


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Управління та експлуатація рухомого складу"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав. кафедрою  Борис БОДНАР

"15" 01 2026 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "Розробка заходів з підвищення тягових властивостей тепловозів"

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

ВИКОНАВ: СТУДЕНТ ГРУПИ ЛГ2421

 Іван КИРСА

Керівник  Дмитро КИСЛИЙ

Нормоконтролер  Людмила КОЛОДІЙ

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

Студент 

Дніпро, 2026

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

Faculty *“Transport engineering”*

Department *“Management and Operation of Rolling Stock”*

EXPLANATORY NOTE
to Master’s Thesis

master

on the topic: **“Development of measures to improve the traction properties
of diesel locomotives”**

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**:

Ivan KYRSA

Scientific Supervisor: Dmytro KYSLYY

Normative controller: Liudmyla KOLODII

Dnipro, 2026

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: *«Транспортна інженерія»*

Кафедра: *«Управління та експлуатація рухомого складу»*

Рівень вищої освіти: *другий (магістерський)*

Освітня програма: *«Локомотиви та локомотивне господарство»*

Спеціальність: *273 «Залізничний транспорт»*

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. Кафедрою _____ Борис БОДНАР

« ____ » _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу магістра

студенту групи ЛГ2421

Кирсі Івану Олеговичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Розробка заходів з підвищення тягових властивостей тепловозів
Керівник роботи: Кислий Дмитро Миколайович, к.т.н., доцент
Затверджена наказом по університету від «02» жовтня 2025 р. №1401ст
2. Строк подання студентом роботи: «11» січня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: сила тяги однієї колісної пари – 70 кН; діаметр колеса – 1,05 м; жорсткість гасителів коливань – 1883 Н/мм.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):
 - 4.1 Аналіз шляхів поліпшення зчіпних властивостей тягового рухомого складу
 - 4.2 Визначення коефіцієнта використання зчіпної ваги тепловоза
 - 4.3 Розробка практичних заходів підвищення зчіпних властивостей тепловозів
 - 4.4 Розрахунок економічної ефективності підвищення зчіпних властивостей тягового рухомого складу

5. Перелік графічного матеріалу:

- 5.1 Схеми перерозподілу навантажень від колісних пар на рейки
- 5.2 Коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза
- 5.3 Схема підключення пускових реостатів
- 5.4 Схема визначення сил, що викликають перерозподіл навантажень між колісними парами тривісного екіпажу
- 5.5 Порівняння тягових характеристик
- 5.6 Модернізована електрична схема силових кіл тепловоза

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапу кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Обсяг розділу, % |
|-------|--|-------------------------------|------------------|
| 1 | Аналіз шляхів поліпшення зчіпних властивостей тягового рухомого складу | 16.11.2025 | 25 |
| 2 | Визначення коефіцієнта використання зчіпної ваги тепловоза | 16.11.2025 | 25 |
| 3 | Розробка практичних заходів підвищення зчіпних властивостей тепловозів | 14.12.2025 | 25 |
| 4 | Розрахунок економічної ефективності підвищення зчіпних властивостей тягового рухомого складу | 11.01.2026 | 25 |
| 5 | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри | 11.01.2026 | |
| 6 | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії | 20.01.2026 | |

Студент _____ Іван КИРСА

Керівник роботи _____ Дмитро КИСЛИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дипломна робота на тему «Розробка заходів з підвищення тягових властивостей тепловозів» загальним обсягом 23 аркуші розрахунково-пояснювальної записки, яка складається з 4 розділів. Робота містить 20 ілюстрацій, 7 таблиць та список літературних джерел з 10 найменувань.

Об'єктом дослідження в магістерській дипломній роботі виступають тягові властивості тепловоза, а метою – підвищення тягових властивостей тепловозів серії ЧМЕЗ.

У рамках роботи для тепловоза ЧМЕЗ проведено розрахунки, спрямовані на підвищення його тягових якостей. Аналіз наявних підходів показав, що традиційні механічні способи менш ефективні порівняно з сучасними системами електронного регулювання потужності кожного колісно-моторного блоку. Електронні системи мають перевагу завдяки здатності до точного та гнучкого регулювання в широкому діапазоні, враховуючи такі змінні параметри, як зношення колісних бандажів, фактичний технічний стан тягових електродвигунів та різницю в опорах паралельних силових ланцюгів.

Було запропоновано впровадити систему електронного керування, яка регулює електричну потужність окремих рушійних блоків шляхом програмованої зміни основного магнітного потоку тягових двигунів на етапі пуску тепловоза. На основі аналітичних розрахунків визначено оптимальні значення струмів у паралельних колах тягових електродвигунів, необхідні для досягнення покращення тягових характеристик. Очікується, що в зоні швидкостей, де тяга обмежена умовами зчеплення коліс з рейками, ефективність тепловоза зросте на 5,5%. Для всього експлуатаційного діапазону швидкостей, який визначається конструкцією локомотива, прогнозований приріст тягових властивостей становить 0,5%.

Ключовими словами в магістерській дипломній роботі виступають: коефіцієнт використання зчіпної ваги, сила зчеплення, тягові властивості, електрична схема, екіпажна частина, автоматизація, удосконалення, ефективність.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 4 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 7 |
| 1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОЛІПШЕННЯ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ | 9 |
| 1.1 Огляд ходових частин локомотивів як елемента створення сили тяги..... | 9 |
| 1.2 Аналіз впливу тягового привода на використання зчіпної маси локомотива | 10 |
| 1.3 Аналіз факторів, які впливають на коефіцієнт використання зчіпної ваги тепловоза | 19 |
| 1.4 Аналіз параметрів, які впливають на коефіцієнт використання зчіпної ваги..... | 21 |
| 1.5 Розробка заходів поліпшення тягових якостей локомотивів за рахунок зменшення розвантаження колісних пар від дії сили тяги..... | 23 |
| 1.6 Аналіз підвищення стабільності тягових якостей локомотива за розрахунок застосування поліпшених електромеханічних характеристик тягового привода..... | 26 |
| 2 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЧІПНОЇ ВАГИ ТЕПЛОВОЗА..... | 30 |
| 2.1 Розрахунок коефіцієнта використання зчіпної ваги тепловоза на математичній моделі | 30 |
| 2.2 Аналітичний розрахунок коефіцієнта використання зчіпної ваги локомотива при модернізації електричної схеми керування тяговими електродвигунами..... | 35 |
| 2.3 Визначення підвищення тягових властивостей тепловозів..... | 40 |
| 3 РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОВОЗІВ | 43 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------|----------|--------|------|---|--|--|--------------------------|------|---------|
| | | | | | <i>0032.200172.000.03MP.ПЗ</i> | | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | Розробка заходів з підвищення тягових властивостей тепловозів | | | | | |
| Розроб. | <i>Кирса</i> | | | | | | | Літ. | Арк. | Акрушів |
| Перевір. | <i>Кислий</i> | | | | | | | Н | 5 | 63 |
| Реценз. | | | | | | | | <i>УДУНТ, зр. ЛГ2421</i> | | |
| Н. Контр. | <i>Колодій</i> | | | | | | | | | |
| Затверд. | <i>Баднар</i> | | | | | | | | | |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Огляд роботи електричної схеми керування тяговими електричними машинами під час пуску тепловоза | 43 |
| 3.3 | Розробка системи підвищення тягових властивостей тепловозів | 52 |
| 4 | РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ | 54 |
| 4.1 | Визначення витрат до впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів | 54 |
| 4.2 | Розрахунок витрат на впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів | 54 |
| 4.3 | Визначення витрат підприємства після впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів..... | 57 |
| 4.4 | Визначення строку окупності та економічного ефекту від системи підвищення тягових властивостей тепловозів..... | 57 |
| | ВИСНОВКИ..... | 58 |
| | СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... | 59 |

ВСТУП

Для соціально-економічного розвитку України важливим є поліпшення транспортного обслуговування. У цьому контексті залізничному транспорту, як одному з найпотужніших видів перевезень, відводиться ключова роль. Актуальним завданням для народного господарства є створення рухомого складу з кращими тягово-енергетичними характеристиками. Практика експлуатації локомотивів свідчить, що їхню ефективність можна значно підвищити за рахунок більш повного залучення зчіпної маси, потужності тягових двигунів та вдосконалення систем керування приводом.

Розташування України в Європі створює передумови для активного розвитку залізничної галузі, яка має задовольняти не лише внутрішні потреби в перевезеннях, а й обслуговувати транзитні потоки між ЄС та євразійським регіоном. Підвищення ефективності роботи залізниць пов'язане зі збільшенням швидкості та ваги поїздів, що, в свою чергу, вимагає потужнішого тягового складу. Однак, як показує досвід, такі локомотиви схильні до буксування через зростання осьової потужності. Крім того, знижується економічність дизелів через роботу в часткових режимах, що веде до підвищеного зношування деталей, погіршення тягових якостей та зростання експлуатаційних витрат.

Через складний економічний стан Укрзалізниці швидка повна заміна рухомого складу неможлива. Значна частина перевезень досі виконується тепловозами минулих років випуску. Тому, окрім існуючої державної програми оновлення парку, важливе значення мають наукові підходи до енергозбереження та модернізації існуючого складу, який становить близько 75% парку.

Виробнича база України, що включає заводи та мережу депо, дозволяє вирішити це завдання з мінімальними капіталовкладеннями. Це сприятиме не лише енергозбереженню, але й посиленню позицій українських залізниць на європейському транспортному ринку.

Поточні системи керування не дають змоги повною мірою використати потенціал рухомого складу, як у використанні зчіпної маси, так і обладнання. Однією з причин є нерівномірність розподілу потужності між двигунами, яка

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 7 |

посилюється через різне навантаження на рейки від колісних пар. Це може бути наслідком неточності балансування або динамічного перерозподілу сил під час руху, що веде до недооцінки зчіпної маси. Таким чином, задача зменшення нерівномірності навантаження по осях і розподілу струмів залишається важливою для подальшого покращення ефективності тягового рухомого складу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 8 |

1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОЛПШЕННЯ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1 Огляд ходових частин локомотивів як елемента створення сили тяги

Ходову частину локомотива, як елемент його екіпажу, можна визначити як вузол, що безпосередньо забезпечує коректний рух по рейковій колії. Історично в локомотиво-будуванні сформувалися дві основні конструкції: рамна та візкова.

