомотивів, тобто зчіпних якостей системи «колесо-рейка».

Аналізуючи спектр заходів, способів і технологій, створених для підвищення сили тяги локомотива, можна дійти до висновку, що сьогодні немає досконалих способів управління процесами тертя.

Переважне використання як активізатора зчеплення кварцового піску веде до різкого зростання інтенсивності абразивного зношування поверхонь тертя колеса і рейки, а також супроводжується інтенсивним забрудненням верхньої будови колії, баластової призми, погіршення дренажних властивостей баласту.

						Арк.
						24
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

1.3 Аналіз методів дослідження процесів взаємодії колеса з рейкою

При розгляді динаміки взаємодії колеса локомотива з рейкою необхідно розглядати дві пари тертя. Корисне тертя – фрикційна взаємодія поверхні кола кочення колеса локомотива та «паразитне» тертя – фрикційна взаємодія гребеня колеса з головкою рейки.

Дане положення, відсутність конструктивної межі між зонами контакту колеса та рейки, де реалізуються «паразитне» та корисне тертя, ускладнює процес створення технології підвищення ефективності фрикційної підсистеми «колесо-рейка».

Антифрикційні властивості ММ, потрапляючи на бокові поверхні, створюють умови зриву зчеплення, а фрикційні, потрапляючи на гребінь колеса, провокують зростання втрат тягової енергії, потрапляючи в контакт гребеня колеса і головки рейки, де реалізується «паразитне» тертя. Практично для матеріалів, аналогічних за своїми фрикційними властивостями, потрібно реалізувати протилежні ефекти:

– у зоні, що формується тяговими поверхнями кола кочення та головки рейки, для забезпечення реалізації максимального рівня гарантованого тягового зусилля необхідно набути стабільного значення сили зчеплення (коефіцієнт зчеплення 0,27–0,45);

– у контакті гребеня колеса з боковою поверхнею головки рейки необхідно отримати мінімально допустимий рівень паразитного тертя (0,13-0,16).

Процеси реалізації сил зчеплення, тягового зусилля, фрикційної взаємодії колеса локомотива з рейками є складним, дуже актуальним і ще повністю не вирішеним завданням галузевого рівня. Розробка комплексних заходів, спрямованих на підвищення тягового зусилля локомотивів, ресурс колісних пар, зниження втрат тягової енергії, збільшення терміну служби рейок є однією з основних галузевих проблем. Вирішення вищеназваної комплексної задачі можливе лише на базі фундаментальних досліджень. Необхідно провести аналіз досвіду вирішення даної проблеми у нас і за кордоном, вибрати раціональні та

						Арк.
						25
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

найбільш перспективні напрямки, поєднавши наявні відомості з реалізацією даних фундаментальних досліджень. В результаті проведеного аналізу та наявних результатів досліджень у галузі оптимізації умов взаємодії колеса та рейки, можуть бути наступні рішення:

– оптимізація конструктивних характеристик системи «колія – рухомий склад» з урахуванням динаміки взаємодії колеса з рейкою та врахуванням взаємовпливу динамічних процесів, що протікають у всіх підсистемах системи «колія – рухомий склад»;

– оптимізація фізико-механічних характеристик матеріалів колеса та рейки шляхом удосконалення технології механічної та хімічної обробки матеріалів колеса та рейок;

– застосування фрикційних та антифрикційних модифікаторів поверхонь тертя з метою управління процесами тертя кочення з проковзуванням.

Як відомо, динамічні процеси, що протікають у підсистемах колії та рухомого складу, – взаємовпливові та взаємопов’язані. Так, наприклад, динамічні процеси, що протікають при взаємодії колії і рухомого складу, істотно впливають на динамічні процеси взаємодії контактуючих поверхонь тертя колеса і рейки.

Динамічні явища можуть спричинити зрив зчеплення колеса з рейкою. Таким чином, маючи інформацію про динамічні процеси, що відбуваються в підсистемах колії та рухомого складу, можна з великим ступенем достовірності прогнозувати динамічні характеристики тягових приводів локомотивів.

Складна динаміка, пов’язана з рухом, жорсткі вимоги до цих систем з точки зору їх безпеки, великі габарити, широкі діапазони температур навколишнього середовища створюють значні труднощі та трудомісткість у вирішенні завдань з дослідження, розрахунку та оптимізації параметрів даних транспортних фрикційних механічних систем (ТФМС).

Серед чисельних методів пошуку оптимальних рішень не існує універсального, який дозволив би ефективно вирішувати задачу оптимізації будь-якої механічної системи [19].

						Арк.
						26
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Процеси тертя перебувають у суттєвій нелінійній залежності більш ніж від двадцяти нелінійно взаємопов'язаних між собою факторів, що впливають один на одного, а також від основних динамічних характеристик механічної системи.

Провести комплексні дослідження натурних ТФМС у лабораторних умовах дуже складно, тому що вони мають великі габарити та у робочому положенні перебувають у русі. Враховуючи вищезазначене, найбільш ефективними методами розрахунку, дослідження та оптимізації ТФМС є методи, що базуються на моделюванні.

В даний час у ряді областей науки і техніки широко та ефективно використовуються методи математичного моделювання. Як показує практика, вирішення питань дослідження фрикційних механічних систем (ФМС) шляхом створення їх математичних моделей з наступним етапом пошуку параметрів пов'язане з низкою складнощів.

Завдання щодо визначення умов прийняття оптимальних рішень щодо отримання оптимальних варіантів їх вирішення на етапах проектування та оптимізації ТФМС мають загальний похід на стадії формування математичних моделей, для вирішення завдань нелінійної оптимізації.

Процеси побудови математичних моделей як систем диференціальних рівнянь, що описують динаміку ТФМС та їх вирішення можливі з певними припущеннями, лінеаризацією суттєво нелінійних зв'язків. У зв'язку з цим значно спотворюються результати і відрізняються на певний порядок від реальних значень.

Для ТФМС нелійними є їх механічні підсистеми, в зв'язках цих підсистем модулі пружності істотно впливають на величини деформацій зв'язків. У свою чергу сила тертя між фрикційними поверхнями при їх відносному ковзанні залежить від швидкості (швидкості ковзання) і т.д.

Облік даних нелінійних залежностей, процесів і характеристик у механічних підсистемах ТФМС створюють умови обов'язкового представлення в'язей у суттєво нелінійному вигляді, наприклад, нелінійний зв'язок між напруженням у в'язях та величинами деформацій. Вищезгадані та інші нелійнності ведуть до

						Арк.
						27
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

того, що системи диференціальних рівнянь, які моделюють рух механічних підсистем приводів ТФМС є нелінійними рівняннями.

Поведінка нелінійних систем суттєво відрізняється від властивостей та законів руху квазілінійних систем. Одним із найважливіших недоліків і результатів дослідження нелінійних систем шляхом лінеаризації нелінійних в'язей у математичних моделях функціональних залежностей – застосування принципу суперпозицій, також послідовне нехтування низки чинників і побудова моделей з інших змінних чинників. У ряді випадків саме суттєво нелінійний взаємозв'язок і є метою дослідження нелінійних систем. Так, наприклад, на вихідні характеристики фрикційних систем впливають від 30 до 50 і більше факторів (зовнішніх та внутрішніх).

