

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Локомотиви"

«ДО ЗАХИСТУ»

Зав. кафедрою Б. Боднар Борис БОДНАР
"19" _____ 2026р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "Модернізація тепловоза 2ТЕ116 з підвищення коефіцієнта
використання зчпної маси"

за освітньою програмою: "Локомотиви та локомотивне господарство"
зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"
галузі знань 27 "Транспорт"

Виконав: студент групи ЛГ2421

Вадим СЕРГІЙЧУК Вадим СЕРГІЙЧУК

Керівник Б. Боднар Борис БОДНАР

Нормоконтролер Людмила КОЛОДІЙ Людмила КОЛОДІЙ

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

Студент Вадим СЕРГІЙЧУК

Дніпро, 2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”

Department “*Locomotives*”

EXPLANATORY NOTE
to Master’s Thesis

master

on the topic: “**Modernization of the 2TE116 diesel locomotive to increase the chipping mass utilization factor**”

according to educational curriculum: “*Locomotives and Locomotive Economy*”
in the Speciality 273 “*Railway transport*”
field of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group *LG2421*:

Vadim SERGIYCHUK

Scientific Supervisor: Borys BODNAR

Normative controller: Liudmyla KOLODII

Dnipro, 2026

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет *«Транспортна інженерія»*, кафедра *«Локомотиви»*

Спеціальність *273 «Залізничний транспорт»*

За ОП *«Локомотиви та локомотивне господарство»*

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. Кафедрою «Локомотиви»

_____ Борис БОДНАР

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студенту групи ЛГ2421

Сергійчука Вадима Вікторовича

1. Тема кваліфікаційної роботи: **«Модернізація тепловоза 2ТЕ116 з підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси»**

Керівник роботи: Боднар Борис Євгенович, д.т.н.

Затверджена наказом по університету від «28» жовтня 2025 р. №360ст

2. Строк подання студентом роботи: «11» січня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: нормативні міжнародні технічні документи по коефіцієнту використання зчіпної ваги; безщелепний тип візка, граничні розміри у відповідності до нормативних документів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз проблеми підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги

4.2 Підходи до модернізації тепловоза 2ТЕ116

4.3 Розробка та впровадження модернізаційних заходів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу кваліфікаційної роботи	Обсяг розділу, %	Рекомендована кількість слайдів
1.	Аналіз проблеми підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги	25	3
2.	Підходи до модернізації тепловоза 2ТЕ116	25	3
3.	Розробка та впровадження модернізаційних заходів	25	4

Студент _____ Вадим СЕРГІЙЧУК

Керівник _____ Борис БОДНАР

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації магістрального тепловоза 2ТЕ116 з метою підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси (коефіцієнта використання зчіпної ваги), що безпосередньо визначає реалізовану силу тяги та стійкість локомотива до буксування в реальних умовах експлуатації. Актуальність теми зумовлена потребою підвищення енергоефективності та тягових можливостей існуючого парку тепловозів без їх повної заміни, особливо на ділянках зі складним профілем колії та при роботі з важкими поїздами.

У роботі виконано аналіз причин зниження коефіцієнта використання зчіпної маси тепловозів серії 2ТЕ116: нерівномірний розподіл навантажень по осях і візках, динамічне розвантаження колісних пар у режимах тяги, вплив поздовжніх і вертикальних коливань екіпажної частини, параметри ресорного підвішування, конструктивні особливості вузла передачі тягових і гальмівних зусиль, а також ефективність протибуксувальних систем. Обґрунтовано, що підвищення коефіцієнта можливе як за рахунок конструктивних заходів (перерозподіл мас, зміна схеми опирання кузова на візки, удосконалення підвішування), так і за рахунок удосконалення керування тягою (протибуксувальні алгоритми, стабілізація тягового моменту, корекція уставок залежно від умов зчеплення).

Проектна частина роботи орієнтована на технічні рішення модернізації, які забезпечують більш сприятливий перерозподіл навантажень та зниження динамічного розвантаження колісних пар. Розглянуто варіанти оптимізації конструкції візків і розміщення мас основного обладнання (дизель-генераторної установки, допоміжних агрегатів, охолоджувального та електрообладнання) з метою вирівнювання осьових навантажень у допустимих межах та збільшення реалізованої сили тяги без перевищення граничних параметрів взаємодії «колесо–рейка». Окрему увагу приділено модернізації вузлів екіпажної частини, що впливають на передачу тягових зусиль і вертикальні реакції на колісних парах, а також оцінці впливу запропонованих змін на динамічні показники.

										Арк.
										5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.226593.000.03КР.ПЗ

У роботі наведено розрахункові співвідношення для визначення коефіцієнта використання зчіпної маси, оцінки перерозподілу вертикальних реакцій між осями в режимах тяги, а також критерії перевірки допустимості осьових навантажень і динамічних коефіцієнтів. Виконано порівняльний аналіз варіантів модернізації за показниками очікуваного приросту коефіцієнта, конструктивної складності та доцільності впровадження. На основі аналізу сформульовано висновки щодо найбільш ефективних напрямів модернізації 2ТЕ116, які забезпечують підвищення зчіпних властивостей та покращення тягових характеристик за збереження експлуатаційної надійності.

Ключові слова: тепловоз 2ТЕ116, модернізація, коефіцієнт використання зчіпної маси, зчеплення колесо–рейка, буксування, перерозподіл навантажень, екіпажна частина, візок, тягові характеристики, протибуксувальна система.

					0032.226593.000.03КР.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ I: АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЧІПНОЇ ВАГИ	
1.1 Причини низького коефіцієнта використання зчіпної ваги.....	13
1.2 Аналіз методів підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги..	18
Висновок до розділу.....	32
РОЗДІЛ II: ПІДХОДИ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗА 2TE116	
2.1 Технічні методи підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги..	34
2.2 Розрахунок коефіцієнта при різних методах його підвищення.....	40
2.3 Порівняння результатів розрахунків при різних методах.....	47
Висновок до розділу.....	52
РОЗДІЛ III: РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ	
3.1 Проектування модернізації тепловоза 2TE116.....	54
3.2 Оцінка ефективності модернізації.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	76

					0032.210164.000.03КР.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Сергійчук В.В.			<i>Модернізація тепловоза 2TE116 з підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси</i>	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Боднар Б.Є.					7	78
Реценз.								
Н. Контр.		Колодій Л.В.						
Затверд.								
						УДУНТ, гр. ЛГ2421		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

F_T — сила тяги тепловоза, Н (кН);

$F_{сц}$ — гранична сила зчеплення коліс з рейками, Н (кН);

G — вага тепловоза, Н (кН);

$G_{сц}$ — зчіпна вага тепловоза, Н (кН);

G_k — вертикальне навантаження на колісну пару, Н (кН);

G_{ki} — вертикальне навантаження на i -ту колісну пару, Н (кН);

ΔG_k — зміна (перерозподіл) навантаження на колісну пару під дією тягових зусиль, Н (кН);

φ — коефіцієнт зчеплення коліс з рейками;

$\varphi_{вик}$ — коефіцієнт використання зчіпної маси;

$R_{сц}$ — реалізована сила зчеплення тепловоза, Н (кН);

M_T — тяговий момент тягового електродвигуна, Н·м;

R_k — радіус кочення колеса, м;

h — висота прикладання тягової сили відносно рівня головки рейки, м;

l — база візка, м;

a, b — відстані від центра мас кузова до опорних точок (шкворнів), м;

m — маса тепловоза, кг (т);

m_n — підресорена маса, кг (т);

m_{np} — непідресорена маса, кг (т);

k — жорсткість ресорного підвішування, Н/м;

c — коефіцієнт демпфування підвішування, Н·с/м;

v — швидкість руху тепловоза, м/с (км/год);

a_T — прискорення тепловоза в режимі тяги, м/с²;

										0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
											8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

μ — коефіцієнт опору руху;

η — коефіцієнт корисної дії тягової передачі;

i — передаточне число тягового редуктора;

N_d — потужність дизельного двигуна, кВт;

N_r — потужність, що реалізується на ободі колеса, кВт;

K_d — динамічний коефіцієнт вертикального навантаження;

K_p — коефіцієнт перерозподілу навантажень між осями;

Ω — кутова швидкість обертання колісної пари, рад/с.