У рамній конструкції всі ведучі осі закріплені в одній жорсткій рамі. Візки в такій схемі, якщо вони є, не мають тягових колісних пар і виконують лише спрямовуючі та підтримуючі функції.

У візковій конструкції, навпаки, саме візки несуть на собі всі тягові осі, тоді як окремі спрямовуючі чи підтримуючі вузли можуть бути відсутніми.

Сьогодні рамна конструкція в основному залишилася в минулому, будучи характерною для паровозів та найперших локомотивів інших типів. Її використання було зумовлене технологіями та потребами свого часу: необхідністю розподілити велику вагу на легкі рейки, а також використанням групового дишлового приводу. У цій конструкції маса, що припадала на ведучі осі, і отримала назву «зчіпна маса». Цей термін походить саме від зчеплення колісних пар єдиним дишловим механізмом. Частина ж ваги спиралася на допоміжні візки, які, до того ж, мали спеціальні пристрої для полегшення проходження кривих ділянок колії.

Для сучасних локомотивів з візковою схемою класифікація ходової частини фактично зводиться до класифікації самих тягових візків. Спрямовуючі та підтримуючі візки (якщо вони застосовуються) поділяються на дво- чи одноосні, з можливим зв'язком із крайніми тяговими осями або без нього.

Тягові візки є основою ходової частини сучасних локомотивів. Під час руху вони сприймають складний комплекс навантажень: передають вагу локомотива і тягове зусилля на рейки, сприймають гальмівні та спрямовуючі сили в кривих, вплив нерівностей колії. Конструкція візків безпосередньо впливає на плавність ходу та динамічні властивості локомотива в цілому. До них пред'являються такі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 9 |

ВИМОГИ:

- забезпечення безпеки руху на максимальних швидкостях;
- мінімізація динамічного впливу на колію;
- максимально повне використання зчіпної ваги локомотива;
- мінімальна маса необресорених елементів;
- висока надійність в експлуатації;
- зручність у технічному обслуговуванні та ремонті;
- прийнятна собівартість виготовлення, утримання та відновлення.

**1.2 Аналіз впливу тягового привода на використання зчіпної маси
ЛОКОМОТИВА**

Для рівномірного зношування коліс та максимального використання тягової ваги локомотива необхідно, щоб усі його колеса чинили однаковий вертикальний тиск на рейки. Однак на практиці, навіть у найпростішого двовісного екіпажу, спостерігається нерівномірний розподіл навантаження від кожної осі. Це явище спричинено низкою факторів.

По-перше, у статично невизначених системах ресорного підвішування поява різниці у тиску коліс на рейки викликана відхиленнями розмірів і жорсткостей пружних елементів від розрахункових значень. Для зменшення цього впливу застосовують встановлення жорстких допусків на характеристики деталей підвішування, ретельний підбір ресор і пружин за групами жорсткості, а також регулювання їх початкового обтиску.

По-друге, нерівномірності верхньої будови колії також приводять до перерозподілу вертикальних навантажень. Мінімізувати цей фактор можна лише підтримкою колії у належному технічному стані.

Третя причина полягає у перерозподілі навантажень між осями під впливом вертикальних моментів від сил тяги та гальмування. Ці моменти виникають через особливості розташування тягових двигунів на візку та різницю висот прикладання тягового зусилля і сили опору руху. Для компенсації такого впливу в односекційних локомотивах створюють спеціальний момент, що діє від кузова на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

візок, використовуючи довантажувальні пристрої або похилі тяги для передачі поздовжніх сил. У двосекційних локомотивах вирівнювання навантажень може додатково досягатися за рахунок вертикальних силових зв'язків між секціями.

Якщо перші дві причини можуть мати випадковий характер, то третя закладена в самій конструкції екіпажа та схемі приводу.

У конструкторській практиці для оцінки тягових якостей локомотива використовується поняття коефіцієнта статичного використання зчіпної маси. Цей параметр, що визначається схемою та конструктивними особливості екіпажу, є розрахунковою величиною. Він відображає зміну навантаження від осі на рейку при розвиненні тяги і характеризує технічний рівень засобів, спрямованих на вирівнювання навантажень.

Недостатнє використання зчіпної маси особливо критично проявляється при початку руху важкого поїзда. Якщо окрема вісь розвантажується, то тягове зусилля, що розвивається її двигуном, може перевищити силу зчеплення з рейкою, що призводить до буксування. При послідовному електричному з'єднанні тягових двигунів це призведе до буксування інших осей у ланцюзі. Історично при проектуванні тепловозів проблемі використання зчіпної маси не приділяли такої ж уваги, як для електровозів, оскільки вони мали значну власну вагу за рахунок дизель-генераторної установки. Однак зі зростанням питомої потужності та зниженням відносної зчіпної маси сучасних тепловозів це питання стало актуальним і для них.

Звичайно вживане поняття про коефіцієнт тяги локомотива m не може оцінити ступінь використання зчіпної маси локомотива z_4 . Тому це поняття можна доповнити (особливо для локомотивів з індивідуальним приводом колісних пар) поняттям про коефіцієнт використання дотичної сили тяги u

$$u = \frac{K}{K_{\max}} \cdot \frac{K}{K_{z4}} \quad (1.1)$$

У цій формулі відношення K до K можна розглядати як умовну величину зчіпної маси, при якій локомотив мав би змогу розвивати силу тяги величиною K . Тоді значення u дасть уяву про те, яка частка зчіпної маси використовується

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 11 |

(умовно) для створення необхідної сили тяги величиною k . Значення u лежить у межах від 0 до 1.

Коефіцієнт зчіпної маси – це відношення найменшого статичного навантаження від колісної пари на рейки m_{in} до середнього статичного навантаження m , тобто

$$u = \frac{m_{in}}{m} \quad (1.2)$$

При цьому

$$z_{ch} = \frac{m_{in}}{m} \quad (1.3)$$

де z_{ch} – зчіпна маса локомотива;

n – кількість рушійних колісних пар;

$$m_{in} = m_{max} \quad (1.4)$$

де m_{max} – максимальне розвантаження колісної пари, яке залежить від особливостей конструкції локомотива та схеми його тягового привода, т.

З урахуванням коефіцієнта використання зчіпної маси u_i , дотична сила тяги, що реалізується i -тою колісною парою, F_i , кН, буде

$$F_i = k u_i \quad (1.5)$$

Значення u_i можуть відрізнятися від одиниці в той чи інший бік, але їх сума (для локомотива, що має лише рушійні колісні пари, без бігункових і підтримуючих) завжди дорівнює кількості рушійних колісних пар, тобто

$$\sum u_i = n \quad (1.6)$$

З наведеного вище легко зрозуміти, що коефіцієнтом використання зчіпної маси зручно користуватися при визначенні найбільшої величини k з урахуванням перерозподілу навантажень між рушійними колісними парами внаслідок дії сили

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |

тяги на автотягач, тобто на певній висоті від головок рейок, з-за коливань та ін.

$$\max_{kп} p_{kп}, \quad (1.7)$$

де $kп$ – дотична сила тяги одного колісно-моторного блоку (КМБ), кН;

$$kп = k_{\text{кп}} u; \quad (1.8)$$

$$u = \frac{p_{\text{кп}} k_{\text{кп}}}{r_{\text{кп}}}, \quad (1.9)$$

звідки

$$u = \frac{p_{\text{кп}} k_{\text{кп}}}{r_{\text{кп}}}. \quad (1.10)$$

У момент зрушення з місця $k_{\text{кп}} = 1$, тоді

$$u = \frac{p_{\text{кп}}}{r_{\text{кп}}}. \quad (1.11)$$

З останньої формули видно, що найкраще використання зчіпної маси має місце при $p = 0$. Шляхом розрахунків встановлено, що для візків тепловоза ТЕЗ $p = 1,176$, тепловоза 2ТЕ10Л – $p = 0,856$, тепловоза 2ТЕ116 – $p = 0,49$.

Якщо з розглянутих вище причин нерівномірності розподілу навантажень від колісних пар на рейки виділити головну, то це буде третя причина, що підтверджується наведеними вище цифрами. Справа в тім, що на цих тепловозах різні схеми розташування ТЕД.

У випадку посадки веденого зубчастого колеса тягового осьового редуктора на вісь колісної пари, при опорно-осьовому підвішуванні ТЕД величина u сильно залежить від того, як розташований окремо взятий ТЕД відносно напрямку руху локомотива: за чи перед віссю колісної пари. На рис. 1.1, а) ТЕД розташований по ходу локомотива за віссю, на тому ж рисунку, б) – перед віссю. У першому випадку вертикальна складова сила від моменту на вінці веденого зубчастого колеса буде розвантажувати колісну пару, а в другому – довантажувати.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |



Рисунок 1.1 – Силове діяння від роботи ТЕД на вісь пари

Як видно з рис. 1.2, ця сила зворотна по знаку, буде також навантажувати підшипники вала якоря ТЕД.