Отже, вирішуючи оптимізаційні завдання для ТФМС, необхідно враховувати вплив на вихідні параметри вузлів тертя всіх нелінійно взаємозалежних основних та другорядних чинників. Крім цього, необхідно враховувати динамічні характеристики конкретних механічних систем машин і механізмів.

За даними закордонних та вітчизняних авторів зміна всього на 5-10% величини маси або жорсткості одного із в'язей механічної системи веде до відмінності на порядок даних, отриманих у лабораторних та натурних умовах.

З цього випливає, що вирішуючи триботехнічні завдання, особливо оптимізаційні, необхідно проводити лабораторні та стендові випробування на установках, механічна частина яких є динамічною моделлю механічної системи натурної машини або механізму. Також експериментальний стенд і шукана натурна система повинні описуватися однією і тією ж математичною моделлю, забезпечувати збіг основних частот і форм власних коливань. У зв'язку з цим вищезгадане число моделей ТФМС необхідно помножити на кількість змінних факторів механічної системи. Таким чином, вирішуючи для ТФМС комплексні оптимізаційні триботехнічні завдання методами математичного моделювання, ми отримуємо значну кількість математичних моделей, що описують її поведінку, вирішення яких дуже складне.

						Арк.
						28
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Як відомо проведення натурних випробувань дуже дорогий і трудомісткий процес, крім того, в ході досліджень практично неможливо визначити причину виявлених процесів. Таким чином, обраний найефективніший спосіб перевірки проектних та конструкторських рішень на основі можливості оптимізації, прогнозування вихідних характеристик механічної системи на різних стадіях випробувань – метод фізико-математичного моделювання.

На відміну від методів математичного моделювання він дозволяє проводити дослідження суттєво нелінійних процесів тертя та зношування, наприклад, що відбуваються в контактні колеса з рейкою.

						Арк.
						29
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

2 МЕТОДИКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ «РУХОМИЙ СКЛАД-КОЛІЯ»

2.1 Фізико-математичне моделювання системи «рухомий склад-колія»

Під час руху рухомого складу по залізничній колії на нього діють понад два десятки випадкових і нестационарних факторів, які змінні за величиною та напрямком. Тому система «рухомий склад – колія» (далі – «РС – колія») може бути представлена як складна неоднорідна система нелінійних функціональних залежностей підсистем, що входять до неї.

Побудувати математичну модель досліджуваної системи при подібній кількості факторів та наявності множини нелінійних членів у рівняннях руху представляє відомі труднощі, що пов'язані з їх лінеаризацією.

Таким чином, методи фізичної подібності та моделювання оптимальні для дослідження системи «РС – колія» [20].

Методика фізико-математичного моделювання складається з трьох етапів:

- оцінювання умов динамічної подібності механічних підсистем;
- оцінка умов динамічної подібності фрикційного контакту;
- фізичне моделювання контакту з використанням методу аналізу розмірностей.

По-перше, на основі теорії моделювання [21] були отримано основні критерії для забезпечення умови динамічної подібності механічних підсистем першого порядку системи «РС – колія», тобто механічного приводу РС та наведеної частини колії. Рух підсистем приводу РС та колії мають апробований практикою математичний опис, тому при виведенні умов їх динамічної подібності використовувався метод аналізу диференціальних рівнянь руху.

На основі цього, були зроблені наступні висновки:

- масштаби подібності жорсткості ресор, коефіцієнта демпфування коливань мають бути однакові;
- модельні випробування повинні проводитись у реальному масштабі часу;
- умовою динамічної подібності механічної системи при поступальному та

						Арк.
						30
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

кутовому переміщеннях є рівність частот власних коливань та коефіцієнта згасання амплітуд коливань моделі та об'єкта.

По-друге, реалізація модельного експерименту повинна забезпечуватися характерним видом та інтенсивністю зношування контактуючих тіл.

По-третє, на етапі моделювання для вузла тертя аналізуються критерії фізичної подібності.

2.2 Експериментальні стенди для дослідження динамічних властивостей системи «рухомий склад-колія»

З метою визначення оцінки динамічних характеристик рухомого складу та колії, впливу величини демпфування колії, зміни робочих поверхонь на значення коефіцієнта зчеплення, а також для проведення комплексу модельних випробувань у роботі [22] був використаний спеціальний випробувальний стенд (рисунок 2.1).

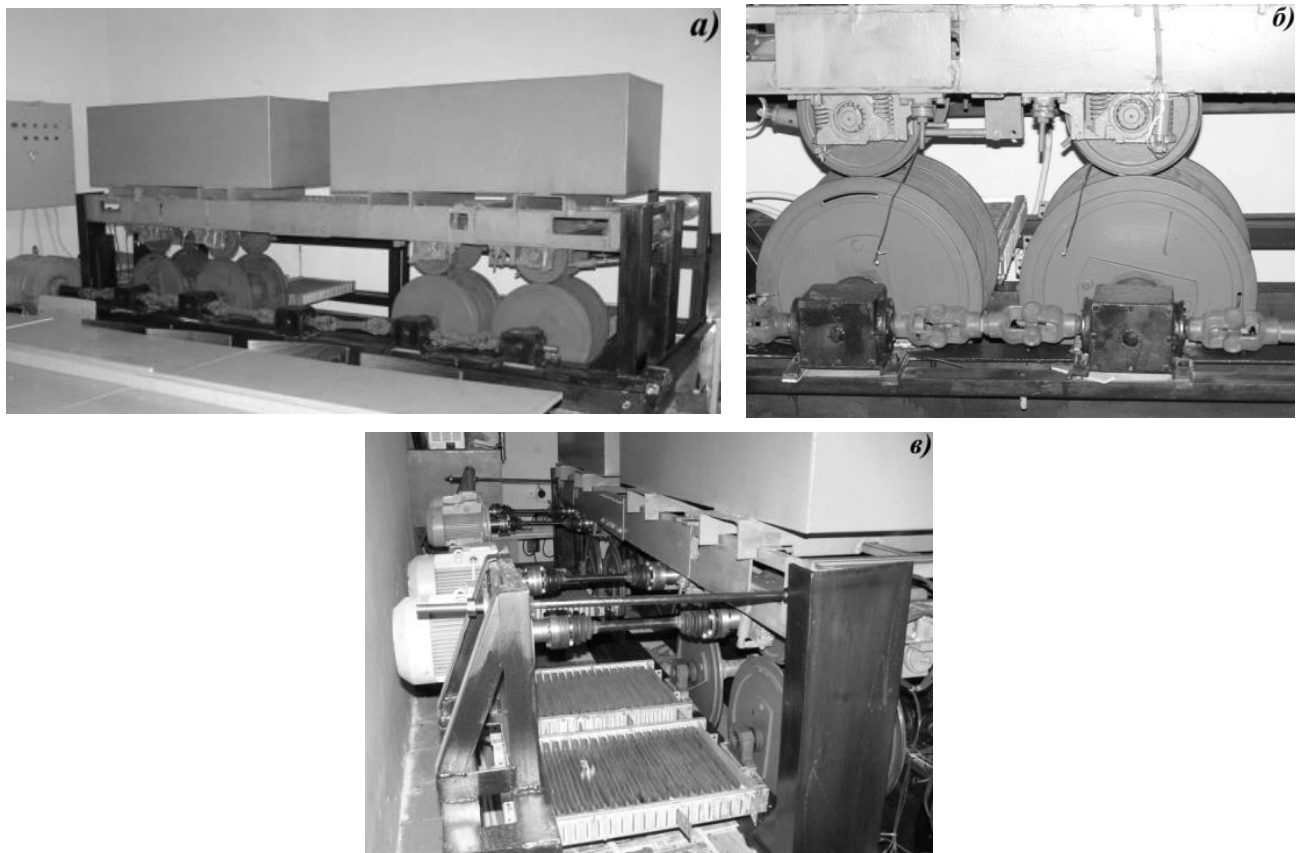


Рисунок 2.1 Катковий стенд:

a, б – загальний вигляд стенду; *в* – моторно-осьові блоки

						Арк.
						31
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

На стенді можна випробовувати дво-, три- і чотиривісні екіпажні частини, відповідно до бази візків встановлювати відстань між осями стенду, у моделі екіпажної частини через відповідний масштаб дотримується розподіл маси по осях колісних пар, моменти інерції та жорсткості відповідних в'язей.

Опорні катки стенду (рисунок 2.2) призначені для моделювання різних видів коливань екіпажу: галоупування, бокове хитання, виляння та ін. Опорні катки дозволяють моделювати залізничну колію з різною її шириною.

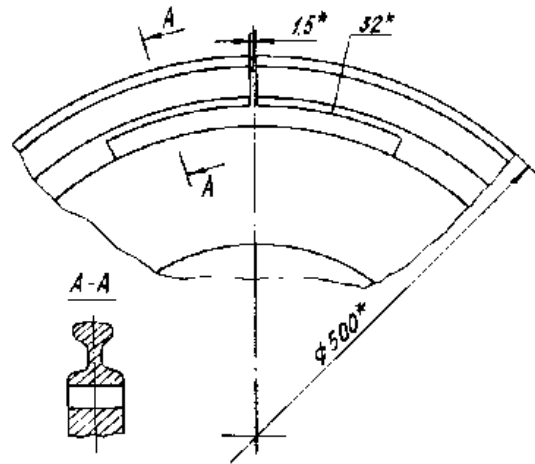


Рисунок 2.2 – Схема катка, що моделює рейку

Для дослідження характеристик системи «колесо – рейка» використовується спеціальна модернізована установка тертя СМЦ-2 (рисунок 2.3-2.4).

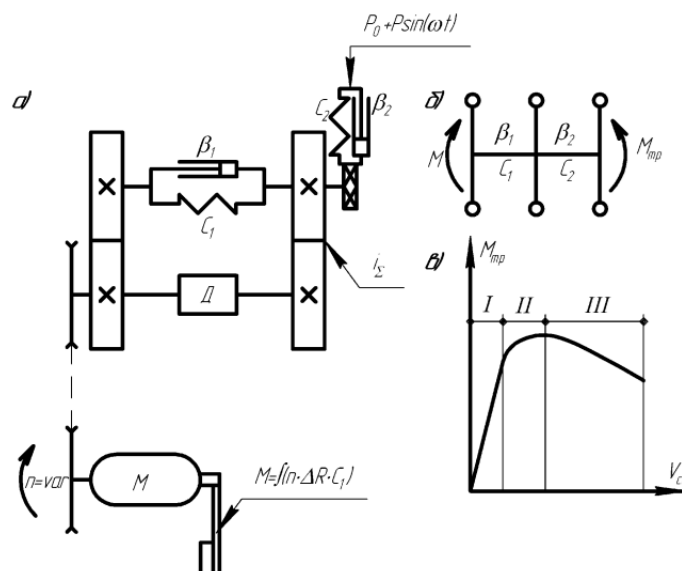
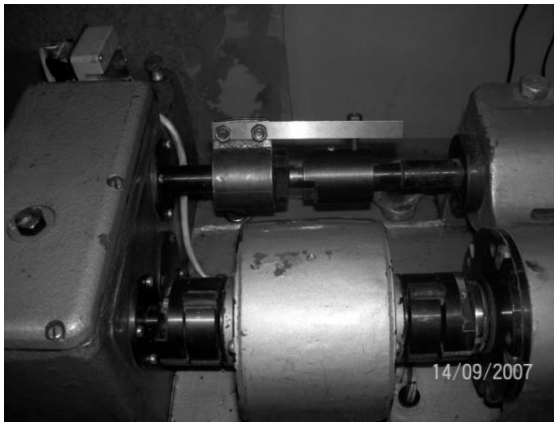


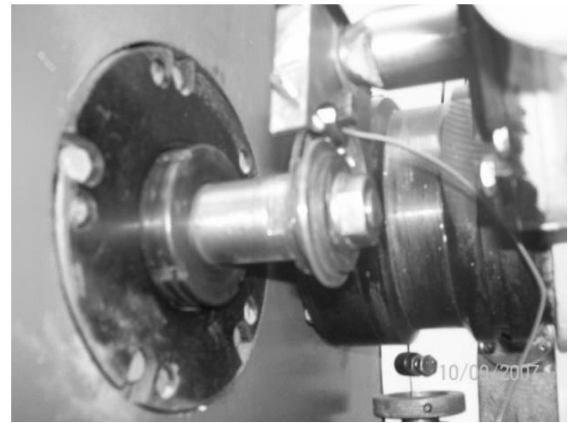
Рисунок 2.3 – Модернізована установка тертя СМЦ-2

a – кінематична схема; *б* – розрахункова еквівалентна схема; *в* – тягова характеристика

						Арк.
						32
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		



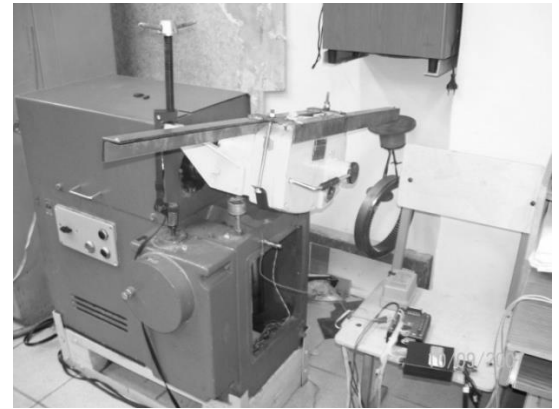
а



б



в



г

Рисунок 2.4 – Модернізована установка тертя СМЦ-2

Дана установка дозволяє проводити випробування в лабораторних умовах та досліджувати всі режими та об'єкти.

2.3 Дослідження впливу різниці діаметрів бандажів на їх знос

Важливим параметром бандажа колісної пари є діаметр. Величини діаметрів бандажів колісних пар по колу кочення на одному локомотиві тісно пов'язані з інтенсивністю їх зношування. Визначити величини діаметрів бандажів колісних пар локомотивів при існуючих методах вимірювання можна лише при викочуванні колісно-моторних блоків, тобто процес контролю величин діаметрів колісних пар на одному локомотиві, отже, і межі їх допуску істотно ускладнені.