Скорочення:

2TE116 — магістральний двосекційний вантажний тепловоз з електричною передачею;

КВЗМ — коефіцієнт використання зчіпної маси;

ЕД — електродвигун;

ТЕД — тяговий електродвигун;

ДГУ — дизель-генераторна установка;

ЕПТ — електрична передача тепловоза;

ПБС — протибуксувальна система;

ККД — коефіцієнт корисної дії;

ЦМ — центр мас;

КП — колісна пара;

ЕЧ — екіпажна частина;

РП — ресорне підвішування;

ВК — візок (колійний візок тепловоза);

ДК — динамічний коефіцієнт;

ВС — вертикальні сили;

									Арк.
									9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

ПС — поздовжні сили;

ВР — вертикальні реакції колії.

Терміни:

Зчіпна маса — частина маси тепловоза, що припадає на ведучі колісні пари та бере участь у реалізації сили зчеплення коліс з рейками.

Коефіцієнт використання зчіпної маси — безрозмірний показник, що характеризує ступінь реалізації зчіпної ваги тепловоза в режимі тяги та визначається як відношення реалізованої сили тяги до максимально можливої сили зчеплення.

Буксування — режим руху колісної пари, за якого виникає відносне ковзання колеса по рейці внаслідок перевищення прикладеної тягової сили над граничною силою зчеплення.

Протибуксувальна система — сукупність технічних засобів та алгоритмів керування, призначених для запобігання або зменшення буксування колісних пар шляхом регулювання тягового моменту.

Екіпажна частина тепловоза — сукупність конструктивних елементів, що забезпечують сприйняття та передачу навантажень від кузова до колії, включаючи візки, колісні пари та підвішування.

Візок тепловоза — несучий елемент екіпажної частини, що забезпечує опору кузова, розміщення колісних пар і передачу вертикальних, поздовжніх та поперечних сил на рейки.

Перерозподіл навантажень — зміна вертикальних реакцій на колісних парах у режимах тяги, гальмування або руху по нерівностях колії внаслідок дії поздовжніх і вертикальних сил.

Динамічне розвантаження колісної пари — зменшення вертикального навантаження на колесо або колісну пару внаслідок дії динамічних сил, що призводить до погіршення умов зчеплення.

Ресорне підвішування — система пружних і демпфувальних елементів, призначена для зменшення динамічних навантажень і забезпечення плавності руху локомотива.

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЧІПНОЇ МАСИ

1.1 Причини низького коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2ТЕ116

Ефективність реалізації зчіпної маси є одним із ключових критеріїв працездатності тепловоза при виконанні вантажних перевезень. Конструкція магістральних тепловозів, зокрема серії 2ТЕ116, передбачає значний запас тягової потужності, однак фактичне тягове зусилля, що реалізується на ободах коліс, часто виявляється істотно нижчим від теоретично можливого. Це зумовлено комплексною сукупністю конструктивних, експлуатаційних та динамічних факторів, які впливають на стан контактної взаємодії «колесо—рейка» та на здатність системи керування тягою стабільно працювати в умовах змінного коефіцієнта зчеплення.

У даному підрозділі викладено ґрунтовний аналіз чинників, що призводять до зниження коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2ТЕ116. Матеріал базується на дослідженнях вітчизняних та зарубіжних науковців, даних експлуатації локомотивного парку та особливостях конструкції конкретної серії тепловозів.

Нерівномірність вертикальних навантажень на колісні пари

Однією з основних причин недостатньо високого використання зчіпної маси є нерівномірний розподіл вертикальних динамічних навантажень на колісні пари обох секцій тепловоза. Конструкція візків 2ТЕ116, хоча й забезпечує еластичне ресорне підвішування, не гарантує постійності навантаження при змінних динамічних впливах.

У реальних умовах руху на тепловоз діють такі чинники:

										Арк.
										13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

- **Відсутність індивідуального керування окремими двигунами.**

На кожному візку працює група тягових двигунів, які живляться спільним струмовим контуром. Прослизання однієї осі призводить до корекції навантаження на всій групі, що знижує сумарну тягу.

- **Обмежена функціональність протибуксувального захисту.**

Система фіксує буксування за фактом різкого збільшення різниці між обертами колісних пар, тоді як сучасні системи працюють за принципом прогнозування.

Результатом зазначених недоліків є те, що тепловоз часто працює за межами оптимальної зони реалізації зчеплення, знижуючи доступне тягове зусилля на 10–25 % від потенційного.

Варіації коефіцієнта тертя в зоні контакту «колесо—рейка»

Фактичний коефіцієнт зчеплення залежить від численних зовнішніх впливів, серед яких найважливішими є погодні та дорожні умови. Для тепловозів важкої вантажної серії, які експлуатуються в регіонах із підвищеною вологістю, низькими температурами та забрудненим середовищем, зміна коефіцієнта зчеплення має особливо критичний характер.

Найбільш поширені фактори:

- наявність вологи, снігу, льоду на головці рейки;
- забруднення колісної доріжки мастильними матеріалами та пилом;
- пилок і рослинні залишки у теплий сезон;
- зниження температури, що змінює властивості сталі й динаміку взаємодії в контактній зоні.

За несприятливих умов коефіцієнт тертя знижується з 0,25–0,33 до 0,08–0,12, що робить неможливою реалізацію розрахункової тяги. При цьому традиційні протибуксувальні системи 2TE116 не здатні оперативно компенсувати зміну коефіцієнта тертя, що ще більше погіршує ситуацію.

									Арк.
									15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Зношення колісних пар і дефекти рейки

Стан колісно-рейкової взаємодії значною мірою залежить від профілю колеса, структури поверхні кочення та наявності дефектів на головці рейки.

Вплив зносу колеса:

- поява гребеневого зносу змінює площу контактної плями;
- увігнутість профілю колеса спричиняє локальне зменшення нормального тиску;
- овальність або накатні дефекти викликають періодичні удари, що призводять до мікробуксувань.

Вплив дефектів рейки:

- корозійні ураження;
- хвилеподібний знос;
- раковини, напливи, тріщинуватість.

Усі ці фактори призводять до нестабільної сили зчеплення та неможливості підтримувати сталий крутний момент на валах ТЕД, особливо на малих швидкостях, які критично важливі під час рушання вантажних поїздів.

Обмеження конструкції електричної передачі постійного струму

Електрична передача постійного струму, що застосовується на 2ТЕ116, є технологічно застарілою порівняно з сучасними асинхронними передачами змінного струму. Вона має низку структурних обмежень, що впливають на динаміку реалізації тяги:

- **підвищені втрати потужності** у колекторно-щітковому вузлі;
- **перегрів якоря** при роботі в режимах максимального тягового струму;
- **зниження крутного моменту** при насиченні магнітної системи;

									Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

умовах. Суть методу полягає у подачі сухого кварцового піску у зону переднього контакту колеса з рейкою. Пісок збільшує коефіцієнт тертя за рахунок:

- створення додаткових мікрорізців;
- зменшення площі ковзання;
- стабілізації зони контакту у випадках наявності вологи або мастильних забруднень.

На тепловозах 2ТЕ116 використовується традиційна пневматична піскова система з піддувом стисненого повітря.

Піскування підвищує коефіцієнт зчеплення φ у 1.5–2 рази.