Рисунок 1.2 – Силове діяння від роботи ТЕД на його пружинну підвіску та підшипники валу якоря

Складові цієї сили, що діятимуть на вісь колісної пари v та пружинну підвіску ТЕД n , будуть

$$v - 3 \ddot{v}; \quad (1.12)$$

$$n - 3 \ddot{n}. \quad (1.13)$$

При обертанні якоря ТЕД виникає реактивний момент p і рівновеликий йому, але зворотний по знаку, реактивний момент статора c , причому $|p| = |c|$. На

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 14 |

рис. 1.2, а) момент P навантажує вісь колісної пари силою c

$$c \cdot P \quad (1.14)$$

і розвантажує пружинну підвіску ТЕД на величину

$$n \cdot n \cdot c. \quad (1.15)$$

На рис. 1.2, б) бачимо зворотну картину. Якщо по ходу локомотива ТЕД розташований за віссю колісної пари, то величина розвантаження колісної пари становитиме

$$0.3 \cdot v \cdot c \cdot 3.3 \cdot \frac{P}{v} \cdot 3 \cdot \frac{3 \cdot v \cdot P}{v}. \quad (1.16)$$

При розташуванні ТЕД перед віссю колісна пара буде довантажена такою ж силою 0 . Як було показано вище, величина 0 найбільш значна при зрушенні з місця з поїздом великої маси й досягає (залежно від потужності локомотива та маси поїзда 36-45 кН. На рис. 1.3 зображене різноспрямоване розташування на візках ТЕД відносно напрямку руху, який позначений стрілкою « \rightarrow ». Таке розташування застосовувалося на багатьох типах локомотивів старого покоління. У такому випадку колісні пари I, II і IV недовантажені на однакову величину, а колісні пари III, V і VI – перевантажені.



Рисунок 1.3 – Силове діяння від роботи ТЕД при їх різноспрямованому розташуванні в екіпажі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

Сила тяги на автозчепі a створює момент F відносно осей колісних пар

$$F \cdot a \cdot k, \quad (1.17)$$

який загалом навантажує задній візок і розвантажує передній. При цьому сила тяги a може бути визначена таким чином

$$a \leq k_{\max} \cdot z_{ч0}, \quad (1.18)$$

де k_{\max} – максимальна сила тяги локомотивів (при зрушенні з місця), кН;

$z_{ч}$ – зчїпна маса локомотива, т;

ρ – основний питомий опір руху локомотива, кН/т, [2].

У той же час на надресорну будову локомотива діє момент за рахунок зусиль n , що передаються через кронштейни підвісок ТЕД (колїсні пари II і III, IV, V) та малих відстанях між кронштейнами підвісок зусилля n на кронштейнах між цими колїсними парами можна вважати за зрівноважені і момент n від сил n визначити як

$$n \cdot l_{n-1}. \quad (1.19)$$

Рїзниця моментів $n \cdot F_{n-1}$ буде змїнювати навантаження на елементи пружного пїдвїшування переднього і заднього вїзків. При збалансованому пружному пїдвїшуванні рїзниця цього навантаження n становитиме

$$\frac{M_{n-1}}{2} \quad (1.20)$$

Найменше навантаження від колїсної пари на рейки \min визначить обмеження сили тяги, яку розвиває ця колїсна пара

$$\min_{n-1} \cdot \rho \cdot M_{n-1}, \quad (1.21)$$

де $\rho \cdot M_{n-1}$.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 16 |

Для загального випадку вводимо такі позначення [3]: додаткове навантаження (розвантаження) колісної пари I від моменту M : m_1 , колісної пари II – m_2 ... шостої – m_6 . З рис. 1.3 видно, що за абсолютною величиною m_1 – m_6 ; m_2 – m_5 ; m_3 – m_4 . Тоді результуючий момент M , наприклад для одного візка, можна описати таким чином

$$m_1 + m_2 + m_3. \quad (1.22)$$

Виразимо m_2 і m_3 через m_1

$$m_2 = m_1 \frac{2}{1}, \quad (1.23)$$

$$m_3 = m_1 \frac{3}{1} \quad (1.24)$$

і підставимо ці вирази. Після простих перетворень дістанемо

$$m_1 \begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1.25)$$

звідки

$$m_1 \frac{2}{1} \frac{2}{1}. \quad (1.26)$$

Тепер можна записати в загальному виразі статичні навантаження від будь якої колісної пари за номером

$$i \cdot 0 \cdot m. \quad (1.27)$$

У цьому виразі знаки визначаються схемою взаєморозміщення ТЕД для схеми рис. 1.4.

$$1 \cdot 0 \cdot m_1; 2 \cdot 0 \cdot m_2;$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

3.0 м3; 4.0 м4;

(1.28)

5.0 м5; 6.0 м6.



Рисунок 1.4 – Схема силового діяння від роботи ТЕД при їх односпрямованому розташуванні на візках (зустрічний варіант)

Розрахунки [4] свідчать, що для схеми рис. 1.3 при технічних даних, які відповідають тепловозу ТЕ3 $\eta = 0,78$, а для схеми рис. 1.4 і технічних даних тепловоза 2ТЕ10Л (варіант з безщелепними візками) $\eta = 0,86$, тобто, зміна розташування ТЕД підвищила величину η приблизно на 8 %.

Пізніше завод-виготовлювач розробив для тепловоза 2ТЕ10Л новий варіант візка з односпрямованим розташуванням ТЕД рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Схема силового діяння від роботи ТЕД при їх односпрямованому розташуванні на візках

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 18 |

Подальші пошуки способів підвищення степеня використання зчіпної маси призвели до створення шкворневих систем, які передають силу тяги a з рами візка на автозчеп у площині осей колісних пар через видовжені шкворні спеціальної конструкції. Такий спосіб зменшує величину моменту F . Шкворневі системи з видовженими шкворнями застосовані на тепловозах ТЕП70 і ТЕМ7.

Як видно з розглянутого вище матеріалу, шляхи поліпшення використання зчіпної маси локомотивів різноманітні. Серед них, окрім вибору способу розташування ТВД на візках та типу шкворневої системи, являє інтерес застосування так званих довантажувачів зчіпної маси. Створено декілька ефективних конструкцій таких довантажувачів, усю сукупність яких неможливо розглянути в межах даного курсу, принаймні з двох причин:

– довантажувачі застосовуються досить обмежено, в основному, на деяких електровозах, велика потужність яких при зрушенні з місця та русі по крутому підйому з важким поїздом використовується неповністю з-за нестачі зчіпної маси;

– принципово майже всі довантажувачі діють однаково: їх конструкції передбачають створення додаткового (до статичного від маси кузова з устаткуванням) натиснення на рами візків у потрібному місці, там, де колісні пари розвантажуються в момент зрушення з місця; це, в основному, системи з застосуванням пневматичних, часто гальмових циліндрів з важелями, існують і гідравлічні системи.

1.3 Аналіз факторів, які впливають на коефіцієнт використання зчіпної ваги тепловоза

Під зчіпною масою локомотива розуміють загальну вагу, яка припадає на його провідні осі та передається на рейки. Ця маса є джерелом сили зчеплення коліс з рейками, необхідної для перетворення обертального руху коліс у силу тяги або гальмування. Як ключова експлуатаційна характеристика, вона визначає максимально можливе тягове або гальмівне зусилля, пропорційне коефіцієнту зчеплення. Розрахунок зчіпної маси зазвичай ведеться для нерухомого локомотива, оскільки під час руху відбувається лише її перерозподіл між осями.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

На величину коефіцієнта зчеплення локомотива з окремим приводом кожної осі впливає комплекс факторів, що дозволяє представити його у вигляді добутку:

- граничного коефіцієнта зчеплення для конкретних умов контакту колеса та рейки, що залежить від матеріалів і властивостей поверхонь тертя;
- коефіцієнта використання зчіпної ваги, що відображає ступінь реалізації цього граничного значення.

Сам коефіцієнт використання зчіпної ваги, у свою чергу, враховує дві основні складові:

- основний коефіцієнт, який обумовлений постійними або стійкими факторами: розбіжністю характеристик тягових двигунів, різницею діаметрів коліс, нерівномірністю статичного розподілу ваги між осями та стійким перерозподілом навантажень через дію сил тяги і гальмування;
- динамічний коефіцієнт, що відображає вплив тимчасових явищ: періодичних коливань вертикальних навантажень і сил тяги, а також випадків переривчастого буксування коліс.

Найвище значення коефіцієнта використання зчіпної ваги спостерігається на старті руху, коли локомотив починає рухатися з місця, і може сягати 0,40-0,45. Зі зростанням швидкості цей коефіцієнт закономірно зменшується. Його базова величина залежить від коефіцієнта статичного тертя у контакті колеса з рейкою.

Фрикційні властивості цього контакту суттєво залежать від стану поверхні рейок. Наявність на них оксидів сама по собі не знижує тертя, проте зволоження такого шару різко погіршує зчеплення. Легкий дощ або роса є більш несприятливими, ніж сильна злива, яка змиває забруднення. Ключовим фактором виступає вологість повітря: при вологості понад 95% коефіцієнт статичного тертя значно падає. Це пояснюється тим, що волога, наповнюючи пори поверхневого шару, утворює колоїдний розчин, властивості якого визначають зсувні напруження.

Експериментальні дослідження на експлуатованих ділянках залізниць виявили кореляцію між коефіцієнтом статичного тертя та фактичним коефіцієнтом зчеплення для тепловозів різних серій, що дозволяє описувати цю

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 20 |

залежність апроксимаційними поліномами. Таким чином, коефіцієнт статичного тертя можна розглядати як комплексний інтегральний показник фрикційних здібностей рейок, що залежить від ступеня забруднення, вологості, температури та є випадковою величиною.

Використання такої залежності дає змогу прогнозувати зчіпні властивості при різних станах колії. Оцінка фрикційних умов через коефіцієнт тертя дозволяє зрозуміти, наскільки високим є реалізоване значення коефіцієнта зчеплення в конкретній ситуації.

Для досягнення максимально можливого рівномірного розподілу ваги локомотива між провідними осями необхідно:

- співставити центр ваги надвізкової будови з геометричним центром рами;
- розташувати точки опори кузова на візки симетрично щодо цього центру;
- забезпечити ідентичність параметрів всіх елементів ресорного підвішування.

Перші дві умови закладаються на етапі компонування локомотива під час проектування, третя – реалізується підбором пружних елементів при складанні. Повна ідеальна рівність навантажень недосяжна, тому технічні норми допускають відхилення від середнього значення в межах 3% для тепловозів з осьовим навантаженням до 225 кН і 2% – до 245 кН.

