

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Локомотиви»

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. зав. кафедрою Б.Є. Боднар

« 13 »  2021 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»


Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Спеціалізація «Локомотиви та локомотивне господарство»

ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛОКОМОТИВІВ

IMPROVING THE TRACTION PROPERTIES OF LOCOMOTIVES

0032.206305.000.02MP.ПЗ

Керівник дипломної роботи  В.Н. Сердюк

Нормоконтролер  Л.В. Колодій

Виконавець: студент

групи ЛГ2026

Student

 С.В. Сергійчук

S.V.Serhiichuk

Дніпро, 2021

**ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ім. ак. ЛАЗАРЯНА**

Факультет *«Транспортна інженерія»* кафедра *«Локомотиви»*
Спеціальність **273 «Залізничний транспорт»**
за ОП *«Локомотиви та локомотивне господарство»*

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедру

М.І.Капіца

«___» _____ 2021 р.

З А В Д А Н Н Я

до дипломної магістерської роботи на здобуття ОС **«магістр»**
студента групи **ЛГ2026** Сергійчук Станіслав Володимирович
(прізвище , ім'я та по-батькові)

1. Тема магістерської дипломної роботи «Підвищення тягових властивостей локомотивів»

Затверджена наказом по університету від **24 грудня 2020 р. № 763ст**

2. Термін подання студентом закінченої роботи **10 грудня 2021 року**

3. Вихідні дані до магістерської роботи. ; діаметрі колеса 1250 мм; площа контакту дорівнює 168 мм²; пружне
площа плями контакту S=150мм; діаметром колеса =
проникнення становить 86 мкм; коефіцієнт Пуассона , $\nu = 0,33$;
1050 мм; плями контакту S=168мм.

4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)

Модель фрикційного контакту колеса з рейкою

Основні криві намагнічування сталей

Зони контакту колеса з рейкою при поперечному та поздовжньому розташуванню котушки

Моделювання магнітного поля між колесом та рейкою

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

Назва розділу магістерської роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1 Аналіз стану питання та ступеня розробленості проблеми	17.10.2021	30
2 Трибометричні установки для дослідження сталевих пар тертя установки для дослідження сталевих пар тертя при впливі магнітного поля		
3 Намагнічування зони контакту колеса із рейкою	14.11.2021	30
4 Дослідження геометричної взаємодії профілів колеса та рейки	10.12.2021	40
5 Магнітні підсилювачі коефіцієнта зчеплення коліс з рейками. Пропозиції та можливості практичного використання результатів дослідження		

Дата видачі завдання « 27 » грудня 2020 р.

Керівник магістерської роботи _____ Сердюк В.Н.
(підпис) (ПБ)

Завдання прийняв до виконання _____ Сергійчук С.В.
(підпис) (ПБ)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура. Дипломна магістерська робота на тему: «Підвищення тягових властивостей локомотивів» включає в себе 6 креслень, 100 аркушів розрахунково-пояснювальної записки та складається з 5 частин. Проект містить рисунки, таблиць та список використаних джерел з 27 найменувань.

Об'єктом дослідження є підвищення надійності зчеплення тепловозних коліс з рейками при роботі в режимі «тяга».

Предметом дослідження є зона контакту колеса і рейки.

Метою дипломої роботи є розробка і вдосконалення науково обґрунтованих методів і способів поліпшення тягових якостей тепловозів впливом постійного магнітного поля на контакт коліс з рейками.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні завдання дослідження:

- визначити для режимів початкового і повного насичення параметри магнітного поля в зоні контакту;
- встановити геометричні параметри контактної взаємодії колеса і рейки, розробити і реалізувати алгоритм визначення площі контакту колесо локомотива з рейками;
- встановити залежність магнітного поля в зоні контакту від поперечного положення колісної пари в рейковій колії для нових і зношених профілів;
- визначити експлуатаційні режими намагнічування зон контакту коліс тепловоза з рейками для поліпшення зчеплення при роботі в режимі «тяга».

Ключові слова: КОЕФІЦІЄНТ ЗЧЕПЛЕННЯ, КОЛЕСО-РЕЙКА МЕХАНІЧНА КОЛИВАЛЬНА СИСТЕМА, МАГНІТНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, ТЕПЛОВОЗ ЧМЕЗ, МАГНІТНЕ ПОЛЕ.

					<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		<i>Сергійчук</i>			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		<i>Сердюк</i>				5	
Реценз.					Підвищення ТЯГОВИХ		
Н. Контр.		<i>Ковалій</i>					
Затверд.		№ докум.	Підпис	Дата	УЛВНТ гп		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА СТУПЕНЯ РОЗРОБЛЕНОСТІ	
ПРОБЛЕМИ.....	
1.1 Моделі контактування колеса з рейкою.....	
1.2 Вплив магнітного поля на фізико-механічні властивості металів.....	
1.2 Способи підвищення зчеплення коліс локомотива з рейками.....	
1.3 Висновки по розділу	
2 ТРИБОМЕТРИЧНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕВИХ	
ПАР ТЕРТЯ ПРИ ВПЛИВІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	
2.1 Установа для дослідження тертя кочення зі ковзанням.....	
2.2 Визначення характеристик магнітного поля.....	
2.3 Дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя.....	
2.4 Висновки по розділу.....	
3 НАМАГНІЧУВАННЯ ЗОНИ КОНТАКТУ КОЛЕСА З РЕЙКОЮ.....	
3.1 Особливості моделювання магнітного поля між колесом і рейкою.....	
3.1 Формування області насичення в зоні контакту колеса з рейкою.....	
3.2 Висновки по розділу	
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРОФІЛІВ	
КОЛЕСА ТА РЕЙКИ.....	
4.1 Моделювання геометрії контактної плями в програмному комплексі	
UM Loco.....	
4.2 Програма моделювання поперечного положення колісної пари в	
колії.....	
4.3 Апроксимація профілю, умови комфортності контакту.....	
4.4 Висновки до розділу.....	
5 МАГНІТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ КОЛІС З РЕЙКАМИ.	
ПРОПОЗИЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	
ДОСЛІДЖЕННЯ	

									Арк.	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>					

5.1 Магнітні підсилювачі коефіцієнта зчеплення коліс локомотива з
рейками.....

5.2 Магнітний ланцюг тривісного візка тепловоза, обладнаної пристроєм
збільшення зчеплення.....

5.3 Режими роботи індукторів на шестиосному маневровому тепловозі

5.4 Висновки до розділу

ВИСНОВКИ.....

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

					0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Залізничний транспорт в більшості країн займає провідне місце серед інших видів транспорту. Провізна здатність залізниці істотно залежить від ступеня використання потужності локомотивів при роботі в режимі «тяга». Робота локомотивів в повну потужність можлива лише при русі по підйому зі швидкостями більш розрахункової, коли маса складу відповідає ваговим нормам ділянки. При розгоні повне використання тягової потужності у більшості локомотивів обмежується їх зчпними властивостями, недостатність зчеплення коліс з рейками діє в широкому діапазоні швидкостей.

Загально визнаним фактом серед українських та зарубіжних фахівців в області тяги поїздів є те, що тягові можливості локомотива головним чином формуються величиною осьових навантажень і коефіцієнтом зчеплення [1-12]. Коефіцієнт зчеплення визначається трибологічними процесами, про-виходять в плямі контакту колеса з рейкою. На величину коефіцієнта зчеплення впливає швидкість переміщення плями контакту, стан та форма контактируємих поверхонь, що передаються зусилля. Падаючі Осінні листя, роса, опади, іній, полії, Мряка, бруд, плівки рідини на поверхнях колеса і рейки призводять до істотного зниження зчеплення. Вітчизняний і зарубіжний досвід експлуатації показує, що коефіцієнт зчеплення коліс по-рухомого складу з рейками змінюється в широких межах від 0,1 до 0,6 [2]. В умовах підвищення вагових норм вантажних поїздів, потужності тягового привода сучасних локомотивів і обмеженого навантаження колісних пар на шлях виникає необхідність у збільшенні коефіцієнта зчеплення.

Численні дослідження показують, що в основі зчеплення коліс залізничного рухомого складу з рейками лежить фрикційна взаємодія в зоні контакту, а коефіцієнт зчеплення істотно залежить від величини коефіцієнта тертя [2, 3, 8, 12].

Актуальність досліджень з управління тертям в системі колесо - рейка підтверджується рядом прийнятих Укрзалізницею «нормативних документів: «стратегією науково-технічного розвитку залізниці на період до 2020 року та перспективу до 2025.

Сучасне уявлення про взаємодію колеса з рейкою базується на досягненнях в

механіці, фізиці, хімії, трибології, триботехніці, матеріалознавстві та інших науках.					Арк.
0032 206305 000 01MR ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Роботи вітчизняних і зарубіжних дослідників Р. В. Самме, Д. Тейбора та ін. дозволили вирішити широке коло завдань, що відносяться до зчеплення колеса з рейкою. В даний час найбільш поширеним способом забезпечення стійкого зчеплення коліс з рейками є використання піску. Його застосування призводить до забруднення і зниження електричного опору баласту, підвищення зносу вузлів і деталей.

Об'єктом дослідження є підвищення надійності зчеплення коліс з рейками при роботі в режимі «тяга».

Предметом дослідження є зона контакту колеса і рейки.

Метою магістерської роботи є розробка та вдосконалення науково обґрунтованих методів і способів поліпшення тягових якостей тепловозів впливом постійного магнітного поля на контакт коліс з рейками.

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І СТУПЕНЯ РОЗРОБЛЕНОСТІ ПРОБЛЕМИ

1.1 Моделі контактування колеса з рейкою

Кочення колеса по рейці є основоположним процесом в роботі залізниці, можна з упевненістю сказати, що більшість підрозділів працює на колесо. При коченні колісних пар виконується головна функція транспорту. Картина експлуатаційної взаємодії колеса з рейкою складна і різноманітна, вплив роблять безліч факторів, серед них: режим роботи, швидкість, погодні умови, технічний стан рухомого складу і шляху. Разом з тим, тертя тіл супроводжується явищами, що мають механічну, хімічну, електричну, магнітну і теплову природу [2-12, 14-27].

Сучасне уявлення про взаємодію колеса з рейкою базується на досягненнях в					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01 МР ПЗ

різних областях науки: механіці, фізиці, хімії, трибології, триботехніці, матеріалознавстві та ін. роботи вітчизняних та зарубіжних дослідників Д. Ю. Погорелова, Р. В. Петрова, Р. В. Самме, Д. Тейбора та ін. дозволили вирішити широке коло завдань тертя, контактної взаємодії, в тому числі що відносяться до зчеплення колеса з рейкою [2-11, 14-18, 20-22].

У роботі [6] представлена модель поверхонь коліс і рейок, на яких в процесі обробки і експлуатації утворюються виступи і западини різної величини, при зіткненні виступи формують істинний контакт. Притискання колеса до рейки силою призводить до наклепу і зміцнення поверхневих шарів товщиною $h_{упр}$. Між поверхнями розташовується дисперсний шар забруднень $h_{дисп}$ з продуктів зносу і адсорбованих молекул газів і рідин, товщина яких лежить в межах від 7 до 35 мкм. Модель фрикційного контакту колеса з рейкою наведена на рисунку 1.1.

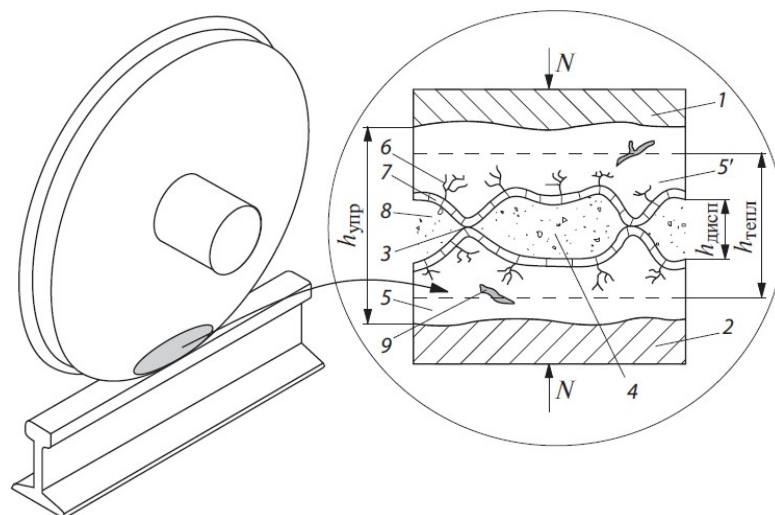


Рисунок 1.1 – Модель фрикційного контакту колеса з рейкою:

1 – колесо; 2 – рейка 3 – контакт виступів; 4 – дисперсний шар; 5 – наклепані (зміцнені) шари; 5' – деформований матеріал, що піддався тепловому впливу при терті колеса і рейки; 6 – внутрішні міжкристалічні тріщини (в результаті дії механічних і теплових напруг, адсорбції, розклинюючої дії і корозії); 7 – окисні і адсорбовані шари колеса і рейки; 8 – навколишнє газове, крапельне і пилоподібне (тверді частинки) середовище; 9 – підповерхнева тріщина (флокен, насичений воднем в процесі фрикційного взаємодії твердих тіл)

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

У даній моделі автори розглядають можливість управління властивостями контакту колеса з рейкою шляхом зміни температури в площині контакту в порівнянні з температурою підповерхневих шарів, рисунок 1.2. Тертя виникає як на поверхні матеріалу, так і всередині в результаті зсуву шарів. Теплова деформація при терті поширюється на глибину $h_{\text{тепл}}$. Режим ковзання колеса щодо рейки супроводжується підвищеним тепловиділенням, матеріал прогрівається на глибину до 1,5 см, величина температури становить від 400 до 600 °С. Контактні і термічні напруги призводять до зміни структури в осередку деформації, поверхневий шар зазнає пластичну деформацію. Підвищення пластичності контакту, викликане зменшенням твердості, збільшує фактичну площу, наближаючи її до контурної і номінальної [6].

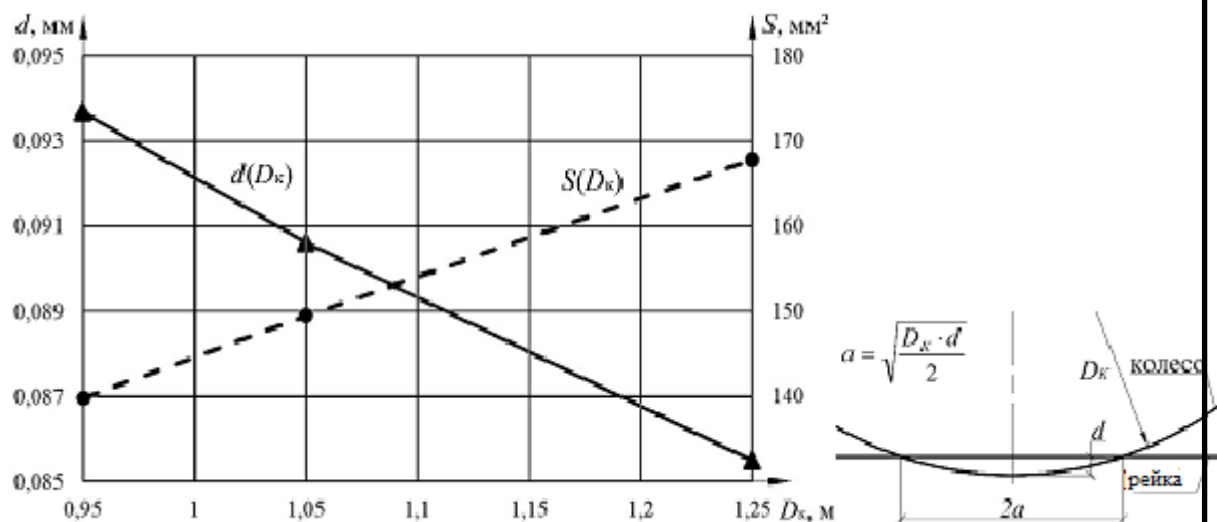


Рисунок 1.2 – Зміна властивостей металу від температури в зоні контакту:
 ADE – коефіцієнт тертя μ ; GH , $G'H'$ – об'ємна міцність при низьких і високих температурах поверхневого шару

Якщо дотичні напруги перевищують межу міцності, виникають зсувні процеси. При низьких температурах найменша об'ємна міцність металу припадає на площину контакту, зрушення відбувається на поверхні (область I). При високих температурах поверхня зміцнюється, а в глибоких шарах відбувається руйнування підповерхневого шару (область II). Оптимальному співвідношенню зносу і коефіцієнта зчеплення відповідає температура в межах 450°С. Теплова обробка поверхні металу без нагріву підповерхневого шару дозволяє змістити оптимальну

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

температуру в бік більшого значення. Новому стану буде відповідати більший коефіцієнт зчеплення [6].

У розвиток науки контактної взаємодії тіл свій внесок внесли І. В. Крагельський, Н. М. Міхін, Е. В. Рижов, Я. І. Френкель та ін. [14-18, 20, 23,]. На сьогоднішній день серед фахівців в області контактної взаємодії тіл загальновизнаним фактом є, що не існує абсолютно пружної взаємодії тіл між твердими тілами контакт завжди дискретний, в навантаженому контакті виникають непружні процеси пластичної деформації. Як правило, непружність сталевих тіл проявляється на мікроскопічному і субмікроскопічному рівні, в цілому спостерігається макроскопічна пружність [19].

Пружні властивості сталі, будучи структурно нечутливими, пов'язані з природою виникнення сил тертя [19]. Процес тертя складається з макроскопічних і мікроскопічних взаємодій. Мікро - та макрогеометрія колеса і рейки впливає на величину плями контакту [18,], на тертя і знос, особливо на етапі приробітку поверхонь. До макрогеометричних факторів відносять діаметр колеса, конусністю профілю, наявність прокату на поверхні катання, до мікрогеометричним факторам відносять шорсткість, хвилястість робочих поверхонь.

При взаємодії тіл утворюється номінальна, контурна і фактична площа контакту [16]. Номінальна (геометрична) площа окреслена макрогеометрією тіл. Для тіл різної кривизни номінальна площа формується шляхом пружної деформації. Фактична (справжня, фізична) площа формується за рахунок деформацій мікронерівностей (переважно пластичних). Мікропластичні деформації виникають на ділянках матеріалу, де напруги перевищують межу плинності. На величину фактичної площі контакту впливають навантаження і шорсткість поверхонь [15].

Відхилення поверхні тіла від макроформи поділяються на макровідхилення, хвилястість та шорсткість. Хвилястість поверхні за своїми розмірами менше макровідхилення та перевищує шорсткість [23]. Під хвилястістю розуміється повторювані і близькі за розмірами нерівності поверхні в формі виступів і западин. Для хвилястої поверхні характерне відношення кроку нерівностей до їх висоті рівній 40 [22, 23].

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ				

Змінання хвилястості тіл обумовлює контурну площу. В роботі [12] показують, що хвилястістю можна знехтувати при контакті криволінійних тіл неузгодженої форми, коли номінальна площа невелика. Це дозволяє користуватися формулами теорії пружності для абсолютно гладких тіл при аналітичному визначенні контурної площі. Дослідним шляхом контурна площа фіксується за відбитками на папері, фользі або фарбі поміщаються в зону контакту [22].

Поняття контурної площі було введено І.В. Крагельським та Н.Б. Демкіним, це дозволило перейти від номінальної площі контакту до фактичної і отримати залежності, придатні для виконання інженерних розрахунків [16, 18, 39]. Оскільки у контактуючих поверхнях колеса і рейки хвилястість незначна: крок хвилі в 200-500 разів перевищує її висоту, то деформуватися хвилястість буде переважно пружно. Для контактуючих поверхнь колеса і рейки відстань між хвилями можна порівняти з номінальним контактом: на номінальну поверхню припадає одна або дві хвилі, в цих умовах і розміри контурної площі приблизно відповідають номінальній площі [12].

Модель контакту пружних тіл з викривленою поверхнею. Колесо і рейка можуть бути представлені двома пружними циліндрами з радіусами R_1 та R_2 і циліндрів схрещені під кутом 90° , рисунок 1.3 а). Відстань між тілами при точковому контакті без навантаження задано залежністю $h(x,y) = \frac{x^2}{2R_1} + \frac{y^2}{2R_2}$. Указаний контакт еквівалентний контакту пружного півпростору і абсолютно твердого тіла з головними радіусами R_1 та R_2 , (рисунок 1.3 б).

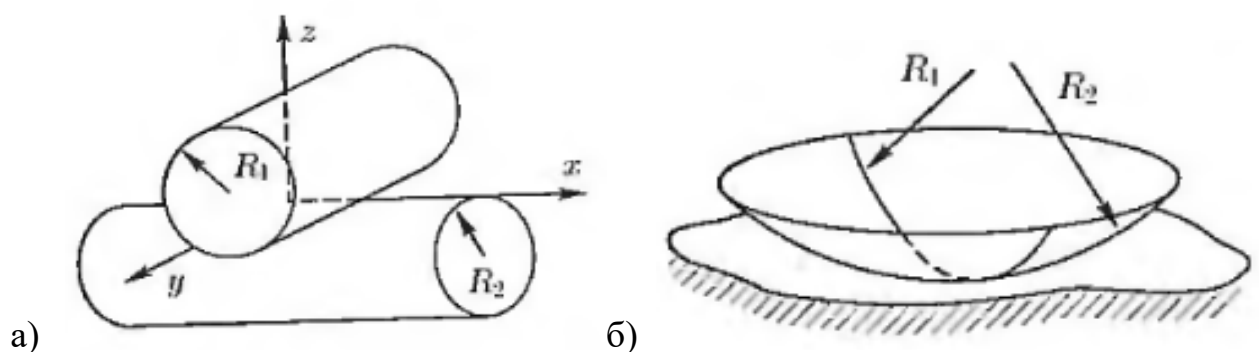


Рисунок 1.3 – Контакт пружних тіл з викривленою поверхнею:

						Арк.
			а) схрещені циліндри;	б) півпростір і тверде тіло		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміри еліптичної області контакту і розподіл тиску, відповідно до теорії пружної взаємодії Герца, визначаються наступними виразами:

$$S = \pi ab = \pi \bar{R}d, \quad p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (1.1)$$

де S - площа контакту;

a, b - півосі еліптичної області контактного пятна;

$$a = \sqrt{R_1 d}, \quad b = \sqrt{R_2 d};$$

\bar{R} - гаусівський радіус кривизни;

$$\bar{R} = R_1 R_2;$$

d - глибина проникнення;

p_0 - максимальна напруга.

Максимальний внутрішній тиск в контакті колеса локомотива з рейкою визначимо з урахуванням того, що радіус колеса і радіус поверхні катання рейки близькі ($R_1 \approx R_2, 525 \approx 500$ мм). Таким чином, взаємодія ідентично контакту пружного кулі радіусом і пружного півпростору [40, с. 75].

$$p_0 = \sqrt{\frac{6FE^*}{\pi^3 R^2}}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3FR}{4E^*}}, \quad (1.2)$$

де F - навантаження на колесо;

E^* - ефективний модуль пружності рейкової сталі;

;

$$E^* \approx \frac{E}{2(1-\nu^2)} \approx \frac{2 \cdot 10^{11}}{2(1-0,33^2)} \approx 1,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

ν - коефіцієнт Пуассона, $\nu = 0,33$;

a - радіус контактної області.

$$p_0 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10^5 \cdot (1,2 \cdot 10^{11})^2}{\pi^3 \cdot 0,525^2}} \approx 1,0 \text{ ГПа}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 10^5 \cdot 0,525}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{11}}} \approx 6,9 \text{ мм}.$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

Для колеса діаметром $D_k = 1050$ мм пружне проникнення становить
а площа плями контакту дорівнює :

$$d = \frac{\lambda a p_0}{2E^*} = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{3F}{4E^* \sqrt{R}} \right)^{2/3} \approx 91 \text{ мкм},$$

$$S = \pi \cdot 0,525 \cdot 91 \cdot 10^{-6} \approx 150 \text{ мм}^2.$$

При діаметрі колеса 1250 мм пружне проникнення становить 86 мкм, площа контакту дорівнює 168 мм². Величина проникнення від діаметра колеса має спадну залежність, а розміри площі контакту – висхідну, рисунок 1.4.

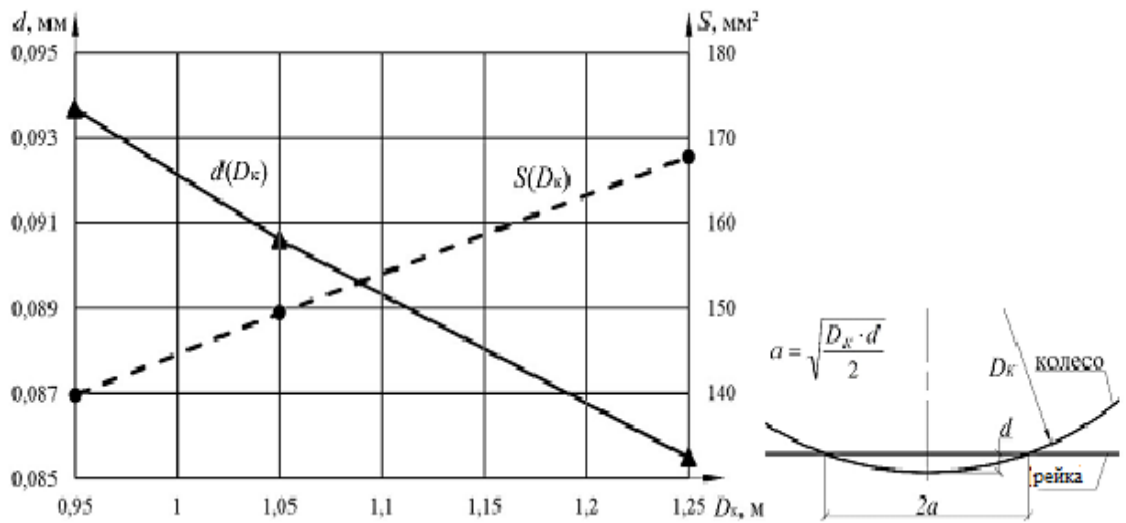


Рисунок 1.4 – Проникнення і розміри контакту від діаметра колеса

У загальному випадку, якщо між колесом і рейкою не прикладена стискає навантаження і криволінійні поверхні до деформації стикаються в одній точці (точці контакту), то майданчик контакту має форму еліпса. Точковий контакт деформованих твердих тіл, обмежених криволінійними поверхнями, характеризується чотирма головними радіусами кривизни та кутом ω між площинами головних кривизни дотичних тіл на поверхні зношеного колеса, крім поздовжньої кривизни k_{11} в точці контакту існує поперечна кривизна величиною k_{12} Кривизни рейки беруться во взаємно перпендикулярних площинах, що перетинаються по лінії дії стискає навантаження, що проходить через точку контакту. Площа еліптичного контакту S та зближення колеса з рейкою d під дією стискає навантаження F визначаються за формулами [41, сс. 54-56].

(1.3)

				$S = \pi n_a n_b \left(\frac{3F}{2E^* \sum k} \right)^{2/3}$	$d = \frac{n_a}{2} \sqrt[3]{\frac{9 \sum k F^2}{4(E^*)^2}}$	Арк.
				0032 206305 000 01MP ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де Σk - сума головної кривизни сполучених тіл $\Sigma k = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$;

$n_a n_b$ - коефіцієнти півосей еліпса, залежать від допоміжного аргументу Ω .

(1.4)

$$\Omega = \frac{1}{\Sigma k} \sqrt{(k_{11} - k_{12})^2 + (k_{21} - k_{22})^2 + 2(k_{11} - k_{12})(k_{21} - k_{22}) \cos \omega}.$$

Модель Дж.А. Грінвуда і Дж.Б. П. Вільямсона, J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson розглядали завдання контактної взаємодії ідеально гладкої та шорсткої поверхонь. Теорія ґрунтується на припущенні, що поверхні мають стохастичну шорсткість, всі піки нерівностей мають форму сфери радіусом R [40, сс. 91-96], рисунок 1.5.

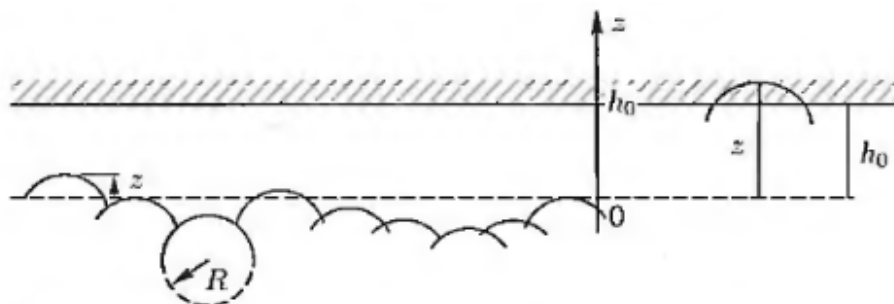


Рисунок 1.5 – Модель Грінвуда і Вільямсона шорсткої поверхні

Постулюємо, що на поверхні присутній N_0 нерівностей, їх висота відповідає нормальному закону розподілу $\Phi(z)$ відносно середнього значення z середньоквадратичним розкидом висот l .

(1.5)

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}l} e^{-\frac{z^2}{2l^2}}, \quad l = \sqrt{\langle z^2 \rangle}.$$

При зазорі між гладкою і шорсткою поверхнями наявність контакту для окремої нерівності з висотою піку відповідає умові $Z > h_0$. Величина пружного вдавнення нерівності в гладку поверхню визначається як різниця висоти піку і відстані між поверхнями $d = z - h_0$. Кількість контактів N між поверхнями, а також сумарну (фактичну) площу S і нормальну силу взаємодії F_N визначають

інтегруванням закону розподілу шорсткості, одиничного контакту				
Арк.				
$\Delta S = \pi R(z - h_0)$ і за навантаженням на ньому $\Delta F = \pi R(z - h_0) \Delta p$				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

(1.6)

$$N=N_0 \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z)dz \quad , \quad S= \pi RN_0 \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z)dz \quad ,$$

(1.7)

$$F_N=\frac{4}{3}N_0E^*\sqrt{R} \int_{h_0}^{\infty} \Phi(z)(z-h_0)^{1.5} dz \quad .$$

У міру зближення поверхонь ($h_0 \rightarrow 0$) спостерігається експоненціальне зростання числа плям дотику і сумарної площі [40].

Правила технічної експлуатації залізниць встановлює ширину колії, відстань між внутрішніми гранями коліс, величину прокату і товщину гребня [42]. Співвідношення цих параметрів і величини допусків забезпечує наявність сумарного зазору між робочими гранями головок рейки і гребнями коліс. Проміжок забезпечує вписування колісної пари в колію, його значення в залежності від величини нормативного зносу коліс і рейок на прямій ділянці шляху змінюється від 7 мм до 43 мм.

На рисунку 1.6 представлені три групи контактування гребня колеса і рейки. Перша група – нове колесо з новою рейкою, частка таких контактів становить від 5 до 10 %. Друга група – зношене колесо з новою рейкою, частка цих контактів знаходиться в межах від 20 до 30 %. Ця група відповідає одноточечному контакту гребня з рейкою, його утворенню також сприяє розколінка рейок. Третя група – зношене колесо зі зношеною рейкою, їх частка найбільша – від 60 до 75 % .

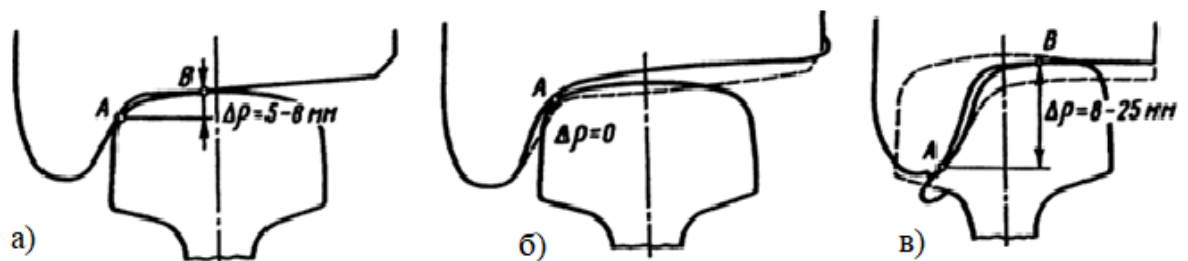


Рисунок 1.6 – Контактуювання гребня колеса з рейкою: а) – нове колесо з новою рейкою, б) – зношене колесо з новою рейкою; в) – зношене колесо зі зношеною рейкою.

					зношеною рейкою.	Арк.
					0032 206305 000 01MP ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Різниця відстаней від осі обертання колеса до точок контакту На гребні і поверхні катання $\Delta\rho$ характеризує ступінь прослизання гребня і протяжність зони зіткнення колеса з рейкою. Відрив поверхні катання колеса від рейки свідчить про процес сповзання.

1.2 Вплив магнітного поля на фізико-механічні властивості металів

Більшість досліджень останніх десятиліть спрямовані на вирішення завдань поліпшення механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів посередництвом привнесених з поза енергетичних впливів. Поряд з пластичною деформацією матеріалу, температурною обробкою, обробкою електричним струмом, широкий розвиток отримало електромагнітне і магнітне вплив.

До головних переваг магнітної обробки можна віднести: можливість дистанційного безконтактного намагнічування, простота і універсальність обладнання, висока швидкість протікання процесу. Ранні дослідження щодо зміни властивостей металів намагнічуванням відносяться до 30-х років ХХ століття. Гіпотеза про вплив магнітного поля отримала розвиток в наступні роки стосовно інструментальної сталі.

Магнітне поле здатне впливати на поглибленому (електронному, ядерному) рівні, в роботах [5, 16] підвищення стійкості магнітообробленого інструменту пояснюється зміною структури дислокацій. Атоми, що знаходяться у вузлах кристалічної решітки, під впливом зовнішньої енергії залишають вакансію і займають між вузлове положення.

Відомо, що магнітне поле впливає на структурні фазові перетворення сталі і механічні властивості при термічній обробці. Загартування металу з низьким відпусткою або без відпустки в магнітному полі підвищує межу міцності. Високий і середній відпуск з термомагнітною обробкою еквівалентний термічній обробці. Вплив магнітного поля в процесі відпустки швидкорізальної сталі сприяє переходу залишкового аустеніту в мартенсит з перетворенням тетрагонального мартенситу в кубічний. Причому обробка різців і

свердел	змінним	магнітним	полем	напруженістю до $3,2 \cdot 10^5$ А/м, еквівалентна	Арк.
				0032 206305 000 01MP ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

обробці постійним магнітним полем напруженістю до $5,6 \cdot 10^5$ А/м. Мікротвердість матеріалу пов'язана з межею міцності і опором деформації. Структурні зміни стали підтверджуються і тим фактом, що стійкість розмагнічених свердел в змінному полі може бути такою ж, як у намагнічених. Магнітострикційні і магнітно-дисперсійні процеси зміцнення і твердіння обумовлюють поліпшення в 1,5-2 рази стійкісні залежності у свердла з швидкорізальної сталі після магнітної обробки, (рисунок 1.7 а).

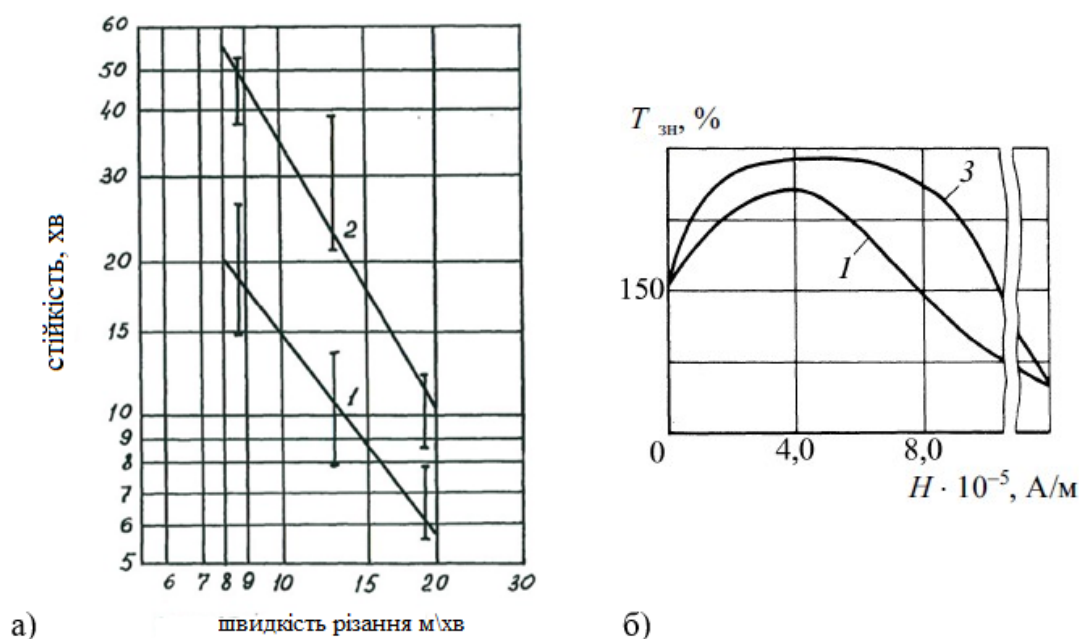


Рисунок 1.7 – Зносостійкість сталі до (1) і після (2, 3) магнітної обробки: а) – сталь Р18; б) – сталь Р6М5

В роботі [18] Б. В. Малигін відзначає сприятливий вплив магнітних полів на фізико-механічні властивості: мікротвердість, корозійну стійкість, пластичність інструментальної сталі. Переміщення дислокацій при впливі магнітного поля пояснюється зниженням залишкових напруг. Висловлюється думка, що кожній марці сталі відповідає величина n напруженості імпульсного магнітного поля, яка найкращим чином сприяє підвищенню технологічних

властивостей і експлуатаційних характеристик сталі: зміцнення, зниження

поля при магнітно-імпульсній обробці з імпульсом тривалістю 0,6 с має немонотонний характер, максимальна зносостійкість спостерігається при напруженості величиною 400 А/м, рисунок 1.7 б).