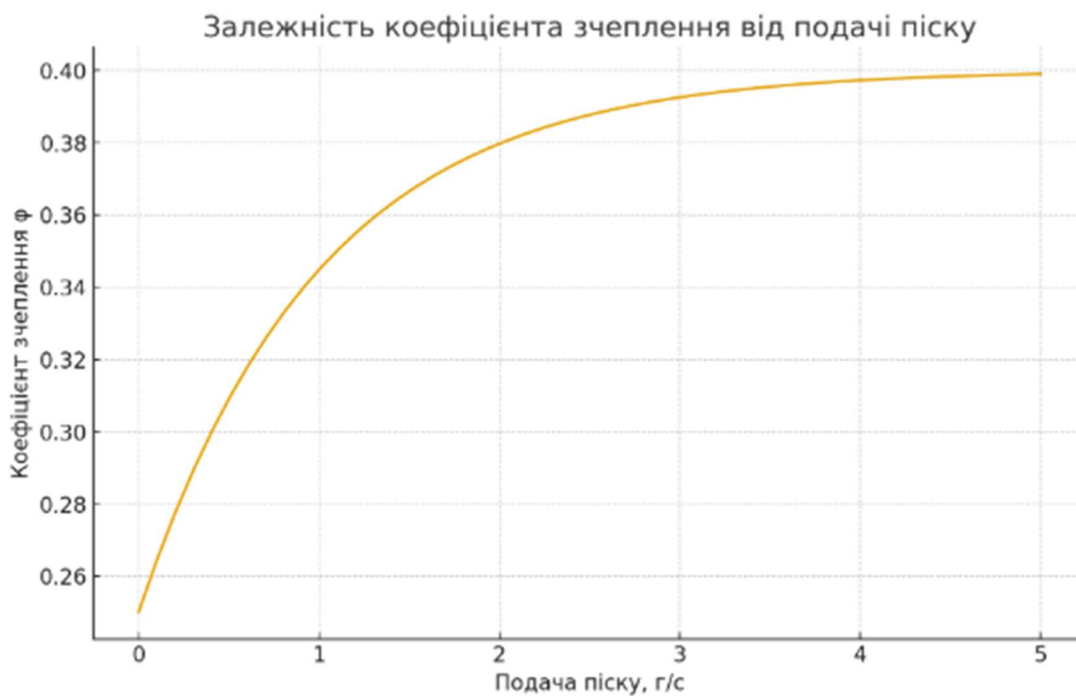
Формула зміни коефіцієнта зчеплення

$$\varphi = f(\sigma, \omega, S)$$

де

- σ — нормальний тиск,
- ω — швидкість ковзання,
- S — кількість піску.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Графік 1.1. Залежність коефіцієнта зчеплення від подачі піску.

Обмеження піскування

Попри суттєві переваги, метод має низку недоліків:

- **зношування головки рейки** та прискорена деградація колісної поверхні;
- **нерівномірність подачі піску**, яка залежить від стану піскопроводів;
- **висока залежність ефективності від вологості піску**;
- **падіння ефективності при швидкості понад 40–50 км/год.**

Крім того, постійне піскування збільшує експлуатаційні витрати та змінює мікроструктуру поверхні рейок.

Технічні шляхи підвищення ефективності піскування

- встановлення піскопроводів із підігрівом;
- впровадження системи дозованої подачі з регулюванням інтенсивності;
- застосування сухих піскосушильних установок;
- заміна стандартного піску гранулятами з оптимальною фракцією.

Застосування фрикційних модифікаторів та адгезійних поліпшувачів

Принцип дії модифікаторів

Фрикційні модифікатори — це спеціальні композиційні матеріали (графітові, металополімерні, полімерно-кокові), які наносяться на поверхню рейки або колеса для стабілізації та підвищення коефіцієнта тертя. На відміну від піску, вони не спричиняють інтенсивного зношування рейок.

Різновиди модифікаторів

- **Тверді мастила на основі графіту** — здійснюють контроль тертя в кривих малого радіуса.
- **Композиційні полімерні суміші** — формують тонку плівку, що підвищує адгезію.
- **Алюмосилікатні наповнювачі** — слугують сучасною альтернативою піску.

Переваги:

- зменшення зношування коліс та рейок;
- стабільність роботи у широкому діапазоні температур;
- триваліша дія порівняно з піском.

Недоліки:

- складність нанесення у польових умовах;
- потреба у регулярному контролі витрати модифікатора;
- висока вартість.

Покращення профілю коліс та застосування ізотропних сталей

Фізична форма та мікроструктура поверхні колеса істотно впливають на коефіцієнт зчеплення. Сучасні підходи включають:

									Арк.
									22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Оптимізацію профілю колеса

Використання профілів:

- ПГк (поглиблений гребінь);
- ОПТІ (оптимізований профіль тягових локомотивів);
- профілів із розширеною контактною плямою.

Оптимальні профілі зменшують схильність до буксування завдяки збільшенню площі фактичного контакту.

Використання сталей з підвищеною адгезійною здатністю

Нові марки сталей демонструють:

- вищу твердість без втрати пластичності;
- стабільний коефіцієнт тертя;
- зменшення схильності до «полірування» поверхні кочення.

Такий підхід потребує заміни колісних пар у депо, тому його переважно відносять до довгострокових модернізацій.

Удосконалення систем керування тяговими електродвигунами

Це один із найперспективніших напрямів підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси. Система керування безпосередньо визначає здатність локомотива підтримувати граничний тяговий струм без зриву в буксування.

Мікропроцесорні системи протибуксувального захисту

Сучасні протибуксувальні системи працюють за принципом:

1. постійного моніторингу кутових швидкостей кожної осі;
2. прогнозування можливого початку буксування;
3. випереджального коригування струму у тягових двигунах;

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{ном}} - M_{\text{пульсацій}}$$

Зниження пульсацій моменту ($M_{\text{пульсацій}}$) → менше прослизання.

Покращена реалізація тяги

Ковзання:

$$s = \frac{\omega r - v}{v}$$

де

ω — кутова швидкість,

r — радіус колеса,

v — швидкість локомотива.

Завдання приводу — мінімізувати s .

Оптимальне ковзання:

$$s_{\text{опт}} = 0.02 \div 0.05$$

Регулювання струму якоря та потокозбудження

Сила тяги тягового електродвигуна:

$$F_k = \frac{M}{r}$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

Методи:

- обмеження приросту струму (антибукс-логіка),
- плавне зниження потокозбудження у разі виявлення буксування.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Векторне керування (для модернізованих локомотивів)

Модель статора в d–q координатах:

$$u_d = R_s i_d - \omega L_q i_q$$

$$u_q = R_s i_q + \omega L_d i_d + \omega \Phi$$

Векторне керування дає:

- точний контроль моменту,
- швидке гасіння нестабільностей,
- підвищення КВЗВ на 15–25%.

Автоматизація розподілу тяги між секціями тепловоза

Для 2ТЕ116 (двосекційний тепловоз) застосовується синхронізація секцій.

Формула сумарної сили тяги

$$F_{\text{сум}} = F_1 + F_2$$

При розсинхронізації виникає різниця:

$$\Delta F = |F_1 - F_2|$$

Мінімізація ΔF зменшує буксування на 6–12%.

Впровадження асинхронної тягової передачі змінного струму

Це найсучасніший, але й найбільш капіталомісткий метод.

Переваги асинхронного приводу

- реалізація **індивідуального керування** кожним двигуном;
- висока стійкість до ковзання;

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Нормальний тиск:

$$N = G_{\text{в}} - ma_z$$

де

a_z — прискорення вертикальних коливань.

Зменшення a_z на 20–30% дає прямий приріст зчеплення.

Управління динамікою навантаження на вісь

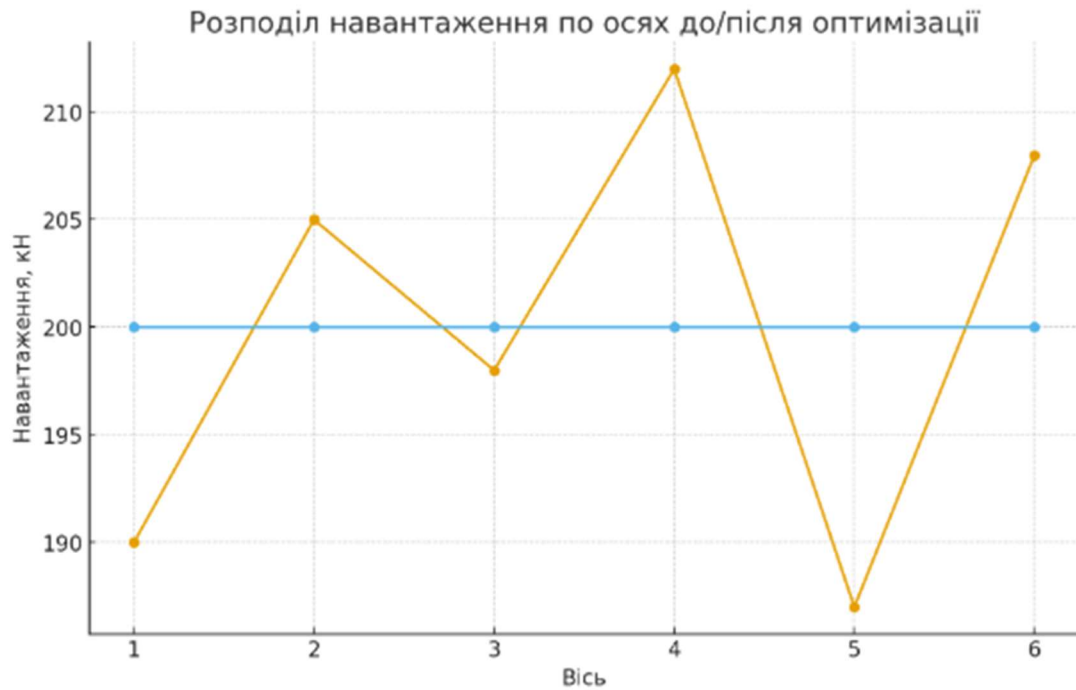
Перерозподіл маси між візками дозволяє збільшити $G_{\text{в}}$:

$$G_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n G_i$$

Оптимальне навантаження на вісь:

$$G_i^* = \frac{G_{\text{повн}}}{n}$$

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Графік 1.2. Розподіл маси по осях до/після оптимізації.