Коефіцієнт використання зчіпної ваги прямо характеризує тягові можливості локомотива. Наприклад, зміна компонування та перенесення тягових двигунів на односторонню схему на візках тепловозів серій 2ТЕ10В та 2ТЕ116 дозволило підвищити цей коефіцієнт до 0,83-0,86. Більшість магістральних та частина маневрових вітчизняних тепловозів мають уніфіковану колісну формулу 3_0-3_0 , що сприяє уніфікації візків за умови вибору оптимальної конструкції.

1.4 Аналіз параметрів, які впливають на коефіцієнт використання зчіпної ваги

Одним з найбільш суттєвих показників якості конструкції візка є коефіцієнт використання зчіпної ваги μ , який являє собою відношення (фактичного

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 21 |

вертикального) мінімального навантаження від колісної пари на рейки m_{in} до номінального статичного cm й визначається з виразу

$$\frac{m_{in}}{cm} \cdot \frac{cm}{m_{max}}, \quad (1.29)$$

де m_{max} – величина найбільшого розвантаження вісі колісної пари.

Схема взаємодії сил та моментів колісно-моторного блока наведена на рис. 1.6. З виразу (1.29) виходить, що для розвантажених колісних пар коефіцієнт $\lambda < 1$, і зі зростанням ΔP відбувається його зменшення.

Чим ближче величина λ до одиниці, тим більш вдалою є конструкція

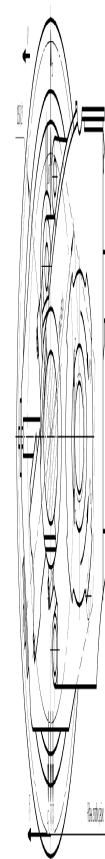


Рисунок 1.6 – Розрахункова схема сил та моментів окремого КМБ

локомотива. Тому при проектуванні локомотивів слід порівнювати розрахункові величини коефіцієнтів використання зчпної ваги й віддавати перевагу тому варіанту конструкції, для якого величина λ є найбільшою.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

Зменшення навантаження від деяких колісних пар на рейки ΔP відбувається під впливом сили тяги F та залежить від ряду конструктивних елементів тепловоза. Основний вплив на величину ΔP чинять:

- розташування тягових електродвигунів на візку;
- схема пружного підвішування;
- відстань між серединами візків.

1.5 Розробка заходів поліпшення тягових якостей локомотивів за рахунок зменшення розвантаження колісних пар від дії сили тяги

Схемні варіанти конструкції екіпажної частини локомотивів (однобічне розташування тягових електродвигунів, застосування видовженого шкворня з метою передачі тягового зусилля в площині колісних пар, а якщо можливо, то ще нижче, що особливо зручно реалізувати при двоосних візках), похилі тяги та мономоторний привод (що також найбільш доцільно, головним чином, для локомотивів з двоосними візками), можуть бути доповнені ще одним конструктивним рішенням, спрямованим на поліпшення використання зчипної маси локомотива.

Застосування довантажувача не призводить до повного вирівнювання навантажень, які передаються колісними парами на рейки. У кращому випадку, при проектуванні, та розміщенні довантажувача можна нейтралізувати діяння додаткових навантажень, що виникають в опорних точках колісно-моторного блока. При розташуванні шкворня візка на висоті m_k (рис. 1.7), це будуть сили $F_{13}, F_{24}, F_{k1}, F_{k2}$, тобто, перші доданки у формулах

$$F_{13} = \frac{m_k}{L} K_{13} K_{14} K_{15} K_{16} ; \quad (1.30)$$

$$F_{24} = \frac{m_k}{L} K_{23} K_{24} K_{25} K_{26} . \quad (1.31)$$

У цих формулах індекси 1-4 позначають номери колісних пар візків, а інші позначення відповідають рис. 1.7.м

Зазначені вище сили F_{k1}, F_{k2} можна нейтралізувати моментом M_{k1}, M_{k2} ,

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 23 |

прикладеним до рами візка. При цьому протилежний за напрямом момент буде прикладений до головної рами локомотива. Такий же момент опиниться прикладеним до головної рами і в зоні розміщення іншого (заднього) візка. Сума цих моментів і моменту M , що діє на головну раму внаслідок прикладення сили тяги P на осі автосцепу, буде дорівнювати PL . В результаті головна рама буде перевантажувати колісні пари заднього візка, та розвантажувати першу та другу колісні пари силами $1/2 PL$ та $3/4 PL$, тобто буде мати місце ситуація, яка



Рисунок 1.7 – Схеми перерозподілу навантажень від колісних пар двоосних візків на рейки:

а) при двоступінчастому пружному підвішуванні; б) при застосуванні довантажувача, що передає момент M на раму візка;

L – відстань між серединами візків; P – зусилля, що створює навантажувач

спостерігалася у випадку одностороннього розташування тягових

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

електродвигунів у тривісних візках (рис. 1.4 та 1.5):

$$z_{ч.к.} \quad (1.30)$$

де

$$z_{ч.к.к.тач.} \quad (1.31)$$

Таким чином, максимальне значення коефіцієнта використання зчіпної маси, яке можна стримати для розвантажених колісних пар за допомогою довантажувачів, можна виразити формулою:

$$u_{тач.} = \frac{K_{тач.}}{c_{т}} \quad (1.32)$$

де n – кількість розвантажених колісних пар.

Якщо довантажувач, розміщений за спрощеною схемою (рис. 1.8) по типу візка, то сила P , що діє на раму візка від механізму довантажувача, визначається за умови рівності додаткового навантаження, що передається на передню колісну пару, та розвантаження

$$P_{кп} = K \quad (1.33)$$

від дії тягового привода.



Рисунок 1.8 – Схема розташування довантажувача, що передає навантаження на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 25 |

зовнішню поперечну балку рами візка (спрощений варіант):

δ – відстань від довантажувача до середини візка

У цьому випадку

$$\frac{\delta}{L}, \quad (1.34)$$

звідки

$$\frac{K_{пк} K_{\delta}}{\delta}. \quad (1.35)$$

Залежно від напрямку руху локомотива включаються в дію відповідні довантажувачі.

1.6 Аналіз підвищення стабільності тягових якостей локомотива за розрахунок застосування поліпшених електромеханічних характеристик тягового привода

Під час роботи потужного локомотива, що розвиває велике тягове зусилля, відбувається перерозподіл ваги між його колесами. Наприклад, у тепловозів із певними типами візків, таких як 2TE10Л(В) чи М62, колеса, розташовані під першою, другою та четвертою осями, можуть розвантажуватися, в той час як третя, п'ята та шоста осі зазнають перевантаження. Такі зміни можуть досягати 20% від вихідної статичної ваги. На більших швидкостях до цього ефекту додається динамічна взаємодія коліс з нерівностями колії.

Враховуючи також немінучі відмінності в характеристиках окремих тягових двигунів на одному локомотиві та різній стан поверхні рейок під кожним колесом, створюються умови для проковзування (буксування) однієї або кількох осей. Воно виникає, коли тягове зусилля на певному колесі перевищує силу його зчеплення з рейкою.

У локомотива з двигунами послідовного збудження буксування однієї осі веде до зменшення струму її двигуна. Це, за гіперболічною характеристикою тягового генератора, викликає падіння його струму та зростання напруги. Підвищена напруга, в свою чергу, подається на всі двигуни, що змушує зростати

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

струм і тягу на тих осях, які ще не буксували. Це може спровокувати ланцюгову реакцію та викликати буксування вже всіх коліс. Така поведінка характерна, зокрема, і для тепловозів зі змінно-постійним струмом, як 2ТЕ116.

Для запобігання поширенню буксування необхідно, щоб у момент його виникнення тяговий генератор працював за так званою жорсткою характеристикою, підтримуючи сталу напругу, на відміну від звичайної гіперболічної залежності.

Для вирішення цієї проблеми для тепловоза 2ТЕ10Л була запропонована експериментальна електрична схема. Її принцип полягав у тому, що система регулювання збудження генератора керувалася не сумарним струмом усіх тягових двигунів, а струмом двигуна на найбільш навантаженій, не буксувальній осі. Це дозволяло зберігати жорсткість характеристики генератора навіть тоді, коли в безпечному режимі працювала лише одна вісь.

Схема також включала вдосконалену систему виявлення буксування. Для підвищення чутливості реле буксування підключалося не тільки до обмоток головних, але й додаткових полюсів двигунів, що особливо ефективно при ослабленому магнітному полі. Додатковий опір у колі реле запобігав надмірній чутливості при повному полі. Випробування підтвердили переваги цього рішення: коефіцієнт тяги при старті та розгоні виріс на 15%, режим роботи став стабільнішим, а буксування, як правило, обмежувалося окремими осями та швидко припинялося. Незважаючи на успіх, подальша доля цієї експериментальної схеми невідома.

Цей приклад ілюструє важливість комплексного підходу до вдосконалення конструкції, коли механічні недоліки можна компенсувати електричними та електромеханічними засобами.

Серед інших перспективних напрямів поліпшення тягових якостей можна відзначити локомотиви з двигунами незалежного збудження, які мають більш жорсткі характеристики та виключають небезпечне "розносне" буксування, що пошкоджує двигуни. Майбутнє за локомотивами з асинхронними тяговими двигунами та змінним струмом, які володіють унікальними властивостями. Досвід спільної розробки українського електровоза ДСЗ з компанією Siemens показує, що

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 27 |

паралельне включення таких двигунів робить буксування практично неможливим при роботі на розрахунковій частоті. Подібна передача для тепловозів може забезпечити значно вищий коефіцієнт тяги, властивий груповому приводу.

Також існує методологія поліпшення зчеплення, що базується на цільовій функції, яка враховує взаємозалежність основних факторів, що впливають на силу тяги. Розроблений метод дозволяє підвищити тягово-зчіпні якості за рахунок керування навантаженням на осі, селективного підбору характеристик двигунів для кожної пари коліс з урахуванням нерівномірності зчеплення, що мінімізує ковзання в контактні колеса з рейкою та відповідні втрати енергії. Ці та інші особливості потребують ретельного та вибіркового врахування при проектуванні характеристик нових локомотивів.