Автори робіт [7-8] відмічають, що намагнічування приводить до зміни напруги в контакті різця з матеріалом. Безповоротний вплив магнітного поля на температуру ферромагнетика пояснюється магнітотепловими афектами. Магнітокалоричний ефект викликаний перетворенням роботи поля в тепло. Для постійних магнітних полів найбільший приріст температури становить близько одного градуса. Термогальваномагнітні ефекти обумовлені впливом магнітного поля на тепло - і електропровідність, включають ефекти: Еттінгсгаузена, Нернста-Еттінгсгаузена, Риги-Ледюка, що пояснюються викривленням траєкторії носіїв заряду під впливом сили Лоренца і поля Холла. Ефект Альберта фон Еттінгсгаузена характеризується утворенням температурного градієнта в провіднику зі струмом, що знаходиться в магнітному полі. Поздовжній ефект Нернста-Еттінгсгаузена полягає в зміні термо ЕРС металів і напівпровідників при впливі магнітного поля на поздовжні і поперечні складові швидкості електронів. Термомагнітний ефект Риги-Ледюка полягає в тому, що при приміщенні провідника з градієнтом температур в постійне магнітне поле, виникає рух носіїв зарядів, що впливає на орієнтацію теплового потоку. Відзначимо, що термомагнітні ефекти для поверхонь тіл проявляються порівняно слабо.

Впливу магнітних полів на міцність і пластичність металів присвячені роботи науково-дослідних колективів під керівництвом ряду вчених: в. І. Альшица, М. І. Каганова, В. О. Громова, К. Б. Зуєва, в. І. Данилова та інших. В 1987 р. під керівництвом професора в. І. Альшица було виявлено рух дислокацій в кристалах NaCl під час витримки зразків у постійному магнітному полі з індукцією величиною 0,5 Тл. Явище отримало назву магнітостатичного ефекту (МПЕ). Вплив МПЕ полягає в зародженні дислокацій і зміні пластичних властивостей матеріалу при впливі магнітного поля. У наступні роки було встановлено вплив МПЕ на характеристики міцності матеріалу: зниження мікротвердості, зменшення межі плинності.

Макроскопічні прояви МПЕ виявлені у багатьох матеріалів в умовах

					Ак.
активного навантаження, активної деформації в умовах постійного термі					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

кристалів. Дослідження дозволили висунути і експериментально підтвердити спінову гіпотезу МПЕ. До теперішнього часу накопичено значну кількість експериментальних даних, на основі яких будуються теоретичні моделі, конкретизуються досить тонкі спінові процеси. Труднощі опису магнітопластичності пов'язано зі складністю методів спостереження через різницю в масштабах макроефектів і спінових процесів. Вимірювання, засновані на травленні поверхні кристала, показують непряму картину процесу переміщення дислокацій в магнітному полі [12].

В даний час відомо безліч робіт вітчизняних і зарубіжних авторів, присвячених магнітної пластичності, серед них і сучасні наукові дослідження слабких енергетичних впливів. Пластичні ефекти обумовлені утворенням дислокацій, зміною кількості вакансій і стану поверхні. Експериментально виявлена немонотонна залежність повзучості алюмінію від магнітної індукції величиною до 0,5 Тл. В іншій роботі [14] встановлено, що повзучість алюмінію чутлива до постійного магнітного поля з індукцією в інтервалі від 0,07 до 0,3 Тл, а при відсутності магнітного впливу його мікротвердість досягає вихідного значення згідно з експоненціальним законом. В алюмінії МПЕ пояснюється зниженням енергетичного бар'єру, через що відбувається активізація переміщення дислокацій. Вплив магнітного поля на пластичність металів відзначено в роботі [16].

Попередні дослідження також підтверджують вплив слабких магнітних полів на властивості кристалічних тіл, приріст пластичного перебігу металів пояснюється виникненням сили Лоренца при русі в магнітному полі заряджених дислокацій.

Дані робіт [8-9] свідчать про те, що після магнітної обробки конструкційних матеріалів поліпшуються їх механічні та експлуатаційні властивості: підвищується довговічність, міцність, зносостійкість, знижуються втомні та залишкові напруги. У той же час, немає єдиного якісного уявлення про характер впливу магнітних полів на властивості металів. На сьогоднішній день за тривалістю існування можна виділити три основні групи МПЕ: проявляються одночасно з впливом магнітного

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

поля, незворотні і повільно оборотні ефекти після впливу магнітного поля, рисунок 1.8.

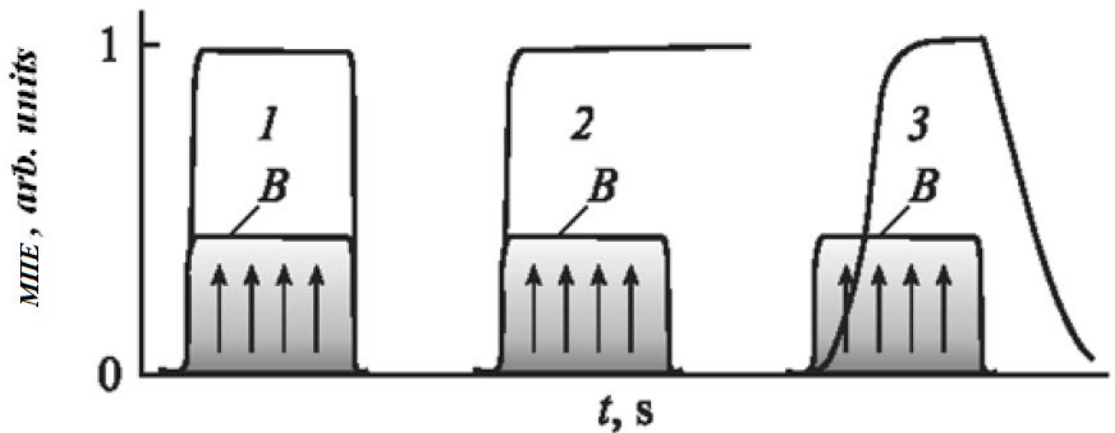


Рисунок 1.8 – Типи поведінки немагнітних матеріалів в магнітному полі : 1 – in situ ефекти, що виникають під дією магнітного поля; 2 – незворотні постефекти; 3 – післядія з повільною релаксацією

В оглядах [8-12] відображені теоретичні та експериментальні дослідження щодо впливу МПЕ на фізико-механічні властивості тіл. зазначимо, що теоретичне пояснення природи МПЕ не є вичерпним, зустрічаються випадки неузгодженості результатів. При намагнічуванні вісмуту мікротвердість збільшується, на алюміній магнітне поле чинить протилежну дію.

Наведені дані свідчать про багатогранність і складність дії магнітного поля на властивості металів, в різні роки були відкриті взаємо-обумовлюють магнітні явища і ефекти. Найбільш часто зустрічаються: магнітотеплові, магнітострикційні, магнітно-дисперсійні і МПЕ. Найбільш повний сучасний опис МПЕ дано в роботі [62], автори зараховують ефект до відносно нової і молодій групи явищ. Ефект полягає в ініціюванні слабким низькоенергетичним магнітним полем процесу взаємодії парамагнітних частинок, а також вплив поля на спіновий стан системи і хімічні реакції. Роль магнітного поля полягає в зміні структури стопорів і зменшенні сили закріплення дислокацій.

Аналіз публікацій [21-23] дозволяє зустріти як ранні, так і сучасні

дослідження, присвячені				тертю твердих тіл при наявності в зоні контакту		Арк.
Змн.				Підпис		Дата

0032 206305 000 01MP ПЗ

електричного струму і магнітного поля. Ряд досліджень безпосередньо відносяться до зчеплення колеса з рейкою, є і такі, які описують схожі фізичні процеси.

Роботи Д.В. Воробйова [14-17] присвячені дослідженню питань впливу на зчеплення колеса з рейкою різних факторів: контактних напруг, стан поверхні, наявності в зоні контакту електричного струму і магнітного поля. Виявлено, що пропускання струму через зону контакту призводить до більш ніж дворазового зростання коефіцієнта тертя з 0,165 до 0,371 при вологому контакті і до 0,452 при сухому контакті. Зафіксовано підвищення зчеплення за рахунок впливу магнітного поля з 0,165 до 0,222. Дані явища пояснюються зростанням температурного градієнта в контакті металів і збільшенням фактичної площі контакту. Було показано, що фізичні поля впливають на триботехнічні властивості вузла тертя. Стендові випробування для сухого і змоченого контакту циліндра з площиною свідчать про збільшення сили тертя після включення електричного струму або магнітного поля, рисунок 1.9.

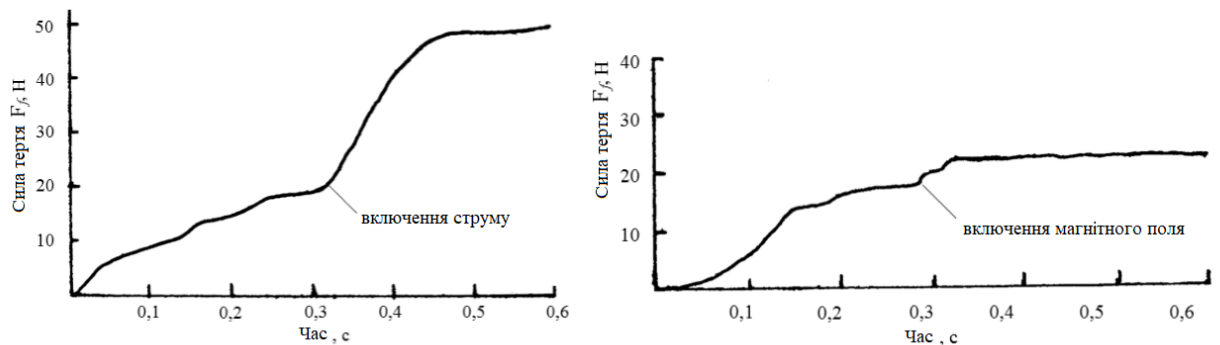


Рисунок 1.9 – Осцилограма сили тертя (навантаження на контакт 250 Н)

Подальші дослідження впливу магнітного поля на триботехнічні властивості відносяться до процесу прокатки [18]. У книзі, присвяченій прокатці металів в постійних магнітних полях, Л.Г. Делюсто розглядає можливість зміни коефіцієнта тертя за допомогою магнітного поля. Отримані результати пояснюються тим,

магнітного поля, це сприяє пружному деформуванню і зміні субмікрошорховатості поверхні. Необхідна шорсткість при прокатці металу підтримується за рахунок впливу магнітного поля. Ряд пропозицій щодо поліпшення зносостійкості та зниження тріщино утворення матеріалу заснований на безперервному намагнічуванні в процесі експлуатації, а також зниженні амплітуди і частоти коливань для областей, розділених мікро тріщиною. Досвідчені дані по переміщенню на ділянці машинного тертя металів показують, що при терті феромагнетиків (Fe) з мастильним матеріалом в постійному магнітному полі коефіцієнт тертя зростає на 17 %, а для випадку переміщення діамагнітних (Cu) і парамагнітних (Al) тіл по поверхні феро-магнітного при тих же умовах коефіцієнт тертя знижується на 44 %. Менший коефіцієнт тертя пояснюється збільшенням зазору між немагнітним тілом і магнітним валиком, що призводить до зниження сили зчеплення і магнітної проникності в зоні контакту. Сила тертя без магнітного поля створюється зачепленням нерівностей, магнітне тертя обумовлюється силою електромагнітного притиснення і міною стану контактних поверхонь. Додаткове зчеплення

прокатних валків з смугою в магнітному полі пояснюється наявністю між тертьовими поверхнями феромагнітного рідкого прошарку з частинками залізничного пилу. Зміна параметрів магнітного поля в зоні деформації дозволяє підтримувати необхідну величину коефіцієнта тертя. Коефіцієнт тертя між валками і смугою при прокатці в постійному магнітному полі має параболічну залежність від напруженості і індукції магнітного поля.

Від величини тертя залежить існування усталеного процесу, продуктивність і якість прокатки. У роботі [19] було відзначено, що фізичні процеси при захопленні валками смуги і подальшому її протягуванню схожі зі зчепленням колеса локомотива і рейки. В обох випадках вирішальну роль відіграє коефіцієнт тертя в зоні контакту деформованих тіл.

Гіпотезу зміни стану вузла тертя в постійному магнітному полі досліджував і .А.Кравець. Висунута гіпотеза про вплив зовнішнього енергетичного джерела, на

зону тертя базується на наукових постулатах про магнетизм. Результати показують,

що використання спрямованого магнітного поля дозволяє при прокатці зразка

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

проти Південного полюса, збільшити коефіцієнт тертя до 0,15, проти Північного коефіцієнт тертя досягає величини від 0,07 до 0,09. Трибологічні процеси спільно із зовнішніми енергетичними впливами на вузол тертя сприяють активному переміщенню матеріалу. У період нестабільного стану поверхонь тертя зовнішній енергетичний вплив дозволяє змінювати будову матеріалів.

Пропускання магнітного потоку між металами сприяє підвищенню енергії в поверхневих шарах і приконтатних областях, завдяки чому відбувається активація електричної структури матеріалу. Магнітна активація контакту в порівнянні з тепловою, без інерційна .

В даний час наука, а слідом за нею технології і промисловість розвиваються по шляху надання матеріалам необхідних властивостей. Широкого розголосу набувають нанотехнології, що діють на об'єкт на атомарному рівні, в той же час достовірна теорія макроскопічного впливу фізичних полів на мікро явлення в структурі матеріалу розроблена далеко неповно. В результаті аналізу літературних джерел виявлено ряд досліджень, які відображають здатність магнітного поля впливати на фізико-механічні властивості матеріалів.

1.3 Способи підвищення зчеплення коліс локомотива з рейками

Зчіпні властивості колеса з рейкою мають стохастичний характер, головним чином залежать від навантаження і структурно-реологічних властивостей поверхні [4]. Відповідно до основного закону локомотивної тяги параметр зчеплення колеса з рейкою обмежує силу тяги і гальмівну силу. Підвищення зчіпних властивостей в парі колесо локомотива-рейок ґрунтується на наступних принципах: використання в зоні контакту третього тіла, зміна сили притискання колеса до рейки довантаженням колісної пари і перерозподілом осьових навантажень, розподіл між осями тягових зусиль, зміна геометрії контактуючих тіл, вплив на умови проходження криволінійних ділянок шляху, зміна стану зони контакту колеса з рейкою впливом фізичних полів.

На сьогоднішній день підсипка піску в зону контакту колеса з рейкою це найпоширеніший спосіб підвищення зчеплення. Пісок є екологічно безпечним і

						дешевим матеріалом, однак, цьому способу притаманні недоліки. Обмежена	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01 МР ПЗ		

можливість використання піску на стрілочних переводах, пісок сприяє забрудненню і зниженню електричного опору баласту, підвищенню зносу вузлів і деталей за рахунок абразивного впливу. Виникає потреба в пунктах екіпірування піском, інерційність механізму підсипки піску не дозволяє запобігти початку буксування.

Відомі й інші способи підвищення зчеплення колеса з рейкою за рахунок введення в зону контакту третього тіла, що складається з різних речовин: графіту, цементу, гліцерину, бітуму, скла та ін.. Активатори тертя модифікують фізико-хімічні властивості поверхні, крім того, в зону контактної плями подаються абразивні частинки. На активатори тертя накладаються вимоги точності і обсягу нанесення шару, дотримання умов охорони навколишнього середовища, виключення схоплювання і виривання матеріалу. Застосування

синтетичних матеріалів для виготовлення коліс дозволяє підвищити коефіцієнт зчеплення, однак, контактні напруги призводять до інтенсивного зносу і підвищення експлуатаційних витрат. Функцію перерозподілу сили тяги між осями виконує Груповий тяговий привід, який використовується на дизель-поїздах (Д1, ДР1А), маневрових тепловозах з гідравлічною передачею (ТГМ4, ТГМ6, ТГМ23), промислових локомотивах (ТЕУ630). По візкове і повісне регулювання дотичної сили тяги стало можливим з впровадженням мікропроцесорних систем управління, що дозволяє індивідуально регулювати силу тяги, виходячи з зчіпних можливостей кожної колісної пари.

Перерозподілу осьових навантажень і довантаження колісних пар реалізуються шляхом внесення змін в конструктив рухомого складу, підвищення зчіпної ваги. При конструкції колії і швидкостях руху поїздів, властивих магістральному транспорту, довантаження колісних пар обмежується граничним осьовим навантаженням. Великі можливості даний спосіб знаходить в маневровій роботі і на шляхах промислового транспорту. Відомо пристрій збільшення тиску коліс транспортного засобу на рейки, що містять закріплені на осі і розміщені біля колеса, в безпосередній близькості від зони контакту, джереламагнітного потоку.

Випробування тепловоза ТЕМ2 - 1983 з електромагнітним пристроєм підвищення зчеплення, розміщеному на візку, проводилися в 1976 році. Після

цього, на замовлення Головного управління локомотивного господарства МПС

Брянський машинобудівний завод в 1978 році виготовив тепловоз ТЕМ2УС-001.					Арк. 2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Тепловоз випробовувався у ВНІПІ. Візки тепловоза обладнані електромагнітами, сила додаткового притиснення створювалася за рахунок проходження магнітного потоку через колеса і рейки. Раніше ідея електромагнітного підвищення зчеплення перевірялося на паровозах серії СО та електровозах ВЛ23.

Слід зазначити, що випробування магнітних підсилювачів зчеплення на порухомому складі проводилися без дослідження магнітних ланцюгів візків локомотива і, як наслідок, можливості пристроїв обмежувалися причинами конструкційного характеру: труднощами розміщення габаритних обмоток, значними повітряними зазорами, розсіюванням магнітного поля в елементах візка.

Хімічні, фізичні та електричні (електроіскрові і плазмові) способи збільшення зчеплення між колесом і рейкою полягають у впливі на поверхні тертя. У ряді з них механічні властивості металів змінюються за рахунок хімічних і теплових реакцій. Зважаючи на низьку стабільність дані способи не знайшли широкого застосування на залізничному транспорті.

Відомий спосіб збільшення зчеплення колеса з рейкою, заснований на нагріванні поверхневих забруднень низькотемпературної плазмою перед проходженням поїзда. Однак, через нестійкість плазми спосіб не дозволяє отримувати стабільні величини коефіцієнта зчеплення. Крім того, недоліком плазмового впливу є висока складність всієї системи, обмежена регулювання потужності, необхідність введення в палиник газу і використання водяного охолодження.

Відомий спосіб підвищення зчеплення коліс транспортного засобу з рейками, що полягає в нагріванні поверхневих забруднень коліс і рейок. На поверхневі забруднення впливають високочастотним електромагнітним полем, енергію якого направляють на поверхні тертя коліс і рейок, при цьому потужність випромінювання високочастотного електромагнітного поля визначають на основі вихідного коефіцієнта тертя, вихідної температури і вологості в зоні тертя колеса з рейкою, а також швидкості руху[7].

Для науково-технічних колективів завдання дослідження області контакту колеса і рейки з метою управління тертям залишається актуальною. Застосування підсилювачів зчеплення коліс з рейками зводиться до виключення режимів роботи

тягового приводу в умовах буксування					ВЛ23 збільшення тертя фрикційних автоколів		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

[13]. Таким чином, з точки зору енергоспоживання, зростає енергоефективність роботи локомотива. Пристрої підвищення зчеплення нового покоління повинні ґрунтуватися на управлінні властивостями робочих поверхонь колеса і рейки. Поверхонь необхідні властивості можуть надаватися як в зоні контакту, так і поза зоною контакту.

Проведений аналіз в області поліпшення зчеплення коліс з рейками і зміни фізико-механічних властивостей металів при намагнічуванні дозволив в деякій мірі судити про можливі впливи постійного магнітного поля на тягові якості тепловозів, але спільний вплив умов експлуатації і намагнічування досі не досліджувалося.

Справжня дисертаційна робота полягає в розробці та вдосконаленні науково обґрунтованих методів і способів поліпшення тягових якостей тепловозів впливом постійного магнітного поля на зони контакту коліс з рейками, за рахунок дослідження ефекту впливу магнітного поля на взаємодію сталевих пар тертя, Визначення геометричних параметрів контактування коліс з рейками, розробки заходів з намагнічування зон контакту коліс тепловоза з рейками в умовах експлуатації.

В період з 2009 по 2019 роки виконувався аналіз стану досліджуваного питання, здійснювався збір експериментальних даних і контрольованих параметрів, побудова моделі взаємодії коліс з рейками, дослідження магнітних ланцюгів. Дисертаційні дослідження проводилися на коліях сервісного локомотивного депо «Слець», в лабораторіях кафедри «рухомий склад залізниць» Дніпровського національного університету залізничного транспорту (ДНУЗТ) та кафедри «тяговий рухомий склад» російського університету транспорту (МІІТ). Був випробуваний дослідний зразок індукторного пристрою збільшення зчеплення коліс з рейками. Вивченню на трибометричних установках піддавалися зразки, виконані з бандажної сталі колісних пар локомотивів.

Висновок до розділу. Модель контакту пружних тіл, заснована на законах контактної механіки і теорії Герца, дозволяє розрахунковим шляхом визначити

приблизні розміри контактної плями. Для уточнення геометричних параметрів зони

контакту колеса з рейкою слід вдатися до методів математичного моделювання.

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Більшість з поширених методів підвищення зчеплення коліс залізничного рухомого складу з рейками мають істотні недоліки. Сучасні шляхи поліпшення механічних та експлуатаційних властивостей матеріалів полягають у зовнішніх енергетичних впливах.

Отримані в різні роки експериментальні підтвердження говорять про вплив магнітних полів на фізико-механічні властивості металів. Розглянуті дослідження показують, що вплив магнітного поля на контакт сталевих пар тертя підвищує коефіцієнт і силу тертя, отже, коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою також може бути підвищений.

					0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТРИБОМЕТРИЧНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛЕВИХ ПАР ТЕРТЯ ПРИ ВПЛИВІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

В даному розділі наведені результати експериментальних досліджень впливу постійного магнітного поля на коефіцієнт тертя зразків зі сталі. Дано опис установок і методик проведення експерименту. Визначено характеристики магнітного поля, отримано залежності коефіцієнта тертя від магнітного поля в зоні контакту.

2.1 Установа для дослідження тертя кочення зі ковзанням

Фізичне моделювання широко використовується в практичній трибології, воно полягає в дослідженні фізично подібних процесів на установках, що дозволяють зберегти природу фізичних явищ і відтворюють їх в інших фізичних і геометричних розмірах. Особливість трибологічної моделі полягає в однаковій природі явища з оригінальним об'єктом, використовуються такі ж умови і матеріали пар тертя.

Результати моделювання зв'язуються з реальним об'єктом за допомогою масштабного фактора. Моделювання трибологічних процесів на експериментальних установках дозволяє відтворювати тотожні умови випробувань і отримувати вихідні характеристики коефіцієнта тертя від режиму випробувань, аналогічні характеристикам оригінальних об'єктів. Можна назвати наступні основні переваги використання лабораторних установок: економія матеріальних і тимчасових ресурсів, зниження витрат на створення та експлуатацію стенду.

Дослідження сталевих пар тертя в умовах тертя кочення зі ковзанням при впливі магнітного поля включають експериментальну частину і визначення параметрів магнітного поля з використанням кінцевого елементного пакета ANSYS Maxwell. Експериментальні дослідження проводилися на трибометричній установці.

Парою тертя на установці (рисунки 2.1 а) є колесо і рейка. Джерелом

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

намагнічує сили є індуктор з обмоткою. Дві котушки 140 і 200 витків, намотаних на П-подібний магнітопровід (рисунок 2.1 б) у взаємно перпендикулярних площинах. Обмотки котушок виконані мідним проводом діаметром 1 мм. Колесо представлено циліндром діаметром 75 мм і висотою 10 мм, приводиться в обертання електродвигуном. Електродвигун розміщений на поворотній платформі 4.

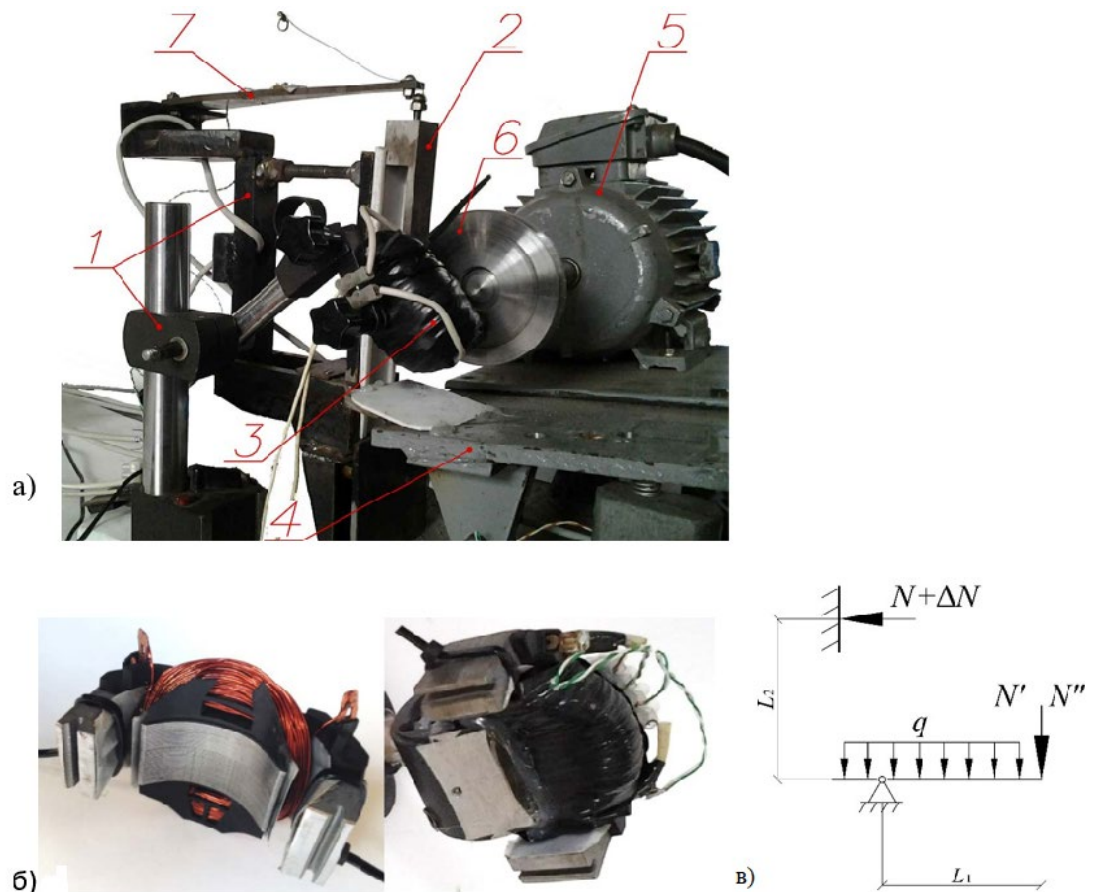


Рисунок 2.1 – Установка для дослідження трибологічних характеристик в умовах тертя кочення з ковзанням при впливі магнітного поля:

1 – стояк; 2 – рейка; 3 – індуктор; 4 – платформа; 5 – електродвигун; 6 – колесо; 7 – тензобалка з тензодатчиком

Рейка виконана бруском прямокутного перетину з виточкою, з'єднана з тензобалкою 7, закріпленою на стійці 1. На тензобалці розташований тензодатчик, що реєструються зусилля передаються на тензометричну станцію у вигляді сигналу. Тензометрична станція підсилює сигнал і передає через

сила тертя колеса про рейку повідомляється тензобалці без значних втрат на тертя рейки об опорну поверхню.

Притиснення колеса до рейки без намагнічування N і при намагнічуванні $N+\Delta N$ зазначається за допомогою динамометра, приєднаного до поворотної платформи, за схемою на рисунку 2.1 в. Показання динамометра без магнітного поля N' і с магнітним полем N'' фіксується в момент відриву колеса від рейки. Величина сили додаткового притиснення колеса до рейки визначається з виразу

$\Delta N=(N''-N') \cdot L_1/L_2$. Занурення має квадратичну залежність від індукції в зоні контакту, рисунок 2.2.

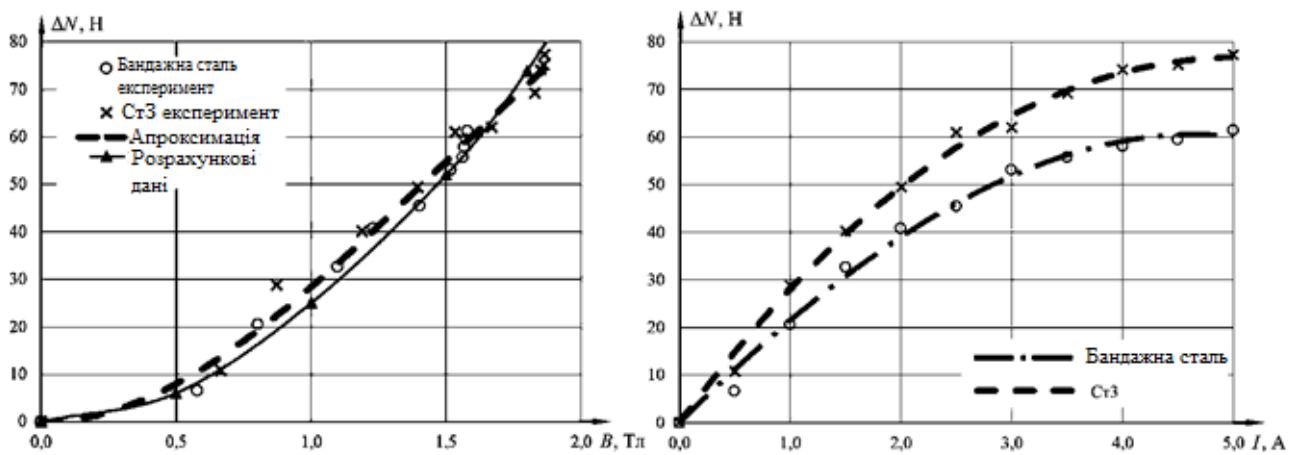


Рисунок 2.2 – Сила додаткового притиснення колеса до рейки від індукції в зоні контакту і струму котушки

Магнітна енергія, зосереджена в повітряному зазорі, створює в зоні контакту колеса з рейкою силу додаткового електромагнітного тяжіння $\Delta N=0,5BHs$, яка залежить від індукції B , напруженість H магнітного поля і площі s .

Основне завдання експериментів полягала в зборі даних величини намагнічуючого струму, сили притиснення і сили тертя в трибологічній системі колесо – рейок без намагнічування і при різних режимах намагнічування зони контакту. Кожен досвід виконувався в наступній послідовності: підготування

установки до експерименту, підключення індуктора до джерела постійної напруги і установка необхідного значення сили струму в обмотці, пуск електродвигуна, реєстрація сили тертя для заданих режимів намагнічування, вимикання

					електродвигуна, вимірювання динамометром. Зусилля відриву колеса від рейки,	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206 305 000 11 МР 113	

зняття напруги з котушки індуктора. Етап підготовки включав тарувальні тензометричної системи, очищення поверхонь тертя, перевірку працездатності засобів вимірювання, огляд електричних ланцюгів. У частині дослідів магнітне поле подавали і знімали між етапами пуску і виключення двигуна. Досліди № 12 і 13 відповідають пізньому включенню магнітного поля, а досвід № 4 – раннього відключення магнітного поля, рисунок 2.3.

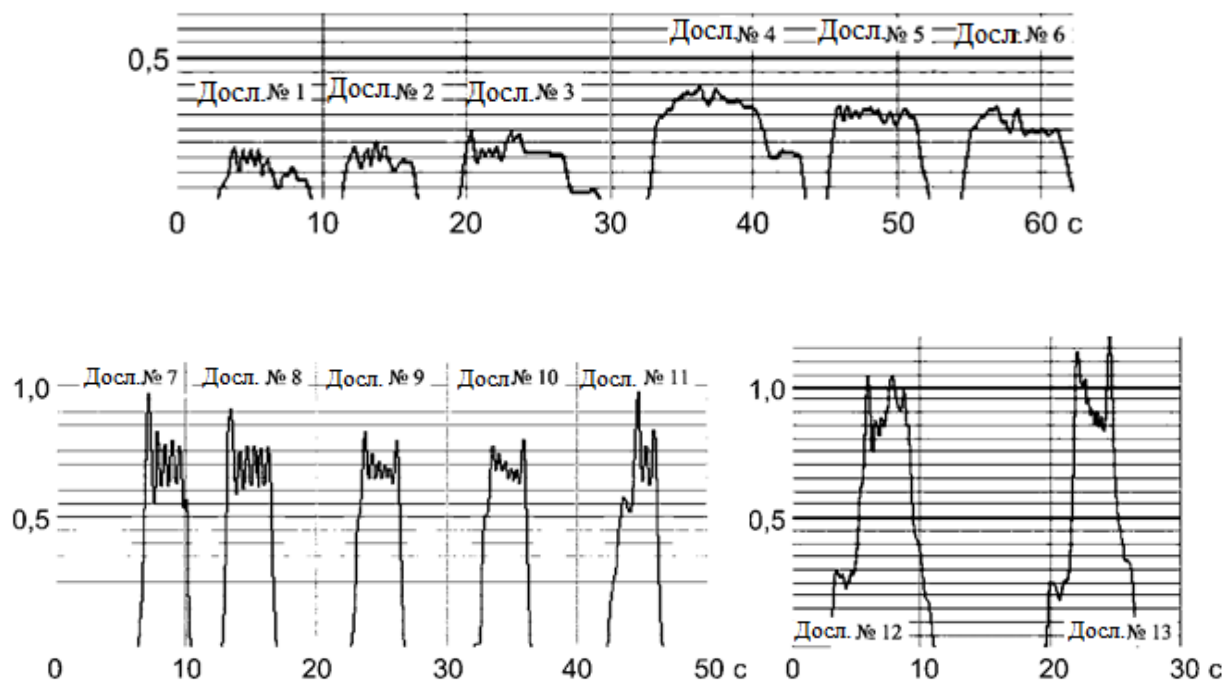


Рисунок 2.3 – Осцилограми зміни сил тертя (відносні одиниці)

В процесі експерименту відтворювалася втрата зчеплення колеса з рейкою і зрив в буксування, при цьому спотворювалася реєстрована сила тертя. Про надійної реєстрації свідчать явні підйоми і спади при зміні режиму намагнічування, пульсація сили тертя щодо середнього значення.

Досліди № 1-3 виконувалися без намагнічування зони контакту колеса з

рейкою, в наступних дослідях № 4-11 виконувалося плавне намагнічування зони контакту. Досліди № 12 і 13 проводилися при насиченні сталі в зоні контакту колеса з рейкою. Зразки виготовлені зі сталі, використовуваної при виробництві

бандажів	в колісних	пар, і	Ст 3.	Досліди № 1, 2, 6, 9, 10, 11, 12 проводили	СаркЗ
				ООЗ 206305 000 01MP ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

використанням бандажної сталі; в дослідах № 3, 4, 5, 7, 8, 13 використовувалася Ст3.

Досліди показують, що пропускання магнітного потоку через зону контакту колеса з рейкою викликає збільшення сили тертя на величину ΔF . Магнітна енергія в повітряному зазорі створює силу електромагнітного тяжіння, однак, додаткове притиснення не пояснює весь приріст тертя, оскільки зіставлення експериментальних даних у вигляді відношення сили тертя до сили притиснення виявляє різницю в коефіцієнтах тертя. При відсутності магнітного поля коефіцієнт тертя відповідає μ , в умовах намагнічування він зростає на величину $\Delta\mu$. На думку авторів [90], ця різниця являє собою те, що в законі Амонтона – Кулона називається адгезійним схоплюванням поверхонь, а І.В. Крагельським пояснюється наявністю молекулярної компоненти коефіцієнта тертя.

Уявімо приріст сили тертя ΔF як результат сумарного впливу від магнітного навантаження ΔN і зміни триботехнічних властивостей вузла тертя $\Delta\mu$, вплив яких накладається на притиснення N і коефіцієнт тертя безмагнітного поля.

$$\Delta F = \mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot \Delta N + \Delta\mu \cdot N. \quad (2.1)$$

Підстановка експериментальних значень сил тертя і притиснення у вираз (2.1) показує, що в режимі початкового насичення коефіцієнт тертя підвищується на 13%, при повному насиченні – на 22%. Таким чином, збільшення магнітного потоку, що проходить через зону контакту колеса з рейкою, сприяє зростанню коефіцієнта тертя. Залежність відносної зміни коефіцієнта тертя від індукції магнітного поля в зоні контакту має квадратично-кубічний вигляд, рисунок 2.4.