Поступальний рух колісних пар різних діаметрів, механічно пов'язаних між собою, супроводжується додатковим (паразитним) їх ковзанням. Це пояснюється тим, що колісні центри таких колісних пар будуть проходити різні

						Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		33

відстані, але через наявність механічного зв'язку між колісними парами змушені проходити однакову відстань.

Основним фактором, що впливає на інтенсивне зношування гребнів, є їх проковзування відносно рейки в результаті вкочування і зкочування. Під вкочуванням розуміється вертикальне переміщення колеса відносно рейки, що виникає внаслідок набігання гребеня на головку рейки, а під зкочуванням – аналогічне переміщення під впливом сил, що залежать від маси екіпажу. Величину проковзування і кут набігання при різниці діаметрів можна порівняти (по різниці відстаней, пройдених великим і меншим по діаметру колесами) з величиною проковзування під час руху локомотива в кривій ділянці колії. У режимі тяги відстань, пройдена з урахуванням проковзування великим по діаметру колесом, визначається за формулою:

$$S_{\text{зов.}} = \frac{R_{\text{зов.}}}{R_{\text{вн.}}} \cdot S_{\text{вн.}}, \quad (2.1)$$

$$S_{\text{зов.}} = \frac{R_{\text{вн.}} + 1,58}{R_{\text{вн.}}} \cdot S_{\text{вн.}}, \quad (2.2)$$

- де $R_{\text{зов.}}$ – радіус кривої по зовнішній рейці, м;
 $R_{\text{вн.}}$ – радіус кривої по внутрішній рейці, м;
 1,58 – ширина рейкової колії, по кругу кочення коліс, м;
 $S_{\text{вн.}}$ – шлях пройдений внутрішнім колесом, м.

Різниця відстаней, які пройдені внутрішнім та зовнішнім колесами під час руху в кривій ділянці колії, визначається за формулою:

$$S_{\text{кр.}} = \frac{1,58}{R_{\text{вн.}}} \cdot S_{\text{вн.}}, \quad (2.3)$$

Для визначення відповідності між проковзуванням коліс від різниці діаметрів

						Арк.
						34
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

та від руху локомотива в кривій необхідно прирівняти вирази різниці пройденого колесами для обидвох випадків. Тоді радіус кривої по осі колії, що відповідає проковзуванню коліс з різницею діаметрів, можна знайти за формулою:

$$S_{\text{кр.}} = \frac{1,58}{\frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{м}}} - 1} + 0,79, \quad (2.4)$$

Результати розрахунку представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Радіус кривої, що відповідає проковзуванню коліс з різницею діаметрів

Діаметр великого колеса, мм	Різниця діаметрів, мм	Радіус кривої, м
1250,0	1	1974
	2	986
	3	657
	4	492
	5	394
	6	328
	7	281
	8	246
	9	218

На (рисунку 2.5) представлена характеристика еквівалентності різниці діаметрів коліс радіусу кривої під час руху колісної пари з проковзуванням.

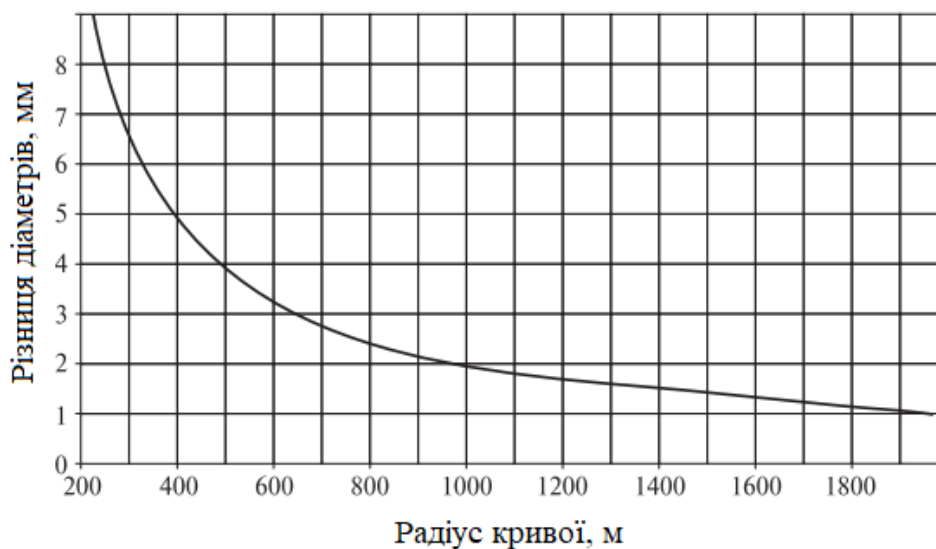


Рисунок 2.5 – Еквівалентна характеристика

Проковзування колісної пари під час руху в прямій ділянці колії з різницею діаметрів 4 мм рівнозначно проковзуванню колісної пари (з відсутністю різниці діаметрів) під час руху в кривій радіусом 492 м. Розподіл даних в залежності від різниці діаметрів представлено на (рисунок 2.6).

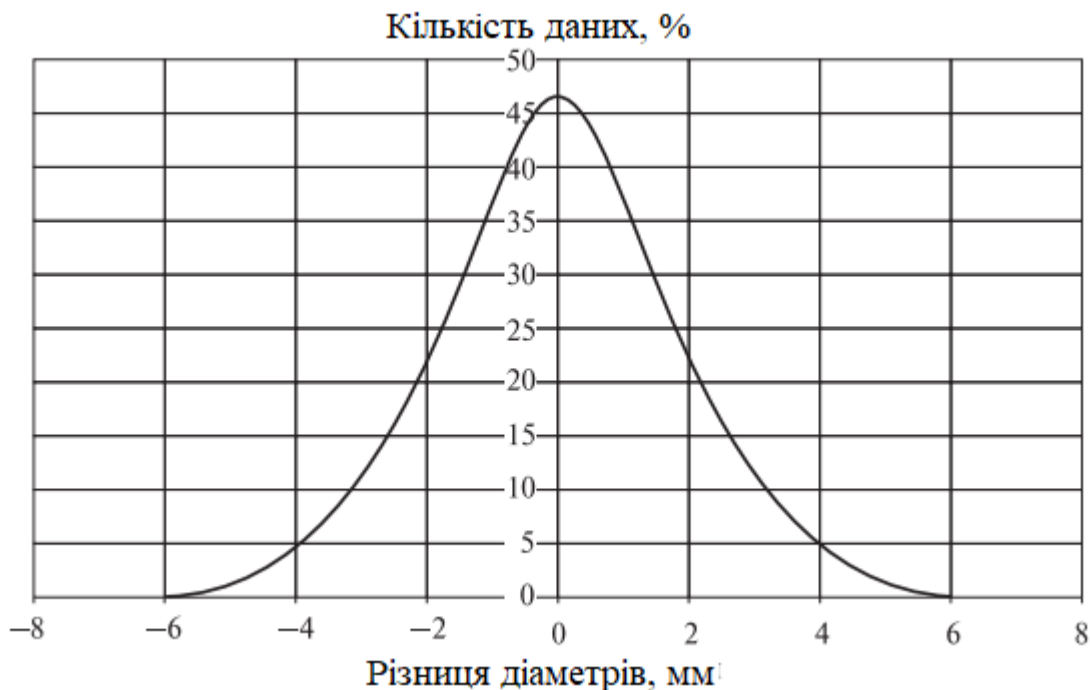


Рисунок 2.6 – Розподіл кількості вихідних даних залежно від різниці діаметрів

Аналіз показує що близько 45 % колісних пар мають різницю діаметрів у межах від 0 до 1 мм, 46 % – в межах від 1 до 3 мм, 9 % колісних пар мають різницю діаметрів у межах від 3 до 5 мм і бувають випадки, коли колісні пари мають більше значення різниці діаметрів. За наявності вкочування колісна пара переходить у режим одноточкового дотику з рейкою з точкою контакту, що припадає на гребінь. Наявність безперервного процесу вкочування-скочування є однією з основних причин інтенсивного зносу гребнів колісних пар локомотивів та рейок.