Існує метод поліпшення зчеплення коліс з рейками на основі цільової функції, яка відображає взаємозалежність основних факторів, які впливають на реалізовану силу тяги:

$$\left| \sum_{i=1}^n \frac{z_{ч} \max i}{\max i} \right| \left| \sum_{i=1}^n \frac{об\ i \cdot об_{\dots} \cdot p}{v\ i \cdot k\ i \cdot e\ i \cdot \max\ i \cdot \frac{кр}{i}} \right| \quad (1.35)$$

де $об\ i_{(\dots)}$ – обертальний момент ТЕД окремої колісної пари;

- $об$ – частота обертання;
- \dots – магнітної потік;
- \dots – сила струму ТЕД,
- \dots – довжина струмопроводів;
- \dots – питомий опір струмопроводів;
- \dots – відхилення обертального моменту тягового електродвигуна від номінального значення в межах допуску на його відхилення;
- \dots – кількість осей локомотива;
- \dots – передаточне число тягового редуктора;
- p – ККД тягового редуктора;

d – діаметр колеса;

$v_i(k_i e_i)$ – вертикальне навантаження на вісь, яке залежить від

статичного та динамічного перерозподілу навантажень,
конструктивних параметрів локомотива k_i та
експлуатаційних факторів e_i ;

μ_i^{max} – максимальний коефіцієнт зчеплення, який досягається

при критичному ковзанні $\frac{kp}{i}$.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 29 |

2 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЧІПНОЇ ВАГИ ТЕПЛОВОЗА

2.1 Розрахунок коефіцієнта використання зчіпної ваги тепловоза на математичній моделі

Для підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги тепловоза також запропоновано систему регулювання потужності окремих колісно-моторних блоків секції тепловоза, тобто за мету прийнято зрівнювання значень розвантаження колісних пар за рахунок регулювання потужності ТЕД. Для цього визначено розвантаження та коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза (табл. 2.1, рис. 2.1).

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза

| Швидкість v , км/год | k | Коефіцієнт використання зчіпної ваги по номеру колісної пари | | | | | |
|---------------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |

З графіка (рис. 2.1) бачимо, що найбільш розвантаженою є перша колісна пара по напрямку руху, а найбільш навантажена – четверта.

Для підвищення зчіпних властивостей автор пропонує систему регулювання сили тяги окремих колісно-моторних блоків за допомогою пускових реостатів (рис. 2.2).

Оптимальний розподіл потужності між КМБ, який має задавати номінал реостатів. Номінальні значення активних опорів обмоток тягового електродвигуна

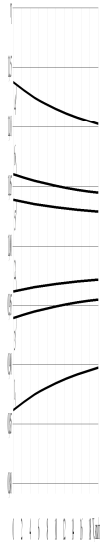


Рисунок 2.1 – Коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза



Рисунок 2.2 – Схема підключення пускових реостатів

ТЕ-006 при температурі 200°С складають:

- обмотка якоря 0,0135 Ом;
- обмотка головних полюсів 0,0105 Ом;
- обмотка додаткових полюсів 0,00821 Ом.

Розподіл сили тяги (струмів) КМБ має бути пропорційний коефіцієнту використання зчіпної ваги (табл. 2.1). Визначення оптимальних значень коефіцієнтів потужності i виконано за методами оптимізації MS Excel (пошук рішення) для системи рівнянь

$$\frac{i \cdot n_{\delta}}{\sum_{1}^{12} i_{\delta}} \quad (2.1)$$

де \dots – цільовий показник оптимізації.

З врахуванням обмежень (по зчепленню коліс з рейками, потужності дизеля та пускових струмів генератора) оптимальне значення показника \dots . Після підстановки значень в систему рівнянь отримано розподіл сили тяги КМБ (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Оптимальний розподіл сили тяги КМБ

| Швидкість v , км/год | k | Сила тяги КМБ по номеру колісної пари, кН | | | | | | $\sum_{1}^{12} i_{\delta}$, кН |
|------------------------|-------|---|------|------|------|------|------|---------------------------------|
| | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | |
| 9 | 9,999 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 999 |
| 9 | 9,999 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 999 |
| 99 | 9,999 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 999 |
| 99 | 9,999 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 999 |
| 99 | 9,999 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 999 |

Перерозподіл потужності призводить до зміни коефіцієнта використання зчіпної ваги. Розраховані значення коефіцієнта використання зчіпної ваги наведено в табл. 2.3 та на рис. 2.3.

Оцінку підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги (табл. 1.4.) можна в % виконано за формулою:

$$\frac{k_{ij}}{\sum_{1}^{12} \frac{i_j}{i_j}}, \quad (2.2)$$

де v , k – відповідно швидкість та номер колісної пари з табл. 2.1 та табл. 2.3.

Таким чином, середнє значення підвищення коефіцієнта використання

Таблиця 2.3 – Підвищений коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза

| Швидкість v , км/год | K | Коефіцієнт використання зчіпної ваги по номеру колісної пари | | | | | |
|---------------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |

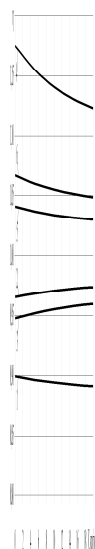


Рисунок 2.3 – Коефіцієнт використання зчіпної ваги окремих колісних пар секції тепловоза з врахуванням регулювання сили тяги окремих КМБ

зчіпної ваги $G_{\text{зч}}$ склало 0,89% для значення опору пускових резисторів (табл. 2.5).

Підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги K призвело до поліпшення тягових властивостей тепловоза в зоні обмеження по зчепленню коліс з рейками. Залежність $K_{\text{зч}}$ для $v_{\text{підв.}}$ км/год наведено на рис. 2.4 з оцінкою підвищення сили зчеплення з використанням формули:

Таблиця 2.4 – Підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги K

| Швидкість v , км/год (.) | Номер колісної пари (.) | | | | | | Середнє значення |
|-------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 9 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| 99 | -9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| Середнє значення | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |

Таблиця 2.5 – Оптимальне значення опору пускових резисторів

| Показник | Опір пускового резистора по номеру колісної пари, кН | | | | | |
|------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| TED , Ом | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 |
| P , Ом | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 | 9,9999 |



Рисунок 2.4 – Обмеження по зчепленню коліс з рейками $zч_{i,оп}$

$$zч_{i,оп} = \sum_{j=1}^k \frac{zч_{ij} \cdot zч_{ji}}{zч_{ij}} ; \quad (2.3)$$

$$Z_{\Sigma} = \sum_{k=1}^k \frac{1}{Z_k} \cdot$$

Перерозподіл струмів ТЕД призводить до постійного спрацьовування реле боксування ББ-320А, тому його використання є недоцільним. Ми пропонуємо використати цифрову систему визначення боксування на підставі порівняння частот обертання колісних пар.

2.2 Аналітичний розрахунок коефіцієнта використання зчпної ваги локомотива при модернізації електричної схеми керування тяговими електродвигунами

Розглядаючи схему сил і моментів, наведену на рис. 1.6, визначаємо величину M_{Σ} та $M_{\Sigma}^{пр}$.

$$M_{\Sigma} = \dots, \quad (2.4)$$

де r_{Σ} – радіус шестерні колісної пари;

$$M_{\Sigma}^{пр} = \dots; \quad (2.5)$$

$$M_{\Sigma}^{пр} = \dots, \quad (2.6)$$

де a_{Σ} – відстань між віссю колісної пари та опорою ТЕД;

$$M_{\Sigma}^{пр} = \dots, \quad (2.7)$$

де l_{Σ} – довжина централі;

$$M_{\Sigma}^{пр} = \dots; \quad (2.8)$$

$$M_{\Sigma}^{пр} = \dots, \quad (2.9)$$

де a_{Σ} – відстань між віссю вала та опорою ТЕД.

З врахуванням того, що $\omega_{ос.я}$

$$\omega_{ос.я}; \quad (2.10)$$

$$\omega_{пр.я}. \quad (2.11)$$

Знаходимо величини ω_0 та $\omega_{пр}$

$$\omega_0 = \omega_{ос} \cdot \frac{d_{к.я}}{d_{к.г}}; \quad (2.12)$$

$$\omega_0 \cdot \frac{d_{к.г}}{d_{к.я}}; \quad (2.13)$$

$$\omega_{пр} = \omega_{пр} \cdot \frac{d_{к.я}}{d_{к.г}}. \quad (2.14)$$

Проведемо оцінку величини цих реакцій. Якщо прийняти величину сили тяги, що розвивається однією колісною парою $F_{кп}$, а діаметр колеса $d_{к.г}$, то величина обертового моменту на валу ГЕД складе:

$$M_{я} = \frac{F_{кп} \cdot d_{к.г}}{2}, \quad (2.15)$$

де $i_{пр}$ – передаточне відношення тягового редуктора;

$\eta_{дв}$ – ККД тягового електродвигуна, $\eta_{дв} = 0,92$.

$$M_{я} = 10,4 \text{ Нм.}$$

З врахуванням величин геометричних параметрів передачі $r_1 = 0,374 \text{ м}$, $r_2 = 0,92 \text{ м}$, $r_3 = 0,469 \text{ м}$, $r_4 = 0,451 \text{ м}$, отримуємо:

$$F_{кп} = 20,8 \text{ кН};$$

$$F_{пр} = 20,8 \text{ кН.}$$

Розрахункова схема наведена на рис. 2.5.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 36 |

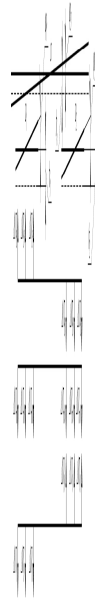


Рисунок 2.5 – Схема визначення сил, що викликають перерозподіл навантажень між колісними парами тривісного екіпажу