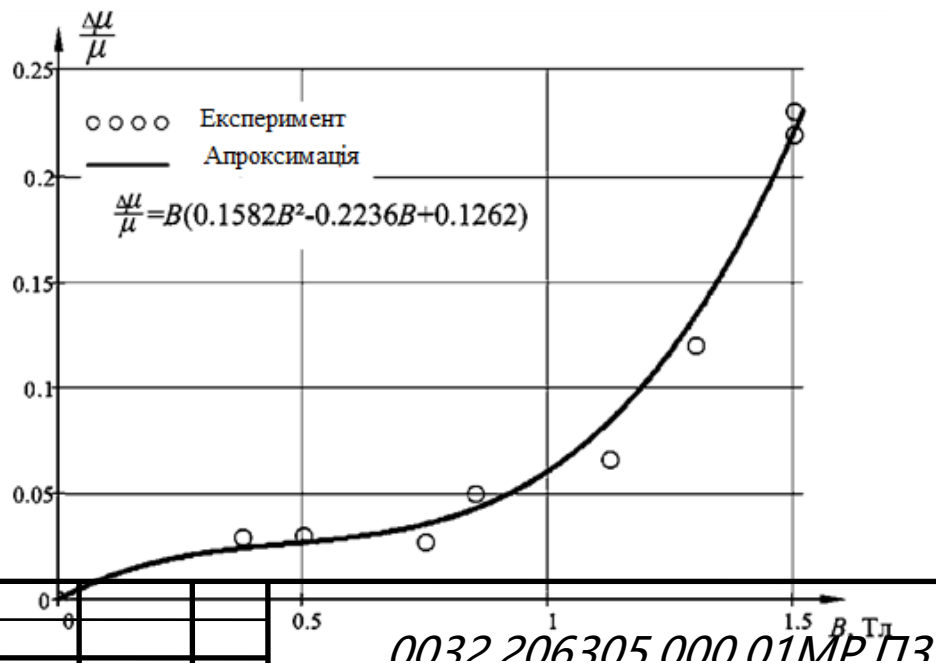


Рисунок 2.4 - Залежність відносної зміни коефіцієнта тертя від індукції магнітного поля в зоні контакту

Залежно від типу установки у виразі (2.1) може переважати перший або останній доданок. Лабораторна установка характеризується невеликою силою притиснення колеса до рейки N , компактністю, малою потужністю. Натурний стенд відрізняється реальними габаритними розмірами, середньою силою N . Досвідчений локомотив – значною силою притиснення і потужністю, реальними розмірами. Для кожного експерименту фізичні процеси подібні, що дозволяє виявити коефіцієнт тертя, враховуючи вплив тієї чи іншої складової сили тертя. Співвідношення сил тертя для різного типу установок, характерні для режимів намагнічування зони контакту колеса з рейкою до індукції 0,7 і 1,5 Тл, наведені на рисунку 2.5.

У лабораторній установці переважає тертя, створюване основним коефіцієнтом тертя і зануренням $\mu \cdot \Delta N$, тертя, створюване збільшенням коефіцієнта тертя $\Delta \mu \cdot (\Delta N + N)$, змінюється в межах від 5 до 50 % від ΔF . У натурального стенду зазначені складові тертя варіюються від 50 до 95 % від ΔF . Для дослідного локомотива від 80 до 99 % додаткового тертя, обумовлено збільшенням коефіцієнта тертя на величину $\Delta \mu$.

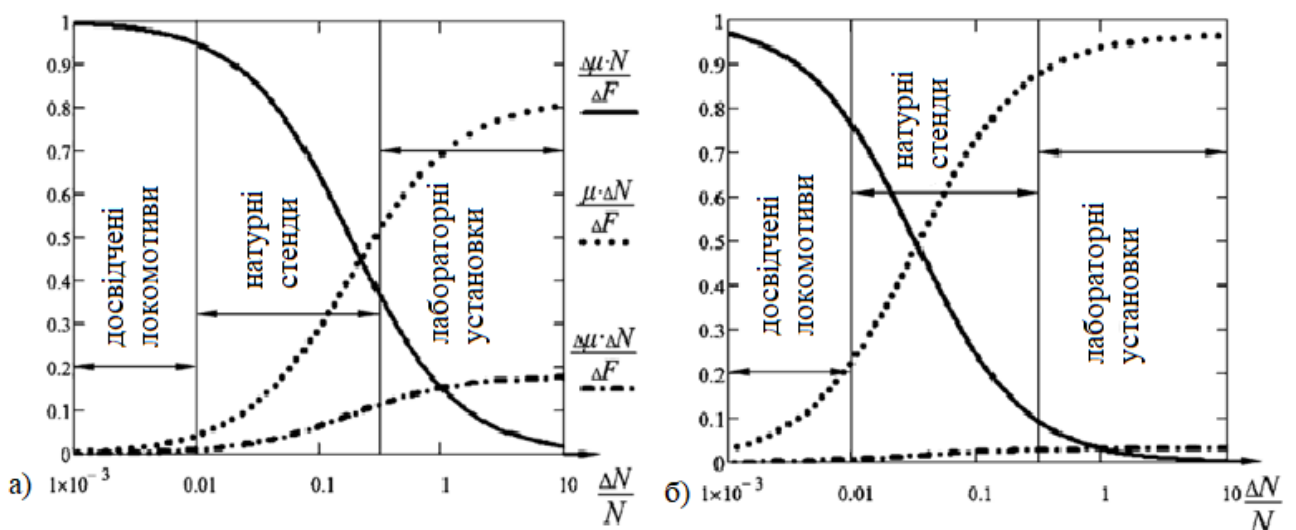


Рисунок 2.5 – Співвідношення складових сили тертя ΔF : а) – індукція в зоні контакту 0.7 Тл; б) – індукція в зоні контакту 1.5 Тл

						Арк.
<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При оцінці загальної точності виміру реєстрованої величини сили тертя, кожна зі складових систематичних похибок приймає характер випадкової величини, а її граничне значення ϵ стає приватною похибкою. Граничну похибку виконуваних вимірювань визначимо, склавши приватні похибки: від тензодатчиків – 1 %, від сполучних проводів – 1 %, від тензометричної станції – 3%, від неточності обробки осцилограм – 3%, $\epsilon_{\Sigma} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 3^2 + 3^2} = 4,47$ %.

2.2 Визначення характеристик магнітного поля

Важливо розуміти розподіл і параметри магнітного поля в установці, кінцевою метою при розрахунку магнітної системи є визначення характеристик і величини поля на ділянці магнітного ланцюга. Для плоских структур Математичні рішення отримують, ґрунтуючись на деяких припущеннях, аналітичних спрощеннях. Застосування спрощених моделей досить на етапі попереднього розрахунку. Даний підхід призводить до наближеного рішення і не може бути застосований до магнітних ланцюгів, які характеризуються: складною геометрією, різноманіттям меж розділу середовищ, нелінійними властивостями. В той же час актуальним завданням є розрахунок тривимірних об'єктів, схильних до намагнічування. В даному випадку одновимірні аналітичні рішення не можуть бути застосовані. Поставлені завдання призводять до вирішення диференціальних рівнянь Максвелла для квазістатичних електромагнітних полів.

Для підвищення ступеня достовірності математичних моделей потрібен глибокий аналіз магнітного поля в феромагнітних середовищах на основі застосування чисельних методів, вирішення нелінійних крайових задач. Такі дослідження дозволяють по-новому побудувати математичні моделі і врахувати особливості процесів, що виникають з високими навантаженнями, нетиповими конфігураціями і відносинами геометричних розмірів.

Чисельний аналіз охоплює широкий спектр завдань, слід зазначити, що чисельні методи вимагають значних обчислювальних ресурсів і з появою

високопродуктивних комп'ютерів виявилися найбільш затребуваними.	Ана
Сьогоднішній день вивомі програмні продукти для розрахунку електромагнітного	0032 206305 000 01MR ПЗ
ЗМР. Арк. № докум. Фібіліс Дата	

поля: FLUX3D, JMAG, EMS, Comsol, Elcut, FEMM, Ansys та інші, що дозволяють з високою точністю виконувати розрахунок об'ємних магнітних систем чисельними методами.

При аналізі полів і процесів в електромеханічних системах широкого поширення набув метод кінцевих елементів (МКЕ). Основний принцип МКЕ полягає в тому, що простір розбивається на окремі частини у формі трикутників, прямокутників, а при тривимірній задачі – паралелепіпедів, тетраєдрів, які утворюють сітку кінцевих елементів. Сітка апроксимує межі розрахункової області, розмір сітки залежить від точності.

Кінцеві елементи не перекривають один одного, кожен елемент сітки має три вершини-вузли і задається окремим поліномом. Скалярний магнітний потенціал характеризується коефіцієнтами, постійними для даного полінома.

Магнітний потенціал $\varphi_{m(i)}$ описується лінійним поліномом першого порядку $\varphi_{m(i)} = a_{(i)} + b_{(i)}x + c_{(i)}y$ з коефіцієнтами i -го елемента $a_{(i)}$, $b_{(i)}$, $c_{(i)}$. Завдання МКЕ зводиться до визначення коефіцієнту для кожного елемента за допомогою рішення нелінійного диференціального рівняння в приватних похідних для векторного магнітного потенціалу A . В результаті з'являється можливість визначити значення шуканого параметра в вузлах і ребрах сітки. В умовах плоско паралельної задачі для двовимірного магнітного поля рівняння Пуассона має наступний вигляд.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (2.2)$$

де A – векторний магнітний потенціал;

μ_x, μ_y – компоненти тензора магнітної проникності;

H_{cx}, H_{cy} – складові коерцитивної сили;

j – вектор середовища густини струму.

Прийнявши, що структура матеріалу ізотропи, пропорційні залежності щільності струму від напруженості електричного поля і потенціалу електромагнітного поля:

					$\vec{j} = \sigma \vec{E} = -\sigma (\nabla \varphi + \frac{\partial A}{\partial t})$	Арк.
					<i>0039 201305 000 01MP ПЗ</i> (2.3)	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де σ – питома провідність середовища;

E – напруженості електричного поля;

ϕ – скалярний потенціал.

В електродинаміці, коли швидкість руху тіла порівняно мала, можна скористатися способами розрахунку для нерухомих тіл. В умовах електростатики $\text{div}A = 0$, при цьому рівняння (2.3) спростити $j = \sigma E = -\sigma \cdot \nabla \phi$.

Джерело намагнічуючої сили визначається струмом в заданій точці. Розподіл струму описується граничними умовами Неймана, що характеризують щільність струму, або за допомогою ампер-витків котушки. Зв'язок щільності струму j і намагнічуючої сили $n \cdot I$ має пропорційну залежність, коефіцієнтом пропорційності є величина, зворотна площі поперечного перерізу котушки S .

Заміна крайової задачі варіаційної зводиться до мінімізації нелінійного енергетичного функціоналу. Розрахункові дані отримуються в результаті мінімізації функціоналу в області Ω , яка попередньо розділена на довільне число елементів.

$$F = \int_{\Omega} \left(\int_0^{B_x} v \cdot B_x \cdot dB_x + \int_0^{B_y} v \cdot B_y \cdot dB_y \right) \cdot d\Omega - \int_S A_z \cdot \Delta \cdot d\Omega \quad (2.4)$$

Магнітна індукція $B = \text{rot}A$ представлена ротором потенціалу. Потенціал всередині довільного елемента m з вершинами i, j, k , які мають координати $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$, визначається значеннями A_z у вершинах.

$$A_z = \frac{(a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y) \cdot A_{zi} + (a_j + b_j \cdot x + c_j \cdot y) \cdot A_{zj} + (a_k + b_k \cdot x + c_k \cdot y) \cdot A_{zk}}{2S_{\Delta}} \quad (2.5)$$

де A_{zi}, A_{zj}, A_{zk} – векторний магнітний потенціал у вершинах трикутника m ;

$$a_i = x_i \cdot y_k - x_k \cdot y_j, \quad b_i = y_i - y_k, \quad c_i = x_k - x_j, \quad a_j = x_k \cdot y_i - x_i \cdot y_k, \quad b_j = y_k - y_i, \quad c_j = x_i - x_k,$$

$$a_k = x_i \cdot y_j - x_j \cdot y_i, \quad b_k = y_i - y_j, \quad c_k = x_j - x_i - \text{коефіцієнти базисної функції};$$

$$S_{\Delta} = \frac{(x_i \cdot b_i + x_j \cdot b_j + x_k \cdot b_k)}{2} - \text{площа трикутника } m.$$

У трикутнику присвоюються постійні значення B_x і B_y і визначається

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)^2 + \left(-\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{c_i \cdot A_{zi} + c_j \cdot A_{zj} + c_k \cdot A_{zk}}{2S_{\Delta}}\right)^2 + \left(\frac{b_i \cdot A_{zi} + b_j \cdot A_{zj} + b_k \cdot A_{zk}}{-2S_{\Delta}}\right)^2}$$

					Арк.
<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Мінімум функціоналу знаходиться з умови $\frac{\partial F^m}{\partial A_{zp}} = 0$. Постійність сумарного заряду

замкнутої системи в електродинаміці описується рівнянням безперервності $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot$

$\mathbf{j} = 0$, де $\nabla \cdot \mathbf{j}$ – дивергенція щільності струму, а $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ – зміна щільності заряду.

В магнітостатиці $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, при цьому рівняння безперервності впливає в умову соленоїдальності поля $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$.

Матеріал магнітопроводу повинен відповідати наступним вимогам: малі втрати в сердечнику, висока щільність потоку сатурації, велика магнітна проникність. Феромагнетики добре зарекомендували себе в якості магнітної компоненти і є найбільш популярним матеріалом при виготовленні індукторних пристроїв і електричних машин. Конструкційні сталі на основі заліза є феромагнетиками. Основні криві намагнічування $B(H)$ сталей, що використовуються в даній роботі, наведені на рисунку 2.6.

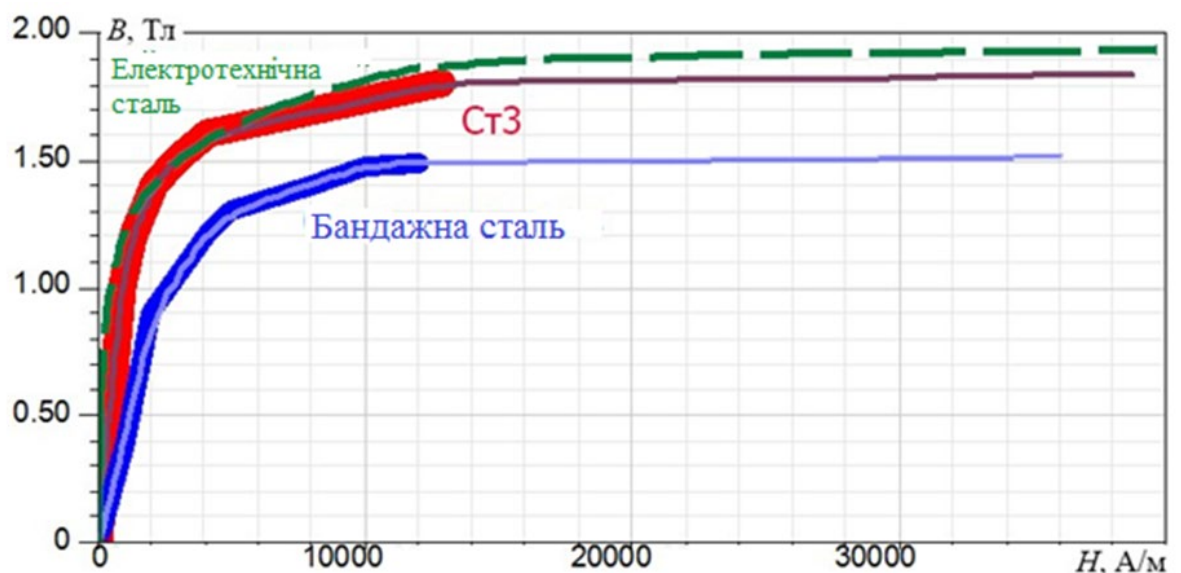


Рисунок 2.6 – Основні криві намагнічування сталей

Магнітопровід з електротехнічної сталі прилягає до рейки і відстає від колеса на 1 мм, рисунок 2.7.

мм	рисунк 2.7.					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

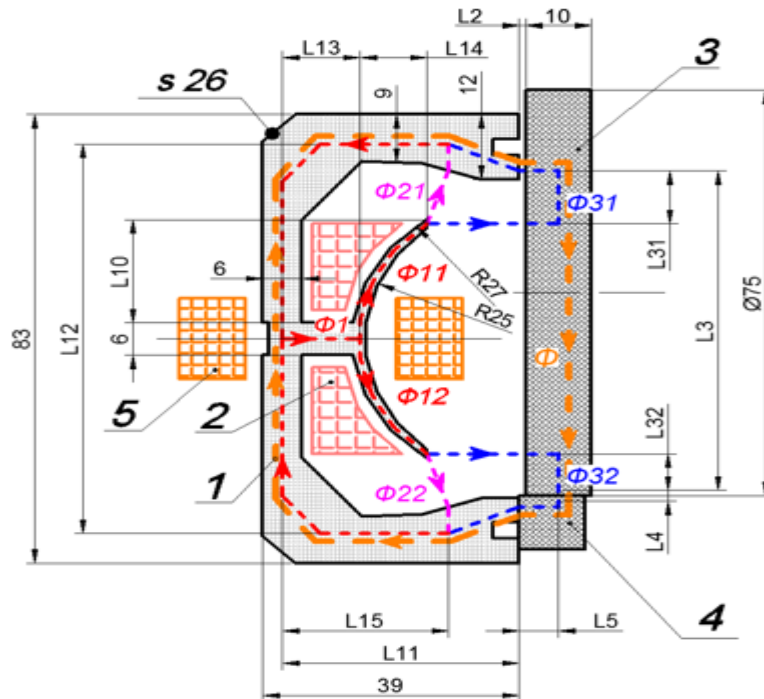


Рисунок 2.7 – Розрахунковий магнітний ланцюг:

1 - магнітопровід; 2 – котушка 140 витків; 3 – колесо; 4 – рейка; 5 – котушка 200 витків

Експерименти виконані зі зразками з бандажів сталі і Ст3 для випадків окремого і спільного використання котушок. При спільному використанні котушки підключені послідовно. Величина протікають по обмотках котушок струмів задається лабораторним автотрансформатором (ЛАТР).

При включенні індуктора установки основний магнітний потік замикається через магнітопровід, колесо і рейку. При спільному використанні котушок, вони підключені таким чином, щоб потоки в нижній частині магнітного ланцюга (зона контакту колеса з рейкою) були спрямовані в одну сторону. При цьому потоки у верхній частині магнітного ланцюга спрямовані зустрічно і концентрація силових ліній магнітного потоку в нижній частині магнітного ланцюга більше, ніж у верхній.

Поздовжнє розташування першої котушки сприяє поділу магнітного потоку на частини. Магнітний ланцюг стає розгалуженим (складається з дев'яти гілок), основний потік проходить в обхід колеса і рейки (вони зашунтовані малим

використання першої котушки не дозволяє досягти насичення зони контакту колеса з рейкою, індукція магнітного поля знаходиться в межах 1 Тл, рисунок 2.8. Поперечне розташування другої котушки 5 (рисунок 2.7) сприяє тому, що основний магнітний потік проходить через зону контакту колеса з рейкою. Потік розсіювання становить малу частину основного потоку, замикається через підковоподібний елемент магнітопроводу і значний повітряний зазор від 45 до 50мм. Оскільки магнітний опір потоку розсіювання великий, то в розрахунках ним можна знехтувати.

Максимальне значення МРС другої котушки становить 1000 А-витків, що відповідає току 5А і 200 витків. Одиночне використання другої котушки дозволяє досягти насичення зони контакту колеса з рейкою при струмі від 2 до 2,5 А, рисунок 2.9.

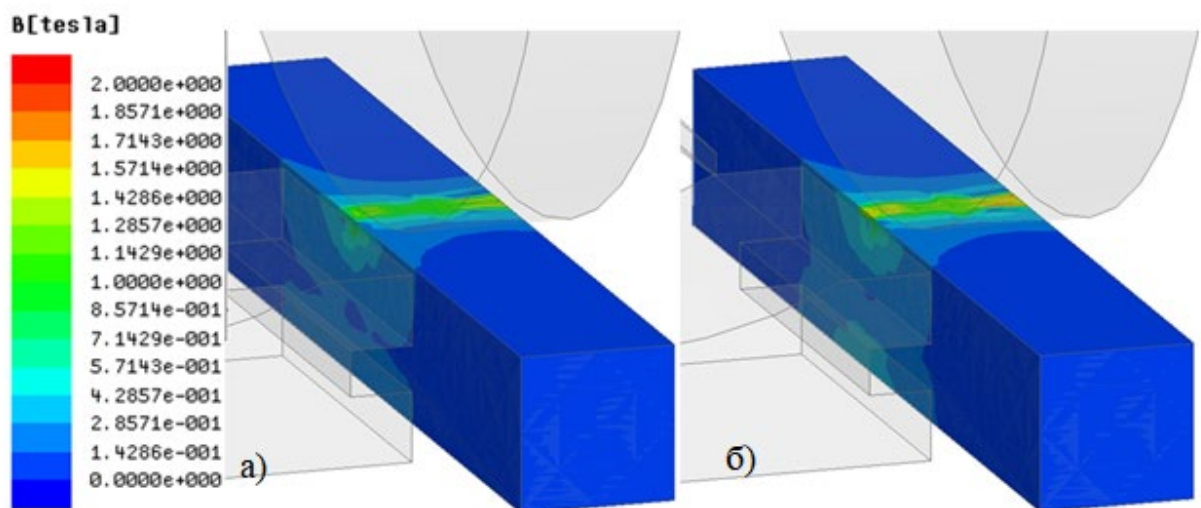


Рисунок 2.8 – Насичення зони контакту колеса з рейкою при поздовжньому розташуванні котушки 140 витків: а) – бандажна сталь; б) – СтЗ

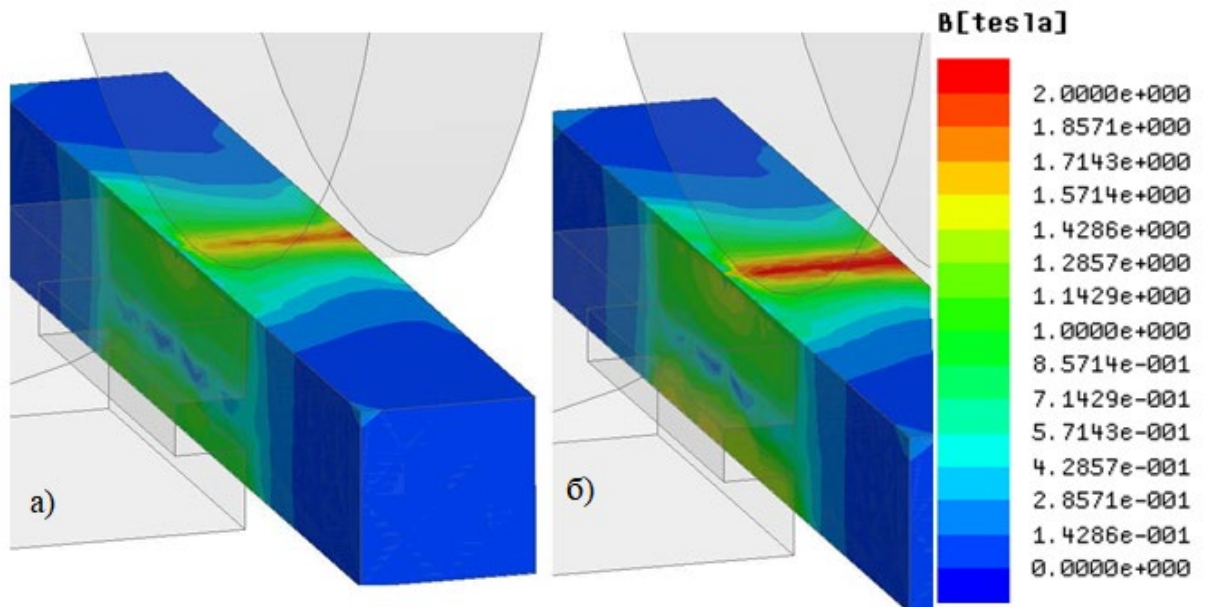


Рисунок 2.9 – Насичення зони контакту колеса з рейкою при поперечному розташуванні котушки 200 витків: а) – бандажна сталь; б) – Ст3

Спільне використання двох котушок не має істотної відмінності від одиночного використання другої котушки, в той же час, спостерігається незначний приріст індукції в зоні контакту колеса з рейкою, рисунок 2.10.

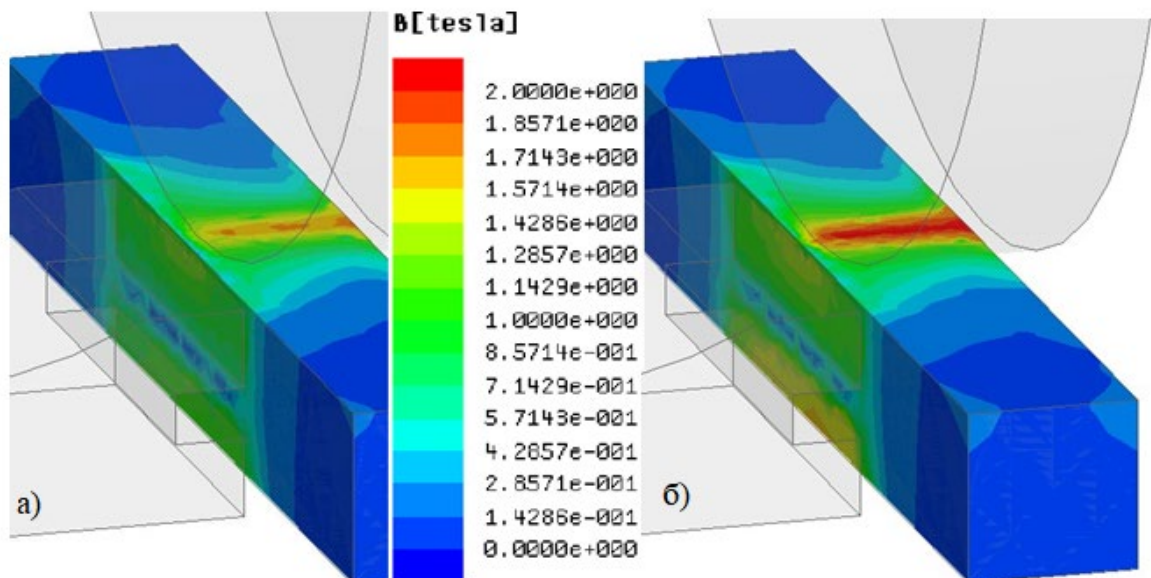


Рисунок 2.10 – Насичення зони контакту колеса з рейкою при двох котушках: а) – бандажна сталь; б) – Ст3

На рисунку 2.11 показана концентрація магнітного поля для випадків окремого і

спільного використання котушок.					Арк.
<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

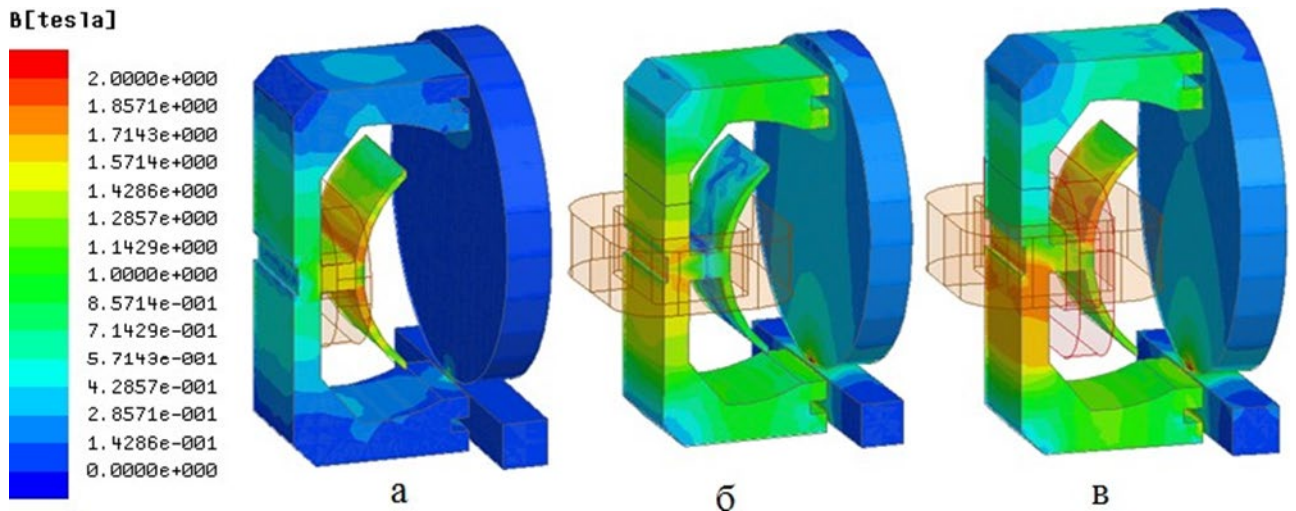
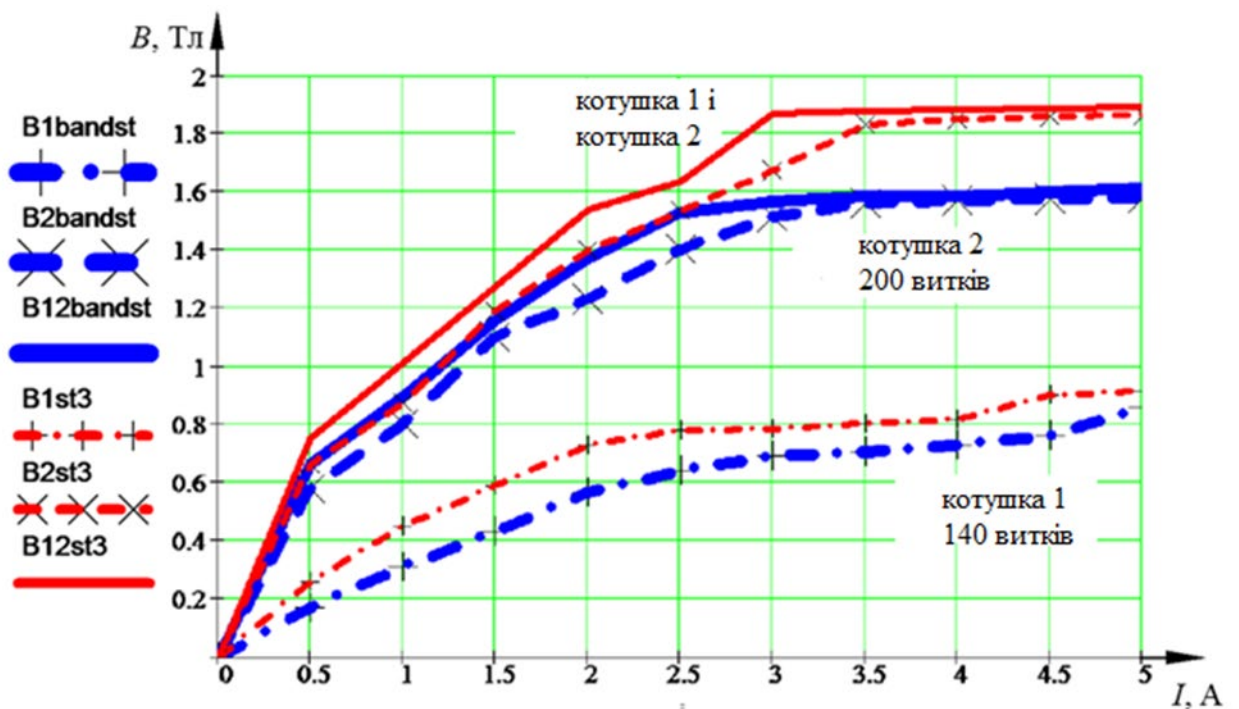


Рисунок 2.11 – Концентрація магнітного поля при струмі 5 А:

а,б) – окреме використання; в) – спільне використання

Графічні залежності магнітних величин в зоні контакту колеса і рейки при зміні струму котушок від 0 до 5 А мають нелінійний характер, рисунок 2.12. Потовщені графіки відповідають бандажній сталі, тонкі – Ст3. Для першої котушки 140 витків (індекс 1) – штрих пунктирна лінія, для другої котушки 200 витків (індекс 2) – штрихова лінія, для двох котушок (Індекс 12) – суцільна лінія.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

ООЗ 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

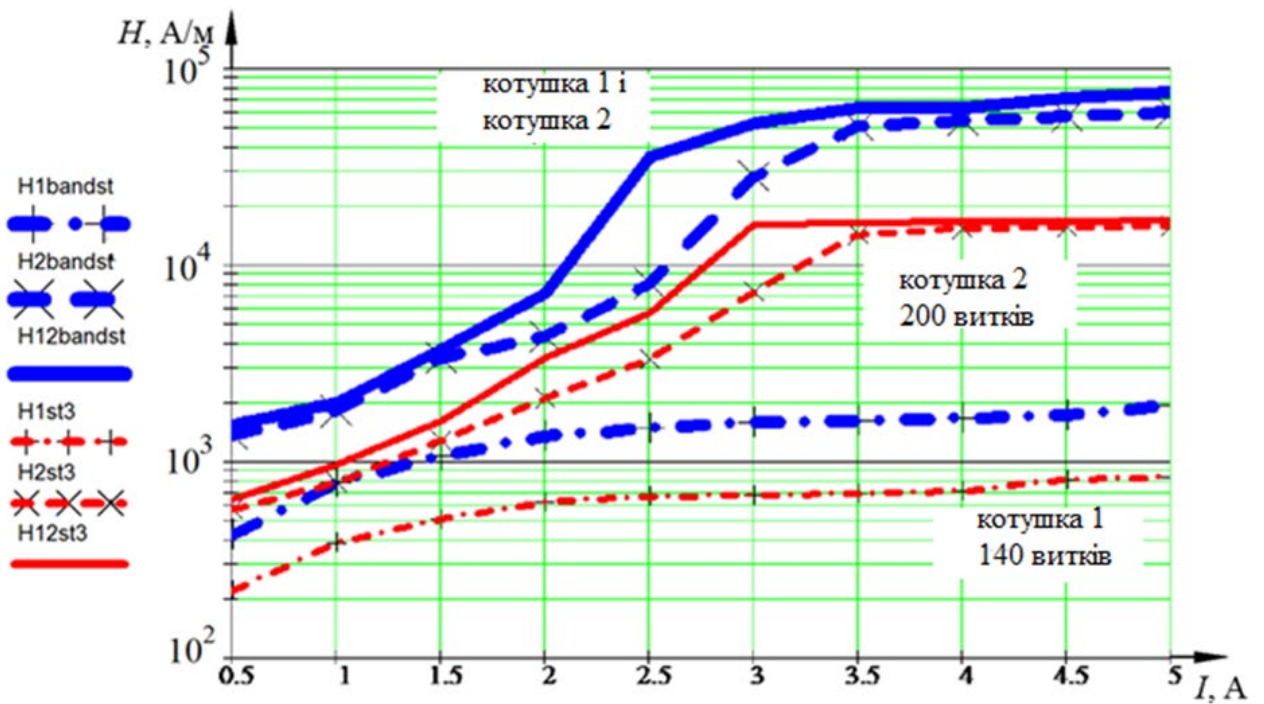


Рисунок 2.12 – Залежність індукції і напруженості магнітного поля від струму

Матеріал Ст3, в порівнянні з бандажною сталлю, володіє меншим магнітним опором. Магнітна проникність матеріалу Ст3 вище магнітної проникності бандажної сталі, при цьому, напруженість бандажної сталі вище на всьому інтервалі намагнічування. До насичення магнітна проникність Ст3 вище магнітної проникності бандажної сталі в 2-3 рази, після насичення різниця знижується до 15 %. Насичення матеріалу Ст3 настає при індукції величиною 1,5 Тл, бандажної сталі – 1,3 Тл.

Керуючим впливом на процес тертя є магнітне поле, в зоні тертя воно характеризується рядом параметрів. Дослідження декількох феромагнітних матеріалів дозволяє виділити ті параметри магнітного поля, які найбільш корелюють з трибологічними характеристиками.

2.3 Дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя

Основний закон тертя був виявлений Леонардо да Вінчі у вигляді залежності сили тертя F від навантаження N , через 200 років точне формулювання дав Гійом

Амонтон [24, с.319]. Коефіцієнт тертя показує величину пропорційності сили	Арк.
Змн.	Арк.
№ докум.	Підпис
Дата	

тертя і навантаження: $F=\mu N$. Кулон ввів доданок A , що характеризує адгезійне схоплювання поверхонь, в розширеній формі закон отримав назву Амонтон-Кулона.

$$F=A+\mu N. \quad (2.6)$$

У деформаційній і молекулярній теоріях тертя найбільш відомі уявлення про тертя Ф. П. Боуден, Б. В. Дерягіна, і. В. Крагельського [14-16, 20, 24]. У деформаційній теорії Ф.П. Боуден силу тертя розкладає на два доданки: опір зрізу металевих з'єднань і опір пластичному витісненню менш твердого металу.

$$F = \theta_{\text{пр}} S_{\phi} + \tau S, \quad (2.7)$$

де $\theta_{\text{пр}}$ – дотична напруга зрізу;

S_{ϕ} – фактична площа контакту;

τ – межа плинності (питомий опір витіснення);

S – поперечний переріз доріжки тертя.

Дослідники W.B. Hardy, P. Woog, Я. і. Френкель, Т. А. Конторова та ін. висловлювали ідею дискретності поверхонь тертя, Б. В. Дерягін розвинув молекулярну теорію тертя, яка призводить до двочленного закону тертя [20].

$$F=\mu_1 S(p_0+p), \quad (2.8)$$

де μ_1 – коефіцієнт тертя по Дерягіну;

S – площа істинного контакту;

p_0 – питома сила молекулярної взаємодії;

p – питома тиск від навантаження N .