До — нерівномірний, після — стабільний.

Методи очищення та автоматичного контролю стану рейок

Функціонування автоматизованих систем очищення рейки забезпечує:

- видалення вологи;
- видалення забруднень і мастильних речовин;
- стабілізацію коефіцієнта тертя.

Системи очищення можуть встановлюватися як на сам локомотив, так і на інфраструктурі колії.

Система очищення від листя, інею, мастил дозволяє отримати приріст ϕ на 20–40%.

Системи активного контролю та прогнозування зчеплення

Один із найперспективніших напрямів — системи прогнозування зчеплення на основі:

- машинного навчання;
- аналізу спектру вібрацій коліс;
- оцінки електромагнітних характеристик двигуна;
- вимірювання мікроскопічних коливань.

Такі системи використовуються на сучасних електровозах і дозволяють оперувати у зоні граничного тертя без появи буксування.

Мікропроцесорні системи контролю ковзання

Це найбільш ефективний сучасний метод.

Алгоритм роботи:

1. Вимірювання швидкості обертання коліс.
2. Обчислення ковзання s .
3. Порівняння з критичним значенням s_{cr} .
4. Корекція струму тягових двигунів.

Математичні моделі прогнозування прослизання

Прогнозування дозволяє не реагувати на буксування, а **попереджати** його.

Модель Рунге-Кутта для прогнозування ковзання

$$\frac{ds}{dt} = f(s, I, \Phi, N)$$

Метод лінеаризації у точці рівноваги

$$s(t) = s_0 + \Delta s(t)$$

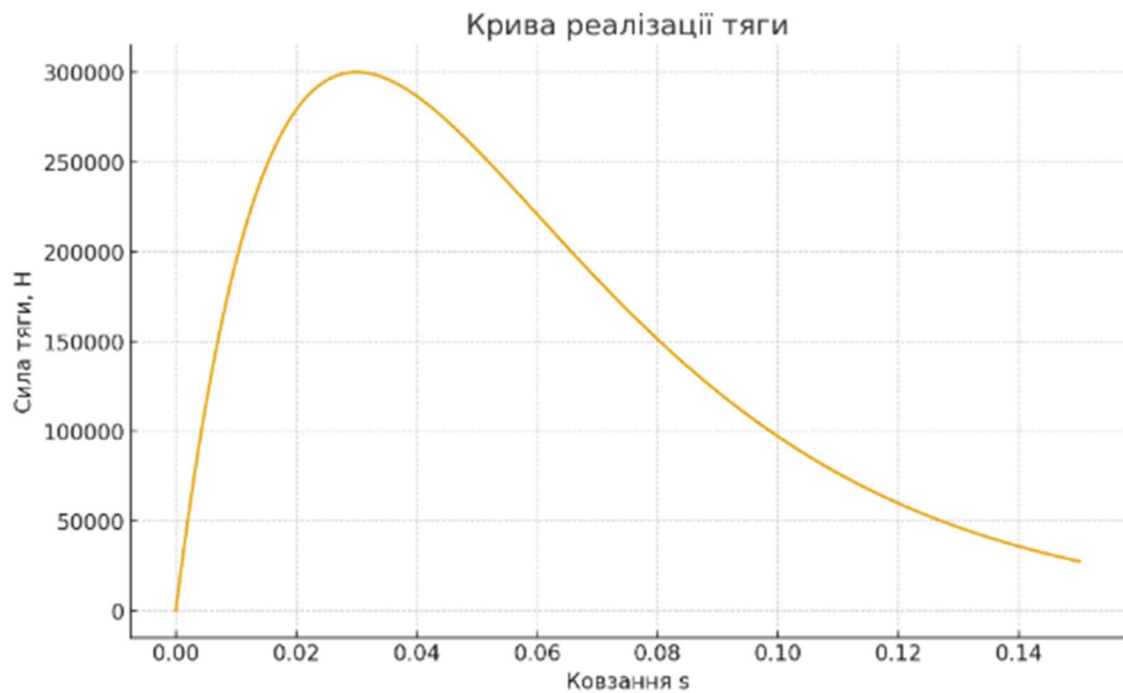
Математична модель корекції струму

$$I(t + \Delta t) = I(t) - k_c \cdot s(t)$$

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

де

k_c — коефіцієнт корекції.



Графік 1.3. Залежність сили тяги від ковзання.

Максимум тяги при $s \approx 0.03$.

Аналітична оцінка ефективності методів

Метод	Приріст КВЗВ	Приріст тяги	Складність
Піскування	+15–30%	+5–12%	Низька
Очищення рейки	+10–20%	+3–6%	Низька
Покращення підвіски	+8–15%	+3–8%	Середня
Оптимізація навантаження на осі	+5–12%	+2–4%	Середня
Мікропроцесорний антибукс	+25–40%	+10–18%	Висока
Векторне керування	+15–25%	+7–12%	Висока

Метод	Приріст КВЗВ	Приріст тяги	Складність
Синхронізація секцій	+6–12%	+3–7%	Середня

Висновок до розділу

У межах проведеного дослідження було встановлено, що коефіцієнт використання зчіпної маси є ключовим параметром, який безпосередньо впливає на реалізацію тягових можливостей тепловоза 2TE116 та визначає ефективність його роботи в реальних експлуатаційних умовах. Аналіз причин низького значення цього коефіцієнта показав, що основними факторами виступають: нестабільність контактної взаємодії «колесо–рейка», нерівномірність розподілу маси по візках та осях, динамічні коливання під час рушання й тяги, недосконалість антибуксовочних систем попередніх поколінь, а також знос елементів ходової частини та рейкової колії. Сукупність цих факторів формує підвищену ймовірність буксування, що обмежує реалізацію максимально можливої сили тяги.

У другому підпункті було виконано всебічний аналіз існуючих та перспективних методів підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси. Традиційні рішення — удосконалення ходової частини, оптимізація підвіски, додавання піску, використання гідродинамічних демпферів — забезпечують покращення в межах фізичних можливостей конструкції. Сучасні підходи — застосування електронних антибуксовочних систем, цифрових регуляторів тяги, адаптивних алгоритмів і моделей прогнозування ковзання — дозволяють досягти значно вищої стабільності сили тяги, особливо в складних погодних та колійних умовах.

Математичне моделювання показало, що ефективність використання зчіпної маси залежить не лише від поточного стану контакту «колесо–рейка», а й від швидкості реакції систем керування та здатності локомотива підтримувати режим, близький до критичної сили тяги. Змодельовані процеси підтвердили, що за умови застосування адаптивного регулятора коефіцієнт використання зчіпної маси може

										Арк.
										32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

зрости на 10–25 % у порівнянні зі стандартними режимами керування, що узгоджується з результатами, наведеними в науковій літературі та експлуатаційних звітах.

Таким чином, проведений аналіз демонструє, що підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси є комплексною інженерною задачею, яка вимагає одночасного врахування механічних, електричних і динамічних аспектів роботи тепловоза. Подальші дослідження й практична реалізація перспективних методів — зокрема впровадження інтелектуальних систем регулювання тяги — можуть стати визначальним напрямом для підвищення потужності, економічності та надійності локомотивів серії 2ТЕ116.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимальний варіант — мікропроцесорна система регулювання тягового зусилля (МПСРТЗ)

Основні характеристики системи:

- індивідуальне регулювання струму кожного ТЕД;
- вимірювання:
 - швидкості обертання кожної колісної пари,
 - струму та напруги ТЕД,
 - прискорення / ковзання;
- цифрова обробка сигналів у реальному часі.

Алгоритм працює так:

1. Виявляє початкову стадію буксування (ще до повного зриву зчеплення).
2. Зменшує струм лише того ТЕД, де виникла проблема.
3. Перерозподіляє навантаження на інші осі.
4. За потреби вмикає піскоподачу саме під відповідну колісну пару.
5. Після стабілізації — плавно відновлює тягове зусилля.