Визначаємо деформації пружин підвішування:

$$I_{111}; \quad (2.17)$$

$$II_1; \quad (2.17)$$

$$III_{112}; \quad (2.18)$$

$$IV_{222}; \quad (2.19)$$

$$V_2; \quad (2.20)$$

$$VI_{221}; \quad (2.21)$$

$$3_{K_{(1)}(2-2)}; \quad (2.22)$$

$$4_{K_{(1)}(2-2)}; \quad (2.23)$$

$$1_{K_{(1)}(1-1)}; \quad (2.24)$$

$$2_{K_{(1)}(1-2)}; \quad (2.25)$$

Позначивши жорсткість буксового підвішування колісних пар з урахуванням жорсткості гасителів коливань b Н/мм, знаходимо величини зміни навантажень на пружні елементи.

$$I \cdot b_{111}; \quad (2.26)$$

$$II \cdot b_1; \quad (2.27)$$

$$III \cdot b_{121}; \quad (2.28)$$

$$IV \cdot b_{222}; \quad (2.29)$$

$$V \cdot b_2; \quad (2.30)$$

$$VI \cdot b_{222}; \quad (2.31)$$

$$k_1 \cdot k_{k_1} \cdot k_{11}; \quad (2.32)$$

$$k_2 \cdot k_{k_2} \cdot k_{11}; \quad (2.33)$$

$$k_3 \cdot k_{k_3} \cdot k_{22}; \quad (2.34)$$

$$k_4 \cdot k_{k_4} \cdot k_{22}. \quad (2.35)$$

Для визначення значень діючих сил складаємо рівняння рівноваги:

— для першого візка

$$mI \cdot mII \cdot mIII \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot o; \quad (2.36)$$

$$\frac{mI \cdot mIII \cdot 2 \cdot o_1 \cdot o_2}{k_1 \cdot k_2 \cdot d \cdot u}; \quad (2.37)$$

— для другого візка

$$mIV \cdot mV \cdot mVI \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot o; \quad (2.38)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.P3 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 38 |

$$\begin{aligned} & m_{IV} z_{mVI} a_{3.04} \\ & k_3 \dots k_4 \dots \delta u \end{aligned} \quad (2.39)$$

— для кузова

$$k_1 k_2 k_3 k_4 ; \quad (2.40)$$

$$k_1 k_2 k_3 k_4 \delta u . \quad (2.41)$$

Оскільки локомотив симетричний та 1.2.3.4 , то k_1 ; 1.2 та 1.2 . Таким чином, система з шести рівнянь приводиться до трьох з трьома невідомими 1 , 1 та k .

$$1 \left(\frac{b}{k} \right) k_1 k_2 k_3 k_4 \delta u ; \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} & k_1 \left(\frac{b}{k} \right) k_2 k_3 k_4 \delta u \\ & k_1 k_2 k_3 k_4 \delta u \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$1 \left(\frac{b}{k} \right) k_2 k_3 k_4 \delta u \quad (2.44)$$

Приймаючи δ кН; b Н/мм; k Н/мм; r мм; r_1 мм; r_2 мм; u мм, геометричні параметри екіпажу r_1 м; r_2 м; r_3 м; r_4 м, знаходимо: $1.2 = 4$ м; $1.2 = 8 \delta = 3$ рад; $k = 8 \delta = 3$ рад.

Розраховуємо величини додаткових зусиль на вісі колісних пар:

$$m_{I} \dots m_{VI} \delta ; \quad (2.45)$$

$$m_{II} \dots m_{V} \delta ; \quad (2.46)$$

$$m_{III} \dots m_{IV} \delta ; \quad (2.47)$$

$$k_1 \dots k_4 \delta ; \quad (2.48)$$

$$k_2 \dots k_3 \delta . \quad (2.49)$$

Результуючі величини навантажень на вісі колісних пар дорівнюватимуть:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

$$I-VI \left(mI \cdot o \right) \cdot \partial \cdot \partial ; \quad (2.50)$$

$$II-V \left(mII \cdot o \right) \cdot \partial \cdot \partial ; \quad (2.51)$$

$$III-IV \left(mIII \cdot o \right) \cdot \partial \cdot \partial . \quad (2.52)$$

Таким чином, найбільш розвантаженою колісною парою є перша по ходу руху тепловоза. Величина коефіцієнта використання зчіпної ваги становить:

$$\frac{I}{I} , \quad (2.53)$$

або з врахуванням

$$34 \cdot 34 \cdot k , \quad (2.54)$$

де k – коефіцієнт зчеплення колісних пар з рейками,

$$K = \frac{1}{2377} , \quad (2.55)$$

отримаємо для першої колісної пари при швидкості ... км/год

$$\dots K ; \quad (2.56)$$

•

Для інших колісних пар результати зводимо в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунків коефіцієнта використання зчіпної ваги окремих колісних пар тепловоза

| | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Номер колісної пари | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Значення коефіцієнта використання зчіпної ваги | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |

2.3 Визначення підвищення тягових властивостей тепловозів

Підвищення коефіцієнта використання зчіпної ваги ... призведе до

поліпшення тягових властивостей тепловоза в зоні обмеження по зчепленню коліс з рейками. Виконаємо побудову $z_{ch_{opt}}$ для v_{max} км/год (рис. 2.6) та виконаємо оцінку підвищення сили зчеплення

$$z_{ch_{opt}} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^k \frac{z_{ch_i} \cdot z_{ch_i}}{z_{ch_i}}, \quad (2.57)$$

де m – кількість КМБ, $m=6$;

k – кількість діапазонів швидкостей, $k=3$;

z_{ch_i} – розрахункова сила тяги модернізованого тепловоза, кН;

z_{ch_i} – сила тяги тепловоза прототипа, кН.

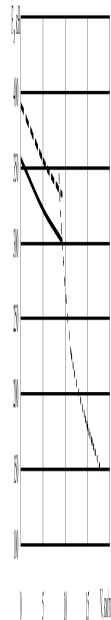


Рисунок 2.6 – Порівняння тягових характеристик:

- – сила обмеження по зчепленню базового тепловоза;
- - - - - сила обмеження по зчепленню проєкуємого тепловоза;
- – автоматична тягова характеристика тепловоза

$$z_{ch_{opt}} = \sum_{i=1}^m \left| \sum_{k=1}^k \left| \sum_{l=1}^k \left| \sum_{n=1}^k \left| \frac{z_{ch_i} \cdot z_{ch_i}}{z_{ch_i}} \right. \right. \right. \right. \cdot$$

Отже, можна стверджувати, що в діапазоні швидкостей 0-9,3 км/год тягові

властивості тепловоза мають збільшитись на 5,5%. Щодо всього діапазону швидкостей, обмежених конструктивною, то тягові властивості мають збільшитись на 0,54%.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 42 |

3 РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОВОЗІВ

Пропонується модернізувати електричну схему керування тяговими електродвигунами, щоб регулювати силу тяги окремих колісно-моторних блоків шляхом зміни магнітного потоку їх збудження.

3.1 Огляд роботи електричної схеми керування тяговими електричними машинами під час пуску тепловоза

3.1.1 Робота електричної схеми

Робота схеми на старті та під час руху починається з першої позиції контролера. На цій позиції замикаються контакти КМ2 та КМ7 головного барабана (рис. 3.1), які залишаються увімкненими з першої по восьму позицію. У цьому режимі електричний струм проходить такий шлях: через замкнуті контакти КМ2 та КМ7, далі через контакти КД11 і КД21, після чого проходить діод Д1. Потім струм надходить на контакти вимикачів тягових двигунів ОМ11, ОМ21 та ОМ31 і протікає через котушки поїзних контакторів КП1, КП2 та КП3, звідки прямує на негативну клему допоміжного генератора. Одночасно, через резистор Р60, частина струму йде на зарядку конденсатора С9, який підключено паралельно котушкам контакторів КП1 та КП3.

Після включення контакторів КП1-КП3 збирається коло живлення котушки контактора збудження тягового генератора: контакти КПП, контакти КП21, контакти КП31, замкнуті контакти блокування верхніх дверей БК1 апаратної камери, замкнуті контакти блокування нижніх дверей БК2, контакти Р32 реле заземлення РЗ, замкнуті контакти електропневматичного клапана автостопа (рис. 3.1), контакти Р12 проміжного реле Р1 апаратури АЛС, контакти реле тиску повітря РДВ, котушку контактора КБ, загальний «мінус». Таким чином, тяговий генератор отримує збудження після включення поїзних контакторів КП1 – КП3, тобто при зібраному силовому колі руху тепловоза.

За рахунок розрядки конденсатора С9 відключення контакторів КП1 – КП3

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 43 |



Рисунок 3.1 – Кола керування реверсором та поїзними контакторами

при переводі головної рукоятки контролера на нульову позицію затримується на 1-2 секунди й відбувається після відключення контактора КБ, тобто після зняття збудження з тягового генератора (рис. 3.1). Це зроблено для зменшення підгорання силових контактів поїзних контакторів. Діод Д1 запобігає розрядці конденсатора С9 на котушку контактора КВ.

Кола збудження збуджувача і тягового генератора представлені на рис. 3.2.

Після вмикання контактора КВ запускається процес збудження збуджувача, який спочатку є незалежним, а згодом переходить у самозбудження. Коло незалежного збудження формується так: струм від допоміжного генератора через контакти КМ7 потрапляє на затискач К1, далі проходить через замкнуті контакти КВ2, резистори 1181 та Я82, контакти ВВ02 перемикача «Регулятор потужності» і надходить у незалежну обмотку (11) збуджувача, звідки повертається на «мінус»

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 44 |

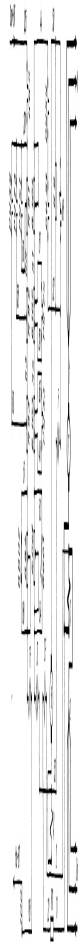


Рисунок 3.2 – Кола збудження збуджувача й тягового генератора

допоміжного генератора.