Експериментальні і теоретичні дослідження зносу і тертя, що проводяться в лабораторії І.В. Крагельського, об'єднують адгезійні і деформаційні процеси в молекулярно-механічну теорію тертя [15, 16]. Силу тертя І.В. Крагельський представляє у вигляді суми механічної $\tau_{\text{мех}}$ і молекулярної $\tau_{\text{мол}}$ складових [14].

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \frac{nA_1 + A_2}{n + 1} S_{\phi} + \frac{nB_1 + B_2}{n + 1} N, \quad (2.9)$$

де A_1 – напруга зрізу;

A_2 – питома тиск молекулярного взаємодії;

n – константа;

					Арк.
	B_1 –	коefficient зростання спору зрізу	за джерелом [14]		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

B_2 – коефіцієнт молекулярної шорсткості.

Коефіцієнт тертя μ складається з механічної $\alpha S_{\phi}/N$ і молекулярної β компонентів,

що включають емпіричні коефіцієнти $\alpha = \frac{nA_1 + A_2}{n+1}$, $\beta = \frac{nB_1 + B_2}{n+1}$.

$$\mu = \frac{\alpha S_{\phi}}{N} + \beta. \quad (2.10)$$

Таким чином, коефіцієнт тертя є функцією площі контакту і тиску, а також залежить від молекулярної адгезії поверхонь. Кулькові трибometri дозволяють виміряти коефіцієнт тертя. Для гладких поверхонь кулі і площини площа контакту мала, механічна складова коефіцієнта тертя приймає незначну величину $\alpha S_{\phi}/N \rightarrow 0$, переважає молекулярна складова $\beta \approx \mu$.

Експериментальні дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя проводилися в лабораторії кафедри «рухомий склад залізних доріг» Брянського державного технічного університету. Дослідження підтверджуються актом впровадження, який наведено в додатку Б. Молекулярна складова коефіцієнта тертя визначалася за допомогою одношарового інденторного пристрою і установки, зображених на рисунках 2.13 і 2.14.

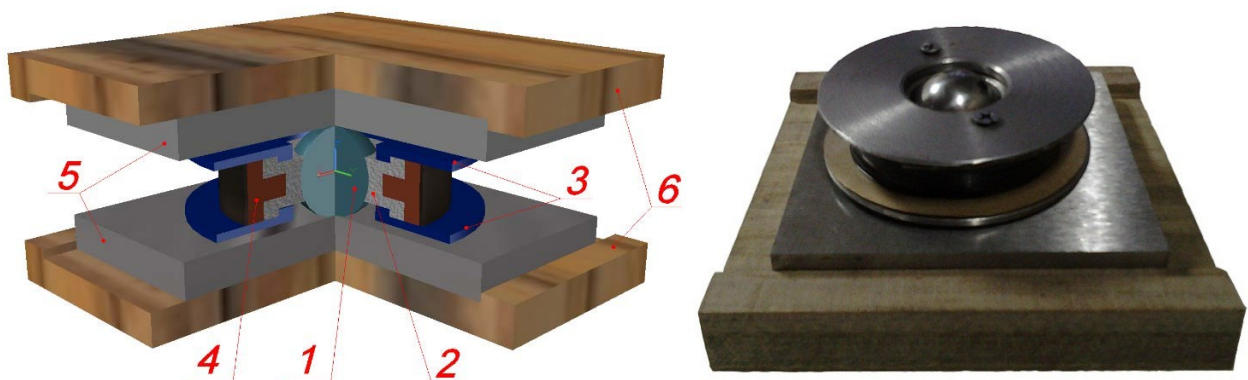


Рисунок 2.13 – Одношаровий інденторний пристрій:

- 1 – куля; 2 – корпус; 3 – обойма; 4 – обмотка електромагніту; 5 – зразок;
6 – текстолітовий тримач

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

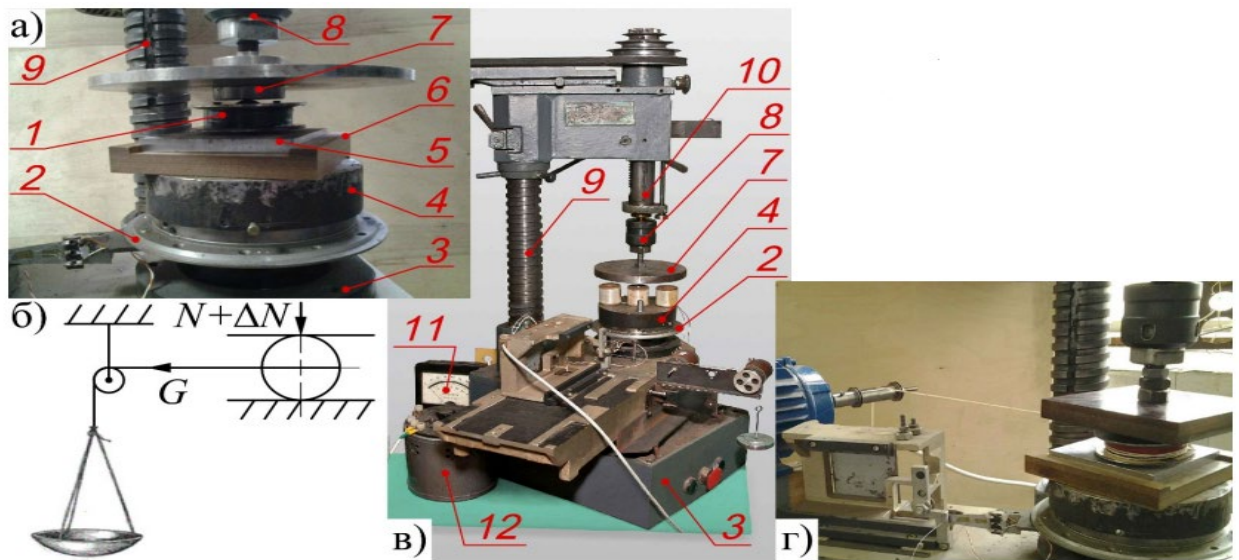


Рисунок 2.14 – Установка для дослідження молекулярної складової коефіцієнта тертя: а) - розташування індентора на установці; б) - схема для визначення зміни тертя; в) - загальний вигляд установки; г) - визначення впливу магнітного поля на тертя спокою

Одношариковий інденторний пристрій (рисунок 2.13) є активним, містить створюючу МРС обмотку 4, обмотка виконана з 112 витків мідного дроту діаметром 1,2 мм полірована сталева куля 1 впресована в алюмінієвий корпус 2. Верхня і нижня сталеві дискові обойми 3 накривають корпус, утворюючи паз для обмотки. Куля затискається між нижнім і верхнім зразками 5, в процесі роботи повітряний зазор між обоймою і зразками становить від 2 до 3 мм, плоскі зразки прямокутного перетину 100 x100 мм товщиною 10 мм обойми і куля діаметром 25 мм виготовлені з бандажної сталі. Верхній і нижній зразки розміщуються в текстолітових тримачах 6, які забезпечують магнітну ізоляцію.

Для оцінки молекулярної складової коефіцієнта тертя при впливі постійного магнітного поля використовувалася виготовлена на основі свердлильного верстата установка, оснащена інденторним пристроєм, рисунок 2.14а). На станині 3 встановлена тензометрична поворотна опора 2 з диском 4, текстолітовим утримувачем 6 і зразком 5. На зразку встановлено одношариковий інденторний пристрій 1. У патроні 8 через парамагнітну прокладку закріплений навантажувальний диск 7, який притискає індентор до зразка. Притиснення

здійснюється шляхом докладання постійного зусилля до шпинделя 10, рисунок 2.14г).

0032 206305 000 01MP ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

2.14в). Струм обмотки інденторного пристрою задає ЛАТР 12, його величина контролюється амперметром 11.

Куля індентора затискається між плоскими зразками силою, утворюючи вищу кінематичну пару першого класу, рисунок 2.14б). Через точки контакту кулі з нижньою і верхньою площинами проходить вертикальна вісь обертання. До індентора в горизонтальному напрямку прикладена сила G . Вектор сили віддалений від вертикальної осі кулі, що створює умови для його верчення. Сила індентору повідомляється через нерозтяжну нитку, один кінець якої намотаний поверх обмотки, а другий перекинута через нерухомий блок, рисунок 2.14 г). Натяг нитки здійснюється за допомогою аптечних гирь вагою G . Для виключення значного перекосу індентора центр кулі і верх блоку розташовані на одному рівні.

Виконані серії експериментів при різних режимах намагнічування, кожна серія включала п'ять дослідів зі зміною струму котушки від 0 до 2 А, притиснення кулі індентора залишалося постійним $N=50$ Н. Основне завдання експериментів полягало в зборі даних величини намагнічуючого струму I і сили натягу нитки G в момент повороту індентора. Експерименти проводились в наступній послідовності: підготовка установки до експерименту, підключення індентора до джерела напруги і установка необхідного значення сили струму в обмотці, поступове збільшення сили натягу нитки, зняття навантаження з нитки після приведення індентора в рух, підрахунок ваги вантажу. Етап підготовки включав перевірку гирь класу точності М1, призначених для технічних аналізів, очищення поверхонь, перевірку працездатності засобів вимірювання, установку індентора, намотування нитки, прикріплення до шпинделю вантажу, огляд електричних ланцюгів.

Досліджуваний магнітний ланцюг вирішується в симетричній постановці. Наявність повторюваних областей дає можливість скористатися методом кінцевих суперелементів, що дозволяє скоротити обсяг обчислень зі збереженням точності. Розрахункова магнітна ланцюг розбивається на суперелементи (підобласті). Рішення зосереджується всередині суперелемента, який описується системою базисних функцій і граничними умовами. В якості суперелемента прийнята чверть інжекторного пристрою (рисунок 2.15), площина симетрії ZY і XY обмежують

розрахункову область. Магнітний потік суперелемента пов'язується з потоками					Арк.
0032 206305 000 01MP ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

всього пристрою. На рисунку 2.16 наведено залежності параметрів магнітного поля в зоні контакту кулі і зразка від намагнічуючого струму котушки.

Використання інвентарного пристрою дозволяє досягти якнайшвидшого насичення сталі, оскільки основний магнітний потік кулі стягується в область контакту.

Ефективність намагнічування підвищується за рахунок розташування обмотки в безпосередній близькості від зони контакту кулі і зразка, а також використання матеріалів з різною магнітною проникністю. Початкове насичення зони тертя настає при індукції величиною 1,3 Тл, МРС котушки в момент насичення становить 90 А-витків [138].

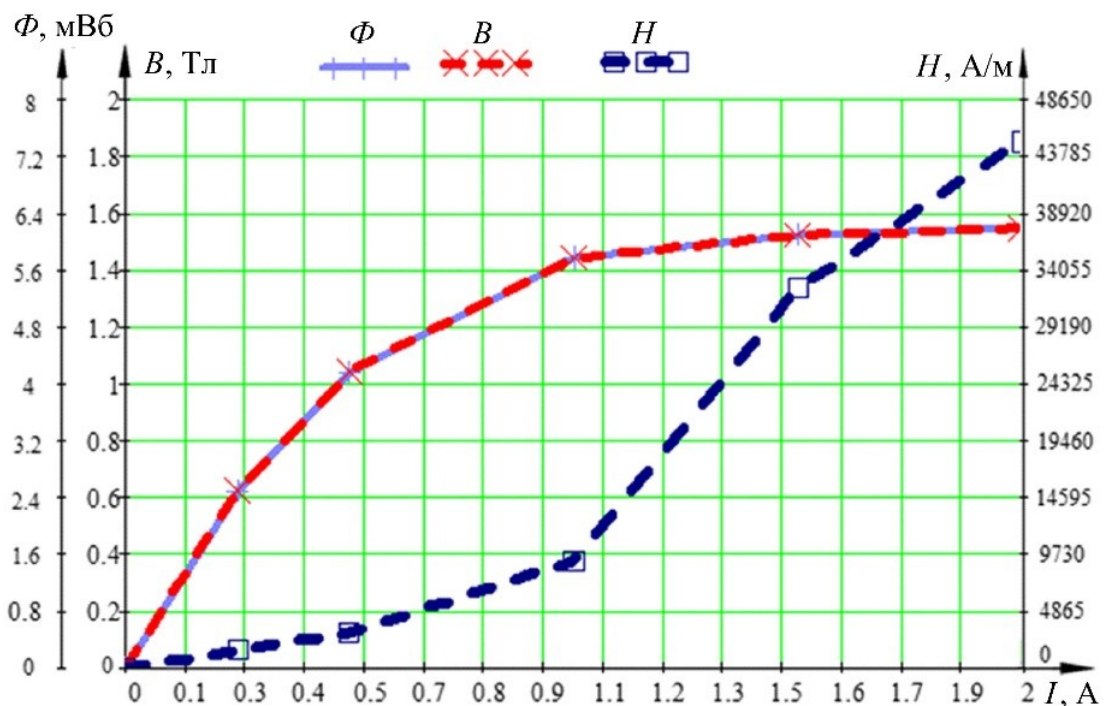
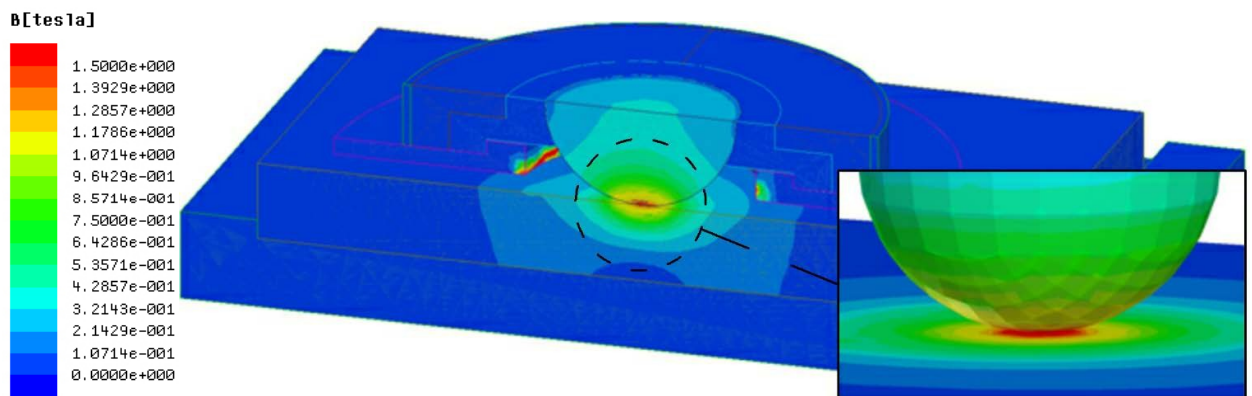


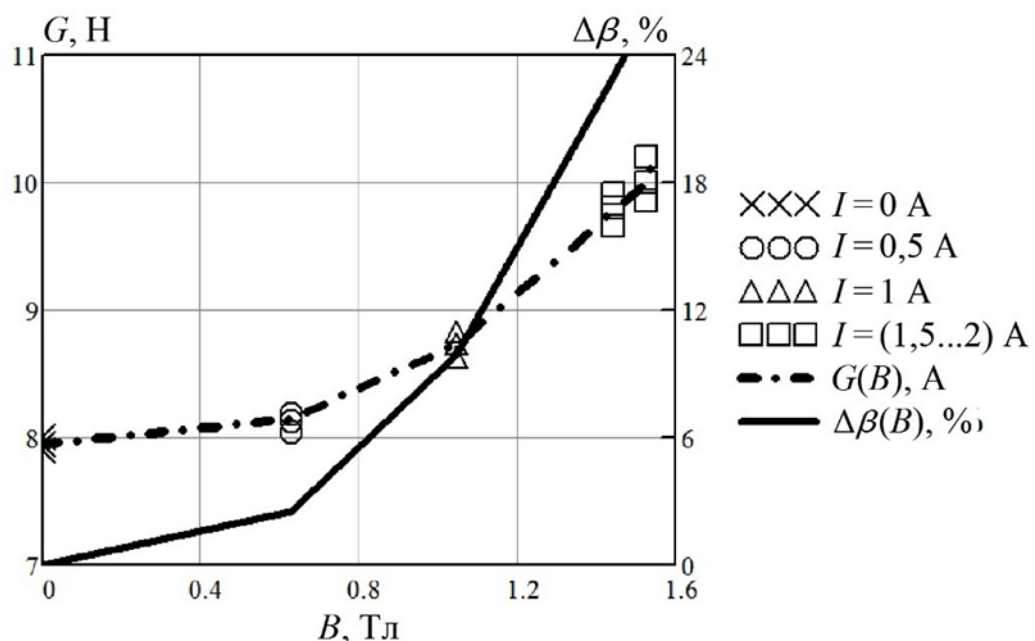
Рисунок 2.15 – Концентрація магнітного поля в суперелементі пристрою

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ООЗ 206305 000 01MP ПЗ	

Рисунок 2.16 – Залежність параметрів магнітного поля в зоні контакту кулі індентора з площиною від сили струму

Досліди показують, що при відсутності намагнічує струму ($I=0$ А) індентор приводиться в рух після прикладання до нитки сили $G=7,9$ Н. Намагнічування зоні контакту кулі індентора зі сталевими пластинами сприяє підвищенню сили, необхідної для виведення індентора зі стану рівноваги. Оскільки знаходження індентора в рівновазі пояснюється тертям, то збільшення сили G свідчить про приріст сили G тертя на величину ΔF . Зосереджена в повітряному зазорі магнітна енергія створює в зоні контакту кулі з площиною силу

електромагнітного тяжіння $\Delta N = 0,5BN_s$, яка залежить від індукції B , напруженості N магнітного поля і площі s [139]. Оскільки площа контакту мала, то сила електромагнітного занурення незначна, при повному насиченні контакту її найбільше значення не перевищує 0,1 Н. Довантаженням ΔN можна знехтувати в тих випадках, коли $N \gg \Delta N$, при цьому вираз (2.1) спроститься $\Delta F = \Delta \mu \cdot N$. При $N = \text{const}$ весь приріст сили тертя ΔF обумовлений збільшенням коефіцієнта тертя за рахунок молекулярної складової $\Delta \beta \approx \Delta \mu$, рисунок 2.17.



Таким чином, одношаровий індикаторний пристрій дозволяє досліджувати зміну коефіцієнта тертя між сталевими зразками при впливі на зони контакту магнітного поля. При початковому насиченні зони контакту кулі індентора з площиною молекулярна складова коефіцієнта тертя збільшується на величину від 15 до 19%, при повному насиченні – від 20 до 25 %. Для оцінки загальної точності визначення величини реєстрованої сили приймається граничне значення похибки $\varepsilon\varepsilon$, складається з випадкових систематичних похибок: від розтягування нитки – 1 %, від неврахованих сил тертя – 1 %; від сполучних проводів – 1 %, від неточності укладання гирь і підбору їх маси – 3%; $\varepsilon\varepsilon = \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2 + 3^2} = 3,46\%$.

Висновки до розділу. Виготовлені трибометричні установки дозволяють провести серію експериментів по встановленню впливу магнітного поля на коефіцієнт тертя. Пропускання магнітного потоку через зону контакту сталевих пар тертя викликає збільшення коефіцієнта тертя головним чином за рахунок молекулярної складової. Тертя ковзання в режимі початкового насичення зони контакту підвищується на 13 %, при повному насиченні – на 22 %.

Одношаровий інденторний пристрій дозволяє досліджувати молекулярну структуру коефіцієнта тертя між сталевими зразками при впливі на зони контакту магнітного поля. У режимі початкового насичення зони контакту молекулярна складова коефіцієнта тертя підвищується від 15 до 19%, при повному насиченні – від 20 до 25 %.

Взаємодія циліндричної поверхні з площиною і точковий контакт кулі з площиною дозволяють відтворити на установках процеси, схожі з процесами системи колесо – рейок, при впливі постійного магнітного поля. Для застосування отриманих результатів до системи колесо – рейок слід враховувати геометричні особливості зони контакту.

3 НАМАГНІЧУВАННЯ ЗОНИ КОНТАКТУ КОЛЕСА З РЕЙКОЮ

В даному розділі розглядається ділянка магнітного ланцюга, що включає бандаж колісної пари, головку рейки і повітряний зазор між ними. Отримано параметри магнітного поля і магнітного опору між колесом і рейкою. Визначено епіцентри концентрації магнітного поля при різних режимах намагнічування з урахуванням зміни положення колеса щодо рейки для нових і зношених профілів. Опис інших ділянок магнітного ланцюга і розташування джерела намагнічує сили дано в розділі 5.

3.1 Особливості моделювання магнітного поля між колесом і рейкою

У пропущенні магнітного потоку між колесом і рейкою беруть участь робочі і суміжні з ними поверхні, силові лінії магнітного поля проходять через контактну пляму і повітряний зазор. Величина магнітного опору зони контакту колеса з рейкою обумовлюється геометричними і магнітними Умовами. Дані Умови варіюються за рахунок ряду експлуатаційних особливостей.

Через переміщення феромагнітних тіл і зміни розмірів повітряного зазору виникає геометричне вплив. На опір стали сильно впливає індукція поля, в насичених областях колеса і рейки магнітна проникність приймає малі значення. Це сприяє відхиленню магнітного потоку, насичені області він обходить по більш

чином залежить від його протяжності.

Для подальшого визначення потоків виділимо характерні поверхні на колесі і рейці, в таблиці 3.1 наведені умови розподілу магнітного потоку між цими поверхнями.

Таблиця 3.1 – Умови розподілу магнітного потоку між поверхнями

Складові частини поверхні		Бандаж локомотивного колеса		
		половина <u>вікружки</u> , гребінь	половина <u>вікружки</u> , поверхня катання	фаска, зовнішня грань
Головка рейки	половина внутрішньої <u>вікружки</u> , внутрішня грань головки	малий зазор між <u>гребенем</u> і рейкою при насиченні стали на поверхнях катання: <u>гребневий контакт</u>	насичення стали на поверхнях катання при положенні колеса, близькому до центрального	—
	половина внутрішньої і зовнішньої <u>вікружок</u> , поверхня катання	<u>одноточковий гребневий контакт</u> , <u>разуклонка</u> і <u>віджаття рейки</u> , утворення на голівці рейки палиці зносу, сповзання <u>гребеня</u> [43]	у нормальних умовах основний магнітний потік проходить через ці поверхні (режим порушується при відриві поверхні катання і розповзанні колеса)	ширина колії, близька до максимальної, значний знос <u>гребенів</u> , сповзання <u>гребеня</u> другого колеса
	половина зовнішньої <u>вікружки</u> , зовнішня грань головки	—	насичення стали на поверхнях катання при положенні колеса, близькому до центрального	значний зазор між <u>гребенем</u> і рейкою при насиченні стали на поверхнях катання

Колесо з рейкою контактують переважно поверхнями катання, тому велика частина магнітного потоку протікає через верх головки рейки. Особливо це виражено при значному зазорі між рейкою і гребенем колеса. Профіль колеса ширше головки рейки, ця геометрична особливість сприяє тому, що в нормальних умовах експлуатації силові лінії можуть з'єднати поверхню катання колеса з будь-якої з трьох розглянутих поверхонь рейки.

Контактування верху головки рейки з гребнем і областю фаски колеса виникає в граничних умовах експлуатації: однокрапковий гребневий контакт

зношеного колеса,	розуклонка	та віджимання рейки, утворення на голівці рейки		
Полки	зносу,	вкочування	гребеня	на Головку рейки. 032 306305 000 01148 73
ЗМН.	Арк.	№ док.ум.	Годпис	Дата

супроводжуються відривом поверхні катання колеса від головки рейки, що сприяє переорієнтації значної частини магнітного потоку з поверхні на суміжні поверхні. Втрата стійкості коліс характерна для порожніх і мало завантажених вагонів, при високих швидкостях. За рахунок значного осьового навантаження

Локомотиви володіють запасом стійкості колеса від вкочування гребня на головку рейки.

Оскільки між колесом і рейкою підтримується постійний феромагнітний контакт, то можна прийняти, що весь магнітний потік складається з потоків, що проходять через поверхню катання і гребінь колеса, а потоки розсіювання незначні. Через великий повітряний зазор потік через зовнішню грань колеса можна віднести до потоків розсіювання, внутрішні поверхні коліс так само мало задіяні в пропусценні магнітного потоку.

Поверхні колеса і рейки характеризуються складною геометрією і нелінійністю магнітних властивостей. Методи розв'язання з використанням теорії ланцюгів мають ряд припущень і не забезпечують високої точності. Аналітичне рішення малопридатне для практичних завдань. Застосування спрощених математичних моделей може обмежуватися передпроектними розрахунками. Польові методи розрахунку магнітних систем засновані на вирішенні диференціальних рівнянь Максвелла. У даній роботі для аналізу магнітного поля застосований чисельний метод з використанням програмного продукту Ansys. Складна геометрія і нелінійність властивостей виражається в особливостях розрахунку розглянутого ділянки магнітного ланцюга. Перша особливість полягає в тому, що значний Магнітний опір повітряного зазору розташовується в безпосередній близькості від плями контакту. В основному енергія магнітного поля зосереджується в повітрі, там же накопичується і похибка розрахунку. Друга особливість полягає в незначних розмірах контакту феромагнітних тіл і клиноподібної формі повітряного зазору. Все це створюють передумови для спотворення розрахункових значень і появи сплесків градієнта поля поблизу повітряного зазору через сингулярності.

Для мінімізації похибки параметри магнітного поля визначаються не на межі

					Арк.
середовищі, а в при поверхневому	1072006315	рейки	Мидев	збільшення	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

купчастості сітки також сприяє зниженню помилки. Підвищення кількості ітерацій призводить до вдосконалення сіткової моделі. З кожним новим проходом сітковий генератор адаптує модель до тих пір, поки енергетичний баланс буде відповідати критерію точності.

3.2 Формування області насичення в зоні контакту колеса з рейкою

При намагнічуванні зони контакту колеса з рейкою формується область з індукцією магнітного поля від 1,3 до 1,5 Тл, що перевищує індукцію початкового насичення бандажної сталі. Розміри області насичення, як і максимальна індукція, головним чином залежать від магнітної напруги. Магнітна напруга на ділянці ланцюга визначається шляхом інтегрування тангенціальної складової напруженості магнітного поля N по контуру обходу l , а магнітний потік Φ розраховується інтегруванням нормалі вектора магнітної індукції B через поверхню S . Приймаючи, що поле однорідне, а поверхня плоска, величина магнітного потоку визначиться скалярним добутком вектора магнітної індукції на вектор площі $\Phi = \vec{B} \vec{S}$. Магнітна проникність визначається співвідношенням індукції і напруженості поля $[\mu] = \frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{H}}$ і характеризує розподіл магнітного опору.

Найбільш намагніченим поверхонь колеса і рейки відповідають гілки протікання основної частини магнітного потоку. Мінімальне число гілок змінюється в залежності від положення колеса щодо рейки. При наявності зазору між гребенем колеса і рейкою 98% магнітного потоку протікає через поверхню катання. При двоточковому гребеневому контакті від 30 до 40% магнітного потоку переорієнтується на поверхні гребня та викружу.

Спрощену схему заміщення магнітного ланцюга між колесом та рейкою можна представити однією або двома гілками. Деталізація гілки, що містить контакт колеса з рейкою, призводить до паралельного з'єднання контактної плями і повітряного зазору. Через пляму контакту колеса з рейкою проходить від 7 до 17% магнітного потоку поверхні катання. При насиченні сталі в області контактної

плями концентрується енергія до 0,03 Дж, намагнічуючий потік, що пронизує пляму					
контакту, становить від 0, до 0,8 мВб. Найвищий в зоні контакту колеса з рейкою					
ЗМН.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0033 306 305 000 01MR 73

повітряного зазору сприяє спрямленню вебер-амперної характеристики, рисунок 3.1.

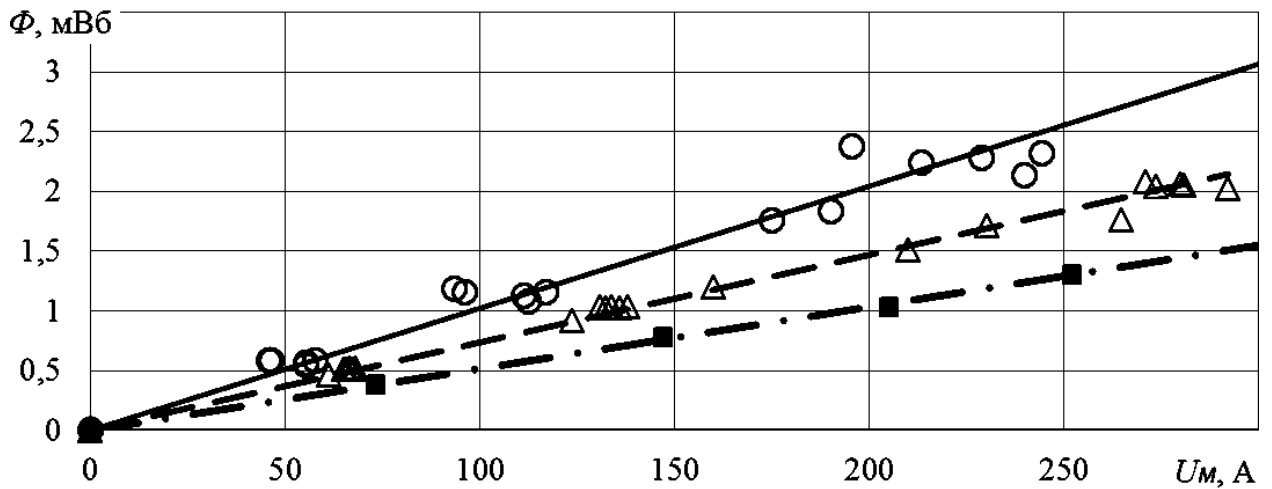


Рисунок 3.1 – Вебер-амперна характеристика зони контакту колеса з рейкою

Три режими намагнічування дозволяли досягти ненасичений, насичений стан і повне насичення зони контакту. В першу чергу насичуються ділянки плями контакту колеса з рейкою, це змушує силові лінії магнітного поля зміщуватися за межі контактної плями, розширюючи область насиченого магнітного контакту. Вивчено вплив режиму намагнічування, зміну положення колеса щодо рейки, наявність і відсутність зносу поверхонь на розподіл і параметри магнітного поля в зоні контакту. Розрахунки виконані для трьох характерних положень колеса щодо рейки: двокрапковий гребневий контакт, центральне положення і положення з найбільшим зазором між гребнем і рейкою.

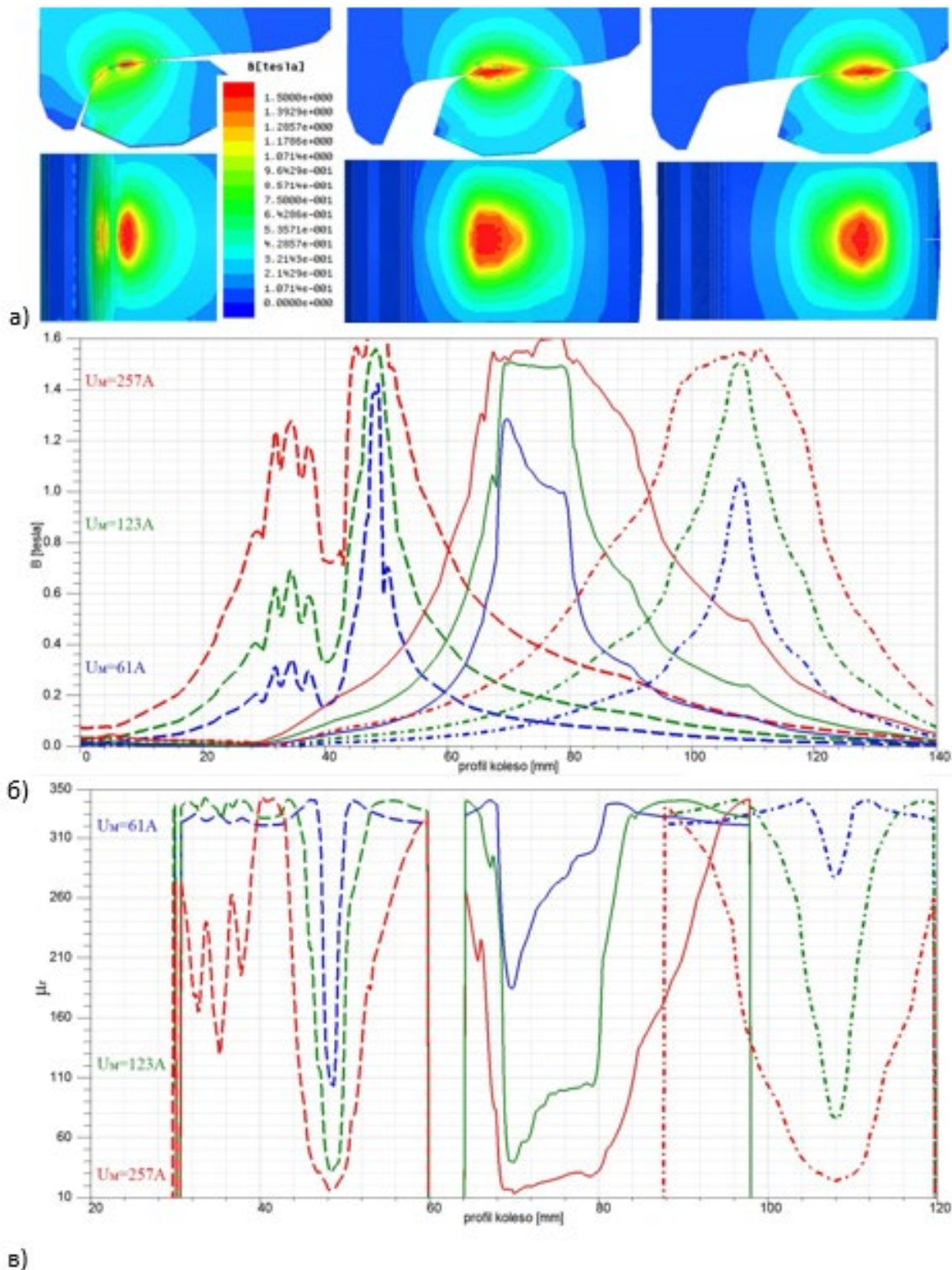
У 50 % розглянутих контактів Магнітний опір зони контакту колеса з рейкою становить від 0,00013 до 0,00015 Гн⁻¹: при взаємодії зношеного колеса і нового рейки, при центральному положенні нового колеса щодо зношеного рейки, а також при наявності зазору між гребнем нового колеса і нового рейки. В 42 % – опір знаходиться в межах від 0,00008 до 0,0001 Гн⁻¹: при контакті зношених профілів, при двоточковому гребневому контакті нового колеса з новим або зношеним рейках. Найбільший Магнітний опір 0,00019 Гн⁻¹

спостерігається у 8 % контактів – при значному повітряному зазорі між гребенем колеса і рейкою з новими профілями.

Якщо не враховувати положення колеса щодо рейки і особливості зносу профілів, то середньозважений Магнітний опір зони контакту колеса з рейкою можна прийняти $0,00012 \text{ Гн}^{-1}$. При послідовному пропущенні потоку через ліве і праве колеса опору складаються, для зон контакту колісної пари з рейками магнітний опір складе $0,00024 \text{ Гн}^{-1}$.

Концентрація магнітного поля в зоні контакту колеса з рейкою і на поверхні колеса показана на малюнках 3.2-3.5. Нижче наведені графіки зміни магнітної індукції на поверхні колеса і відносної магнітної проникності в зазорі між колесом і рейкою. На графіках горизонтальна вісь відповідає зміні відстані вздовж профілю колеса. За початок відліку прийнята нижня точка гребня колеса.