Під час руху електровоза в режимі тяги ковзання бандажа з більшим діаметром протікає інтенсивніше, ніж бандажа з меншим діаметром, при гальмуванні – навпаки. Тому різниця у діаметрах бандажів колісної пари в експлуатації постійно змінюється, отже, змінюється і інтенсивність зношування.

При збільшенні швидкості руху величина перерозподілу тягового зусилля по колісним парам зростає настільки, що колісна пара з меншим діаметром бандажів може мати від'ємне значення сили тяги, тобто може перейти в режим гальмування, а навантаження більшої колісної пари значно перевищуватиме розрахункову. Збільшення різниці діаметрів колісних пар веде до пропорційного збільшення різниці обертових моментів по колісним парам групового тягового приводу, що суттєво знижує його надійність та довговічність в експлуатації. Аналіз показує, що інтенсивність зношування бандажів колісних пар можна значно зменшити шляхом підбору колісних пар відповідно до співвідношення їх діаметрів та електромеханічних характеристик тягових двигунів локомотивів. При цьому суттєво збільшується використання потужності електровозів та зменшується нерівномірність навантаження ТЕД. При вирішенні питання про товщину шару, що знімається, при обточуванні бандажів основним фактором є стан гребеня: чим більше його знос, тим, відповідно, велику стружку доводиться знімати по колу кочення колеса і, навпаки, при повномірному гребені і наявності прокату абсолютно немає необхідності в додатковому зніманні металу з поверхні кочення.

						Арк.
						37
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ЗАХОДІВ, ЯКІ СПРЯМОВАНІ НА ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ

3.1 Покращення умов вписування візків локомотивів в криві ділянки колії

Завдяки динамічному моніторингу контакту «колесо-рейка» відкривається можливість реалізації схеми керованого руху візків локомотива в кривих за рахунок автономного управління приводом подачі модифікатора тертя, зміни швидкостей ковзання та забезпечення передаточного відношення в замкнутому силовому контурі «рейка – колесо – вісь колісної пари – колесо – рейка» рівного одиниці, або зміни його в заданих межах.

Відомо, що в кривій під дією відцентрової сили колесо, що рухається по зовнішній рейковій нитці, піднімається на більший радіус, а внутрішнє колесо, яке котиться по меншому радіусу, вписує колісну пару в криву. Для виконання цієї умови необхідно, щоб відцентрова сила піднімала колесо до відповідного радіусу. Якщо відцентрова сила недостатня, то колесо «не добирає» необхідного радіусу, внаслідок чого колісна пара через пробуксовування одного колеса або проковзування іншого розвертається відносно осі колії назовні кривої. Чим більша різниця радіусів кочення, тим більша сила розвороту, яка змушує гребінь колеса впирається у робочу грань рейки. А чим більший кут розвороту колісної пари, тим сильніший тиск гребеня колеса на робочу грань рейки та значніший боковий знос рейки та гребеня колеса. В результаті цього коефіцієнт зчеплення знижується, сила тяги, що розвивається локомотивом і контактне навантаження на рейки в кривих змінюються. Змащення бокової грані рейки в цьому випадку не вирішує всіх проблем, оскільки рідкі та пластичні мастильні матеріали просто видавлюються гребенем.

Аналогом розглянутого способу управління рухом візків локомотива при вписуванні в криві є зміна конструкції та кількості візків локомотива.

Технічні зміни, що вносяться в конструкцію візків для зниження різниці частот обертання коліс, нанесення на колеса покриттів із спеціальної зносостійкої пластмаси, профільне шліфування головки рейок у кривих з метою

									Арк.
									38
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата					

наближення місця контакту рейки та колеса на зовнішній нитці до внутрішнього краю колеса пов'язані з великими витратами.

Прототипом даного винаходу може бути дослідження входу екіпажу в криву ділянку колії. Аналізується стійкість руху системи у кривих ділянках колії та вплив параметрів екіпажу та колії на горизонтальну динаміку локомотива у кривих. В роботі [22] були отримані графіки зміни відтискання зовнішньої рейки і рамних зусиль під колісною парою, що набігає, у функції швидкості руху електровоза для різних радіусів кривих. При швидкості руху ≥ 90 км/год у діапазоні зміни поперечної жорсткості колії J_k досліджуваної кривої рамні зусилля зростають тим інтенсивніше, чим менша жорсткість колії. Наприклад, при швидкості 110 км/год у кривій радіусом 620 м. максимальні рамні зусилля, що діють на колісну пару електровоза ВЛ80, що набігає, складають при поперечній жорсткості рейкової нитки 10Мн/м і 15Мн/м, відповідно 92 кН і 64 кН. Недоліком цього є те, що конкретна проблема вписування візків локомотива в криві залишається не вирішеною, а проводиться лише дослідження процесу вписування.

Технічним результатом повинно бути зменшення бокового тиску на рейкову колію шляхом перерозподілу поздовжніх сил ковзання по колесах. Створюється момент, що повертає колісну пару і візок від внутрішньої рейки, зменшуються поперечні сили ковзання, спрямовані у бік внутрішньої рейки. В результаті чого підвищується безпека при русі локомотива в кривих, виключаючи можливість сходу його з рейок, збільшується час експлуатації без проведення ремонтних робіт.

В роботі [22] зазначений технічний результат досягається тим, що в способі управління рухом візків локомотива при вписуванні в криві фрикційний модифікатор тертя (активізатор зчеплення), автономно подають на зовнішню рейку кривої. Існує багато модифікаторів зчеплення (наприклад, силікатний, що містить біхромат калію; силікатний, який містить перманганат калію та ін.). Якість матеріалу та вид фрикційного модифікатора тертя визначають час та кількість подачі його на рейку. Це забезпечує необхідну різницю відсотків ковзання коліс відносно зовнішньої та внутрішньої рейкових ниток (рисунок 3.1).