Магнітний потік, створений цією обмоткою, призводить до індукції електрорушійної сили в обертовій якірній обмотці збуджувача. Після цього замикається коло самозбудження: струм від позитивної клеми збуджувача йде через силові контакти контактора КВ, контакти РУ51 і РУ54 (реле РУ5 активується лише після включення КВ, коли реверсивна рукоятка переведена з «Пуску» у робоче положення), резистори Л101, Я102, Я103, реостат ЯРМ регулятора потужності, в обмотку паралельного збудження збуджувача, а потім через перемичку та обмотки додаткових полюсів повертається на «мінус» збуджувача. На момент старту тепловоза частини резисторів Я102 та Я103 виведені з ланцюга розмикаючими контактами РУ24 і РУ33.

Основний струм збуджувача подається в незалежну обмотку збудження тягового генератора. Пройшовши через неї та через обмотки додаткових полюсів

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 45 |

збуджувача, він повертається на його «мінус». Паралельно силовим контактам контактора КВ встановлений резистор Я9, який виконує роль розрядного та призначений для обмеження е.р.с. самоіндукції, що виникає при вимкненні КВ. Отримавши збудження, тяговий генератор починає жити силові кола.

Розглянемо протікання струму в силових колах при русі тепловоза вперед (рис. 3.3). Від позитивного полюса тягового генератора по трьом кабелям струм подається на загальну шину. Далі він розподіляється по трьом паралельних гілках: через замкнуті силові контакти контактора КП1 (2, 3), обмотки якорів та додаткових полюсів першого і другого тягових електродвигунів, силові контакти реверсора, обмотки збудження другого і першого тягових електродвигунів, знову через силові контакти реверсора, і далі на шину 2.

Обидві шини (загальна та шина 2) підключені до мінусової клеми шунта амперметра А1, від якої струм повертається на «мінус» тягового генератора, проходячи за трьома кабелями та через обмотку додаткових полюсів його самого.

Струм, що проходить через обмотки тягових електродвигунів, створює обертальний момент на валах їх якорів. Цей момент через тягові редуктори передається на колісні пари тепловоза, змушуючи його рухатися.

3.1.2 Конструкція та робота тягових електродвигунів

Тягові електродвигуни на тепловозі розміщені безпосередньо в рамах візків. Це накладає обмеження на їх габарити, позбавляє захисту кузова та піддає їх постійним динамічним навантаженням через нерівності колії. Такі умови експлуатації визначають особливі вимоги до їх конструкції: підвищену міцність, герметичність для захисту внутрішніх вузлів від забруднення, ефективну систему охолодження, здатність витримувати перевантаження та надійну ізоляцію. На тепловозах ЧМЕЗ застосовуються двигуни типу ТЕ-006. Це чотириполюсні машини постійного струму з послідовним збудженням, примусовою вентиляцією та опорно-осьовим кріпленням. Використання саме послідовного збудження забезпечує оптимальну тягову характеристику, завдяки чому максимальний обертальний момент досягається під час старту та руху на найнижчих

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |



Рисунок 3.3 – Силкові кола тепловоза

швидкостях.

До основних складових частин електродвигуна (рис. 3.4) відносяться: остов, підшипникові щити, головні та додаткові полюси, якір і щіткова система. Остов (9) виготовлений зі спеціальної сталі, що поєднує високу механічну міцність з добрими магнітними властивостями.

З одного боку остов має оброблені приливи для встановлення вкладишів

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |

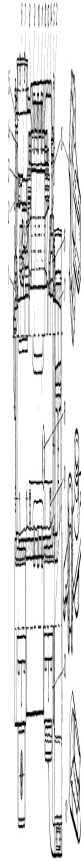


Рисунок 3.4 – Тяговий електродвигун типу ТЕ-006 (поздовжній і поперечний розрізи)

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 48 |

Позначення до рис. 3.4: 1, 16 – роликові підшипники; 2 – трубка підведення масла; 3 – траверса; 4, 15 – передній і задній підшипникові щити; 5, 21 – болти; 6 – колектор; 7 – зрівнювальні з'єднання; 8, 14 – передня і задня натискні шайби; 9 – остов; 10 – вал якоря; 11 – сердечник якоря; 12 – головний полюс; 13 – обмотка якоря; 17 – привідна шестерня; 18 – рим-болт; 19 – накладка; 20 – шапка моторно-осьового підшипника; 22, 24, 26 – кришки; 23 – кожух тягового редуктора; 25 – додатковий полюс; 27 – щіткотримач; 28 – носик

моторно-осьових підшипників, а з іншого – два виступи (носики) (28) для кріплення пружинної підвіски, через яку двигун спирається на раму візка. На торцях остова розточені отвори діаметром 580 і 630 мм для встановлення переднього та заднього підшипникових щитів. З боку колектора в корпусі виконані чотири люки: три для огляду колектора та щіток і один для підведення повітря системи охолодження. Оглядові люки закриті знімними кришками з ущільнюючими прокладками. Верхня кришка (22) фіксується пружинним замком, а бічна (26) та нижня (24) кришки – чотирма болтами М12 кожна.

У верхній частині остова є два глухих різьбових отвори під римболти (18) (М42), які використовуються для транспортування двигуна під час ремонтних робіт. Після монтажу колісно-моторного блоку римболти виймають, а отвори заглушують пробками. З боку шестерні в торці остова передбачені чотири вікна для виходу охолоджуючого повітря.

До внутрішніх оброблених приливів корпусу болтами прикріплені чотири головні (12) та чотири додаткові (25) полюси. Для захисту від потрапляння вологи верхні болтові з'єднання залиті компаундом. Сердечник головного полюса зібраний з 328 листів електротехнічної сталі товщиною 1 мм, ізолюваних один від одного лаком. Листи стиснуті та скріплені чотирма заклепками діаметром 16 мм, кінці яких приварені до сталевих накладок – пластин товщиною 15 мм, поставленим по кінцях пакета. У центральний отвір сердечника запресований сталевий циліндричний стрижень діаметром 42 мм з трьома різьбовими отворами М24 під кріпильні болти. Котушка головного полюса намотана з 18 витків смуговий міді.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 49 |

Момент обертання в ТЕД виникає в результаті проходження провідників зі струмом, вкладених в пазах якоря в магнітному полі, що створюється основними полюсами двигуна. Він залежить від величини магнітного потоку та сили струму, що проходить по обмотках якоря та визначається за формулою:

$$M = m \cdot \Phi \cdot I, \quad (3.1)$$

де m – постійний коефіцієнт, який враховує кількість пар полюсів, кількість витків якоря та інші параметри даного електродвигуна.

Частота обертання якоря ТЕД – функціональна залежність, що пропорційна е.р.с двигуна та зворотнопропорційна магнітному потоку

$$n = \frac{e}{\Phi}, \quad (3.2)$$

де e – постійний для даного електродвигуна коефіцієнт, що залежить від діаметра якоря, кількості провідників обмотки та інших конструктивних особливостей двигуна.

З врахуванням

$$\Phi = \frac{U}{k \cdot n}, \quad (3.3)$$

частота обертання визначається

$$n = \frac{U}{e \cdot \Phi}. \quad (3.4)$$

На локомотивах застосовуються ТЕД послідовного збудження з декількома ступенями ослаблення поля. Струм, що проходить через обмотку збудження дорівнює або пропорційний струму якоря.

Магнітний потік Φ , що створюється основними полюсами електродвигуна визначається за формулою:

$$\Phi = \frac{I \cdot W}{R}, \quad (3.5)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 50 |

де Φ – полюсна дуга, тобто зона дії пари полюсів.

$$F_{\text{маг}} = \frac{2 \cdot \Phi \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\pi \cdot g} \quad (3.6)$$

Сила намагнічування полюсів дорівнює сумі магнітних напружень на ділянках магнітного кола та сили розмагнічування якоря

$$F_{\text{маг}} = \frac{2 \cdot \Phi \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\pi \cdot g} \quad (3.7)$$

та залежить від кількості витків N обмотки полюса та струму, що проходить по них.

$$F_{\text{маг}} = \frac{2 \cdot \Phi \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\pi \cdot g} \quad (3.8)$$

Під час роботи машини змінним параметром є струм збудження. Залежність магнітного потоку машини від намагнічуючої сили або струму має нелінійний характер. До того ж намагнічувальна характеристика холостого ходу та навантажувальна характеристика мають розбіжність за рахунок розмагнічуючої сили якоря (рис. 3.5).

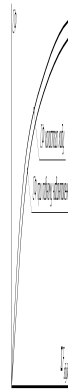


Рисунок 3.5 – Намагнічувальні характеристики ТЕД

Для розрахунку потужності ТЕД як функції частоти обертання та моменту

$$P_{\text{ТЕД}} = M \cdot \omega \quad (3.9)$$

пропонуємо використовувати чисельні значення змінних виразів (3.2) та (3.5), що отримуються датчиками при роботі машини.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 51 |

3.3 Розробка системи підвищення тягових властивостей тепловозів

Систему окремого навантаження колісно-моторних блоків тепловоза пропонуємо до розробки на підставі залежностей моменту обертання на валу ТЕД та частоти обертання якоря ТЕД.

Зміни обертового моменту можна досягти варіативним плавним коригуванням магнітного потоку основних полюсів.

На підставі табл. 2.5 можна стверджувати, що найбільше можна навантажувати четверту колісну пару (саме вона буде мати найбільший магнітний потік збудження, приймаємо його рівним одиниці), а найменше – першу у відповідному процентному співвідношенні (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Перерахунок магнітного потоку окремих ТЕД

у відсотках

| Номер колісної пари | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Значення перерозподілу магнітного потоку | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |
| Скориговані значення перерозподілу магнітного потоку | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 | 9,999 |

Але електрична схема силових кіл не дозволяє окремо змінювати магнітний потік 1 та 2; 3 та 4; 5 та 6 тягових електродвигунів. Тому для вказаних суміжних ТЕД обираємо менше значення магнітного потоку (скориговані).

З урахуванням того, що без боксування частоти обертання усіх колісних пар однакові, то обчислюємо лише відповідні моменти обертання для різних значень магнітного потоку.

Для коригування магнітного потоку пропонуємо додати до системи ослаблення збудження шунтуючий IGBT транзистор (рис. 3.6).