					<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



в)

Рисунок 3.2 – Зношене колесо, зношена рейка: а) – розподіл магнітного поля при $U_M=257$ А; б) – магнітна індукція на поверхні колеса; в) – відносна магнітна проникність зазору; — — - двокрапковий гребневий контакт; — — - центральне положення колеса; — · — - найбільший зазор між гребнем і рейкою

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

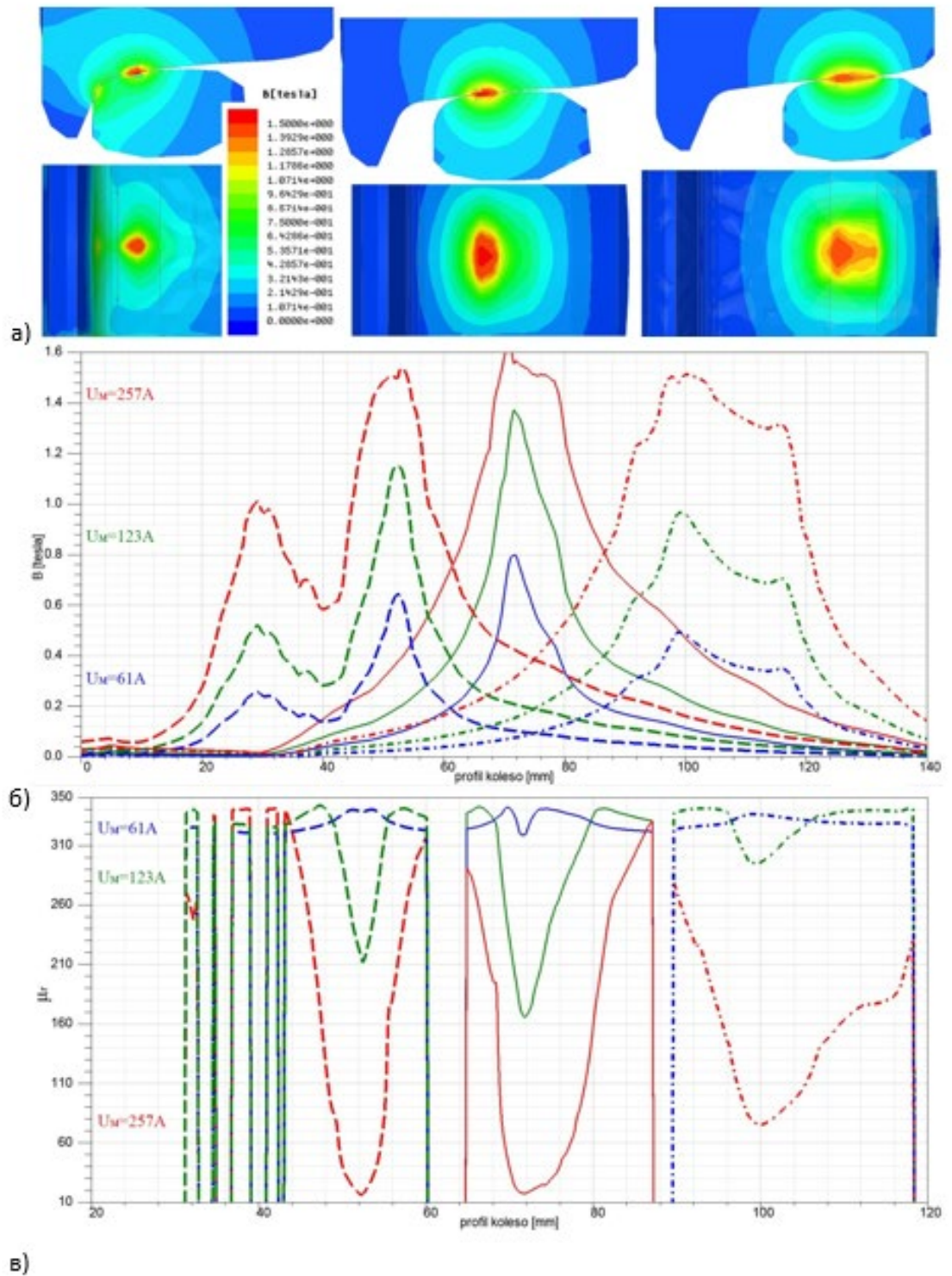


Рисунок 3.3 – Зношене колесо, нова рейка : а) – розподіл магнітного поля при $U_M=257$ А; б) – магнітна індукція на поверхні колеса; в) – відносна магнітна проникність зазору; --- - двокрапковий гребеневий контакт; — - центральне положення колеса; - · - найбільший зазор між гребнем та рейкою

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ООЗ 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

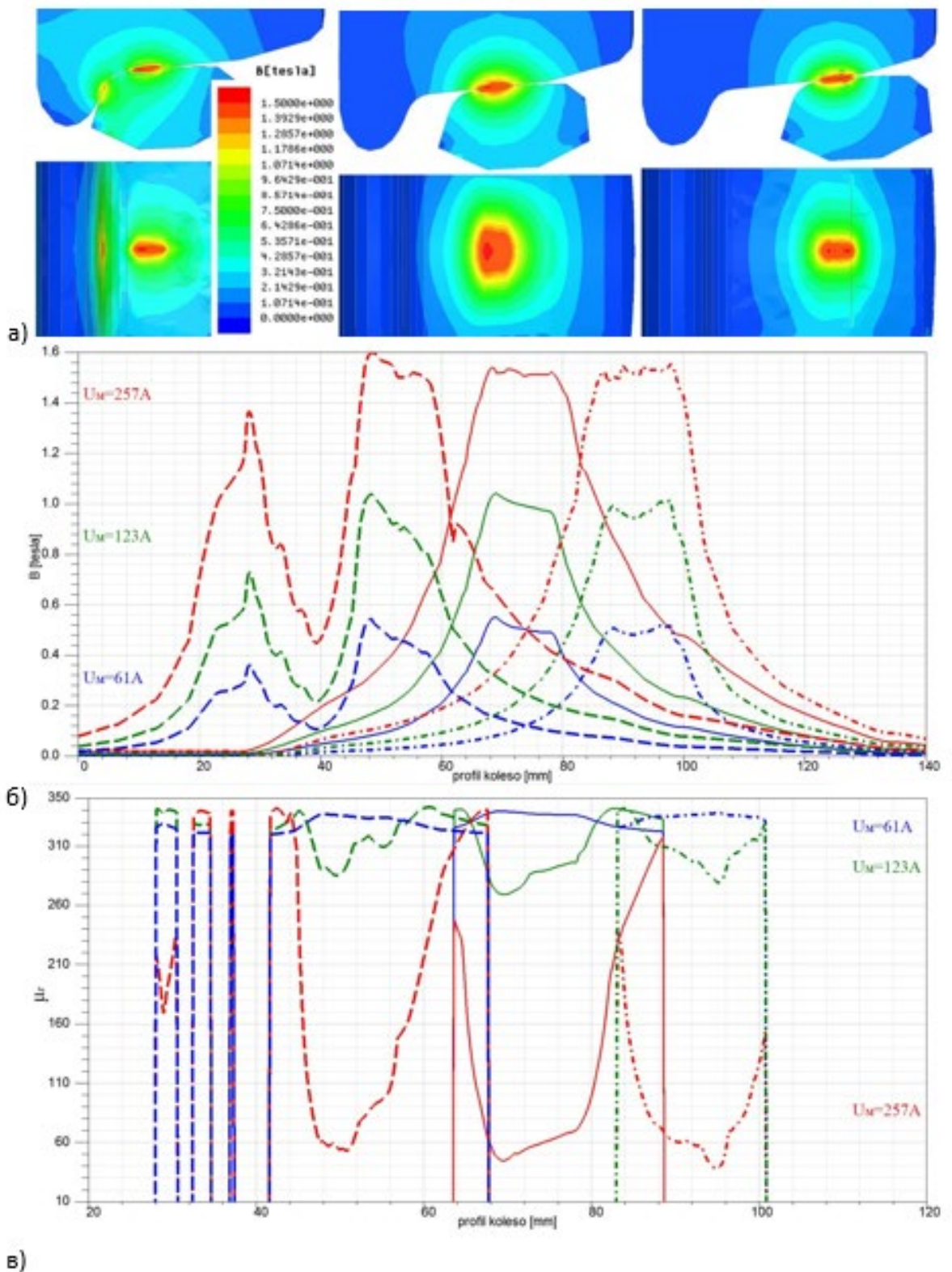
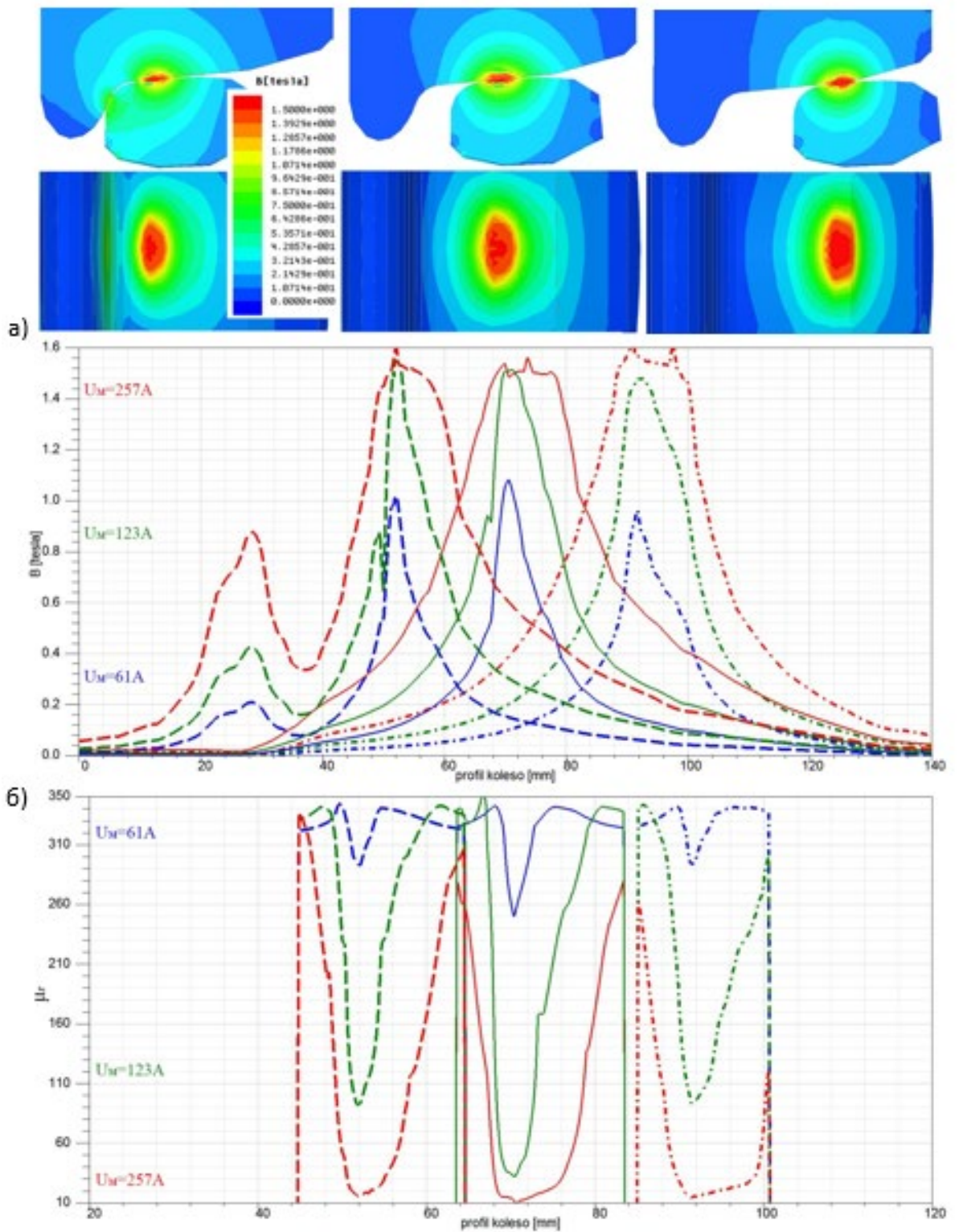


Рисунок 3.4 – Нове колесо, зношена рейка : а) – розподіл магнітного поля при $U_M=257$ А; б) – магнітна індукція на поверхні колеса; в) – відносна магнітна проникність зазору; - - - двокрапковий гребневий контакт; — - центральне положення колеса; - · - найбільший зазор між гребнем і рейкою

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032 206305 000 01MP ПЗ

Арк.



в)
 Рисунок 3.5 – Нове колесо, нова рейка : а) – розподіл магнітного поля при $U_M=257$ А; б) – магнітна індукція на поверхні колеса; в) – відносна магнітна проникність зазору; — — - двокрапковий гребневий контакт; — — - центральне положення колеса; — · — - найбільший зазор між гребнем і рейкою
 Дослідження тертя і.в. Крагельського і Н.Б. Демкіна показують, що

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ООЗ 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

коефіцієнт тертя сильно залежить від фактичної площі контакту, а майданчики фактичного контакту розподілені в межах контурного контакту [16, 18].

Щоб ефект впливу магнітного поля на сталеві пари тертя застосувати в трибосистемі колесо – рейок, слід піддати намагнічування мікровиступи одиничних майданчиків фактичного контакту. Оскільки магнітна сприйнятливість у феромагнітних і парамагнітних речовин одного знака, то в зоні контакту не вдається досягти виборчого намагнічування. Разом з мікровиступами фактичного контакту намагнічуються області контурного контакту, а при достатній магнітній напрузі насичується і номінальний контакт колеса з рейкою.

Межі області насичення приймають близьку до еліптичної форму, рисунки 3.2-3.5. Велика піввісь області насичення між колесом і рейкою може бути спрямована як уздовж, так і поперек осі обертання колеса. При контакті, коли обидва профілі нові або зношені, області насичення мають поздовжню орієнтацію. Зоні контакту нового профілю зі зношеним властиво поперечне витягування області насичення. Обрис області насичення пов'язано з розподілом силових ліній магнітного поля в колесі і рейці, а також зі зміною магнітного опору. Аналіз зміни магнітної проникності показує, що опір збільшується при видаленні від плями контакту колеса з рейкою. Якщо врахувати, що в основному Магнітний опір обумовлений повітряним зазором, то зазор має значний вплив і на формування області насичення.

Розглянемо зміну зазору між колесом і рейкою у взаємно перпендикулярних поздовжньому і поперечному перерізах. У поздовжньому перерізі зазор між колесом і рейкою визначається за формулою

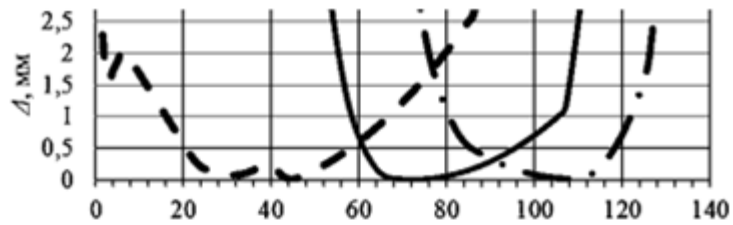
$$\Delta = \frac{a^2}{D_k}, \quad (3.1) \text{ де}$$

D_k - діаметр колеса;

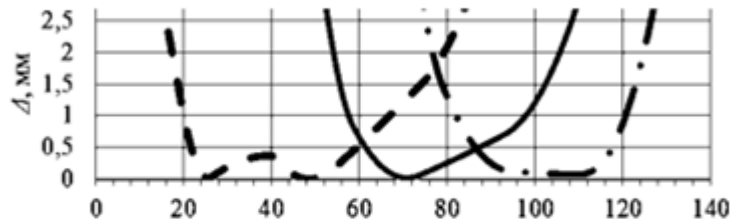
a - половина області насичення в поздовжньому напрямку.

Зазор в поперечному перерізі залежить від зносу колеса і рейки, а також поперечного положення колісної пари в колії, рисунок 3.6.

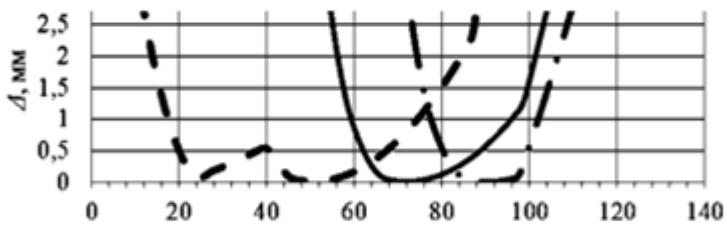
						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	



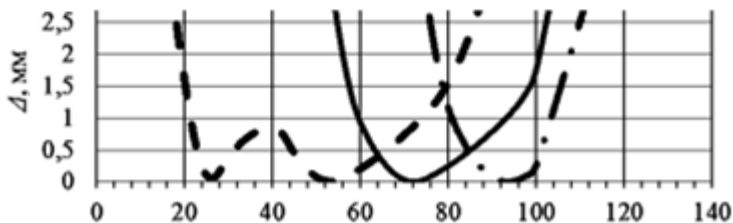
а) Зазор між колесом і рейкою, мм



б) Зазор між колесом і рейкою, мм



в) Зазор між колесом і рейкою, мм



г) Зазор між колесом і рейкою, мм

Рисунок 3.6 – Зазор між колесом і рейкою в поперечному перерізі: а) – зношене колесо, зношена рейка; б) – зношене колесо, нова рейка; в) – нове колесо, зношена рейка; г) – нове колесо, нова рейка; — — - двокрапковий гребневий контакт; — — - центральне положення колеса; — · — - найбільший зазор між гребнем та рейкою

Обертання області магнітного насичення пояснюється тим, що повітряний зазор навколо контактної плями змінюється нерівномірно. Зіставлення графіків зміни зазору між колесом і рейкою з графіками індукції показує, що розподіл індукції на поверхні колеса має зворотну залежність від зазору між тілами.

Монотонності графіків зазору і індукції змінюється в одних і

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

0032 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

тих же точках профілю, максимуму індукції відповідає мінімум зазору. З'єднавши послідовно рівновіддалені точки на поверхнях колеса і рейки, отримаємо замкнуту межу, на якій індукція приймає постійну величину.

Застосування магнітної напруги $U_M=257$ А насичує контакт колеса з рейкою і приконтатну область. Межа області насичення з індукцією 1,3 Тл розташовується в межах зазору між колесом і рейкою від 0,1 до 0,2 мм, при цьому в епіцентрі області насичення (плямі контакту) індукція досягає величини 1,5 Тл. Таким чином, пляма контакту на поверхні катання перекривається областю насичення.

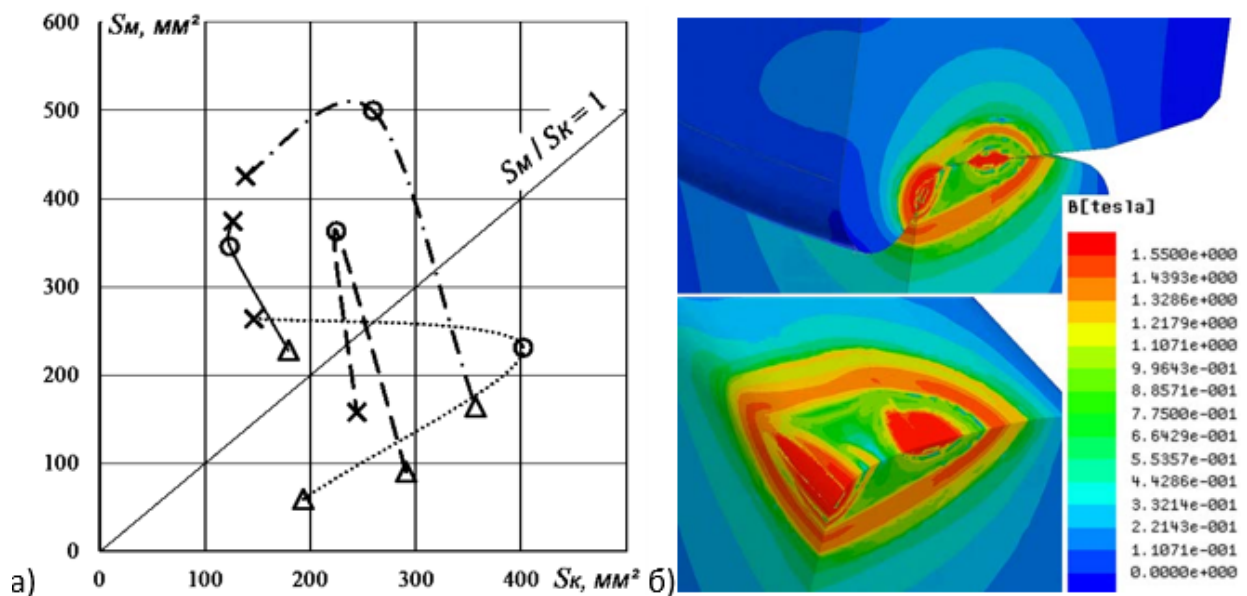
Далі область насичення на поверхні катання, де індукція магнітного поля більше індукції початкового насичення, будемо називати площею магнітного контакту колеса з рейкою S_M . Ввівши поняття коефіцієнта магнітного перекриття контакту колеса з рейкою у вигляді відношення площі магнітного контакту до площі контактної плями S_K , зможемо охарактеризувати ефективність намагнічування зони контакту колеса з рейкою.

До неефективним режимом намагнічування слід віднести випадки, коли площа магнітного контакту менше площі контактної плями ($S_M/S_K < 1$), рисунок 3.7 а). Такі режими виникають при крайніх положеннях нового колеса щодо зношеного рейки, при контакті гребеня колеса з рейкою, а також при <123 А.

При значних магнітних напругах виникає перенасичений стан зони контакту колеса з рейкою, з'являються додаткові області насичення з індукцією більш 1,3 Тл.

На рисунку 3.7 б показано розподіл магнітного поля при $U_M=400$ А.

					<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



○ △ △ двоточковий гребневий контакт; ○ ○ ○ центральне положення колеса;
 × × × найбільший зазор між гребнем і рейкою

Рисунок 3.7 – Залежність площі магнітного контакту ($U_M=257$ А) від площі контактної плями при різних положеннях колеса щодо рейки(а), перенасичений стан зони контакту колеса з рейкою при $U_M=400$ А (б); — - нові колесо та рейка; — — - нове колесо і зношена рейка; — · — - зношені колесо і рейка; ···· - зношене колесо і нова рейка

Результати розрахунків показують, що насичення поверхонь колеса і рейки відбувається по-різному. Для насиченого стану при двоточковому гребневому контакті найбільше значення індукції магнітного поля на гребні колеса в 1,4-2 рази менше індукції на поверхні катання. Зазначена різниця особливо виражена для зношених коліс і залежить головним чином від площі контактної плями. При наявності повітряного зазору між гребнем колеса і рейкою через поверхню катання колеса проходить 98% від усього магнітного потоку зони контакту. При двоточковому гребневому контакті потік поверхні катання зменшується, його частина становить від 60 до 70%, за рахунок цього знижується площа магнітного контакту і коефіцієнт магнітного перекриття контакту колеса з рейкою.

колесом і рейкою надає величина повітряного зазору, в меншій мірі – магнітна проникність сталі. При наявності зазору між гребнем колеса і рейкою 98% магнітного потоку проходить через поверхню катання. При двоточковому гребневому контакті від 30 до 40% магнітного потоку переорієнтується на поверхні гребня і викружку, за рахунок чого знижується ефективність намагнічування зони контакту.

Через пляму контакту колеса з рейкою проходить від 7 до 17% магнітного потоку поверхні катання. Випучування магнітного потоку в бік повітряного зазору розширює область насичення за межі контактної плями, для нових профілів характерна поздовжня орієнтація області насичення, знос профілів витягує область насичення в поперечному напрямку. Обертання області насичення пояснюється нерівномірністю повітряного зазору в околицях контактної плями.

На Параметри магнітного поля в зоні контакту впливають: режим намагнічування, положення колеса щодо рейки, профілі поверхонь. Середньозважений Магнітний опір зони контакту колеса з рейкою становить $0,00012 \text{ Гн}^{-1}$. Магнітна напруга величиною від 123 до 257 А, прикладене до зони контакту, дозволяє підтримувати насичений стан приконтактної області і забезпечувати ефективну величину коефіцієнта магнітного перекриття ($S_{\text{ММММ}}/S_{\text{КК}} > 1$) для 65% випадків контактування колеса з рейкою.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРОФІЛІВ КОЛЕСА І

					РЕЙКИ 0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сила тертя між тілами залежить від ряду факторів, серед них – величина фактичної площі контакту [15]. Відомо, що фактична площа контакту в 10-20 разів менша за контурну [12]. Передані зусилля, мікрогеометрія і макрогеометрія колеса і рейки впливають на величину плями контакту, на тертя і знос особливо на етапі приробітку поверхонь [18].

Оскільки потік магнітної індукції через поверхню заданої площі визначається як скалярний добуток вектора індукції на вектор площі, то при зміні розмірів поверхні контакту слід враховувати зміну і параметрів магнітного поля. Інформація про величину миттєвої площі контакту коліс залізничного рухомого складу з рейками дозволяє формувати керуючий сигнал для пристроїв регулювання зчеплення, наведених в розділі 5.

В даному розділі досліджено вплив поперечного положення колісної пари в рейковій колії на розміри контактної плями при наявності і відсутності зносу. У математичній формі представлені критерії утворення конформного контакту колеса з рейкою.

4.1 Моделювання геометрії контактної плями в програмному комплексі UM Loco

Головна відмітна особливість залізничного транспорту полягає в тому, що колеса рухомого складу котяться по рейках. Крім звичайних функцій, властивих наземним транспортним засобам: підтримка у вертикальному положенні, кочення і гальмування, залізничні колеса виконують додаткову функцію – утримання колісної пари в колії. Контакт між колесом і рейкою є основним джерелом енергетичних втрат в механічній частині тягового приводу локомотива [13]. У статтях [16 -19] взаємодія колеса з рейкою розглядається як основоположний процес в роботі залізничного транспорту. Співвідношення сил в плямі контакту колеса і рейки надають вирішальний вплив в питаннях

досягнення комфорту пасажирів і забезпечення безпеки проти сходу з рейок. Стійкість колеса проти вкочування гребня на головку рейки характеризує

співвідношення проєкцій сил на осі системи координат YZ. Рівняння проєкцій сил

на осі для двоточкового і однокрапкового	м.роб.т.з.ч.о.к.т.а.к.т.м.д.т.в.з.	Арк.		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$R_y = T_1 \cdot \cos \beta_1 + N_1 \cdot \sin \beta_1 + T_2 \cdot \cos \beta_2 + N_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (4.1)$$

$$R_z = N_1 \cdot \cos \beta_1 + T_1 \cdot \sin \beta_1 + N_2 \cdot \cos \beta_2 + T_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (4.2)$$

$$R_y = T_1 \cdot \cos \beta_1 + N_1 \cdot \sin \beta_1, \quad (4.3)$$

$$R_z = N_1 \cdot \cos \beta_1 + T_1 \cdot \sin \beta_1, \quad (4.4)$$

де R_y, R_z – рівнодіючі реакції;

N_1, N_2 – нормальні складові сили у контакті;

T_1, T_2 – тангенціальні складові сили у контакті;

β_1, β_2 – кут між нормальною силою та вертикальною віссю, малюнок 4.1.

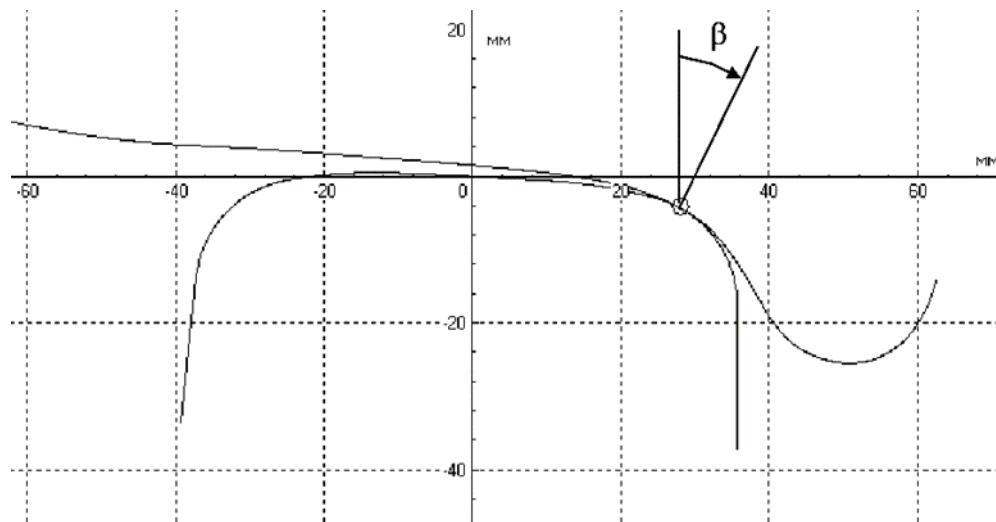


Рисунок 4.1 – Визначення кута контакту колеса з рейкою

Характер розподілу контактних сил і форма контакту колеса з рейкою залежить від ряду геометричних параметрів: ступеня зносу, величини піднесення рейки, його подуклонки, положення колісної пари в колії. Від кута контактування поверхонь β залежить співвідношення проєкцій сил [155].

Поперечні сили, прикладені в точках контакту колеса і рейки розкладаються на нормальну N і тангенціальну T складові [126], рисунок 4.2.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032 206305 000 01MP ПЗ

Арк.

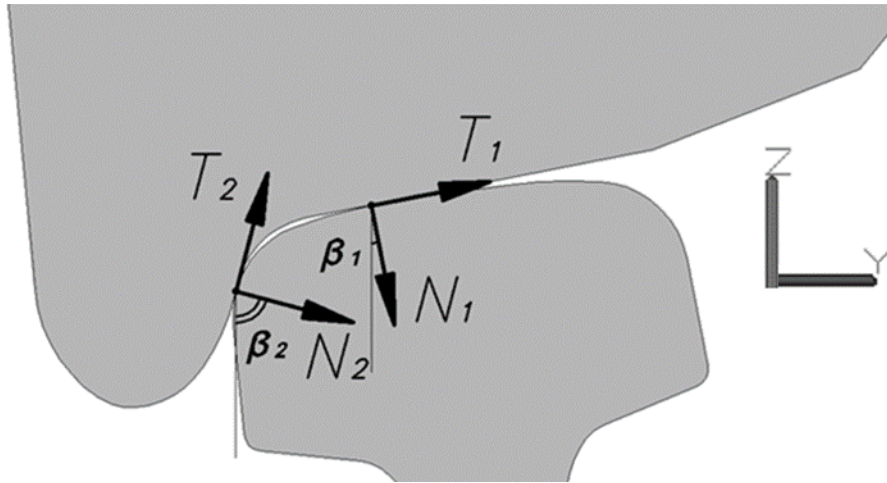


Рисунок 4.2 – Поперечні сили в точках контакту колеса з рейкою

Дослідження граничних умов зчеплення пов'язане з розрахунком в контактї колесо-рейок кінематичних характеристик: крипів : $\xi_x = v_x/v_0$, $\xi_y = v_y/v_0$, $\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$; спіну $\varphi = \omega_n/v_0$ та швидкості v_0 . Сучасні моделі дотичних сил крипу в точках контакту коліс з рейками засновані на нелінійних залежностях виду[155].

$$F_x = F_x(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, p), \quad F_y = F_y(N, \xi_x, \xi_y, \varphi, p), \quad (4.5)$$

де F_x, F_y – поздовжня і поперечна сили крипу, розташовані в дотичній площині до точки контакту;

N – нормальна реакція в точці контакту;

p – набір геометричних параметрів, що характеризують профілі колеса і рейки в точці контакту (для алгоритму FastSim – кривизни поверхонь).

Комп'ютерне моделювання при аналізі технічно складних процесів широко поширене, прикладом може служити програмний комплекс моделювання

динаміки систем тіл» універсальний механізм», розроблений в лабораторії» обчислювальної механіки " Брянського державного технічного університету [32].

Комплекс вирішує велике коло завдань, серед них завдання пружної взаємодії колеса і рейки. До позитивних особливостей даного комплексу можна віднести використання швидких безітераційних і ітераційних алгоритмів. Алгоритм FastSim,

заснований на теорії контакту качення Дж. Калкера і адаптований для еліптичних					Арк.
плям контакту колеса з рейкою визначаються [10, 101] МР ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Автор дякує професору Погорелову Дмитру Юрійовичу за надання програмного комплексу "універсальний механізм" для проведення досліджень. Модуль UM Loco містить багату елементну базу і бібліотеку моделей [30, 33, 155, 162].

Для моделювання обраний шестиосний тепловоз ЧМЕЗ, як наймасовіший маневровий локомотив Росії. Модель тепловоза Побудована з використанням підходу систем тіл, згідно з яким механічна система складається з набору абсолютно твердих тіл, пов'язаних між собою за допомогою силових елементів і шарнірів, рисунок 4.3.

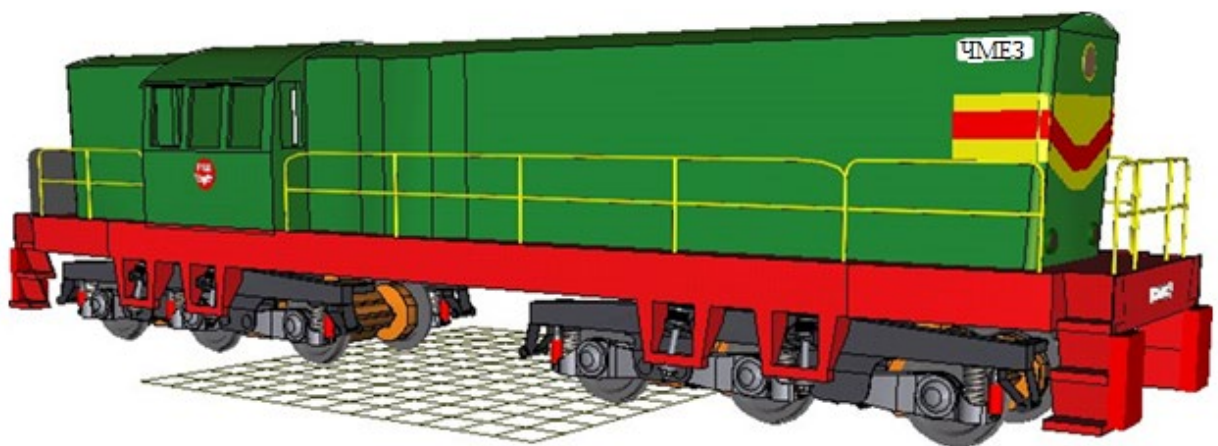


Рисунок 4.3 – Модель тепловоза ЧМЕЗ

Структура моделі тепловоза ЧМЕЗ ґрунтується на методі підсистем, який полягає в поданні повторюваних об'єктів, таблиця 4.1. Тіла екіпажної частини тепловоза з'єднані за допомогою невагомих пружно-дисипативних зв'язків.

Таблиця 4.1 - Структура підсистем моделі тепловоза ЧМЕЗ

Кузов					
Візок 1			Візок 2		
КМБ 1	КМБ 2	КМБ 3	КМБ 4	КМБ 5	КМБ 6
КП 1	КП 2	КП 3	КП 4	КП 5	КП 6

При моделюванні процесу рушання і розгону задіявся алгоритм розрахунку сил кріпу FastSim. Даний алгоритм заснований на лінійній теорії сил Кріпа Калкера і є

найбільш популярним при використанні в програмних комплексах. До переваг

алгоритму FastSim відносяться: порівняно висока швидкість розрахунку, облік

спина і найпростіших геометричних властивостей (кривизни контактуючих поверхонь). Алгоритм може бути використаний і при біконтакті для розрахунку сил крипа в обох точках.

Вихідними даними для процедури FastSim є наступні параметри і змінні: властивості матеріалу колеса і рейки (коефіцієнт Пуассона і модуль пружності), головні кривизни поверхонь в точці контакту, нормальна реакція в контакті N . Процедура FastSim розраховує величину еліптичної плями контакту відповідно до теорії Герца, величину ξ_x, ξ_y і спина ϕ . В області зчеплення вирішується система диференціальних рівнянь щодо дотичних напруг, в області ковзання – диференціально-алгебраїчних рівнянь. Пляма контакту розбивається на вузькі смуги однакової ширини, кожна смуга складається з однакового числа елементів, що мають рівні розміри [155].

У програмному комплексі "універсальний механізм" реалізована напіваналітична модифікація класичного алгоритму FastSim у вигляді процедури FastSim-A (FastSim – Analytic). FastSim-A виграє в швидкодії до FastSim приблизно в два рази і дає дуже близькі результати розрахунку сил крипа при порівняно невеликих значеннях спина ($\phi < 0,5$).

Метод Мінова застосовується при розрахунку сил крипу на основі емпіричної залежності сили зчеплення колісних пар локомотива від швидкості прослизання. Сили крипу розраховуються за такими формулами.

$$F_{xy} = f \cdot N \cdot k \cdot |\xi|, \quad F_x = -F_{xy} \frac{\xi_x}{\xi}, \quad F_y = -F_{xy} \frac{\xi_y}{\xi}, \quad (4.6)$$

де k – відношення сили зчеплення (крипа) до її граничного значення при заданому стані рейок.

В експлуатації крива мінова має стохастичний характер. Для зручності ділянки кривої зчеплення апроксимовані трьома виразами [31].

1. На ділянці пружного пропорційного прослизання при $0 \leq |\xi\xi| \leq 0,0014$ коефіцієнт зчеплення $k = 359,61178 \cdot |\xi\xi|$.

2. На ділянці пружного прослизання при $0,0014 < |\xi\xi| \leq 0,025$

$k = \frac{350 \cdot \xi\xi + 0,155}{0,195 + 336 \cdot \xi\xi }$					Арк.
<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

3. На ділянці надлишкового ковзання (буксування) при $|\xi\xi| > 0,025$

$$k = \frac{1}{1 - \chi \cdot v_0 \cdot (0,225 - |\xi|)}$$

де v_0 – поздовжня швидкість руху, м/с;

χ – жорсткість падаючої (третьої) ділянки характеристики. При швидкості колісної пари від 0 до 5 км/год приймається $\chi = 0,9$; при швидкості від 5 до 20 км/год $\chi = 0,6$ [155].

На першому етапі моделювання визначені площі плям контакту і поперечні положення колісних пар локомотива ЧМЕЗ при розгоні від 0 до 12 км/год на другому етапі отримані дані імпортувалися в Matlab, де система регулювання задавала намагнічуючий струм індукторів для підтримки зчеплення за рахунок коефіцієнта тертя між поверхнями колеса і рейки. На заключному етапі в UM Loco повторювався розрахунок із заданими значеннями коефіцієнтів тертя на поверхнях катання, викружках і гребенях.