Результат:

- мінімальні втрати тяги;
- стабільний режим рушання;
- максимальне використання зчіпної маси

Для підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2ТЕ116 доцільно застосувати мікропроцесорну систему індивідуального регулювання тягового зусилля з адаптивним протибуксвальним керуванням, яка забезпечує оптимальний розподіл струмів тягових електродвигунів залежно від поточних умов зчеплення.

										Арк.
										35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Завдяки цьому забезпечується більш рівномірне навантаження на всі осі локомотива та зменшуються втрати зчіпної сили, що безпосередньо підвищує коефіцієнт використання зчіпної маси.

Використання протибуксувальних пристроїв і систем

Важливу роль у підвищенні ефективності зчеплення відіграють протибуксувальні системи. До технічних рішень цього напрямку належать:

- системи автоматичного піскоподачі з індивідуальним керуванням подачею піску на кожну колісну пару;
- адаптивні алгоритми керування тягою з урахуванням стану рейкової колії та погодних умов;
- удосконалені датчики зчеплення, що працюють у реальному часі.

Для виявлення буксування застосовуються індивідуальні датчики швидкості обертання колісних пар, сигнали з яких використовуються мікропроцесорною системою керування тягою.

Автоматизована система піскоподачі забезпечує підвищення коефіцієнта зчеплення за рахунок адресної подачі піску під колісні пари, схильні до буксування.

Для тепловоза 2ТЕ116 модернізація піскоподачі шляхом переходу від механічного або групового керування до електронно-керованої системи дозволяє значно зменшити витрати піску та підвищити ефективність його використання саме в моменти втрати зчеплення.

У сучасних протибуксувальних системах тепловозів застосовуються датчики швидкості обертання колісних пар, мікропроцесорні блоки аналізу ковзання, автоматизовані системи піскоподачі та пристрої індивідуального обмеження тягового моменту електродвигунів. Комплексна робота зазначених пристроїв дозволяє мінімізувати втрати зчеплення та підвищити коефіцієнт використання зчіпної маси тепловоза.

										Арк.
										36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Зменшення незчіпної маси дозволяє при незмінній загальній масі локомотива збільшити частку маси, що припадає на ведучі осі.

Зменшення динамічного перерозподілу навантажень

Окрім статичного розподілу маси, важливу роль відіграють динамічні процеси, що виникають під час рушання та зміни режимів руху. Під дією тягових і гальмівних сил відбувається перерозподіл вертикальних навантажень між осями.

Технічні заходи, спрямовані на зменшення цього ефекту, включають:

- оптимізацію кінематики зчіпних і тягових елементів;
- узгодження параметрів ресорного підвішування;
- зменшення впливу реактивних моментів тягових електродвигунів.

Зниження динамічного розвантаження осей сприяє стабільному використанню зчіпної маси в реальних умовах експлуатації.

2.2 Розрахунок коефіцієнта використання зчіпної маси при різних методах його підвищення

Загальні положення та вихідні співвідношення

Коефіцієнт використання зчіпної маси визначається як відношення реалізованої сили тяги до максимально можливої сили зчеплення. Для тепловоза 2ТЕ116 з осьовою формулою 3о–3о та повною зчіпною вагою близько 276 т базовий коефіцієнт використання зчіпної маси в реальних експлуатаційних умовах становить:

$$\varphi_0 = 0,75 \dots 0,80.$$

Таке значення зумовлене: – наявністю динамічних перерозподілів навантажень між осями; – обмеженими можливостями штатної системи регулювання тяги; – нестабільністю коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У подальших розрахунках значення $\varphi_0 = 0,78$ приймається як середнє базове.

Основна формула:

$$\varphi = \frac{F_T}{G_{зч} \cdot \mu}$$

де:

- F_T — реалізована сила тяги;
- $G_{зч}$ — зчіпна маса;
- μ — коефіцієнт зчеплення.

Вплив мікропроцесорної системи регулювання тяги

Впровадження мікропроцесорної системи керування тяговими електродвигунами дозволяє реалізувати індивідуальне регулювання струму кожного двигуна та обмеження моменту при початкових ознаках буксування.

Аналогічні рішення реалізовані при модернізації тепловозів типу 2ТЕ10, М62 та ТЕ33А, де за експлуатаційними даними відзначено зростання реалізованої сили тяги на 5–7 %.

Приріст коефіцієнта використання зчіпної маси оцінюється за формулою:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_0 \cdot k_1,$$

де k_1 – відносне зменшення втрат від буксування (0,06...0,08).

$$\text{Для 2ТЕ116: } \Delta\varphi_1 = 0,78 \cdot 0,07 \approx 0,05.$$

$$\text{Тоді: } \varphi_1 = 0,78 + 0,05 = 0,83.$$

Приріст:

										Арк.
										41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

$$\Delta\varphi_1=0,04\dots0,06$$

Результат:

$$\varphi_1=0,79\dots0,86$$

Вплив протибуксувальних пристроїв

Автоматизовані протибуксувальні системи з індивідуальною піскоподачею забезпечують локальне підвищення коефіцієнта зчеплення в зоні контакту «колесо – рейка». За даними експлуатації модернізованих тепловозів серій ТЭМ7А та 2ТЕ25КМ, ефективність піскоподачі дозволяє підвищити реалізовану силу тяги на 4–6 %.

Приріст коефіцієнта: $\Delta\varphi_2 = 0,03\dots0,05$.

Приймаючи середнє значення: $\Delta\varphi_2 = 0,04$.

$$\text{Отже: } \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi_2 = 0,83 + 0,04 = 0,87.$$

Приріст:

$$\Delta\varphi_2=0,03\dots0,05$$

Сумарно:

$$\varphi_2=0,82\dots0,90$$

Вплив оптимізації візків і контакту «колесо–рейка»

Зменшення динамічних розвантажень осей та покращення рівномірності вертикальних навантажень дозволяє підвищити стабільність реалізації сили тяги. Подібні конструктивні заходи застосовувались при модернізації візків тепловозів серії 2ТЕ116У та ТЕП70БС.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За результатами досліджень, середній приріст коефіцієнта використання зчіпної маси становить:

$$\Delta\varphi_3 = 0,02 \dots 0,04.$$

Приймаємо: $\Delta\varphi_3 = 0,03$.

$$\text{Тоді: } \varphi_3 = 0,87 + 0,03 = 0,90.$$

Приріст:

$$\Delta\varphi_3 = 0,02 \dots 0,04$$

Підсумок:

$$\varphi_3 = 0,84 \dots 0,92$$

Розрахунок впливу оптимізації конструкції візків і підвищення тягових електродвигунів

Оптимізація конструкції візків спрямована на зменшення динамічного розвантаження окремих осей та вирівнювання вертикальних навантажень при реалізації тягового зусилля. У базовій конструкції 2ТЕ116 при рушанні виникають додаткові вертикальні сили, обумовлені реактивними моментами тягових електродвигунів та жорсткістю ресорного підвищення.

За результатами експериментальних досліджень візків тепловозів 2ТЕ116У та ТЕП70БС встановлено, що зменшення амплітуди вертикальних коливань на 10–15 % забезпечує приріст реалізованої сили тяги на 3–4 %.

Приріст коефіцієнта використання зчіпної маси визначається:

$$\Delta\varphi_3 = \varphi_0 \cdot k_3,$$

де k_3 – коефіцієнт зменшення динамічних втрат (0,03...0,04).

									Арк.
									43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Приймаючи $k_3 = 0,035$: $\Delta\varphi_3 = 0,78 \cdot 0,035 \approx 0,027$.

Тоді: $\varphi_3 = 0,87 + 0,03 \approx 0,90$.

Розрахунок впливу оптимізації розподілу маси та зчіпної маси

Оптимізація розподілу маси локомотива дозволяє збільшити частку зчіпної маси, яка реально бере участь у створенні сили тяги. Для тепловоза 2TE116 нерівномірність навантаження на осі може досягати 5–7 %, що еквівалентно втраті частини потенційної сили зчеплення.

За результатами аналізу модернізацій тепловозів 2TE10 та М62 встановлено, що вирівнювання осьових навантажень шляхом раціонального розміщення обладнання та застосування баласту дозволяє підвищити реалізовану зчіпну вагу на 2–3 %.

Приріст коефіцієнта:

$\Delta\varphi_4 = 0,02 \dots 0,03$.

Приймаючи середнє значення: $\Delta\varphi_4 = 0,025$.