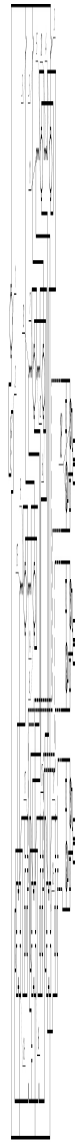


Рисунок 3.6 – Модернізована електрична схема силових кіл тепловоза:
 1 – тяговий генератор; 2 – обмотка збудження тягового генератора; 3 – поїзні контактори; 4-9 – тягові електродвигуни; 10-15 – обмотки збудження тягових електродвигунів; 16 – реверсор; 17 – система ослаблення збудження; 18 – IGBT транзистори

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 53 |

4 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЗЧПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

В сучасних умовах збільшення обсягів перевезень та зростання вартості споживаних ресурсів, забезпечення стійкого фінансового становища залізниць нерозривно пов'язане з рішенням проблеми подовження строку експлуатації тепловозів.

Кожна галузь залізниці представляє конкретні заходи щодо подовження строку експлуатації та методи їх реалізації.

Впровадження на залізничному транспорті новітніх технологій, що забезпечують перетворення потенційних досягнень науково-технічного прогресу в реальні, як правило, пов'язано з економічними проблемами, тобто раціоналізації використання всіх видів матеріальних, технічних, трудових, вартісних (фінансових) та інших ресурсів.

4.1 Визначення витрат до впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів

При експлуатації локомотивів, особливо в умовах важкого профілю колії при великих масах поїзда, колісні пари зменшують свій ресурс досить швидко за рахунок боксування під час рушання з місця на додатних ухилах. В першу чергу зносу підлягають бандажі в зоні кола катання, що зумовлює зменшення інтервалів роботи між обточуванням бандажів та заміну останніх.

Вартість одного бандажа колісної пари для тепловоза ЧМЕЗ складає 31000 грн. Депо в середньому за рік витрачає на ремонт колісних пар з перекомплектуванням складальних одиниць, враховуючи обточування витрачає 762936,13 грн. Приписний парк тепловозів серії ЧМЕЗ складає 18 секцій.

4.2 Розрахунок витрат на впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів

Очікувана вартість системи регулювання потужності КМБ зі встановленням на тепловоз становить 42 тис грн.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>0032.200172.000.03MP.ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 54 |

При комплектуванні одного тепловоза залучені слюсарі п'ятого розряду.

Час, що витрачається встановлення та налаштування одного комплекту системи регулювання потужності КМБ складає 36 год.

Матеріальні витрати M на встановлення та налаштування одного комплекту системи регулювання потужності КМБ складають

$$M_{\text{мат}}, \quad (4.1)$$

де $M_{\text{мат}}$ – витрати на систему регулювання потужності КМБ, $M_{\text{мат}}=42000$ грн;

n – кількість систем регулювання потужності КМБ на один тепловоз, $n=1$.

$$M_{\text{мат}} \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці z/n слюсарів складають

$$z/n_{\text{факт}}, \quad (4.2)$$

де z – годинна тарифна ставка слюсаря п'ятого розряду, $z=67,92$ грн/год;

n – фактичний час роботи, $n=36$ год.

$$z/n_{\text{факт}} \text{ грн.}$$

Відрахування до соціальних фондів $сс$ складають

$$сс \cdot z/n_{\text{факт}}, \quad (4.3)$$

$$сс_{\text{факт}} \text{ грн.}$$

Амортизація $відр$ на проведення ремонту складає

$$відр \frac{\text{перв лікв}}{\text{перв корч}}, \quad (4.4)$$

де $перв$ – балансова вартість основних засобів, що використовуються для

встановлення системи регулювання потужності КМБ (зварювальний апарат, електродриль тощо), $перв=7500$ грн;

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 55 |

лікв – ліквідаційна вартість основних засобів, *лікв*=1000 грн;
кор.в – термін корисного використання основних засобів, *кор.в*=2 роки.

відр _____ грн.

Прямі витрати *прям* складають суми вище перерахованих

прям.м.з/п.сс.відр, (4.5)

прям _____ грн.

Витрати на утримання загально виробничого та адміністративного персоналу *заг.вир*

заг.вир.прям, (4.6)

заг.вир _____ грн;

заг.госп.прям, (4.7)

заг.госп _____ грн.

Собівартість комплектування тепловоза _____ складає

прям.заг.вир.заг.госп, (4.8)

_____ грн.

Для комплектування тепловозів серії ЧМЕЗ всього приписного парку капітальні витрати складуть

ЧМЕЗ, (4.9)

де *ЧМЕЗ* – приписний парк тепловозів відповідної серії, *ЧМЕЗ*=18 одиниць.

_____ грн.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 56 |

4.3 Визначення витрат підприємства після впровадження системи підвищення тягових властивостей тепловозів

Після впровадження системи регулювання потужності КМБ, очікуване зростання ресурсу колісних пар складе 15%. Це значно зменшить простій локомотивів на ремонті та зменшить загальний відсоток несправних локомотивів.

Очікувані витрати депо на відновлення та ремонт колісних пар складуть 648495,71 грн.

4.4 Визначення строку окупності та економічного ефекту від системи підвищення тягових властивостей тепловозів

Термін окупності OK визначається за формулою:

$$OK = \frac{I}{E}, \quad (4.10)$$

де I – капітальні витрати пов'язані з впровадженням системи регулювання потужності КМБ.

$$OK = \frac{I}{E} \text{ років.}$$

Величина річного економічного ефекту визначається за формулою:

$$E = \dots - 12; \quad (4.11)$$

$$E = \dots \text{ грн.}$$

Отже можна зробити висновок, що впровадження системи підвищення тягових властивостей на локомотиви серії ЧМЕЗ приписного парку є доцільним економічно обгрунтованим рішенням. Термін окупності складає OK 15 років. Річний економічний ефект складе $E = \dots$ грн.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 57 |

ВИСНОВКИ

Під час розробки магістерської дипломної роботи на тему «Розробка заходів з підвищення тягових властивостей тепловозів» для тепловоза серії ЧМЕЗ було виконано розрахунки щодо вдосконалення його тягових якостей. Аналіз існуючих методів показав, що механічні підходи поступаються сучасним системам електронного регулювання потужності окремих колісно-моторних блоків. Перевагою електронних систем є здатність працювати в широкому діапазоні регулювання на основі змінних факторів: діаметра бандажа коліс, технічного стану тягових електродвигунів, електричного опору паралельних силових кіл та інших.

Запропоновано впровадити систему електронного керування електричною потужністю окремих колісно-моторних блоків шляхом регульованої зміни основного магнітного потоку тягових електродвигунів за спеціальним алгоритмом під час пуску тепловоза. Технічна реалізація передбачає паралельне підключення потужних IGBT-транзисторів до резисторів ослаблення збудження. Транзистори працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), причому індуктивна складова самих тягових двигунів призначена для згладжування високочастотних пульсацій струму.

Очікується, що в діапазоні швидкостей, обмеженому умовою зчеплення коліс з рейками, тягові властивості тепловоза зростуть на 5,5%. Для всього експлуатаційного діапазону швидкостей, обмеженого конструктивною швидкістю, прогнозоване підвищення становить 0,5%.

Оскільки запропонований перерозподіл струмів тягових двигунів може порушити коректну роботу стандартних реле буксування, для виявлення проковзування запропоновано використовувати цифрову систему.

В економічному розділі пояснювальної записки до магістерської роботи наведено розрахунок строку окупності та очікуваного економічного ефекту від впровадження заходів щодо підвищення тягових властивостей тепловозів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03MP.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 58 |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп. /Під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д.: ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 360 с.
2. Розробка новітніх технічних рішень та способів з покращення експлуатаційних властивостей локомотивів. Кравченко К. О., Ковтанець М. В. //Збірник наукових праць – Луганськ: Східноукраїнський національного університету імені Володимира Даля, 2012. – №2. – 120 с.
3. Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобир Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина: Підручник для ВНЗ залізнич. трансп. /Під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д.: ПП «Ліра ЛТД», 2008. – 205 с.
4. Теорія та конструкція локомотивів (поздовжнє розважування тепловозів): метод. вказівки до виконання контрольної роботи, курсового та дипломного проектування /уклад.: Д. В. Бобирь, Є. Г. Нечаєв, Л. В. Колодій,; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2017. – 35 с.
5. Теорія та конструкція локомотивів: Методичні вказівки до виконання курсового проекту, розділ «Розрахунок техніко-економічних характеристик» /Дніпропетр. націон. універ. залізнич. трансп. ім. ак. В. Лазаряна; Уклад.: Д. В. Бобирь, Л. С. Казаріна, М. І. Мартишевській, Є. Г. Нечаєв. – Дніпропетровськ, 2006. – 30 с.
6. Бабанин А.Б. Улучшение переходных режимов работы маневровых тепловозов на промежуточных позициях /А.Б. Бабанин, Ю.В. Сиротенко, И.В. Мымриков //Локомотив-информ. – 2009. – №5-6. – С.4-8.
7. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт» ОП «Локомотиви та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | 0032.200172.000.03МР.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

локомотивне господарство» / уклад.: Б. Є. Боднар, Д. В. Бобирь, Є. Б. Боднар; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро: УДУНТ, 2023. – 50 с.

8. Бабанін О.Б. Оцінка ефективності маневрових тепловозів /О.Б. Бабанін, Ю.В. Сиротенко, А.І. Марцун //Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 96. – С. 98-103.
9. Бабанін О.Б. Покращення характеристик тепловозів ЧМЕЗП для виконання важкої маневрової роботи /О.Б. Бабанін, Ю.В. Сиротенко, Є.О. Тимошенко //Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 134. – С.79-84.
10. Фінансово-економічний аналіз діяльності підприємств: Навч. посіб. /М.Я. Коробов – К.: Т-во Знання, 2000. – 378 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------------|------|
| | | | | | <i>0032.200172.000.03MP.ПЗ</i> | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 60 |