Рух тепловоза ЧМЕЗ відбувалося в межах S – подібної кривої, покладеної рейками типу Р65, моделювання виконувалося для нових і зношених профілів. Частина поверхні катання зношеної головки рейки окреслена лінією змінного радіуса від 280 до 310 мм. Прокат на поверхні катання з-ношеного локомотивного колеса наблизився до припустимої величини 5 мм, замість коничности крутизною 1:20 ближче до викругляння гребеня сформувалася

опукла кривизна радіусом від 630 до 660 мм. Нові профілі локомотивного колеса і головки рейки Р65 прийняті згідно [163, 164]. Графіки зміни сумарної площі контакту лівого і правого коліс в залежності від поперечного положення колісної пари в рейковій колії наведені на рисунку 4.4.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

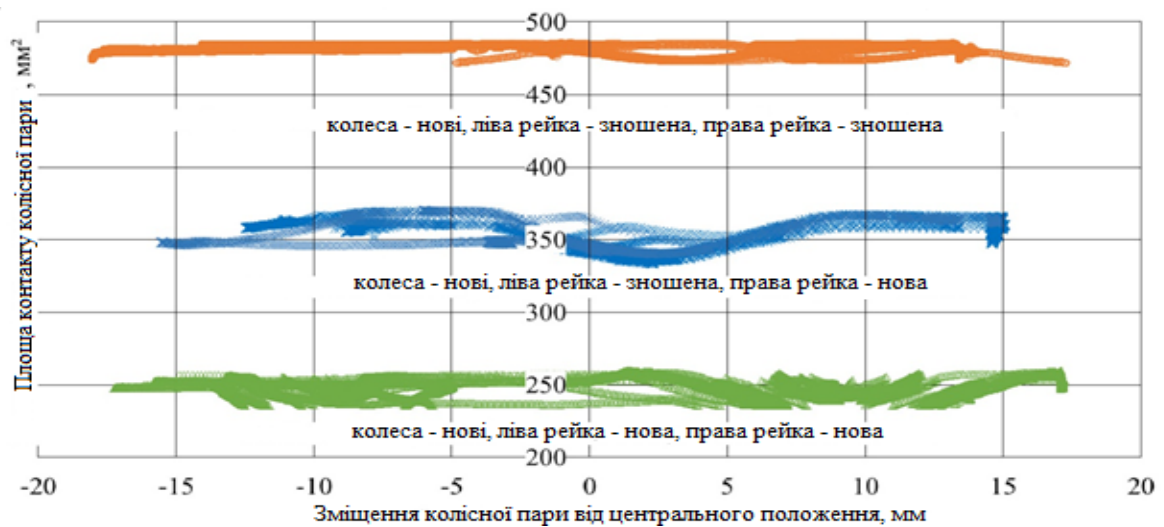
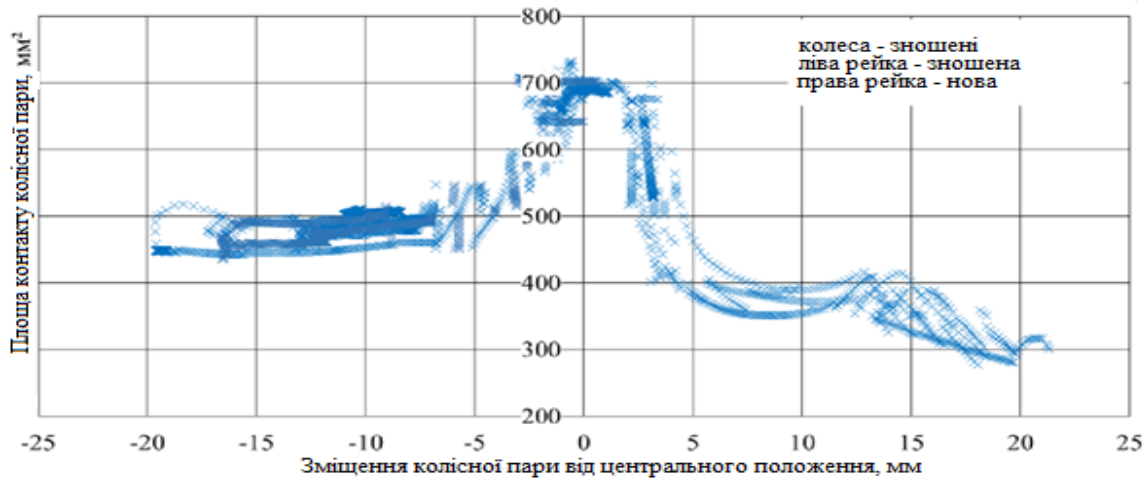
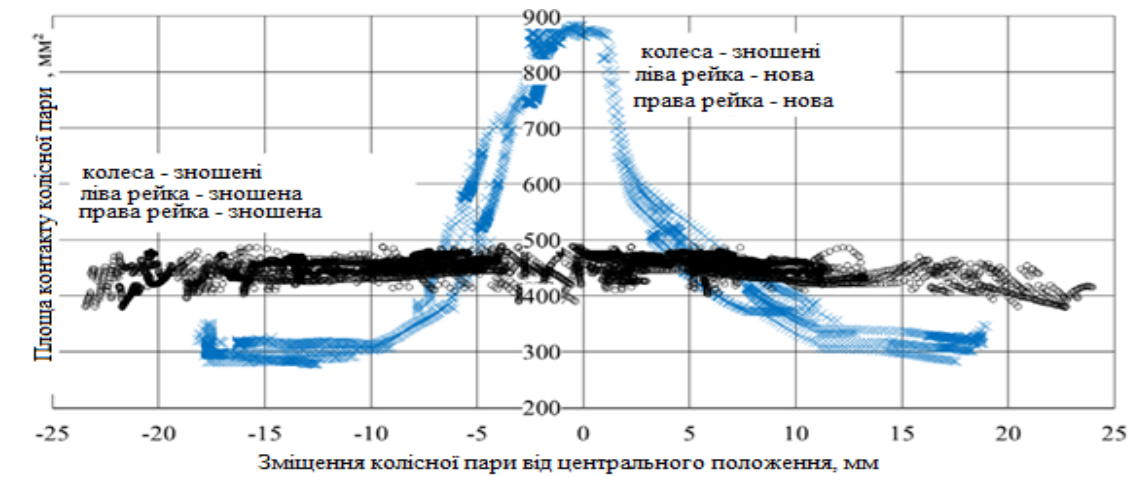


Рисунок 4.4 – Площі плями контакту колісних пар з рейками від поперечного положення в колії

Кожному положенню колісних пар тепловоза в рейковій колії відповідає коридор значень площі, це пояснюється мінливістю швидкості і сил, що передаються на колеса. При визначенні площі контакту між колесом і рейкою повинен

враховуватися комплекс особливостей контактуючих профілів, що вимагає				Арк.
0032 206305 000 01MP ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

складного програмування і тривалого часу обчислень. Точне рішення контактної задачі з використанням методів теорії пружності призводить до інтегральних рівнянь, розв'язання яких аналітичним способом складно, а часом неможливо. У першому наближенні, з достатнім ступенем точності, допускається при вирішенні контактної задачі за рахунок спрощень перейти від інтегральних рівнянь до алгебраїчних [155].

4.1 Програма моделювання поперечного положення колісної пари в колії

Як було показано в першому розділі, на розміри плями контакту між поверхнею катання колеса і рейкою впливає величина зусиль, що передаються, а також радіус колеса, рисунок 1.4. Крім того, у формуванні контактної плями беруть участь і такі параметри як: геометрія профілю, величина піднесення рейки, його подуклонка, положення колісної пари в колії [123].

Переміщення колісної пари в рейковій колії дозволяє при кожному положенні визначити на профілі точки найбільшого пружного проникнення. У рамках рішення задачі з визначення геометричних параметрів положення колісної пари залізничного рухомого складу в рейковій колії написана " програма моделювання поперечного положення колісної пари в колії» [127]. Програма розроблена в середовищі Visual LISP [165-167], для обміну даними з Visual Basic for Applications задіяний інтерфейс AutoCAD ActiveX Automation Interface, застосована технологія об'єктно-орієнтованого програмування. Програмний код включає 14 модулів, що використовують мову функціонального програмування AutoLisp, основні структурні дані представлені списками.

Програма дозволяє досліджувати контактування профілю колеса з профілем рейки і величину зазору між ними, визначати обриси контактної плями [123].

В основі роботи програми лежать ітераційні алгоритми. Сімейство поперечних положень колісної пари формується зміщення колісної пари в межах зазору між внутрішніми гранями рейки і гребенями. Для крайніх проміжних положень колісної пари розраховується зміщення в колії, нахил колісної пари і кут контакту колеса з

Контурна площа обумовлюється переважно хвилястості контактуючих поверхонь, для колеса і рейки хвилястість незначна: крок хвилі перевищує висоту в 200-500 разів. Це дозволяє розглядати контурну площу між колесом і рейкою як результат пружної деформації хвилястості. Розміри хвилястості співмірні з номінальним контактом: на номінальну поверхню припадає одна або дві хвилі, в цих умовах розміри номінальної і контурної площі приблизно рівні [12].

Проміжні положення колісної пари відповідають випадку, коли гребені коліс не торкаються рейки, одне з проміжних положень є центральним. Крайні положення колісної пари формуються двоточковим гребневим контактом коліс з лівим і правим рейкою. До вхідних даних програми відносяться наступні параметри: мінімальний зазор між колесом і рейкою для завдання точності розрахунку, число проміжних положень колісної пари, Діаметр колеса по колу катання, величина найбільшого проникнення на по-верху катання і гребені колеса, профіль колісної пари, профіль лівого і правого рейки, наявність піднесення рейки і розширення колії. Шукані положення колісної пари в колії визначаються ітераціями плоскопаралельного переміщення профілю колісної пари щодо профілю лівого і правого рейки. На кожному етапі виконується контроль зазору між поверхнями катання, гребенями коліс і рейками. Виконання умов величини мінімальних зазорів дозволяє перейти до розрахунку наступного положення колісної пари в колії [123], рисунок 4.5.

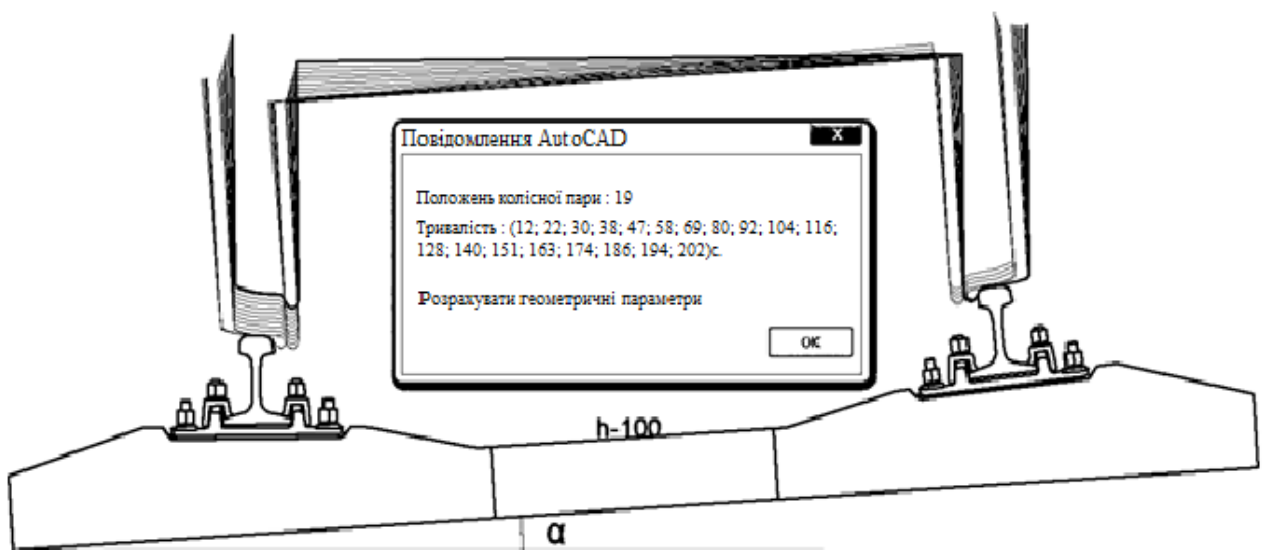


Рисунок 4.5 – Ітераційне визначення положення колісної пари в колії

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Після побудови поперечних положень колісної пари в колії визначається площа контакту колеса з рейкою [123], рисунок 4.6

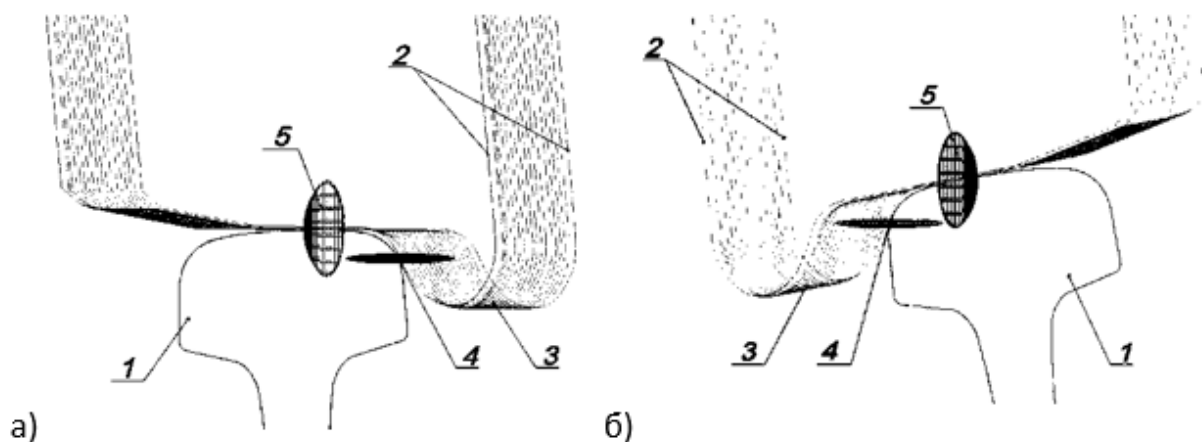


Рисунок 4.6 – Площа контакту колеса з рейкою: а) – контакт з лівою рейкою; б) – контакт з правою рейкою;

1 – рейка; 2 – крайні положення коліс; 3 – проміжні положення коліс; 4, 5 – пляма контакту на гребені і поверхні катання

Точковий контакт, за допомогою зміщення координат профілю на величину проникнення, вироджується в область перетину. Обертання нижньої межі

області припинення щодо осі колісної пари і витягування верхньої межі в поздовжньому напрямку формує тіло контакту, обмежене поверхнями контакту. Число виконаних ітерацій і час розрахунку відображаються в інформаційних повідомленнях. Результати розрахунку і геометричні параметри поперечних положень колісної пари залізничного рухомого складу в рейковій колії виводяться на екран і зберігаються у файл для подальшої обробки [123].

В умовах руху з малими швидкостями навантаження на колесо приймається постійною. Програма моделювання поперечного положення колісної пари в колії дозволяє досліджувати взаємодію нових, а також зношених коліс і рейок, реальна пляма контакту має нееліптичну форму. Отримані дані (Додаток А) добре корелюються з результатами моделювання в програмному комплексі

«Універсальний механізм», рисунок 4.4.					Арк.
0032 206305 000 01MP ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

У додатку а наведені параметри контактування профілів локомотивних коліс діаметром 1050 мм і 1250 мм з рейками Р65 при різних поперечних положеннях колісної пари в колії. Моделювання виконано для нових і зношених профілів з піднесенням правої рейки h від 0 до 150 мм, рисунок 4.7.

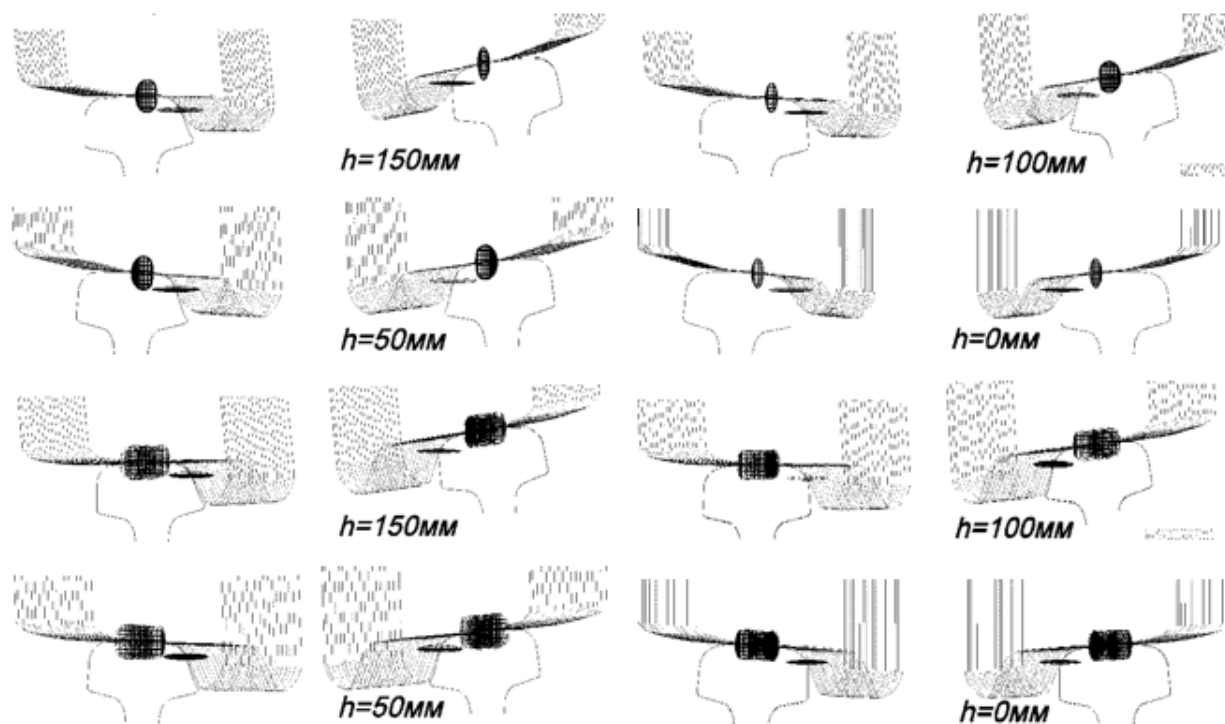


Рисунок 4.7 – Положення нової і зношеної колісної пари в рейковій колії

На рисунку 4.8 побудовано графіки залежності площі контакту на поверхні катання колеса SKK від зазору між гребенем колеса і робочою гранню головки рейки $\delta\delta$. Профіль коліс новий, рейка – зношена. Площа контакту на поверхні катання лівого і правого колеса зростає в міру збільшення зазору. Розкид значень площі на поверхні катання для одного колеса не перевищує 13 мм². При контакті гребеня з рейкою, коли $\delta\delta = 0$ мм, приріст площі контакту колеса 1050 мм становить від 82 до 91 мм², колеса 1250 мм – від 90 до 99 мм². Найбільший одноразовий перекид площ між лівим і правим колесом при двоточковому контакту: $\Delta S_{\max}^{1050} = 84 \text{ мм}^2$ і $\Delta S_{\max}^{1250} = 93 \text{ мм}^2$.

					0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

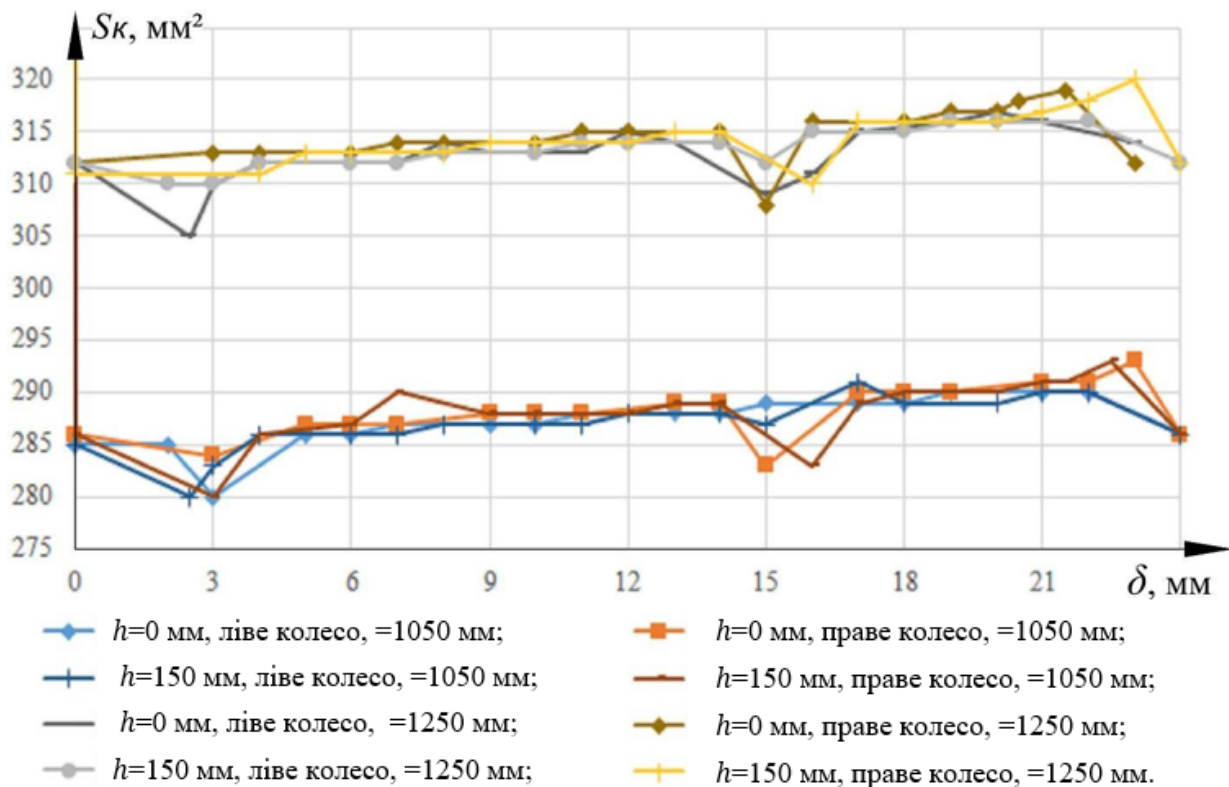


Рисунок 4.8 – Залежність площі контакту на поверхні катання колеса від зазору між гребенем колеса і рейкою

На залежності $S_k(\delta)$ видно характерні ділянки зростання ($\delta \approx 23 \text{ мм}$, $\delta \approx 7 \text{ мм}$) і зменшення ($\delta \approx 3 \text{ мм}$, $\delta \approx 15 \text{ мм}$) площа контакту. Дані сплески пояснюються розташуванням контакту щодо перелому профілю колеса. Коли контакт припадає на перелом профілю, площа зменшується. Розташування контакту між

переломами профілю відповідає зростанню площі. Таким чином, для зниження розкиду площі, має виконуватися умова плавності зміни кривизни профілю на поверхні катання. Інакше кажучи, перша похідна від функції профілю по горизонтальній координаті повинна бути гладкою функцією і не повинна мати розривів. В процесі приробітку поверхні катання колеса переломи профілю округлюються і функція профілю стає гладкою. Профіль нового або недавно обточеного колеса не відповідає умові плавності зміни кривизни [123].

Професор А.П. Буйносов розглядав технологію обточування бандажів локомотива

						Арк.
31	збереженням залишкового прокату. На поверхні залишається накатана смуга					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шириною до 20 мм, яка сприяє зниженню ковзання. У місці контакту нового бандажа з новим рейкою утворюється близька до еліпса майданчик розмірами від 1,5 до 2,0 см² [168].

Характер розподілу контактних сил і форма контакту колеса з рейкою залежить від положення колісної пари в рейковій колії. Конусність профілю колеса, наявність піднесення рейки, розширення колії, знос верхньої будови колії і ходових частин рухомого складу обумовлюють перекіс колісної пари в колії на кут γ . Оцінка впливу на розміри контактної плями кожного фактора окремо дозволить виділити найбільш значущі. Піднесення зовнішньої рейки h в криволінійній ділянці шляху влаштовується шляхом збільшення товщини баластного шару під шпалою. При цьому рейкова колія щодо краю шпали нахилиється на кут α [123], рисунок 4.5.

$$\alpha = \arcsin \frac{h}{1600+u}, \quad (4.7)$$

де $1600+u$ – відстань між осями лівого і правого рейки з урахуванням розширення колії. Результати моделювання дозволяють висловити зв'язок кута нахилу колісної пари, з кутами контакту на поверхні катання коліс і піднесенням.

$$y = y_0 + \alpha = \frac{\beta_L + \beta_{II}}{2}, \quad (4.8)$$

де y – кут нахилу колісної пари;

y_0 – кут нахилу колісної пари при нульовому підвищенні;

β_L – кут контакту на поверхні катання лівого колеса;

β_{II} – кут контакту на поверхні катання правого колеса [123].

4.3 Апроксимація профілю, умови конформності контакту

					0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дотична до профілю визначається за допомогою похідної від функції профілю по горизонтальній координаті. Для обчислення точок контакту і кута контакту в кожній з них слід мати рівняння профілів колеса і рейки. Профілі колеса і рейки визначаються сукупністю відрізків і дуг кіл, що лежать в площині [163, 164]. Поверхня катання головки нового рейки Р65 має симетричне опукле криволінійне обрис: радіус 500 мм переходить в радіус 80 мм, сполучення поверхні катання з бічними гранями виконується дугою радіусом 15 мм. Викружки гребеня нового колеса виконана радіусом 13,5 мм, близьким до заокруглення головки рейки, в процесі експлуатації це сприяє щільному приляганню гребеня колеса до голівки рейки, рисунок 4.9.

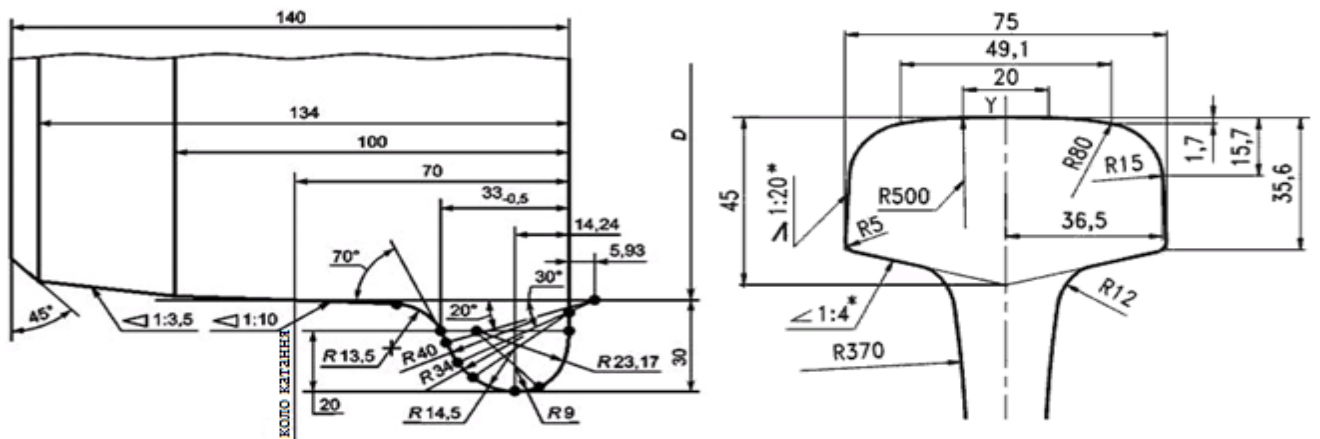


Рисунок 4.9 – Профілі локомотивного колеса і головки рейки Р65 [163, 164]

У роботі [169] профіль колеса розділений на вісім сегментів і апроксимується прямими, поліномами, колами.

$$z(y_B) = a_B + b_B \cdot y_B + c_B \cdot y_B^2 - d_B \cdot y_B^3 + e_B \cdot y_B^4 - f_B \cdot y_B^5 + g_B \cdot y_B^6 - h_B \cdot y_B^7 + i_B \cdot y_B^8. \quad (4.9)$$

Шматкова апроксимація не дозволяє отримати гладку функцію, ступінчастість явно виражається при диференціюванні таких функцій, крім того, обмежений діапазон застосування виразів. Відомо, що будь-яка безперервна періодична функція, що задовольняє умовам Діріхле, розкладається в ряд Фур'є. Якщо функція неперіодична, то після розкладання вона стане періодичною [170].

$$z(y) = \frac{a_0}{2} + (a_1 \cdot \cos(y) + b_1 \cdot \sin(y)) + (a_2 \cdot \cos(2y) + b_2 \cdot \sin(2y)) \dots$$

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

0032 206305 000 01MP ПЗ

$$\dots + (a_g \cdot \cos(gy) + b_g \cdot \sin(gy)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(ny) + b_n \cdot \sin(ny)), \quad (4.10)$$

де n – номер гармоніки;

g – число гармонік, $g = \max(n)$;

a_0, a_n, b_n – коефіцієнти Фур'є [170]:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} z(y) dy, \quad a_n = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} (z(y) \cdot \cos(ny)) dy}{\int_{-\pi}^{\pi} (\sin(y) \cdot \sin(y)) dy} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (z(y) \cdot \cos(ny)) dy,$$

$$b_n = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} (z(y) \cdot \sin(ny)) dy}{\int_{-\pi}^{\pi} (\sin(y) \cdot \sin(y)) dy} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (z(y) \cdot \sin(ny)) dy.$$

Ранні роботи автора [132-135] були присвячені питанням апроксимації нелінійних залежностей, у тому числі магнітних характеристик, що використовуються для розрахунку магнітних ланцюгів та електромагнітних пристроїв. Було встановлено, що використання рядів Фур'є дозволяє отримати аналітичні вирази з високим ступенем збіжності вихідних та розрахункових значень. Ця особливість особливо цінна в умовах, коли між профілем колеса та профілем рейки потрібно відстежувати зазори завбільшки в десяті частки міліметра.

Послідовність розкладання профілю колеса до ряду Фур'є представлена у роботі [126]. На початку поставимо координати характерних точок профілю: $(y_1, z_1) \dots (y_m, z_m); (y_{m+1}, z_{m+1}) \dots (y_{k+1}, z_{k+1})$, число точок $k+1$. Функцію $z(y)$ з періодом $2T$ можна скласти з k часткових функцій, кожна з яких з'єднує дві суміжні точки з координатами (y_m, z_m) і (y_{m+1}, z_{m+1}) . Таким чином, коефіцієнти Фур'є будуть складатись із суми k певних інтегралів від часткових функцій.

$$a_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{y_1} z_1(y) dy + \frac{1}{T} \int_{y_1}^{y_2} z_2(y) dy + \dots + \frac{1}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} z_k(y) dy = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} z_m(y) dy;$$

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{y_1} (z_1(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy + \frac{2}{T} \int_{y_1}^{y_2} (z_2(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy + \dots$$

$$\dots + \frac{2}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} (z_k(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (z_m(y) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy; \quad (4.11)$$

		y_k				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{y_1} \left(z_1(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \frac{2}{T} \int_{y_1}^{y_2} \left(z_2(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy + \dots$$

$$\dots + \frac{2}{T} \int_{y_k}^{y_{k+1}} \left(z_k(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy = \frac{2}{T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(z_m(y) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy,$$

де $z_m(y)$ – часткова функція в інтервалі від y_m до y_{m+1} ;

m – номер часткової функції, $\max(m)=k$.

Коефіцієнти Фур'є для профілю колеса розраховані в додатку В. при визначенні коефіцієнтів Фур'є, в якості часткової функції $z_m(y)$, використовується пряма лінія, виражена рівнянням наступного виду.

$$z_m(y) = \left(\frac{z_{m+1} - z_m}{y_{m+1} - y_m} \right) y + z_m + \frac{y_m (z_{m+1} - z_m)}{y_{m+1} - y_m} = p_m y + c_m. \quad (4.12)$$

Кожна пряма розглядається на відрізку, обмеженому точками з координатами (y_m, z_m) і (y_{m+1}, z_{m+1}) . При цьому, кінець m відрізка буде початком $m+1$ відрізка.

Враховуючи сказане, (4.10) буде мати вигляд:

$$z(y) = \frac{1}{2T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (p_m y + c_m) dy + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left((p_m y + c_m) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left((p_m y + c_m) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right]. \quad (4.13)$$

При заданому числі гармонік g графік функції $z(y)$ пульсує щодо профілю колеса. Збільшення числа гармонік ($g \rightarrow \infty$) зменшує амплітуди пульсацій, у той же час підвищується трудомісткість обчислень. Графіки профілю локомотивного колеса, побудовані за аналітичними залежностями для семи та двадцяти гармонік, накладені на вихідний профіль, рисунок 4.10.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

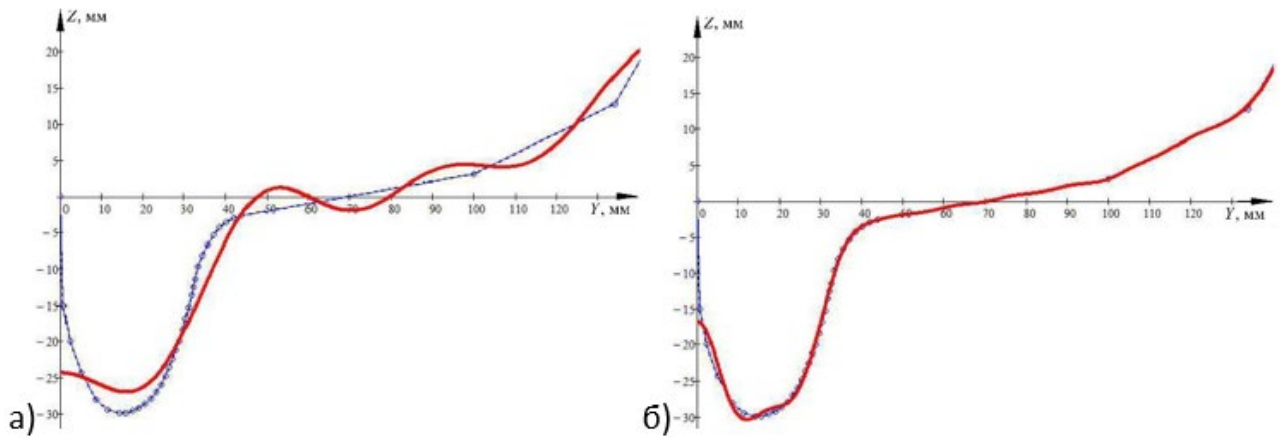


Рисунок 4.10 – Апроксимація профілю колеса локомотива:

а) $g=7$ гармонік; б) $g=20$ гармонік

При малому числі гармонік спостерігається явно виражена пульсація зі сменоймонотонності аналітичного графіка, рисунок 4.10а). Перший спосіб підвищення точності апроксимації заснований на збільшенні числа гармонік, рисунок 4.10б). Збіжність аналітичного профілю з вихідним при двадцяти гармоніках краща, ніж при семи гармоніках [126].

Інший спосіб згладжування пульсацій заснований на використанні допоміжної функції, пульсації якої щодо профілю знаходяться в протифазі до $z(y)$. Середнє значення цих функцій буде відповідати профілю більшою мірою, ніж кожна окремо. Шукана функція представлена виразом (4.14), для компактності зроблені заміна:

$$f_m = p_m y + c_m; f_k = p_k y + c_k.$$

$$z(y) = \frac{1}{2T} \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} f_m dy + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^g \left[\left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (f_m \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{T}\right) + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (f_m \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right)) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right] + \frac{g}{2T(g+1)} \left(\int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} f_k dy + \sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} f_m dy \right) +$$

$$+ \frac{g}{T(g+1)} \sum_{n=1}^{g+1} \left[\int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} (f_k \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right)) dy + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (f_m \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right)) dy \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} (f_m \cdot \sin\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right)) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) \right] \quad (4.14)_{Арк.}$$

0032 206305 000 01MP ПЗ

$$\cdot \cos\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) + \int_{y_{k+1}}^{y_{k+1} + \frac{T}{g}} \left(f_k \cdot \sin\left(\frac{\pi n y g}{g+1}\right) \right) dy + \left(\sum_{m=1}^k \int_{y_m}^{y_{m+1}} \left(f_m \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \right) dy \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{T}\right) \Bigg].$$

Для будь-якої n-ої гармоніки ряду Фур'є можемо отримати рівняння, записане в традиційному вигляді [170]. Таким чином, функція профілю колеса буде представлена у вигляді суми тригонометричних функцій з різними частотами, амплітудами і фазами. Дана апроксимація дозволяє отримати гладку функцію профілю колеса $Z_K(y)$.

$$Z_K(y) = \sum_{n=1}^g A_n \cdot \sin(n\omega y + \varphi_n), \quad (4.15)$$

де A_n – амплітуда n-ої гармоніки ряду Фур'є;

ω – частота основної гармоніки;

φ_n – фаза n-ої гармоніки.

Рівняння профілю локомотивного колеса наведено в додатку В. Дотична до профілю в кожній його точці характеризується похідною від функції профілю по горизонтальній координаті, тому при апроксимації важливо зберігати монотонність аналітичного профілю з вихідним [171].