						Арк.
						39
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

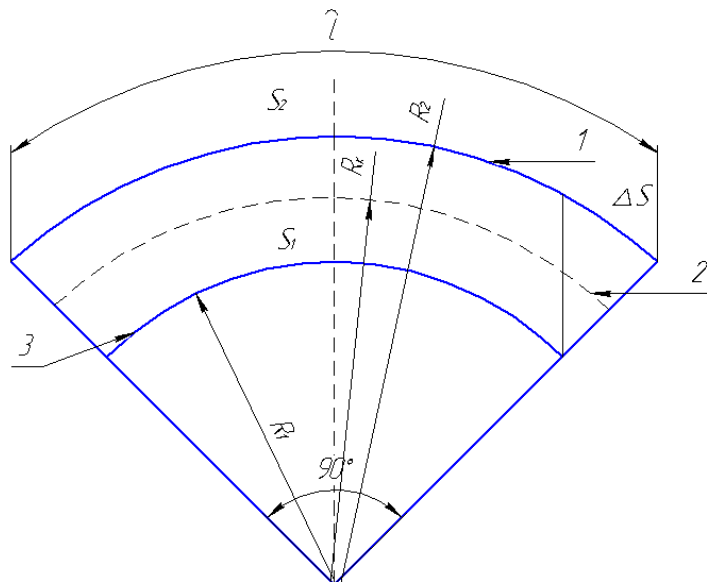


Рисунок 3.1 – Розташування рейкових ниток в кривій ділянці колії

1 – зовнішня рейка; 2 – умовний центр; 3 – внутрішня рейка

Для цього використаємо декілька залежностей:

$$S = 2\pi Rk, \quad (3.1)$$

$$k = \frac{l}{L}; k = \frac{1}{4}, \quad (3.2)$$

де k – відношення довжини кривої до довжини кола, м;

l – довжина кривої, м;

L – довжина кола, м.

$$S_1 = 2\pi R_1 \cdot \frac{1}{4} = \frac{\pi R_1}{2}, \quad (3.3)$$

$$S_2 = 2\pi R_2 \cdot \frac{1}{4} = \frac{\pi R_2}{2}, \quad (3.4)$$

$$\Delta S = \frac{\pi}{2}(R_2 - R_1), \quad (3.5)$$

- де R_1, R_2 – радіуси кривих, відповідно для внутрішньої і зовнішньої рейки, м;
- ΔS – величина, що показує, наскільки довжина зовнішньої рейки перевищує довжину внутрішньої рейки кривої, м.;
- S_1, S_2 – відстань в кривій, яка пройдена візками локомотива, відповідно по внутрішній та зовнішній рейках, м.

Схема розвороту візка локомотива наглядно відображена на (рисунок 3.2).

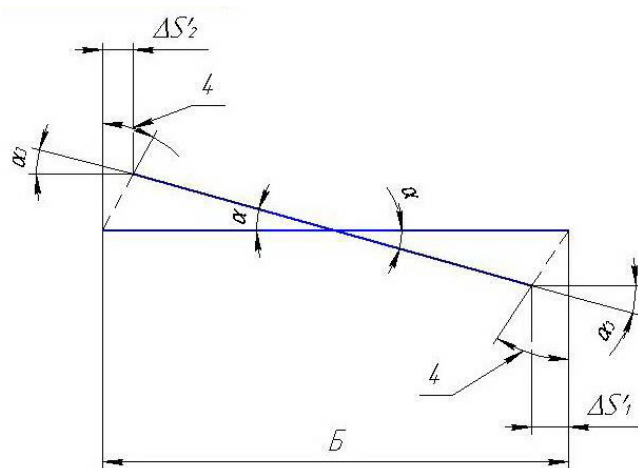


Рисунок 3.2 – Поворот візка локомотива

При здійсненні способу управління рухом візків локомотива для вписування в криві, утворення необхідної різниці ковзання (рисунок 3.3) відбувається при різниці між графіком 5 – з використанням модифікатора фрикційного тертя і графіком 6 – без використання фрикційного модифікатора тертя.

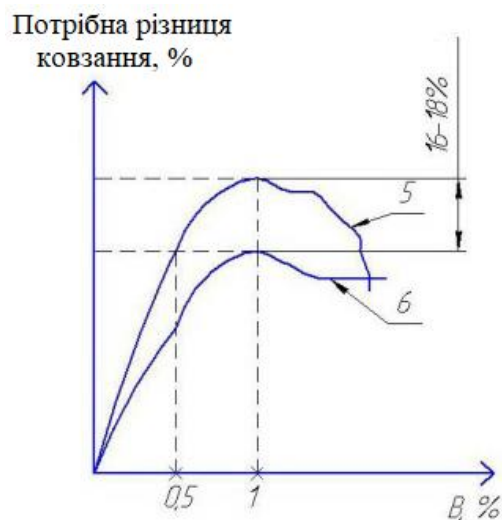


Рисунок 3.3 – Утворення необхідної різниці ковзання

						Арк.
						41
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

Таким чином, при реалізації способу управління рухом візків локомотива при вписуванні в криві покращуються умови взаємодії в системі «колесо-рейка» і, як наслідок, збільшується ресурс колісних пар рухомого складу.

3.2 Автоматизація процесу лубрикації контакту «колесо-рейка»

Процес лубрикації відіграє значну роль в залізничному транспорті. Це один з основних аспектів ресурсозберігаючих технологій, який визначає конкурентоспроможність залізничної галузі в цілому.

Результатом процесів тертя гребнів колісних пар та бокової поверхні головки рейки є інтенсивне зношування коліс та рейок, а також втрати до 10% тягової енергії. Система «колесо – рейка» є відкритим вузлом тертя, що працює в складних умовах експлуатації при впливі несприятливих факторів зовнішнього середовища. Місце контакту гребеня колеса з боковою поверхнею головки рейки – це антифрикційний вузол, якісна та точна лубрикація якого збільшує ресурс рейок, колісних пар по гребню, підвищує стійкість колеса від вкочування на головку рейки, а також знижує втрати тягової енергії та шумовий вплив на навколишнє середовище.

У зв'язку з цим важливим науковим завданням є розробка науково-обґрунтованих методичних положень з техніко-економічного обґрунтування застосування технологічних схем гребне- та рейкозмащування [23]. Розробка високоефективних мастильних матеріалів та вдосконалення систем та технологій їх нанесення в зону контакту гребнів коліс рухомого складу з боковою поверхнею рейок є актуальною проблемою. Такі властивості, як високий ресурс, широкий діапазон температур експлуатації, можливість використання у всіх швидкісних режимах і точність локалізації мастильного матеріалу є визначальними у виборі оптимальної схеми лубрикації.

У роботі [23] представлена принципово нова система модифікування відкритих вузлів тертя. Технічним результатом роботи стало виготовлення та успішна апробація конструкції автоматичного гребне-рейкозмащувача (АГРЗ).

Механічна частина АГРСЗ (рисунок 3.4) складається з лафета 1, жорстко

						Арк.
						42
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

закріпленого на підресореній масі – рамі візка 6, який шарнірно зв'язаний з корпусом за допомогою шарніра 2. Підпружинений системою 4 відносно рами візка корпус включає бункер-накопичувач 3 для мастильних стрижнів 7, пневмопривід 8 і напрямний канал 9, який фіксується щодо змащувальної поверхні гребеня колеса 10 зовнішніми і внутрішніми тягами 5, які пов'язані з невідресореною масою – буксовим вузлом 11. Бункер-накопичувач з пневматичним приводом монтується на рамі візка тягового рухомого складу на кожному колесі, а система автоматичного регулювання – усередині кабіни локомотива.

Компонування АГРЗ дозволяє при відносному зміщенні рами візка 6 і буксового вузла 11 зберігати точне взаємне положення напрямного каналу 9 і гребеня колеса 10 за рахунок фіксації внутрішніми і зовнішніми тягами 5 (наприклад, тросом) напрямного каналу з буксовим вузлом і можливості обертання підпружиненого системою 4 бункера-накопичувача 3 відносно осі закріплення на лафеті 1.