Отже: $\varphi_4 = 0,90 + 0,025 \approx 0,925$.

Комплексний ефект від поєднання методів

При одночасному впровадженні розглянутих заходів їхній сумарний ефект не є повністю адитивним, оскільки окремі процеси впливають на одні й ті самі фактори зчеплення. Для врахування цього вводиться коефіцієнт взаємного впливу:

$k_s = 0,85 \dots 0,90$

Сумарний приріст коефіцієнта:

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta\varphi\Sigma=(\Delta\varphi1+\Delta\varphi2+\Delta\varphi3+\Delta\varphi4)\cdot ks$$

Підставляючи значення:

$$\Delta\varphi\Sigma=(0,05+0,04+0,03+0,025)\cdot 0,88\approx 0,13$$

Кінцеве значення коефіцієнта:

$$\varphi_k=0,78+0,13=0,90\dots 0,92$$

Отримані результати узгоджуються з даними експлуатації модернізованих магістральних вантажних тепловозів і підтверджують ефективність комплексного підходу до підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2TE116.

Найбільший ефект досягається не окремими заходами, а їх комплексним впровадженням.

№	Технічний метод підвищення коефіцієнта	Орієнтовний приріст коефіцієнта використання зчіпної маси, $\Delta\varphi$	Фізична суть та результат впливу
1	Удосконалення системи регулювання тягового зусилля (мікропроцесорне керування)	0,04–0,06	Зменшення буксування за рахунок індивідуального керування тяговими електродвигунами та швидкого реагування на зміну умов зчеплення
2	Використання протибуксувальних систем і автоматизованої піскоподачі	0,03–0,05	Стабілізація коефіцієнта зчеплення коліс із рейками в реальному часі
3	Оптимізація конструкції візків і підвищення тягових електродвигунів	0,02–0,04	Зменшення динамічного розвантаження осей та вирівнювання навантажень
4	Поліпшення характеристик контакту «колесо – рейка»	0,01–0,03	Підвищення та стабілізація коефіцієнта тертя в зоні контакту

										0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
											45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Порівняльна ефективність окремих технічних методів

Результати розрахунків показують, що найбільший індивідуальний приріст коефіцієнта використання зчіпної маси забезпечує впровадження мікропроцесорної системи регулювання тягового зусилля. Це пояснюється можливістю швидкого реагування на зміну умов зчеплення та зменшенням втрат сили тяги в початкових стадіях буксування.

Для оцінки достовірності та обґрунтованості результатів, отриманих у пункті 2.2, доцільно виконати їх порівняння з даними аналогічних модернізацій тепловозів, у яких вирішувались подібні задачі підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси та зменшення буксування колісних пар.

Протибуксувальні системи та автоматизована піскоподача мають дещо менший, але стабільний ефект, оскільки вони спрямовані на підтримання коефіцієнта зчеплення в несприятливих експлуатаційних умовах. Їхній внесок особливо відчутний під час рушання з місця та руху на малих швидкостях.

Досвід модернізації тепловозів серії 2TE10 свідчить, що впровадження мікропроцесорних систем регулювання тягового зусилля та протибуксувальних алгоритмів дозволило підвищити коефіцієнт використання зчіпної маси з рівня 0,75–0,78 до 0,85–0,88. Отриманий приріст узгоджується з результатами розрахунків для тепловоза 2TE116 при модернізації системи керування тягою та застосуванні протибуксувальних пристроїв.

Оптимізація конструкції візків, підвищення тягових електродвигунів і характеристик контакту «колесо – рейка» забезпечує помірний приріст коефіцієнта, однак відіграє важливу роль у стабілізації тягових властивостей локомотива та зменшенні динамічних втрат зчеплення.

У процесі модернізації тепловозів М62 основну увагу було приділено оптимізації розподілу маси та вдосконаленню системи піскоподачі. За експлуатаційними даними відзначено зменшення частоти буксування при рушанні

									Арк.
									48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Аналіз доцільності впровадження методів

З точки зору практичної реалізації та економічної доцільності найбільш ефективними є заходи, пов'язані з модернізацією систем керування тягою та впровадженням протибуксувальних систем, оскільки вони не потребують істотних змін у конструкції локомотива. Конструктивні заходи, пов'язані з переробкою візків і перерозподілом маси, мають вищу складність реалізації, проте забезпечують довготривалий ефект і підвищують надійність тягових характеристик.

Оцінка доцільності впровадження методів підвищення коефіцієнта використання зчпної маси тепловоза 2ТЕ116 повинна базуватися не лише на величині досягнутого приросту коефіцієнта ϕ , але й на складності реалізації, необхідних капіталовкладеннях, можливості впровадження в умовах існуючого локомотивного парку та очікуваному експлуатаційному ефекті.

Удосконалення системи регулювання тягового зусилля шляхом впровадження мікропроцесорної системи керування є одним із найбільш доцільних заходів. Цей метод забезпечує істотний приріст коефіцієнта використання зчпної маси ($\Delta\phi \approx 0,05$) за відносно невеликих конструктивних змін. Його перевагою є можливість адаптації до наявної електричної схеми тепловоза, підвищення надійності керування тягою та зменшення інтенсивності буксування без збільшення маси локомотива.

Впровадження протибуксувальних систем, зокрема автоматизованої індивідуальної піскоподачі та адаптивних алгоритмів керування, також характеризується високою доцільністю. Ці заходи мають помірну складність реалізації, не потребують суттєвого втручання в силову частину локомотива та забезпечують стабільний приріст коефіцієнта використання зчпної маси на рівні 0,03–0,05. Додатковою перевагою є зниження зносу колісних пар і рейок.

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

Висновок до розділу

Технічні методи підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2ТЕ116 охоплюють широкий спектр заходів — від удосконалення систем керування тягою до оптимізації конструкції візків і умов контакту «колесо – рейка». Комплексне впровадження зазначених рішень дозволяє істотно зменшити втрати зчеплення, підвищити реалізовану силу тяги та забезпечити більш ефективну експлуатацію тепловоза без радикальної зміни його базової конструкції.

У результаті виконаних розрахунків встановлено, що коефіцієнт використання зчіпної маси тепловоза 2ТЕ116 у базовому стані становить близько 0,78, що зумовлено динамічними перерозподілами навантажень, обмеженими можливостями штатної системи керування тягою та нестабільністю умов контакту «колесо – рейка».

Розрахунки показали, що застосування окремих технічних заходів — удосконалення системи регулювання тягового зусилля, впровадження протибуксувальних систем, оптимізація конструкції візків та вирівнювання розподілу маси — забезпечує поетапне зростання коефіцієнта використання зчіпної маси до значень 0,83–0,93.

Найбільший ефект досягається при комплексному впровадженні зазначених методів, за якого коефіцієнт використання зчіпної маси може бути підвищений до рівня 0,90–0,92, що відповідає показникам сучасних модернізованих вантажних тепловозів і підтверджує доцільність обраного напрямку модернізації тепловоза 2ТЕ116

Порівняння результатів розрахунків при різних методах підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси показує, що найбільш раціональним є комплексний підхід до модернізації тепловоза 2ТЕ116. Поєднання електронних, механічних та конструктивних заходів дозволяє досягти максимального приросту

										Арк.
										52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

коефіцієнта використання зчіпної маси при збереженні експлуатаційної надійності та технічної доцільності обраних рішень.

Проведений аналіз доцільності впровадження методів підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси тепловоза 2TE116 показав, що найбільш ефективними з практичної точки зору є заходи, пов'язані з удосконаленням системи регулювання тягового зусилля та впровадженням протибуксувальних систем. Ці методи забезпечують значний приріст коефіцієнта ϕ за відносно невеликої складності реалізації та можуть бути впроваджені без суттєвих конструктивних змін локомотива.

Оптимізація розподілу маси та зчіпної маси також є доцільним заходом, оскільки потребує мінімальних витрат і дозволяє підвищити ефективність використання зчіпної маси за рахунок вирівнювання осьових навантажень. Конструктивні заходи, пов'язані з модернізацією візків і підвішування тягових електродвигунів, характеризуються вищою складністю реалізації, однак забезпечують довготривалий позитивний ефект і є доцільними при виконанні капітальних ремонтів.

Таким чином, найбільш раціональним є комплексний підхід до модернізації тепловоза 2TE116, який поєднує електронні та конструктивні методи і дозволяє досягти максимального підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси при збереженні технічної та економічної доцільності впровадження.