Апроксимацію робочих поверхонь профілю рейки можна виконати за допомогою полінома $Z_P(y)$ [172]. Точки контакту профілів колеса і рейки визначаються як рівність перших похідних від функцій профілів по горизонтальній координаті [123], рисунок 4.11.

$$\frac{dZ_K(y)}{dy} - \frac{dZ_P(y)}{dy} = \frac{d(dZ_K(y) - dZ_P(y))}{dy} = 0. \quad (4.16)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	

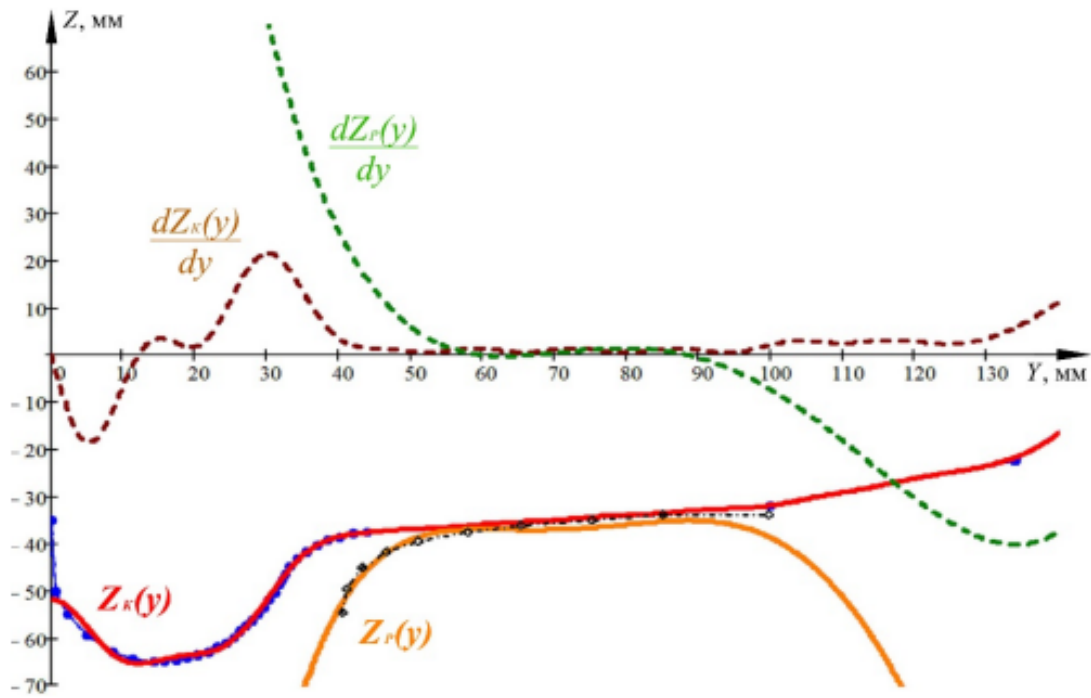


Рисунок 4.11 – Графіки функцій профілів колеса і рейки, та їх похідних:
 $Z_K(y)$ – апроксимація профілю колеса; $Z_P(y)$ - апроксимація профілю рейки;
 $\frac{dZ_K(y)}{dy}$ – похідна профілю колеса; $\frac{dZ_P(y)}{dy}$ - похідна профілю рейки

Таким чином, можливо аналітично дослідити взаємодію колеса з рейкою зіставленням рівнянь профілів і їх похідних. Графічно точки контакту на профілях колеса і рейки визначаються через перетин графіків перших похідних по горизонтальній координаті від функцій профілів.

Наявність на контактуючих поверхнях ділянок схожого обрису сприяє

щільному приляганню колеса до рейки, в міжнародній термінології такі контакти прийнято називати конформними. У роботі [154] конформні контакти поділяються на одноточковий і двоточковий, рисунок 4.12. При конформному гребеневому контакті досягається найбільша площа взаємодії поверхонь колеса і рейки, за рахунок чого знижується інтенсивність зносу і послаблюються контактні напруги. Контакт вважається щільно конформним, коли зазор між недеформованими колесом і рейкою не перевищує 0,1 мм. При зазорі величиною до 0,4 мм контакт ще

Можна вважати конформним.					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ

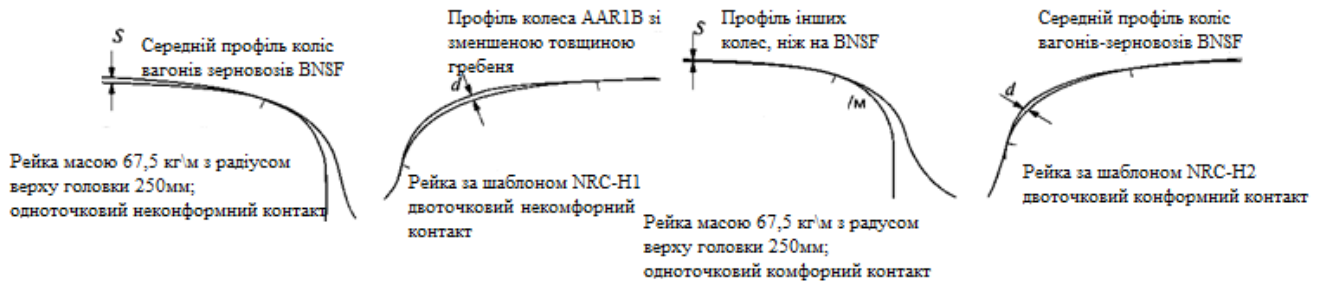


Рисунок 4.12 – Схеми контакту профілів колеса і зовнішньої рейки [154]

В роботі [131] зазначено, що зазначений спосіб визначення конформності контакту є дещо віртуальним, оскільки в умовах експлуатації в зоні контакту колесо і рейка завжди деформовані. Умова щільного прилягання колеса до рейки є достатнім для утворення конформного контакту. Зазор між колесом і рейкою представлений виразом $\Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y)$. Функція зазору визначається для недеформованого колеса і рейки. Недеформований точковий контакт профілю колеса з профілем рейки характеризується наявністю зазору Δ , який показує наскільки контакт буде щільним в результаті деформації. Коли $\Delta \rightarrow 0$ контакт стає багатоточковим. Пружні і пластичні деформації, зношування колеса сприяють зменшенню кривизни поверхні, тим самим підвищують конформність контакту.

Згідно (4.16) у точці контакту колеса з рейкою функція зазору має мінімум, координата точки контакту на поверхні катання колеса y_K відповідає кореню

рівняння $\frac{\Delta(y)}{dy} = 0$ [129], рисунок 4.13. У випадку, коли функції колеса і рейки не

мають спільних точок контакту $Z_K(y_K) \neq Z_P(y_K)$, необхідно перевизначити функцію зазору $\Delta(y) = Z_K(y) - Z_P(y) - Z_K(y_K) + Z_P(y_K)$, при цьому $\min \Delta(y) = 0$.

Геометрично перевизначення виражається паралельним зміщенням графіка зазору до осі OY і виникненням точкового контакту [131].

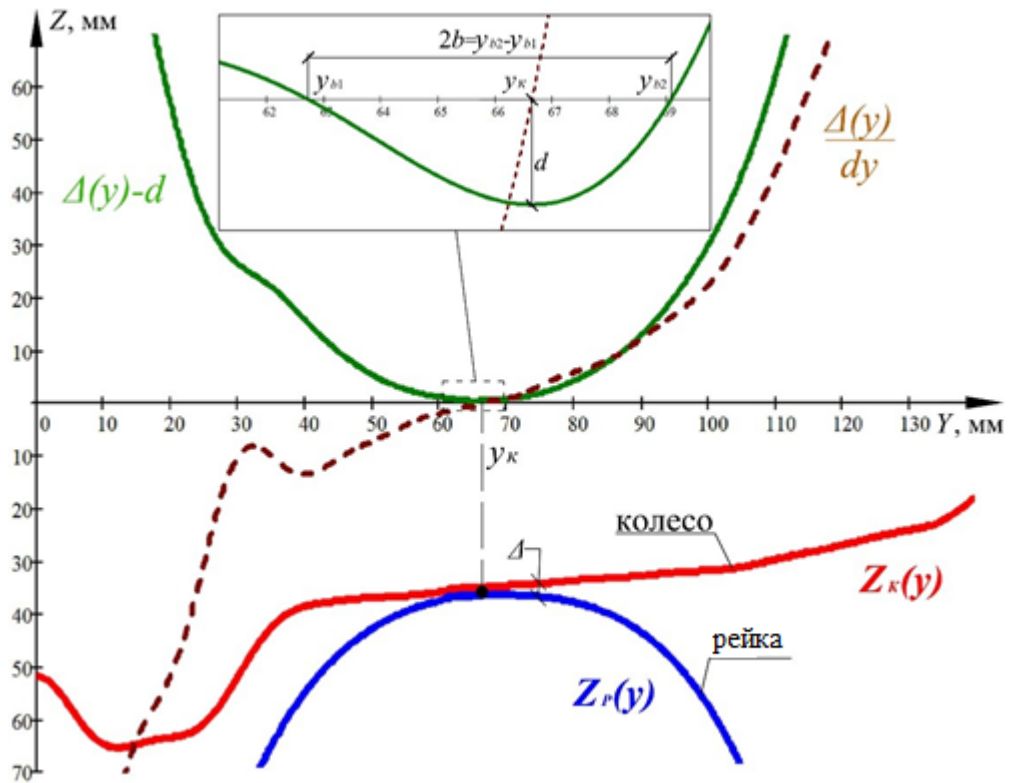


Рисунок 4.13 – Графіки функції зазору та її похідної

Подальший крок у визначенні ширини плями контакту $2b$ і площі контакту S_K . Зменшення функції зазору при точковому контакті на величину проникнення d , сприяє появі негативних значень зазору в області контактної плями. Корінь рівняння $\Delta(y)=d$ відповідає кордонам плями контакту y_{b1}, y_{b2} . Приймаючи, що пляма контакту плоска і має форму еліпса, розрахуємо його приблизну площу $S_K=0,71\pi b\sqrt{D_K \cdot d}$, де половина ширини плями контакту $b=0,5(y_{b2} - y_{b1})$. Більш точну величину площі визначимо, враховуючи кривизну профілю колеса [129, 131]. Протяжність плями контакту $2b$ розраховується через певний інтеграл від функції колеса [173, с. 792]. Межі інтегрування відповідають межах плями контакту.

$$2b = \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{z_K(y)}{dy}\right)^2} dy, \quad S_K = 1,11\sqrt{D_K \cdot d} \int_{y_{b1}}^{y_{b2}} \sqrt{1 + \left(\frac{z_K(y)}{dy}\right)^2} dy. \quad (4.17)$$

Моделювання поперечного положення колісної пари в рейковій колії (Додаток А) показує, що найбільша ширина плями контакту на поверхні катання становить 26 мм.

Дослідження А.М. Керопяна [174, 175] присвячені утворенню конформного контакту в парі колесо – рейок кар'єрного залізничного транспорту. В умовах

підвищених осьових навантажень до 350 кН, граничну величину зазору між недеформованими колесом і рейкою можна збільшити до 0,8 мм, при цьому контакт буде вважатися конформним. Смуга зношування при щільно конформному контакті знаходиться в межах від 25 до 38 мм [154].

Протяжність цієї ділянки визначається залежно від ширини плями контакту $2b$. Будемо вважати, що точка контакту недеформованого колеса і рейки розташована в центрі плями контакту, тоді приблизні координати меж плями контакту визначаються як $y_K \pm b$.

Необхідною умовою конформного контакту є наявність на профілях ділянок з кривизною одного знаку, профілі колеса і рейки повинні бути опуклої форми. Причому величина кривизни колеса в зоні контакту K_K не повинна перевищувати кривизну рейки K_P . У роботі [129] необхідні умови конформного контакту представлені в математичній формі.

$$\left| \frac{K_K}{K_P} \right| \leq 1, K_K \cdot K_P = \frac{\frac{Z_K(y_K)}{dy^2} \cdot \frac{Z_P(y_K)}{dy^2}}{\left(1 + \left(\frac{Z_K(y_K)}{dy} \right)^2 \right)^{1.5} \cdot \left(1 + \left(\frac{Z_P(y_K)}{dy} \right)^2 \right)^{1.5}} \geq 0. \quad (4.18)$$

Таким чином, для утворення конформного контакту в точці контакту радіус профілю колеса R_{KK} повинен бути більшим або рівним радіусу рейки R_{KP} . У роботі [131] отримана залежність радіусів на профілі колеса і рейки при різній степені конформності, рисунок 4.14.

$$R_{KP}(R_{KK}, \Delta, b) = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{R_{KK}^2 - b^2} - \Delta \left(2\sqrt{R_{KK}^2 - b^2} - \Delta \right)}{2(R_{KK} + \sqrt{R_{KK}^2 - b^2})} \right]^2 + b^2}. \quad (4.19)$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

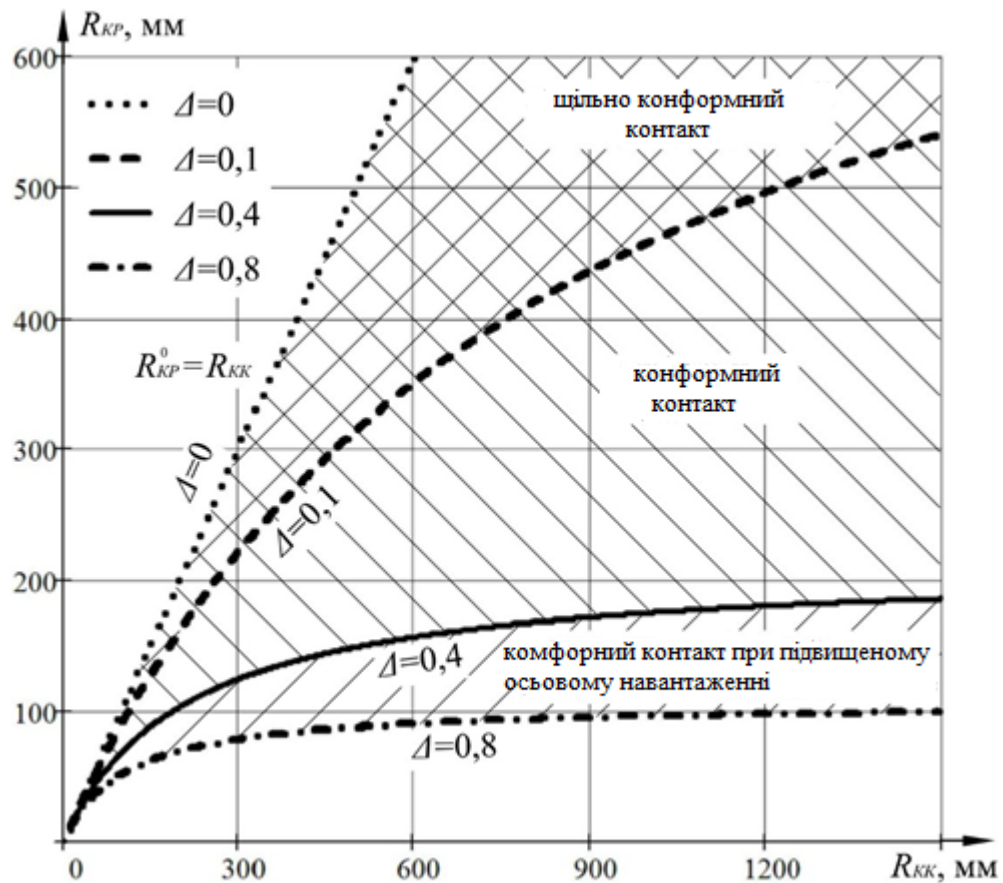


Рисунок 4.14 – Залежність радіуса профілю рейки від радіуса профілю колеса при конформному контакті шириною $2b = 26$ мм

Розміри контактної плями істотно залежать від профілю колеса. Зіставляючи радіуси сполучення поверхні катання і гребеня нового колеса з радіусами головки нового рейки типу Р65 (рисунок 4.9), бачимо, що необхідні умови конформності не виконуються. Конформний контакт утворюється в умовах приробітку профілю колеса і профілю рейки [129]. Оскільки розміри площі контакту і ширина контактної плями практично пропорційні (додаток А), то по одному з цих параметрів можливо виявляти конформність колеса і рейки в деформованому стані [131]. Ширина контактної плями може відслідковуватися пристроєм, робота якого заснована на відеозйомці [176].

У першому наближенні площа контакту колеса з рейкою можна визначити за

законами	контактної	механіки	теорії Герца, на основі аналітичного дослідження	для
формули	профилів,	головки	очні значення площі нееліптичного контакту	

0032 206305.000.01MP ПЗ

визначаються за допомогою моделювання. Результати моделювання групуються для нових і зношених профілів. Надалі інформація про величину і форму контактної плями колеса залізничного рухомого складу з рейками передається в систему регулювання, де визначається ефективність намагнічування і задаються струми індукторів.

Удавана (номінальна) площа контакту колеса з рейкою визначалася дослідним шляхом за допомогою способу, заснованого на знятті відбитків [6]. В якості проміжного середовища між колесом і рейкою використовувалася фольга, сканування і обробка зображення фольги дозволили визначити розміри плям контакту коліс тепловоза ЧМЕЗ з рейками, було проаналізовано сім відбитків коліс шостої осі, рисунок 4.15.

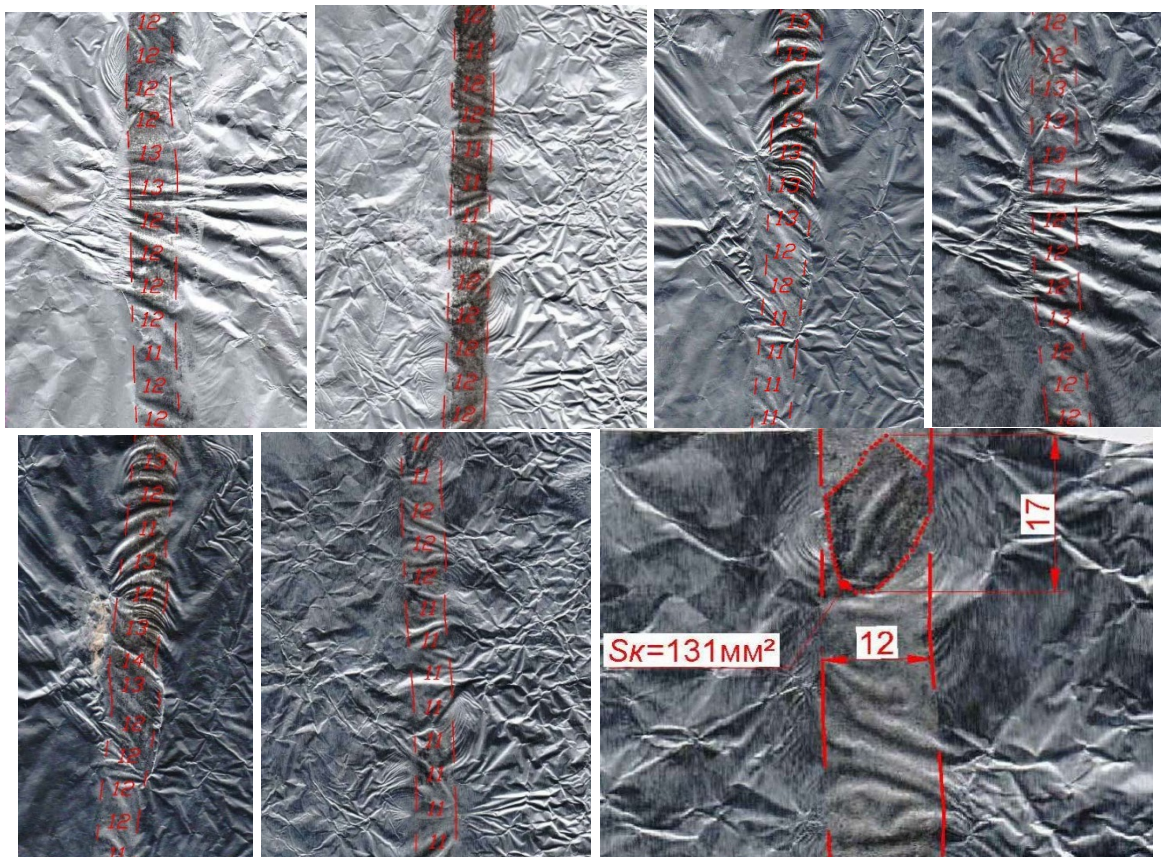


Рисунок 4.15 – Відбитки контакту коліс тепловоза ЧМЕЗ з рейками на фользі

Дані, зібрані дослідним шляхом, були доповнені результатами виміру величини прокату на поверхні катання і товщини гребеня з журналу ТУ-17. Колісні пари

шостої осі тепловоза ЧМЕЗ мають прокат коліс 0,5 мм, рисунок 4.16.					Арк.
<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Сторінка МНДС *технолог* серія *ЧНІЗ* № *5008* ТУ-17

№ *1*

№	Сторінка (дата)	Найбільший прокат, мм	Найменша ширина рейки, мм	Найбільший параметр крутизи рейки, мм	Найменша ширина баштака (за висотою проката), мм	Найбільший радіус дотичності баштака до колеса, мм	Діаметр колеса, мм	Кількість рейок з прокатом в даній баштаці	№ рейки	Прокат, мм		Площина рейки, мм		Параметр крутизи рейки, мм		Толщина баштака, мм		Діаметр баштака, мм		Діаметр, ширина і форма рейки, матеріал рейки
										мм	град.	мм	град.	мм	град.	мм	град.			
1	26	8	43	16	-	-	1	1	1	26	26	25	25	43	43	90	90	110	110	Р65
2	0	0	26	26	8	8	25	25	51	100	100	47	47	90	90	110	110	110	110	Р65
3	0,5	0,5	26	26	8	8	42	42	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Р65
4	0	0	26	26	8	8	48	48	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Р65
5	0	0	26	26	8	8	46	46	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Р65
6	0,5	0,5	26	26	25	25	43	43	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	Р65

Рисунок 4.16 – Фото сторінки журналу ТУ-17

При знятті відбитків тепловоз знаходився на прямій ділянці шляху зі звичних ланок, покладених новими рейками типу Р65. Вимірювання показують, що контакт коліс з рейками не є конформними, за формою не еліптичні. Ширина нееліптичного контакту змінюється від 11 до 14 мм, переважає ширина 12 мм, Площа контактної плями становить від 131 до 140 мм². Результати моделювання (Додаток А) показують, що площа контактної плями нового колеса з новою рейкою знаходиться в межах від 119 до 128 мм², його ширина дещо вужча, ніж у колеса, що приробляється, становить 8 мм. Розбіжність розрахункових і вимірянних площ контакту не перевищує 10 %.

Аналітичним способом отримана площа еліптичного контакту нового колеса з новою рейкою – 150 мм², пляма контакту шириною 6,9 мм більш витягнута в поздовжньому напрямку в порівнянні з нееліптичним. Розбіжність площі контакту становить від 15 до 21 %.

Висновки до розділу. При визначенні площі контакту між колесом і рейкою врахований комплекс геометричних особливостей контактуючих профілів.

контакту можна визначити аналітично. Більш точні розміри нееліптичного контакту визначаються в результаті моделювання.

Щільне прилягання колеса до рейки є достатньою умовою утворення конформного контакту. Необхідною умовою конформного контакту є наявність на профілях ділянок з кривизною одного знаку - профілі колеса і рейки повинні бути опуклої форми, причому величина кривизни колеса в зоні контакту не повинна перевищувати кривизну рейки.

Розміри площі контакту і ширина контактної плями сприяють виявленню конформності колеса і рейки в деформованому стані, цей спосіб адаптований для умов експлуатації.

5 МАГНІТНІ ПІДСИЛЮВАЧІ КОЕФІЦІЄНТА ЗЧЕПЛЕННЯ КОЛІС З РЕЙКАМИ. ПРОПОЗИЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поліпшення зчіпних властивостей рейкового рухомого складу за рахунок використання магнітних систем базується на двох принципах: магнітне довантаження і зміна триботехнічних властивостей плями контакту колеса з рейкою. Магнітне довантаження сприяє підвищенню зчіпного навантаження на рейки за рахунок використання магнітного блоку, з'єданого з рамою. Основний розвиток магнітне довантаження знайшло в електромагнітних рейкових гальмівних системах міського, магістрального та промислового транспорту.

В даному розділі наведені результати випробувань маневрового тепловоза ЧМЕЗ з індикаторним пристроєм збільшення зчеплення коліс з рейками, запропоновані способи використання магнітних підсилювачів зчеплення на локомотивах. Обрані місця розташування індукторів, наведені режими намагнічування, визначено приріст сили тяги коліс тепловоза.

5.1 Магнітні підсилювачі коефіцієнта зчеплення коліс локомотива з рейками

Для кількісної оцінки ефекту впливу магнітного поля на трибосистему локомотивні колеса – рейка були проведені випробування на коліях сервісного локомотивного депо «Єлець» з використанням маневрового тепловоза ЧМЕЗ і виготовленого дослідного зразка індукторного пристрою збільшення зчеплення коліс з рейками (додаток б). Індукторний пристрій збільшення зчеплення (рисунок 5.1) представлено збірним сердечником прямокутного перетину і обмоткою, поверх якої розташований захисний шар. Довжина сердечника становить 1700 мм, уздовж сердечника намотана $WW = 320$ витків алюмінієвого дроту перетином 5 мм^2 , початок і кінець обмотки віддалені від

краю сердечника для укладання пристрою на рейки. Для підвищення комфортності і зниження магнітного опору контактують з рейками поверхні сердечника механічно оброблені і мають кривизну радіусом від 500 до 800 мм.

					<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

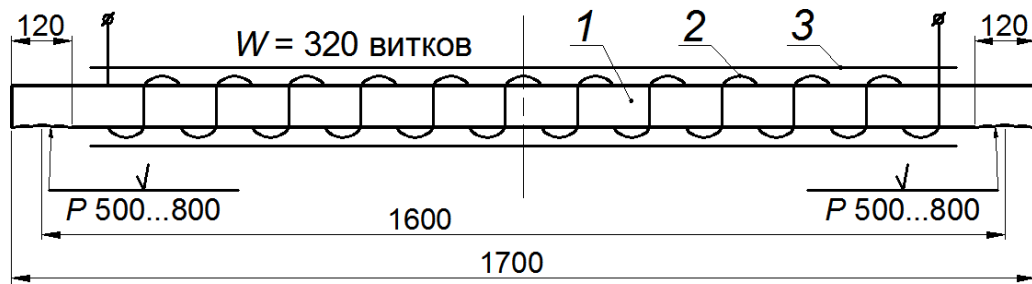
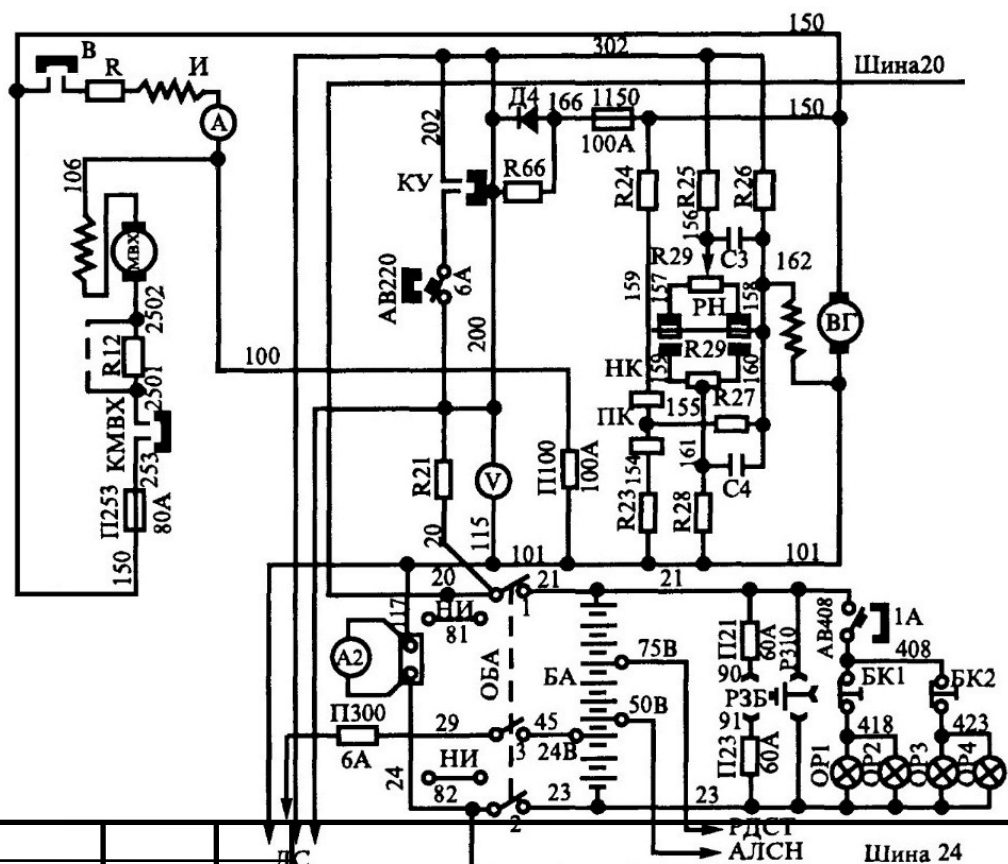


Рисунок 5.1 – Індукторний пристрій збільшення зчеплення коліс з рейками: 1 – прямокутний перетин; 2 – обмотка; 3 – захисний шар

На рисунку 5.2 представлена схема підключення обмотки пристрою. Обмотка И через опір R і амперметр А підключена до допоміжного генератора ВГ паралельно ланцюгу електродвигуна вентилятора холодильника МВХ (дроти № 100; 150). Комутація ланцюга здійснюється вимикачем В. Струм обмотки становить 50А, намагнічуюча сила – $WI = 16000$ А-витків. Величина намагнічуючої сили використовуваного пристрою обмежена найбільшим струмом обмотки і потужністю допоміжного генератора тепловоза.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арк.
					0032 206305 000 01MP ПЗ

Рисунок 5.2 – Схема підключення обмотки пристрою

При оцінці загальної точності виміру реєстрованої величини сили струму, кожна зі складових систематичних похибок набуває характеру випадкової величини, а її граничне значення $\epsilon\epsilon$ стає приватною похибкою. Гранична похибка вимірювань сили струму визначається складанням приватних похибок: від неточності показання амперметра -3 %, від сполучних проводів -1 %, від мінливості напруги на тягових двигунах -3 % $\epsilon\epsilon = \sqrt{3^2 + 1^2 + 3^2} = 4,36\%$.

Силовий ланцюг тепловоза ЧМЕЗ (рисунок 5.3) представлений тяговими двигунами № 5 і 6, підключеними послідовно до генератора Г, на час проведення випробувань були відключені тягові двигуни № 1-4.

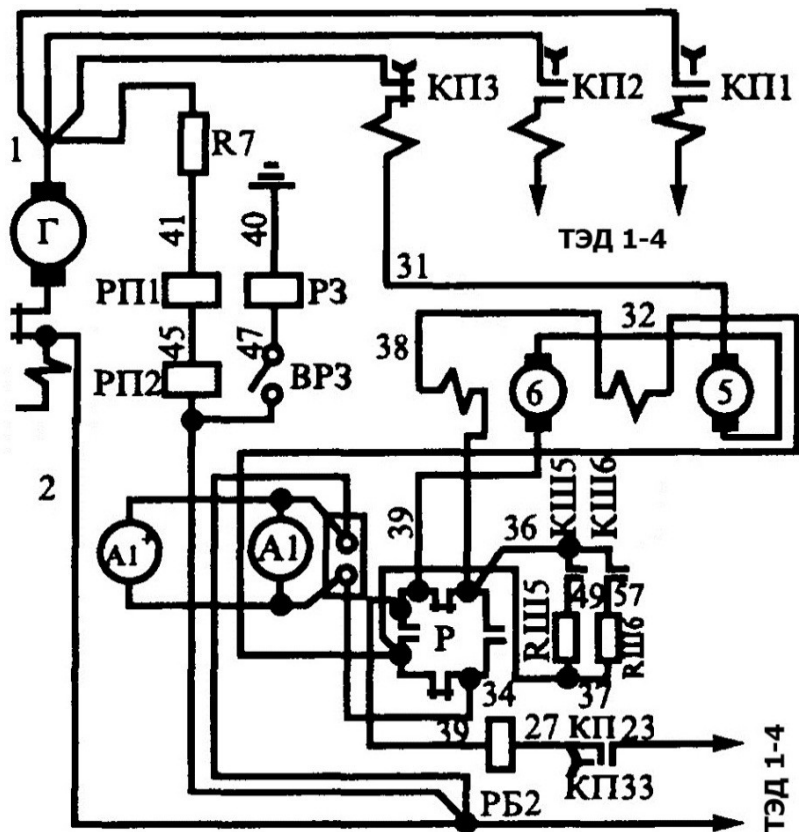


Рисунок 5.3 – Силовий ланцюг тепловоза ЧМЕЗ при проведенні випробувань

Ревізореора локомотива розгорнуті в положенні "назад", шоста колісна пара є першою у напрямку руху. Для утримання тепловоза на місці виставляється опору руху

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

під чотири задні колісні пари (рисунок 5.4) укладено по одному гальмівному черевіку з боку передніх колісних пар. Перед шостою колісною парою на рейки поперек осі шляху укладено індукторний пристрій збільшення зчеплення коліс з рейками.

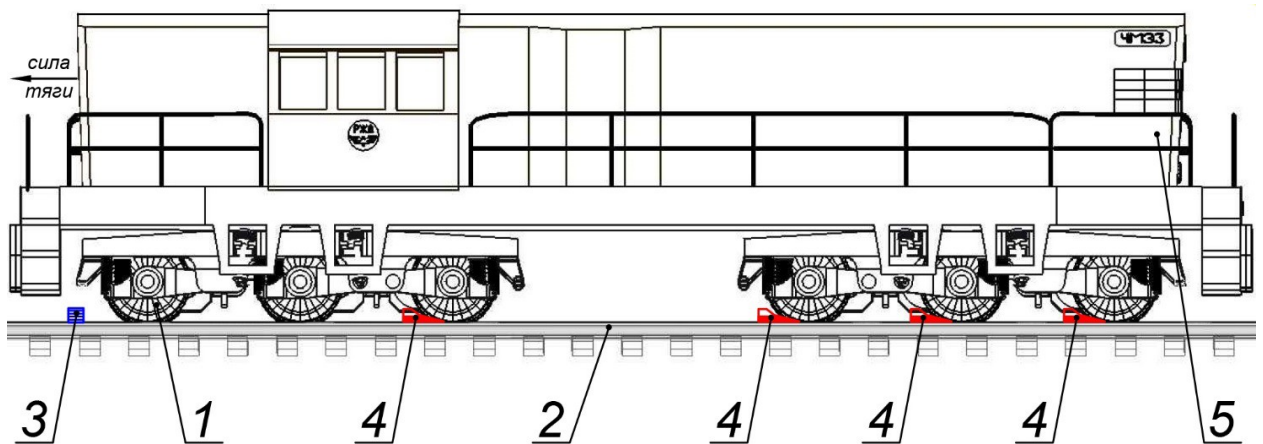


Рисунок 5.4 – а) - схема випробувань; б) - підготовчий етап випробувань:
 1 – шоста колісна пара; 2 – рейка; 3 – індукторний пристрій збільшення зчеплення коліс з рейками; 4 – гальмівний черевик; 5 – тепловоз ЧМЕЗ

Магнітний ланцюг представлений замкнутим феромагнітним контуром, що складається з сердечника з обмоткою, рейок і колісної пари тепловоза. Згідно з даними журналу ТУ-17 (рисунок 4.16) колеса шостої осі тепловоза мають прокат 0,5 мм, поверхні катання нового профілю знаходяться на етапі підробітку. У

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ	

зазначених умовах намагнічування індукція магнітного поля в плямах контакту коліс з рейками становить 1 Тл.

Підготовчий етап випробувань включав очищення або змазування поверхонь катання коліс і рейок, загальмовування локомотива черевиками з накатом, перевірку електричного кола індуктора. В процесі кожного експерименту набором позицій контролера збільшувався струм тягових двигунів № 5 і 6 до моменту зриву зчеплення колісної пари, величина струму початку буксування $I_{\text{ТЕД}}^{\text{Б}}$ фіксувалася по амперметру в кабіні локомотива. Кожна серія випробувань включала шість чергуються експериментів без намагнічування і з намагнічуванням контакту коліс з рейками, таблиця 5.1

Таблиця 5.1– Результати випробувань тепловоза ЧМЕЗ з індукторним пристроєм збільшення зчеплення коліс з рейками

Реєстровані параметри при зриві зчеплення				Віднос не зм. струму $\frac{I_{\text{ТЕД}}^{\text{откл}}}{I_{\text{ТЕД}}^{\text{вкл}}}$	Абсолютне вим. найбільшої сили тяги $\Delta F_{\text{КП}}$, кН
особливості випробування	підсил ювач зчеплен ня	п оз. ко нтр .	стр ум $I_{\text{ТЕД}}^{\text{Б}}$, А		
Сухі очищені поверхні колеса і рейки	відключ ен	5	97 0	-0,03	-2,8
	включе н	5	94 0		
	відключ ен	5	10 20	0,05	5,0
	включе н	5	10 70		
	відключ ен	5	10 00	-0,01	-1,0
	включе н	5	99 0		
Рейки змочені водою з додаванняммазуту	відключ ен	4	86 0	0,09	8,2
	включе н	5	95 0		
	відключ ен	4	82 0	0,10	8,0

	включе н	5	91 0		
	відключ ен	4	87 0	0,11	10,1
	включе н	5	98 0		
Рейки змочені водою з додаванням мазуту. На 4 позиції підсилювач зчеплення вимикається.	1) включе н 1-4 поз; 2) виключ ення на 4 поз.	1-4 4	- 87 0	-	-

Серії експериментів виконувалися в два етапи. На першому етапі експерименти проводилися для сухих очищених поверхонь катання коліс і рейок. При вимкненому пристрої стійке зчеплення коліс локомотива з рейками підтримувалося на четвертій позиції контролера, а буксування починалося під час переходу з четвертої на п'яту позицію при струмі тягових двигунів від 940 до 1070 А. Включення пристрою не запобігло буксування при переході з четвертої на п'яту позицію. Відсутність ефекту від використання пристрою пояснюється тим, що збільшення сили тяги під час переходу з четвертої на п'яту позицію перевищує приріст зчеплення.