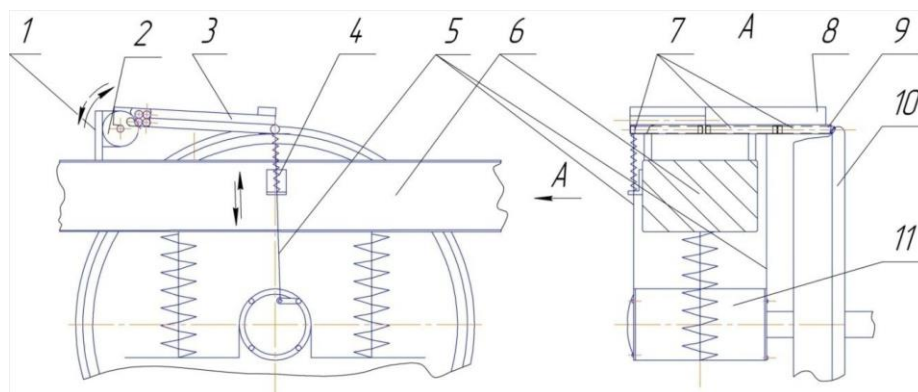


Рисунок 3.4 – Схема кріплення АГРЗ на буксовому вузлу локомотива

Таке розташування АГРЗ дозволяє уникнути впливу на лубрикатор руйнівних динамічних навантажень, тому що сама конструкція розташована на підресореній масі рухомого складу, а зв'язок її з невідресореною масою рухомого складу здійснюється за допомогою пружного зв'язку (троса), який також не передає руйнівних динамічних навантажень на конструкцію лубрикатора. Це дозволяє підвищити ефективність технології лубрикації та знизити експлуатаційні витрати на виконання робіт зі зниження інтенсивності зношування в парі тертя «колесо-рейка».

						Арк.
						43
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

3.3 Визначення основних факторів, які впливають на ресурс колісних пар локомотивів

Процеси тертя складно та нелінійно залежать більш ніж від двадцяти факторів. Для вирішення поставлених завдань необхідно визначити фактори, що впливають на ресурс колісних пар та виявити основні із них. Для цього було обрано 21 фактор, що найбільше впливає на ресурс колісних пар. За допомогою методу рангової кореляції (апріорного ранжування) було встановлено вагомість кожного фактору.

За методикою обробки апріорної інформації методом рангової кореляції на підставі сформульованих цілей та завдань досліджень приступають до збору апріорної інформації (апріорі – незалежно від досвіду). Джерелом інформації дослідження по виявленню основних чинників, які впливають на ресурс колісних пар і рейок, є досвід та знання фахівців – експертів з цієї проблеми (табл. 3.1).

За допомогою методу рангової кореляції (апріорного ранжування, методу експертних оцінок) встановлюють вагомість кожного фактору (рисунок 3.5). В даному випадку використовуються анкети опитування, у яких зазначені чинники.

Фактори, що впливають на ресурс колісних пар магістральних електровозів:

- а) різниця діаметрів коліс колісної пари;
- б) величина шорсткості поверхонь колеса та рейки;
- в) реалізація дотику колеса у 2-х точках з головкою рейки;
- г) ступінь зносу рухомого складу та колії;
- д) різниця у значеннях профілів коліс, що пов'язано зі ступенем зношеності колеса або рейки (величина плями контакту підсистеми колесо – рейка);
- е) виникнення значних деформацій шпал та баластного шару при сприйнятті силового впливу рухомого складу;
- ж) значення кута набігання коліс на рейки;
- з) значення механічних характеристик матеріалів колеса та рейки (твердість);
- и) співвідношення величин профілів колеса та рейки;
- й) погодні умови у момент експлуатації (температура навколишнього

						Арк.
						44
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

середовища, вологість повітря та ін.);

- к) наявність та тип активізатора зчеплення;
- л) умови взаємодії у системі «гальмівна колодка – колесо»;
- м) величина направляючої сили на гребінь колеса (горизонтальна сила);
- н) встановлення підшипників кочення або ковзання у візках рухомого складу;
- о) швидкість руху рухомого складу;
- р) коефіцієнт проковзування коліс при реалізації тяги локомотива;
- q) якість металу для колісних пар та наявність дефектів у металі;
- г) абразив у зоні контакту колеса з рейкою, його якість та кількість;
- с) наявність мастильного матеріалу в контакті «гребінь колеса – рейка»;
- т) величина навантаження на вісь у підсистемі «колесо-рейка»;
- у) рівень значень коефіцієнтів тертя ковзання та тертя кочення.

Таблиця 3.1 – Фактори, які впливають на ресурс колісних пар

Фактори	Експерти							$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	Δ_i	Δ_i^2	Ранги
	1	2	3	4	5	6	7				
a)	6	5	12	10	9	13	9	64	-13	169	5
b)	21	13	19	9	10	12	6	90	13	169	15
c)	20	7	11	16	13	5	7	79	2	4	12
d)	2	18	5	11	14	6	4	60	-17	289	4
e)	7	8	6	4	18	7	5	55	-22	484	3
f)	8	14	7	12	19	18	14	92	15	225	16
g)	16	2	16	13	12	4	15	78	1	1	11
h)	3	1	4	2	4	3	3	20	-57	3249	1
i)	17	15	13	3	7	8	2	65	-12	144	6
j)	19	19	21	17	21	21	12	130	53	2809	21
k)	10	9	15	14	5	15	19	87	10	100	13
l)	11	20	8	21	8	19	13	100	23	529	19
m)	18	6	10	5	11	11	16	77	0	0	10
n)	4	21	9	20	17	20	21	112	35	1225	20
o)	15	10	3	18	20	14	20	100	23	529	18
p)	12	11	18	6	6	17	17	87	10	100	14
q)	1	3	1	7	1	2	8	23	-54	2916	2
r)	9	12	17	8	2	16	1	65	-12	144	7
s)	13	16	14	1	16	1	10	71	-6	36	9
t)	5	4	2	15	15	10	18	69	-8	64	8
u)	14	17	20	19	3	9	11	93	16	256	17