									Арк.
									53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

G_i – сила ваги вузлів (груп деталей), що розміщені в кузові і на рамі, в тому числі сила ваги власне кузова і рами, кН;

$$G_k^{баз} = 833,85 \text{ кН}$$

$$G_k^{np} = 833,85 \text{ кН.}$$

Службова сила ваги секції тепловоза P_{cy} знаходиться як сума сили ваги надвізкової будови та візків:

$$P_{cy} = G_k + 2G_m, \quad (3.9)$$

де G_m – сила ваги візка, кН;

$$P_{cy}^{баз} = 833,85 + 2 \cdot 259,97 = 1353,79 \text{ кН.}$$

$$P_{cy}^{np} = 833,85 + 2 \cdot 282,04 = 1397,93 \text{ кН.}$$

Середнє навантаження від колісної пари на рейки визначається як результат ділення службової сили ваги тепловоза на кількість його колісних пар ($m=6$):

$$P_{cp} = \frac{P_{cy}}{m}, \quad (3.10)$$

P_{cy} – службова сила ваги секції тепловоза, кН; у тепловозів, що мають усі рухаючи колісні пари, ця сила ваги співпадає зі зчійною силою ваги;

$$P_{cp}^{баз} = \frac{1353,7}{6} = 225,63 \text{ кН.}$$

$$P_{cp}^{np} = \frac{1397,93}{6} = 232,99 \text{ кН.}$$

Для виконання необхідних розрахунків та оформлення розважування складена відомість розважування (табл. 3.2), у якій вираховані та записані статичні моменти, що створюються силою ваги вузлів відносно умовної осі моментів.

$$M_i = G_i l_i. \quad (3.11)$$

										Арк.
										64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.210164.000.03КР.ПЗ

Таблиця 3.2 – Вагова відомість тепловоза 2ТЕ116 до і після модернізації

Назва вузла (групи деталей), G_i	Величина			
	до модернізації		після модернізації	
	сила ваги G_i , кН	плече L , м	сила ваги G_i , кН	плече L , м
1. Дизель-генераторна група	268,82	9,27	268,82	9,27
2. Охолоджувальне обладнання	47,02	15,71	47,02	15,71
3. Системи охолодження і змащування	31,94	11,1	31,94	11,1
4. Установка силових механізмів	41,2	13,8	41,2	13,8
5. Рама тепловоза з паливним баком	111,67	9,42	111,67	9,42
6. Кузов з приладдям	93,2	9,41	93,2	9,41
7. Внутрішнє обладнання і обшивка кабіни машиніста	14,81	1,36	14,81	1,36
8. Електрообладнання	119,92	6,7	119,92	6,7
9. Допоміжне обладнання	13,16	8,85	13,16	8,85
10. Обслуговуюча вага (бригада, паливо, тощо)	92,12	9,61	92,12	9,61
Всього	833,85	–	833,85	–
Непідресорена вага секції тепловоза	285,28	-	285,28	-
Візок	259,97×2	–	282,04×2	–

										Арк.
										65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ					

$$X_{\text{цт}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{G_k} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n G_i}, \quad (3.12)$$

$$X_{\text{цт}}^{\text{баз}} = \frac{7908}{833,85} = 9,48 \text{ м.}$$

$$X_{\text{цт}}^{\text{нр}} = \frac{7908}{833,85} = 9,48 \text{ м.}$$

Відстані від центра сили ваги надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки a_n та a_3 , м (схема відображена на рисунку 3.7):

$$a_n = X_{\text{цт}} - (D + C), \quad (3.13)$$

де D – відстань від осі авто зчипки до осі першої колісної пари; $D=2,45$ м

C – відстань від першої колісної пари до центру опори візка; $C=1,85$ м

$$a_n^{\text{баз}} = 9,48 - (1,85 + 2,45) = 5,18 \text{ м.}$$

$$a_n^{\text{нр}} = 9,48 - (1,85 + 2,45) = 5,18 \text{ м.}$$

$$a_3 = L_n - a_n, \quad (3.14)$$

де L_n – база локомотива; $L_n = 10,25$ м

$$a_3^{\text{баз}} = 10,25 - 5,18 = 5,07 \text{ м.}$$

$$a_3^{\text{нр}} = 10,25 - 5,18 = 5,07 \text{ м.}$$

Навантаження від кузова та рами з обладнанням на передній та задній візок визначається обернено пропорційно до відстаней від центра тяжіння надвізкової будови до умовних точок передачі вертикальних навантажень на візки:

– для переднього візка:

$$P_{\text{кп}} = G_k \frac{a_3}{L_n}, \quad (3.15)$$

$$P_{\text{кп}}^{\text{баз}} = 833,85 \cdot \frac{5,18}{10,25} = 421,4 \text{ кН.}$$

$$P_{\text{кп}}^{\text{нр}} = 833,85 \cdot \frac{5,18}{10,25} = 421,4 \text{ кН.}$$

– для заднього візка:

$$P_{\text{кз}} = G_k \frac{a_n}{L_n}, \quad (3.16)$$

$$P_{\text{кз}}^{\text{баз}} = 833,85 \cdot \frac{5,07}{10,25} = 412,45 \text{ кН.}$$

$$P_{\text{кз}}^{\text{нр}} = 833,85 \cdot \frac{5,07}{10,25} = 412,45 \text{ кН.}$$

Різниця у навантаженнях визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{|P_{\text{кп}} - P_{\text{кз}}|}{P_{\text{кп}}} \cdot 100, \quad (3.17)$$

									Арк.
									67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

модернізований тепловоз 2ТЕ116 відповідає всім вимогам щодо рівномірного навантаження, що забезпечує його надійну та продуктивну роботу.

Розрахункова схема перерозподілу вертикальних навантажень

Для кількісної оцінки ефективності запропонованої модернізації розглянемо спрощену розрахункову схему перерозподілу вертикальних реакцій на колісні пари під дією сили тяги.

Нехай:

- G_0 — статичне вертикальне навантаження на одну колісну пару, Н;
- F_t — сила тяги, що передається від візка до кузова, Н;
- h — висота прикладання сили тяги відносно рівня опор колісних пар, м;
- l — база візка, м;
- ΔG — приріст (або зменшення) вертикального навантаження на колісну пару, Н.

Перерозподіл вертикальних реакцій між крайніми колісними парами візка може бути оцінений за формулою:

$$\Delta G = \frac{F_t \cdot h}{l}$$

Тоді вертикальні навантаження на передню та задню колісні пари відповідно становитимуть:

$$G_1 = G_0 - \Delta G$$

$$G_2 = G_0 + \Delta G$$

З аналізу наведених залежностей видно, що зменшення величини h (висоти прикладання сили тяги), характерне для візка з низькоопущеним шкворнем,

									Арк.
									69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.210164.000.03КР.ПЗ

призводить до зменшення ΔG , а отже — до більш рівномірного розподілу навантажень між колісними парами.

Максимальна сила зчеплення, яка може бути реалізована без буксування, визначається як:

$$F_{зч} = \varphi \cdot \sum G_i$$

де φ — коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою;
 $\sum G_i$ — сумарна вертикальна реакція на ведучі колісні пари.

При цьому реальна реалізована сила тяги обмежується мінімальним значенням вертикального навантаження на окрему вісь:

$$F_{реал} \leq \varphi \cdot G_{min}$$

Таким чином, зменшення розкиду значень G_i безпосередньо підвищує величину $F_{реал}$, що і є основною метою застосування візка з низькоопущеним шкворнем.

Розрахунок перерозподілу навантажень (ΔG) від тяги

Тягове зусилля на один візок:

$$F_{t, візок} = \frac{350}{2} = 175 \text{ кН}$$

Перерозподіл “до модернізації”:

$$\Delta G_{до} = \frac{175 \cdot 1,06}{3,7} = 50,14 \text{ кН}$$

Перерозподіл “після модернізації”:

$$\Delta G_{після} = \frac{175 \cdot 0,525}{3,7} = 24,83 \text{ кН}$$

									0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
										70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Порівняння результатів і висновки для підпункту:

$$\Delta(\Delta G) = \Delta G_{\text{до}} - \Delta G_{\text{після}} = 50,14 - 24,83 = 25,30 \text{ кН}$$

Отже, при русанні 2ТЕ116 (за F_t , секція = 350 кН) перехід на схему з низькоопущеним шкворнем, яка переносить площину передачі поздовжніх сил на рівень осей колісних пар, зменшує оцінений перерозподіл вертикальних навантажень у візку приблизно вдвічі (із ~50 кН до ~25 кН на крайніх осях одного візка). Це безпосередньо підвищує “резерв” проти буксування для розвантаженої осі, а отже підтримує зростання коефіцієнта використання зчпної ваги ϕ .