На другому етапі рейки змочувалися водою з додаванням мазуту. При вимкненому пристрої стійке зчеплення коліс підтримувалося на третій позиції контролера, буксування починалося під час переходу з третьої позиції на четверту при струмі тягових двигунів від 820 до 870 А. При включеному пристрої перехід з третьої позиції на четверту відбувався без буксування, на четвертій позиції контролера підтримувалося стійке зчеплення коліс. Подальше виключення пристрою супроводжувалося зривом зчеплення. Збільшення намагнічуючої сили пристрою в процесі буксування до 16000 А-витків зчеплення не стабілізує. Це

										АПК
пояснюється тим, що при початку буксування коефіцієнт зчеплення коліс з рейками										
ЗМН.	АПК	№ докум.	Підпис	Дата	0033 206305 000 01 МР ПЗ					

знижується, намагнічуючої сили пристрою мало для збільшення зчеплення на величину, необхідну для припинення буксування. В умовах зниженого зчеплення попереднє включення пристрою дозволяє запобігти розвитку буксування, забезпечує перехід на більш високу позицію контролера (з третьої на четверту).

Слід зазначити, що отримані кількісні та якісні показники, що підтверджують вплив магнітного поля на зчеплення коліс з рейками. Якщо кількісні показники частково можуть бути обумовлені похибкою ($\approx 5\%$), то якісні показники мають більший ступінь достовірності. До якісних показників відносяться: збільшення позиції контролера без буксування при включеному пристрої і зрив зчеплення після його виключення.

На основі тягових і струмових характеристик тепловоза ЧМЕЗ отримана залежність сили тяги колісної пари від струму тягового двигуна при рушанні з місця $F^{TP}(I_{TEД})=0,00003I_{TEД}^2+0,04I_{TEД}$. Залежність близька до лінійної, тому величина відносної зміни струму близька відносній зміні сили тяги. Тягові якості тепловоза при використанні підсилювача зчеплення оцінюються величиною абсолютної зміни найбільшої сили тяги колісної пари: $\Delta F_{КП} = F^{TP}(I_{TEД}^{Б\text{ вкл.}}) - F^{TP}(I_{TEД}^{Б\text{ откл.}})$. Результати випробувань показують, що намагнічування зон контакту коліс з рейками в умовах зниженого зчеплення сприяє збільшенню найбільшої сили тяги шостої колісної пари від 9 до 11 %

(від 8,2 до 10,1 кН).

На основі отриманих результатів визначено два напрямки подальшого підвищення ефективності пристрою збільшення зчеплення коліс з рейками: збільшення розмірів пристрою, що дозволить підвищити намагнічуючу силу, а також знизити магнітний опір сердечника, і використання систем виявлення буксування на ранній стадії розвитку.

На сьогоднішній день основна складність використання магнітних підсилювачів коефіцієнта зчеплення коліс з рейками (МУКС) полягає у відсутності достатнього досвіду створення таких пристроїв. Можна констатувати, що

універсальна конструкція, яка здатна істотно підвищувати зчіпні властивості					Арк.:
0032 206305 000 01MP ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

локомотива і відповідати габаритним і компоувальним вимогам екіпажу не створена. У роботах [10-12] були розглянуті способи розташування індуктора, що є основою МУКС. При розташуванні обмотки індуктора уздовж осі колісної пари стикаємося з труднощами розміщення в габаритах тягового електродвигуна. Розташовувати обмотку паралельно осі колісної пари на окремому осерді недоцільно, оскільки виникають два додаткових повітряних зазори між сердечником і дисками коліс, а вісь колісної пари шунтує контакти коліс з рейками. При оперізуючому розташуванні обмотки індуктора навколо колеса по хорді виникають габаритні обмеження з боку шляху і деталей екіпажної частини. Кріплення індуктора на необресорених масах екіпажу призводить до погіршення умов міцності та надійності обмотки при високих швидкостях.

Розташування індуктора між колісними парами над рейками дозволяє знизити протиріччя, обумовлені зовнішнім габаритними обмеженнями. Однак, при кріпленні індуктора на обресорених частинах візка його ефективність знижується внаслідок необхідності в забезпеченні повітряного зазору між індуктором і рейкою величиною декілька десятків міліметрів, рисунок 5.5.

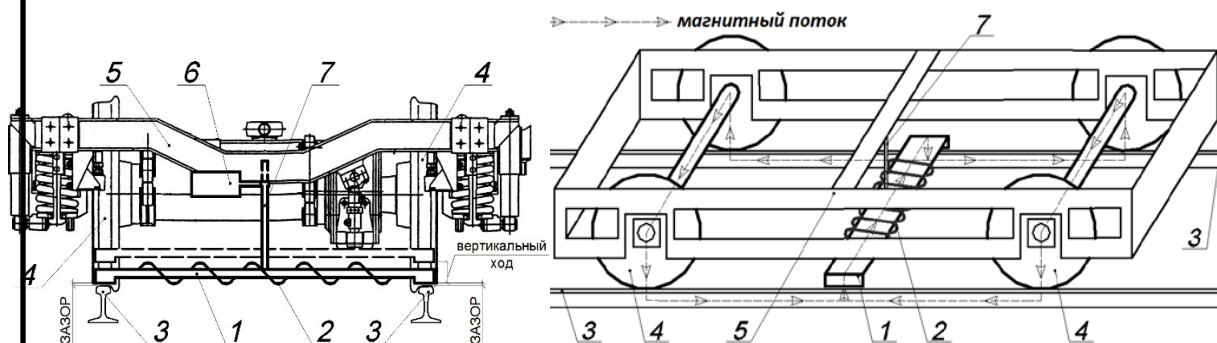


Рисунок 5.5 – Схема розташування індуктора між колісними парами над рейками: 1 – магнітопровід; 2 – котушка; 3 – рейка; 4 – колесо; 5 – рама візка; 6 – електродвигун; 7 – немагнітна зубчаста рейка

При розташуванні індуктора в самому колесі виникає необхідність виконати колесо розрізним, щоб пропускати значну частину магнітного потоку через контакт колеса і рейки, це призводить до ускладнення конструкції. У той же час,

					Арк.
враховуючи існуючий досвід створення мотор-коліс для моторвагонного рухомого					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

складу, не можна виключати можливість створення для цього виду рухомого складу МУКС з розміщенням індуктора в колесі. З перерахованого випливає, що МУКС коліс локомотивів з рейками повинні відповідати наступним основним вимогам:

- компоновання повинна забезпечувати достатній простір для розміщення обмотки індуктора;
- в якості магнітопроводу повинні бути використані деталі екіпажної частини;
- в індукторі не повинно бути власних деталей магнітопроводу, що мають велику вагу і матеріаломісткість;
- між магнітопроводом і колесом не повинно бути значного повітряного зазору.

Зазначеним вимогам найбільшою мірою відповідає компоновка з обмоткою індуктора, розміщеної навколо осі колісної пари. За рахунок появи асинхронних тягових двигунів менших габаритів і застосування зубчастих

передач з проміжними колесами, габаритні обмеження можна вважати частково дозволеними. Подальше порівняння магнітних ланцюгів доцільно виконувати для двох способів розташування обмотки індуктора: на осі колісної пари і хордового.

Розвиток процесу оснащення локомотивів МУКС можливий двома шляхами: модернізація існуючих і проектування нових локомотивів. Для експлуатованих локомотивів проблема недостатнього зчеплення, як правило, найбільш властива вантажним магістральним і маневровим локомотивам з опорно-осьовим підвішуванням тягових електродвигунів. Модернізація локомотивів полягає в оснащенні тягового електродвигуна індуктора обмотка якого розташовується між моторно-осьовими підшипниками [90]. При даному способі розміщення обмотки МУКС обмеження по потужності індуктора будуть обумовлені обмеженими умовами і потужністю силової установки автономних локомотивів.

Реалізація всіх можливостей МУКС вимагає вирішення завдань конструкторського характеру у знову спроектованих локомотивів. Компонування приводу дозволяє отримати достатньо вільного місця для індукторів, рисунки 5.6-

5.8. Повною мірою МУКС здатний реалізувати свої енергозберігаючі властивості при роботі в парі з груповим тяговим приводом локомотива ПТК					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

одномоторного приводу ускладнюються в разі застосування його на тривісних візках.

Рисунок 5.6 – Схема тягового приводу з осьовим розташуванням індуктора: 1, 2 – осьові редуктори; 3, 4 – тяги; 5 – рама візка; 6 – рамний редуктор; 7, 8 - карданний вал; 9, 10 – індуктор; 11, 12 – колісні пари; 13, 14 – блоки «або»; 15, 16 – датчики зусилля; 17 – блок порівняння; 18 – ключ, 19 – блок уставки; 20, 21 – регулятори струму; 22 – джерело струму; 23 – вимикач; 24 – суматор

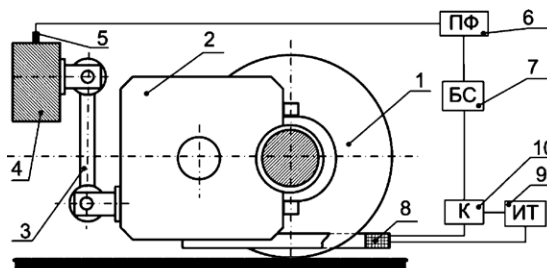


Рисунок 5.7 – Схема тягового приводу з хордовим розташуванням індуктора: 1 – колісна пара; 2 – ТЕД; 3 – підвіска; 4 – рама візка; 5 – датчик вертикальної віброшвидкості; 6 – смуговий фільтр; 7 – блок порівняння, 8 – індуктор; 9 – джерело струму; 10 – ключ



									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 005305 000 01MP ПЗ				

Рисунок 5.8 – Схема тягового приводу з осьовим розташуванням індуктора при опорно-осьовому підвішуванні тягового електродвигуна: 1 – колесо; 2 – вісь колісної пари; 3 – котушка; 4 – джерело живлення; 5 – провід; 6 – немагнітний каркас; 7 – моторно-осьові підшипники; 8 – зубчасте колесо; 9 – редуктор; 10 – тяговий електродвигун; 11 – немагнітна втулка

Управління МУКС здійснюється системою оперативного регулювання зчеплення зі зворотним зв'язком. Фізичні процеси, що супроводжують буксування, дозволяють виділити основні способи отримання інформації: виникнення автоколивань, відмінність швидкостей, зміна тягового зусилля, зміна енергії в контактні колеса і рейки шляхом вимірювання температури поверхонь колеса або рейки.

На основі величини миттєвої площі контакту коліс з рейками система управління МУКС здійснює плавне регулювання струму індуктора. Задана МРС індуктора за допомогою намагнічування зони контакту дозволяє підтримувати коефіцієнт зчеплення коліс локомотива з рейками в межах необхідної величини.

Визначення площі контакту коліс з рейками розглянуто в розділі 4. Поперечне положення колісної пари система управління визначає виходячи з даних про план залізничної колії, пікетажного положення локомотива і швидкості прямування. В умовах експлуатації поперечне положення колісної пари може уточнюватися шляхом визначення зазору між гребнем колеса і робочою гранню головки рейки за допомогою відеозйомки зони контакту з подальшою по кадровою обробкою. Моніторинг поперечного положення колісної пари в колії сприяє формуванню даних для системи оперативного регулювання зчеплення колеса з рейкою.

Найбільші енергетичні втрати в механічній частині тягового приводу

~~локомотива припадають на контакт коліс з рейками, де реалізується сила тяги.~~

Наприклад, при годинному режимі роботи локомотива втрачається енергія при буксуванні

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

можуть перевищувати 30% від переданої потужності [13, 11]. Застосування МУКС зводиться до виключення режимів роботи тягового приводу в умовах буксування. Таким чином, зростає енергоефективність роботи локомотива з точки зору енергоспоживання, крім того, знижуються пов'язані зі зносом бандажа витрати.

5.2 Магнітний ланцюг тривісного візка тепловоза, обладнаного пристроєм збільшення зчеплення

Пристрої для збільшення зчеплення ведучих коліс локомотива з рейками за допомогою впливу на зону контакту колеса і рейки магнітного поля передбачає два типи розташування намагнічуючих котушок на тривісному візку локомотива: оперізуючий щодо коліс (хордове) і співвісний уздовж осей колісних пар. При співвісному намотуванні кожна котушка розташовується навколо осі між моторно-осьовими підшипниками і вписується в конструкцію тягового електродвигуна. Зони контакту коліс з рейками включаються паралельно джерелам МРС і шунтуються буксовими вузлами і рамою візка, рисунок 5.9 а). Оскільки контакт коліс з рейками і джерела МРС розташовуються в замкнутих феромагнітних контурах, тобто можливість намагнітити зони контакту крайніх колісних пар до індукції 1 Тл, а середньої колісної пари до 1,5 Тл, рисунок 5.10 а). Для зазначеного режиму МРС одного індуктора становить 6000 А-витків, а його потужність– 31 кВт.

При охоплюваному розташуванні, котушки обмотка намотується в безпосередній близькості від зони контакту колеса з рейкою. Це дозволяє включити контакт колеса з рейкою послідовно з джерелом МРС (рисунок 5.9 б) і пропускати основний магнітний потік через зону контакту, рисунок 5.10 б). З експлуатаційної точки зору створюються складності огляду коліс. Котушки кріпляться до корпусу букси, корпусу тягового двигуна (кожуха редуктора) на висоті 100 м над рівнем головки рейки. При охоплюваному розташуванні, котушки обмотка намотується в

без	посередній	близькості	від зони	контакту	колеса з	рейкою. Це	дозволяє	включити	контакт
контакт	колеса з	рейкою	послідовно	з джерелом	МРС (рисунок	5.9 б)	і пропускати	основний	магнітний

0032 206305 000 01 МР ПЗ

основний магнітний потік через зону контакту, рисунок 5.10 б). З експлуатаційної точки зору створюються складності огляду коліс.

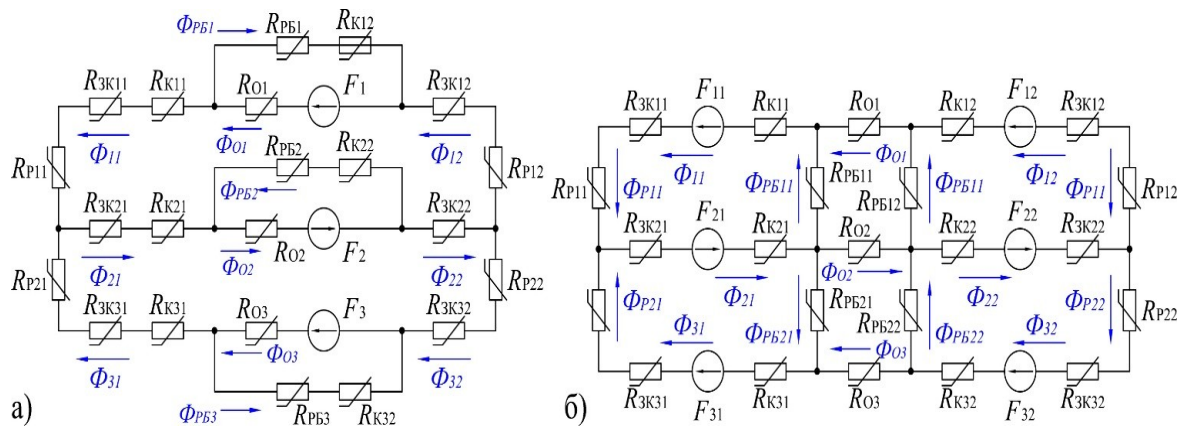


Рисунок 5.9 – а) - схеми заміщення магнітного ланцюга тривісного візка тепловоза при розташуванні котушок на осях колісних пар; б) - схеми заміщення магнітного ланцюга тривісного візка тепловоза при обрізувальному розташуванні котушок навколо коліс: F1 , F2 , F3 – джерела МРС на осях колісних пар; F11, F12 , F13 , F21, F22, F23 – джерело МРС навколо коліс; Φ – магнітний потік; R – магнітний опір; ЗК – зона контакту колеса з рейкою; К – колесо; О – вісь колісної пари; Р – рейка; РБ – рама візка та буксовий вузол

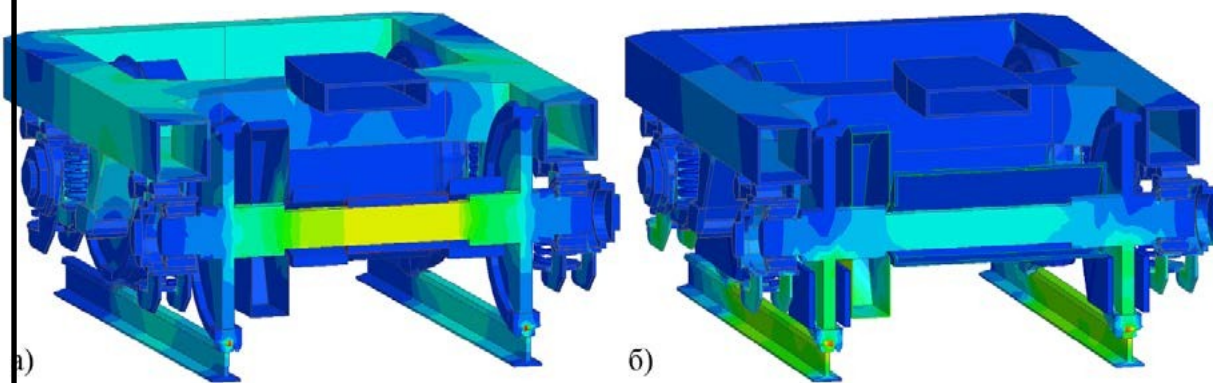


Рисунок 5.10 – а) - концентрація магнітного поля при розташуванні котушок на осях колісних пар; б) - концентрація магнітного поля при обрізувальному розташуванні котушок навколо коліс (виконаний розріз по осі другої колісної пари)

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ООЗТ 206305 000 01MP ПЗ	

Котушки кріпляться до корпусу букси, корпусу тягового двигуна (кожуха редуктора) на висоті 100 м над рівнем головки рейки. Товщина намотування становить від 20 до 25 мм і обмежується зазорами між колесом, корпусом тягового двигуна (кожухом редуктора). Таке розташування котушки дозволяє віднести індуктор до підресорених частин візка і вписати його в габарит рухомого складу, що проходить по механізованих сортувальних гірках при неробочому положенні сповільнювачів. Для насичення зон контакту потрібна МРС одного індуктора становить 6000 А-витків, а його потужність – 97 кВт.

Під час розгону локомотива здійснюється короткочасне намагнічування зон контакту найбільш схильних до буксування колісних пар, намагнічування-ня може здійснюватися при будь-якому розташуванні катушок. Експлуатація залізничного рухомого складу показує, що в першу чергу зрив зчеплення відбувається у першій по ходу колісної пари, після чого послідовно зриваються в розносне буксування інші колісні пари.

Розташування обмотки на осі енергетично більш вигідне. По-перше, катушка на осі більш компактна, Діаметр осі значно менше розмірів колеса. Середня довжина одного витка навколо осі становить 0,6 м, а у колеса – 2 м, при рівному числі витків зменшується довжина намотування і потужність катушки. По-друге, при розташуванні катушок на осях колісних пар, їх потрібне число скорочується в два рази в порівнянні з охоплюваним розташуванням навколо коліс.

Основна причина зниження ефективності магніторельсових систем полягає у відриві від рейки магнітного блоку. Відрив супроводжується збільшенням магнітного опору і ослабленням потоку, зазначений недолік відсутній в розглянутих МУКС, рисунок 5.9. Оскільки колеса щільно прижаті до рейок, то існують постійно замкнуті феромагнітні контури: перша колісна пара – ліва рейка – друга колісна пара – права рейка; третя колісна пара – ліва рейка – друга колісна пара – права рейка. Таким чином, зони контакту другої колісної пари можуть намагнічуватися від трьох джерел, а першої і третьої – від двох.

Підвищення значних властивостей тривісного візка локомотива може вестися трьома або двома індукторами. Намагнічування зон контакту візка трьома

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арк.
------	------	----------	--------	------	------

індукторами сумарною потужністю 93 кВт дозволяє збільшити зчеплення середньої колісної пари до 22 %, а крайніх колісних пар візка до 7%. Відключення одного індуктора і намагнічування двох суміжних колісних пар візка двома індукторами сумарної МРС 14800 а-витків, дозволяє скоротити протяжність магнітного ланцюга, а вивільняється потужність задіяти для більшого намагнічування зон контакту крайньої колісної пари. У зазначеному режимі вдається підвищити зчеплення двох суміжних колісних пар візка на 11 %. Для приросту зчеплення до 22 %, на крайніх колісних парах візка слід вдатися до охоплювання розташування котушок відносно коліс.

Розглянуті пристрої можуть використовуватися і на рухомому складі з двовісними візками, при цьому Магнітний ланцюг спроститься, а намагнічування буде проводитися аналогічно тривісного візку за схемою використання двох індукторів.

5.3 Режими роботи індукторів на шестивісному маневровому тепловозі

Вище було показано, що енергетично вигідне осьове розташування індуктора - це особливо актуально для автономних локомотивів, коли немає можливості поглинати додаткову потужність ззовні. При рушанні і розгоні локомотива через обмеження по зчепленню виникає недовикористання його тягової потужності $\Delta P P$. Якщо частину цієї потужності направляти на намагнічування найбільш схильних до буксування колісних пар, то приріст зчеплення дозволить локомотиву розвивати велику силу тяги і підвищити енергоефективність роботи тягового приводу [13].

Для тепловоза ЧМЕЗ розраховані режими роботи МУКС з осьовим розташуванням індукторів. Енергетичні витрати на два візки складають від 186 до 500 кВт. На рисунку 5.11 побудовано графіки зміни невикористаної тягової потужності ΔP (v, ψ) при реалізації локомотивом найбільшої сили тяги за умовами зчеплення. Слід зазначити, що недовикористана тягова потужність – величина змінна, зменшується з ростом швидкості v і коефіцієнта зчеплення ψ .

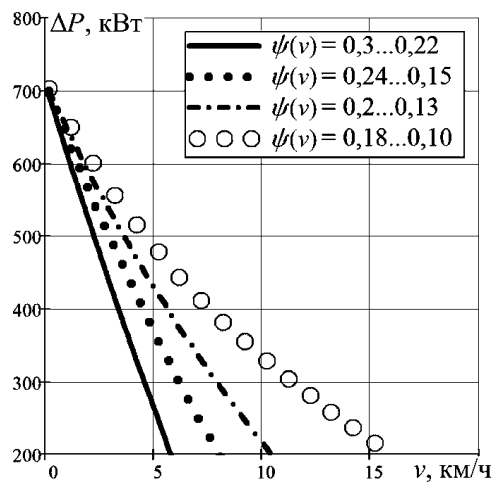


Рисунок 5.11 – Недовикористана тягова потужність тепловоза ЧМЕЗ при реалізації найбільшої сили тяги за умовами зчеплення (всі індуктори відключені, значення коефіцієнта зчеплення при русанні: 0,18; 0,2; 0,24; 0,3)

Прийнято три режими роботи МУКС: перший режим - працюють всі шість індукторів; другий режим - працюють по два індуктора на кожному візку; третій режим - працюють по два індуктора на кожному візку з короткочасним протіканням значних струмів. Недовикористана тягова потужність тепловоза витрачається на роботу індукторів з намагнічування найбільш схильних до буксування колісних пар і реалізацію приросту сили тяги ΔF , $\Delta P(v, \psi) = N_M + F \cdot v$.

При русанні з місця резерв потужності приймає найбільше значення $\Delta P_{MAX} = 700$ кВт, що дозволяє задіяти третій режим короткочасного намагнічування з протіканням по обмотках індукторів струмів, що перевищують номінальний в 2-2,5 рази. Сумарна потужність двох індукторів одного візка становить 250 кВт, а їх МРС – 24000 А-витків. Це дозволяє при

пар візка на 14 %, при цьому не потрібно збільшувати число витків котушки. Значення для другої візки аналогічні. Приріст сили тяги тепловоза залежить від величини вихідного коефіцієнта зчеплення без намагнічування, рисунок 5.12.

Розрахунки показують, що при рушанні з місця з включеними індукторами приріст тягових сил чотирьох найбільш схильних до буксування осей тепловоза ЧМЕЗ становить від 30 до 50 кН, тобто на одну вісь в середньому припадає від 7,5

до 12,5 кН. Результати випробування показують, що при рушанні з місця в умовах зниженого зчеплення намагнічування зон контакту коліс тепловоза ЧМЕЗ з рейками сприяє збільшенню найбільшої сили тяги шостої колісної пари на величину від 8,2 до 10,1 кН. Розбіжність розрахункових і дослідних результатів знаходиться в межах від 9 до 19 %. З області приросту тягових сил тепловоза ЧМЕЗ (рисунок 5.12) видно, що в міру розгону приріст сили тяги ΔF знижується до 18-22 кН. Для випадку підвищення коефіцієнта зчеплення з 0,29 до 0,34 після розгону до 2 км/год недовикористована тягова потужність розраховується виразом наступного виду: $\Delta P P = (250 + 250) \text{ кВт} + 48 \text{ кН} \cdot 2 \text{ км/ч} = 530 \text{ кВт}$. Ця величина є граничною за умовами обмеження потужності. З'являється необхідність перейти на менш енергоємний 2-й режим роботи індукторів, з коефіцієнтом зчеплення $\psi\psi = 0,33$.

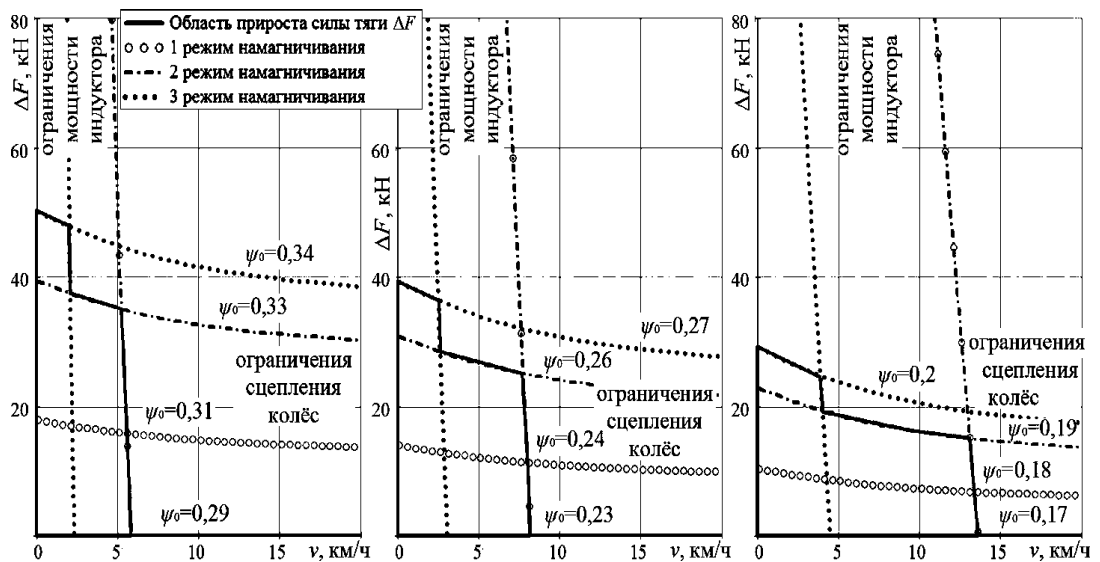


Рисунок 5.12 – Формування області приросту тягових сил тепловоза ЧМЕЗ за умовами обмеження зчеплення і потужності індуктора (значення коефіцієнта зчеплення при рушанні з вимкненими індукторами:

					0,29; 0,23; 0,17)	Арк.
					0032 206305 000 01MP ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Плавне регулювання струму індуктора здійснює система оперативного регулювання зчеплення колеса з рейкою. Вимикання індукторів відбувається після розгону локомотива до швидкості, що не допускає виникнення буксування. Обмеження по потужності і величина коефіцієнта зчеплення при вимкнених індикаторах впливають на розміри області приросту сили тяги. В умовах зниженого зчеплення інтервал швидкостей роботи МАКС розширюється і виходить за межі розрахункової швидкості локомотива ЧМЕЗ. Даний факт підтверджує експлуатаційну ефективність використання МУКС особливо на ділянках, де коефіцієнт зчеплення систематично знижений (криві малого радіуса, шляхи для наливних вантажів). Оскільки пляма контакту між колесом і рейкою є основним джерелом енергетичних втрат в механічній частині приводу, то поліпшення зчіпних властивостей локомотива сприяє підвищенню енергетичної ефективності тягового комплексу.

Висновки до розділу. Оснащення локомотивів МУКС доцільно виконувати з використанням осьового або оперізуючого (хордового) способу розташування обмотки індуктора. Осьове розташування індуктора енергетично більш вигідне.

При осьовому розташуванні котушок підвищення зчіпних властивостей тривісного візка локомотива може вестися трьома або двома індукторами. Для візків локомотива ЧМЕЗ намагнічування зон контакту найбільш схильних до буксування колісних пар доцільно виконувати двома індукторами. Зчеплення двох суміжних колісних пар візка збільшується на 14 %, приріст сили тяги шестивісного маневрового локомотива при рушанні з місця становить від 30 до 50 кН, у міру розгону знижується до 18-22 кН.

Результати досліджень показують, що МУКС здатні до поліпшення тягових якостей локомотивів на величину від 9 до 11 %. Повна реалізація всіх можливостей МУКС можлива при вирішенні ряду завдань, які в перспективі вплинуть на конструкцію тягових приводів. Для усунення шунтуючої дії від елементів візка і підвищення ефективності пристрою потрібно забезпечити магнітну ізоляцію колісних пар від візка.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	

ВИСНОВОК

Відповідно до завдань дипломного дослідження отримані наступні висновки та результати.

1. Виготовлені трибومترічні установки та інвентарний пристрій дозволяють проводити експерименти по встановленню впливу магнітного поля на коефіцієнт тертя. Пропускання магнітного потоку через зону контакту сталевих пар тертя викликає збільшення коефіцієнта тертя головним чином за рахунок молекулярної складової. Тертя ковзання в режимі початкового насичення зони контакту підвищується на 13 %, при повному насиченні – на 22 %. Молекулярна складова коефіцієнта тертя в режимі початкового насичення зони контакту кулі з площиною підвищується від 15 до 19 %, при повному насиченні – від 20 до 25 %.

2. Істотний вплив на розподіл магнітного поля між колесом і рейкою надає величина повітряного зазору. При наявності зазору між гребенем колеса і рейкою 98% магнітного потоку проходить через поверхню катання. При двоточковому гребневому контакті від 30 до 40% магнітного потоку переорієнтується на поверхні гребеня і викружку, за рахунок чого знижується ефективність намагнічування зони контакту. Рекомендується величину магнітної напруги, прикладеної до зони контакту колеса з рейкою, підтримувати в межах від 123 до 257 А, це дозволить ефективно намагнітити приконтатну область і забезпечити коефіцієнт магнітного перекриття більше одиниці для 65% випадків контактування.

3. Площа і ширину контакту колеса з рейкою можна визначити аналітично, більш точні розміри нееліптичного контакту визначаються в результаті моделювання. Надалі інформація про величину і форму контактної плями коліс залізничного рухомого складу з рейками передається в систему регулювання, де визначається ефективність намагнічування, і задаються струми індукторів.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032 206305 000 01MP ПЗ				

4. Рекомендується оснащення локомотивів МУКС виконувати з використанням осьового способу розташування обмотки. Для візків тепловоза ЧМЕЗ намагнічування зон контакту найбільш схильних до буксування колісних пар доцільно виконувати двома індукторами. Енергетичні витрати на намагнічування становлять від 186 до 500 кВт, приріст сили тяги локомотива досягає від 17 до 50 кН.

5. Результати досліджень показують, що МУКС покращують тягові якості тепловозів на величину від 9 до 11 %. Перспектива повної реалізації всіх можливостей МКС можлива при вирішенні ряду завдань, пов'язаних з конструкцією тягових приводів.

					0032 206305 000 01MP ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВНЕШНЕЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБЪЕДИНЕНИЯ

1. Иньков, Ю.М. Выбор параметров двухсистемного грузового электровоза [Текст] / Ю.М. Иньков, В.В. Литовченко, Д.В. Назаров, В.П. Феоктистов // Мир транспорта. – 2014. – №6. – С. 34-46. – ISSN 1992-3252.
2. Исаев, И.П. Случайные факторы и коэффициенты сцепления [Текст] / И.П. Исаев – М. : Транспорт, 1970. – 184 с.
3. Лужнов, Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами: реальность и возможности [Текст] / Ю.М. Лужнов. – М. : Интекст, 2009. – 176 с.
4. Исаев, И.П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами [Текст] / И.П. Исаев; Ю.М. Лужнов – М. : Машиностроение, 1985. – 238 с.
5. Лужнов, Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности [Текст] / Ю.М. Лужнов. – М. : Интекст, 2003. – 144 с.
6. Лужнов, Ю.М. Модель фрикционного контакта колеса с рельсом и возможности управления его свойствами [Текст] / Ю.М. Лужнов, В.А. Попов, Г.М. Седов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – №1. – С. 30-32.
7. Способ повышения сцепления колес транспортного средства с рельсами [Текст] : пат. 2395418 Рос. Федерация : МПК В61С15/08 / Лужнов Ю.М. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО «Науч.-исслед. ин-т ж.д. транспорта». – № 2008132737/11 ; заявл. 08.08.2008 ; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21. - 8 с: ил.
8. Самме, Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами [Текст] : монография / Г.В. Самме. – М. : Маршрут, 2005. – 80 с. – ISBN 5-89035-221-0.
9. Kalker, J.J. Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers. – 1990.
10. Kalker, J.J. Wheel-rail wear calculations with the program CONTACT / J.J. Kalker // in G.M.L. Gladwell, H. Ghonen and J. Kalonsek (eds.), Proc. Int. Symp. on Contact Mechanics and Wear of Rail-Wheel Systems II, Kingston, RI, July 1986 – Waterloo Ontario : University of Waterloo Press, 1987 – pp 3-26

						Арк.
11	Лужнов, Ю.М.	Ю.М.	Влияние	Магнитного поля на механизм	0033-2063/05-000 01 МР-ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаимодействия колес и рельсов [Текст] / Ю.М. Лужнов, А.П. Прунцев // Тр. МИИТ. – Вып. 480. – 1975. Керопян, А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо - рельс карьерных локомотивов в режиме тяги : дис д-ра техн. наук : 05.05.06 / Керопян Амбарцум Мкртичевич. – Екатеринбург, 2015. – 233 с.

12. Антипин, Д.Я. Тяговые приводы локомотивов: поиск и выбор инновационных решений [Текст]+[Информационный ресурс]: учеб. пособие для студентов ву-зов ж.д. трансп. / Д.Я. Антипин, Д.А. Бондаренко, В.И. Воробьёв, О.В. Измеров, В.О. Корчагин, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачёв, С.Г. Шорохов. – Брянск : БГТУ, 2016. – 340 с. – ISBN 978-5-89838-881-2.

13. Крагельский, И.В. Молекулярно-механическая теория трения [Текст] / И.В. Крагельский // Трение и износ в машинах: труды второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах : АН СССР, 1949. – Т.Ш.

14. Крагельский, И.В. Развитие науки о трении [Текст] / И.В. Крагельский, В.С Щедров. – М. : изд-во АН СССР, 1956. – 237 с.

15. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480с.

16. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст] : Учебник / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : «Издательство МСХА», 2001. – 616 с., ил 208. – ISBN 5-94327-004-3.

17. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

18. Фридман, Я.Б. Деформация и разрушение [Текст] / Я.Б. Фридман. – изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с. с ил. (Механические свойства металлов : в двух частях. / Я.Б. Фридман ; часть первая).

19. Дерягин, Б.В. Что такое трение? [Текст] / Б.В. Дерягин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 232 с.

20.	Лужнов, Ю.М. Влияние постоянного магнитного поля на трение				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

0032 206305 000 01МР ПЗ

твёрдых тел [Текст] / Ю.М. Лужнов, А.П. Прунцев // Тр. МИИТ. – Вып. 467. – 1974. – 245 с.

21. Лужнов, Ю.М. Основы триботехники [Текст] : учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. – М. : МАДИ, 2013. –

136 с. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия [Текст] / И.Г. Горячева. – М. : Наука, 2001. – 478 с. – ISBN 5-02-002567-4.

22. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения [Текст] / А.С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – с. 427.

23. Постников, С.Н. Некоторые физические аспекты магнитной обработки инструмента [Текст] / С.Н. Постников, А.Ф. Годлина, В.Н. Тараканов // Вопросы электрофизики трения и обработки резанием: Труды Горьковского политехнического института им. А.А.Жданова. – Горький : ГПИ, 1974. – Вып. 4. – С. 27-35.

24. Постников, С.Н. Электрические явления при трении и резании [Текст] / С.Н. Постников. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1975. – 280 с.

25. Якунин, Г.И. Влияние намагниченности резца и заготовки на стойкость [Текст] / Г.И. Якунин, Э.А. Умаров [и др.] // Ташкентский политехнический институт. Сер. Машиностроение, 40 : изд-во «ФАН», 1966. – С. 18-24.

26. Якунин, Г.И. Исследование новых эффектов, связанных с термоэлектрическими явлениями и влияющими на стойкость быстрорежущих резцов. Электрические явления при трении и резании металлов. [Текст] / Г.И. Якунин, Н.Г. Молчанова. – М. : Изд-во Наука, 1969. – С. 49-55.

27. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел [Текст] / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор ; пер. с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина, под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М. : Машиностроение, 1968.

					<i>0032 206305 000 01MP ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		