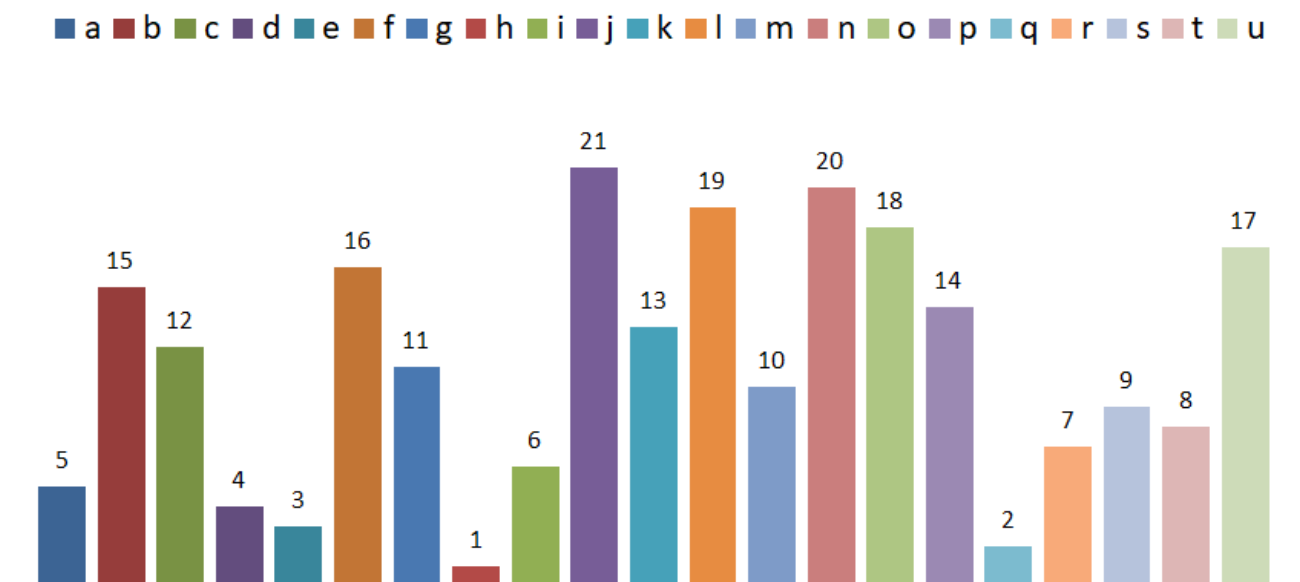


Рисунок 3.5 – Ступінчаста діаграма ранжування факторів, що впливають на ресурс колісних пар локомотивів

Отже, проаналізувавши діаграму ранжування факторів, можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на ресурс колісних пар локомотивів є: значення механічних характеристик матеріалів колеса та рейки (твердість); якість металу для колісних пар та наявність дефектів у металі; різниця у значеннях профілів коліс, що пов'язано зі ступенем зношеності колеса або рейки (величина плями контакту підсистеми колесо – рейка); ступінь зносу рухомого складу та колії; різниця діаметрів коліс колісної пари; абразив у зоні контакту колеса з рейкою, його якість та кількість; наявність мастильного матеріалу в контакті «гребінь колеса – рейка».

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- проведено аналіз існуючих технологічних засобів, які спрямовані на збільшення ресурсу в системі «колесо-рейка»;
- відзначено зони рейок та коліс з різним характером зносу залежно від рівня контактних напружень;
- для дослідження динамічних властивостей системи «рухомий склад-колія» можна використовувати катковий стенд, що дозволить проводити випробування в лабораторних умовах та досліджувати всі режими експлуатації;
- було побудовано характеристику еквівалентності різниці діаметрів коліс радіусу кривої під час руху колісної пари з проковзуванням;
- використовуючи метод рангової кореляції було визначено основні фактори, які впливають на ресурс колісних пар локомотивів;
- оскільки, наявність мастильного матеріалу в контакті «гребінь колеса – рейка» має значний вплив на ресурс колісної пари, було запропоновано використовувати автоматичний гребне-рейкозмашувач.

						Арк.
						47
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Фейзов, Э.Э. Энергосберегающие средства и схемы для тягового подвижного состава / Э.Э. Фейзов // Транспорт-2011 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2011 г. В 3 ч. Ч. 2: Технические науки ; Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2011. – С. 67–68.
2. Улучшение условий функционирования фрикционной системы «колесо – рельс» / И.В. Колесников, А.М. Лубягов, Э.Э. Фейзов [и др.] // Известия Самарского научного центра. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 753–758.
3. Sawley, R. Railway Age / R. Sawley, R. Reiff. – 1999. – No 6. – P. 44, 46, 48, 49.
4. Повышение эффективности технологии смазки в системе «колесо – рельс»: сб. докл. Сетевой школы. – Чита, 2010.
5. Беркович, И.И. Трибология: учебник для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2000. – 268 с.
6. Гапанович, В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В.А. Гапанович, В.Д. Авилов, Б.А. Аржанников [и др.] - М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. - 620 с.
7. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: пер. с англ. / У. Харрис, С. Захаров, Д. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсон. – М.: Интекст, 2002. – 416 с.
8. Совершенствование систем смазывания рельсов // Железные дороги мира. – 1997. – № 2. – С. 68–70.
9. Современные рельсосмазыватели на комбинированном ходу // Железные дороги мира. – 1998. – № 4. – С. 51–52.
10. Черкашин, Ю.М. Использование результатов фундаментальных и прикладных исследований проблем взаимодействия подвижного состава и пути при решении задачи предотвращения сходоов колеса и рельса / Ю.М. Черкашин // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути : сб. докл. науч.-практ. конф.. – Щербинка, 2003. – С. 21–29.
11. Твердая смазка для гребней колес // Железные дороги мира. – 1996. – №5.

						Арк.
						48
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

– С. 35–36. .

12. Чичинадзе, А.В. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 3: Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств / А.В. Чичинадзе; под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
13. Хебда, М. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 1: Теоретические основы / М. Хебда; под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
14. Повышение эффективности системы «путь – подвижной состав» / В.В. Шаповалов, И.А. Майба, П.Н. Щербак, А.Н. Озябкин, Э.Э. Фейзов // Локомотив. – 2011. – № 6. – С. 40–41.
15. Повышение эффективности системы «путь – подвижной состав» / В.В. Шаповалов, И.А. Майба, П.Н. Щербак, А.Н. Озябкин, Э.Э. Фейзов // Локомотив. – 2011. – № 5. – С. 40–42.
16. Регулирование трения в контакте колесо – рельс // Железные дороги мира. – 1998. – № 3. – С. 45–47.
17. Машкович, О.Н. Программа оптимизации взаимодействия колеса с рельсом / О.Н. Машкович // Железнодорожный транспорт за рубежом. Сер. IV: Путь и путевое хозяйство. – 1998. – Вып. 5, 6. – С. 8–11.
18. Коссов, В.С. В перспективе – комбинированная лубрикация / В.С. Коссов, А.В. Трифонов, Ю.А. Панин // Локомотив. – 2006. – № 12. – С. 32–33.
19. Шаповалов, В.В. Комплексное моделирование динамически нагруженных узлов трения машин / В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 1985. – № 3. – С. 451–457.
20. Заковоротный, В.Л. Исследование комплексного коэффициента трения / В.Л. Заковоротный, В.В. Шаповалов // Трение и износ. – 1987. – Т. 1. – С. 22–24.
21. Физико-математическое моделирование нелинейных фрикционных систем / В.В. Шаповалов, А.Л. Озябкин, Э.Э. Фейзов [и др.] // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 6(181). – С. 77–82.

						Арк.
						49
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		

22. Фейзов, Э. Э. Увеличение ресурса колесных пар подвижного состава железных дорог: диссертация ... кандидата технических наук: 05.22.07 / - Ростов-на-Дону, 2016. - 186 с.
23. Фейзов, Э.Э. Разработка профессиональной компетенции выпускника: научно-исследовательская деятельность (ПК-6) / Э.Э. Фейзов, В.А. Фейзова // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт 2010»: Ч. 1 ; Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов н/Д, 2010. – 332 с.: С. 91-92.

						Арк.
						50
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		