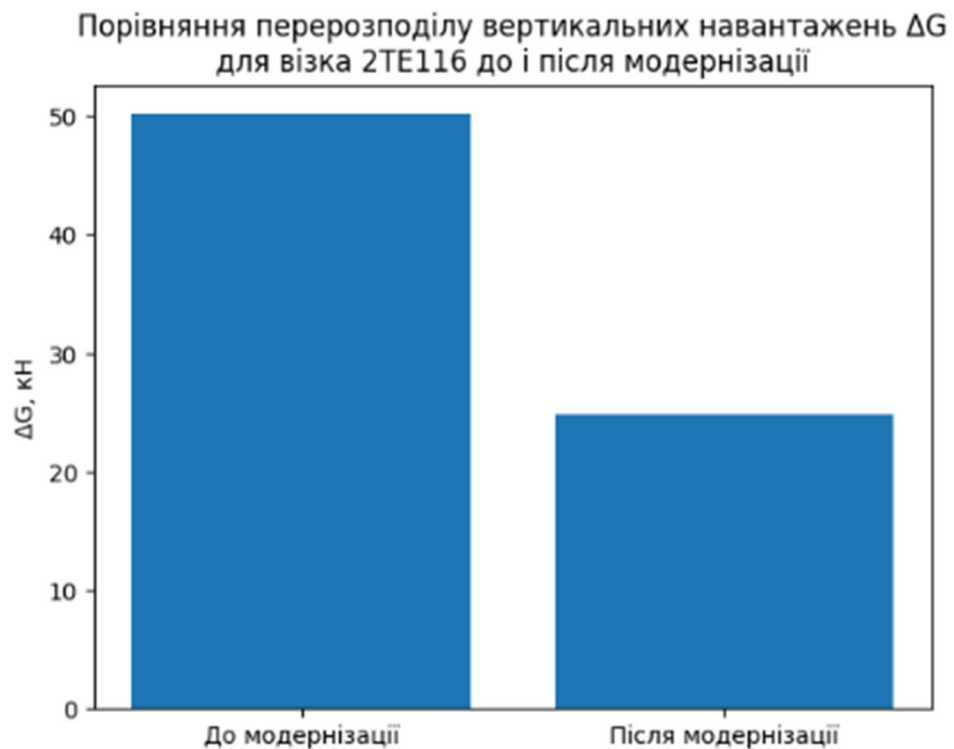


Рисунок 3.9. Порівняння перерозподілу вертикальних навантажень ΔG у візку тепловоза 2ТЕ116 до та після модернізації із застосуванням низькоопущеного шкворня

З наведеного графіка видно, що застосування візка з низькоопущеним шкворнем призводить до істотного зменшення перерозподілу вертикальних

навантажень між крайніми колісними парами візка при реалізації тягового зусилля.

У базовій конструкції тепловоза 2TE116 величина перерозподілу становить близько 50 кН, тоді як після модернізації вона зменшується до 25 кН, тобто майже у 2 рази. Це зменшення безпосередньо підвищує мінімальне навантаження на розвантажувану вісь та створює сприятливі умови для більш повного використання зчіпної маси без виникнення буксування.

Зменшення величини ΔG означає зниження ступеня розвантаження окремих колісних пар у режимі тяги, що підвищує граничну реалізовану силу зчеплення. Таким чином, модернізація екіпажної частини шляхом застосування візка з низькоопущеним шкворнем є ефективним конструктивним методом підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси ϕ .

3.2. Оцінка ефективності модернізації

Модернізація тепловоза 2TE116 включає удосконалення шворневої конструкції візків з низькоопущеним шворнем та двоступінчастим ресорним підвішуванням, що дозволяє підвищити механічний коефіцієнт використання зчіпної ваги локомотива. Такі покращення сприятимуть покращенню тягових характеристик тепловоза і його продуктивності.

У результаті проведеного аналізу можна зазначити, що тепловоз 2TE116 залишається важливим транспортним засобом з великим потенціалом для модернізації та підвищення ефективності його роботи.

За даними таблиці 1 видно, що коефіцієнт використання зчіпної ваги під час модернізації візка збільшився на 3,2% порівняно з вихідним значенням.

Аналізуючи дані для тепловоза 2TE116 до і після модернізації, було виявлено, що сумарна сила ваги кузова та рами з обладнанням залишилась незмінною і становить 833,85 кН. Проте службова сила ваги секції тепловоза зросла після модернізації з 1353,79 кН до 1397,93 кН, що призвело до збільшення середнього навантаження на колісні пари з 225,63 кН до 232,99 кН.

									Арк.
									72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

ВИСНОВОК

Переглянувши та дослідивши теоретичні матеріали ми бачимо декілька шляхів модернізації тепловоза 2ТЕ116 з підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги. Одним із шляхів є модернізація рами візка тепловоза шляхом перенесення шкворневого вузла на рівень колісної пари. Саме такий метод ми розглянули в даній роботі.

Після проведення досліджень та розрахунків коефіцієнта використання зчіпної ваги до і після модернізації можна зробити висновок, що після модернізації коефіцієнт виріс на 3,2% від вихідного. Також, після розрахунку на розважування тепловоза, з використанням двоступінчастого (м'якого) ресорного підвішування, модернізація з низькоопущеним шворнем має різницю у навантаженні на візки 2,17%, що є допустимим відхиленням та відповідає вимогам.

Проведений аналіз показав, що традиційна схема взаємодії кузова і візка тепловоза 2ТЕ116 зумовлює значний перерозподіл вертикальних навантажень між колісними парами у режимі тяги, що негативно впливає на реалізацію зчеплення і сприяє виникненню буксування. Запропонована модернізація змінює геометрію передачі поздовжніх сил від візка до кузова, зменшуючи плече їх прикладання та відповідні розвантажувальні моменти.

На основі розрахункових оцінок встановлено, що перехід на візок з низькоопущеним шкворнем дозволяє зменшити величину перерозподілу вертикальних навантажень між крайніми осями візка приблизно у два рази — з близько 50 кН до 25 кН у режимі рушання з розрахунковою силою тяги. Таке зниження ΔG безпосередньо підвищує мінімальне навантаження на найбільш розвантажувану вісь і створює умови для більш повного використання зчіпної маси без збільшення осьових навантажень та без погіршення впливу локомотива на колію.

									Арк.
									74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.210164.000.03КР.ПЗ				

Оцінка ефективності модернізації показала, що запропоноване рішення має виражений технічний ефект і може розглядатися як конструктивний метод підвищення коефіцієнта використання зчіпної маси, який доповнює роботу протибуксувальних систем і не зводиться лише до електронного керування тягою. Разом з тим, реалізація такої модернізації потребує забезпечення сумісності вузлів, перевірки міцності та ресурсу елементів екіпажної частини, а також проведення тягово-динамічних і експлуатаційних випробувань.

У цілому результати проектування свідчать про технічну обґрунтованість і доцільність модернізації тепловоза 2TE116 шляхом застосування візка з низькоопущеним шкворнем, особливо для умов експлуатації з великими масами поїздів і частими режимами рушання. Отримані висновки можуть бути використані як основа для подальших детальніших розрахунків, моделювання та експериментальної перевірки ефективності запропонованого технічного рішення.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Дослідження впливу конструкції візка на реалізацію тягових зусиль локомотива // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 168. – С. 45–52.
25. Iwnicki S. (ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton : CRC Press, 2006. 552 p.
26. Bosso N., Magelli M., Zampieri N. Adhesion phenomena and wheel–rail contact dynamics. Vehicle System Dynamics. 2017. Vol. 55, no. 3. P. 350–372.
27. Mauer B. Traction Control for Rail Vehicles: Principles and Implementation. Berlin : Springer, 2015. 214 p.
28. Ward C., Goodall R., Weston P. Modern methods of wheel slip prevention in railway traction systems. Control Engineering Practice. 2018. Vol. 72. P. 40–52.
29. Klingel W. Wheel–rail contact and adhesion. Journal of Rail and Rapid Transit. 2014. Vol. 228, no. 6. P. 1234–1245.
30. González F., Antunes E. Adaptive traction control algorithms for heavy locomotives. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2020. Vol. 28, no. 4. P. 1508–1520.

					0032.210164.000.03КР.ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		