

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.424:621.31

Є. С. РЯБОВ^{1*}, Б. Х. ЄРІЦЯН², Є. В. ЛИСЕНКО³, Є. Г. ЧЕРНИШЕНКО⁴, А. Ю. ЖУКОВ⁵

^{1*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (097) 302 14 54, ел. пошта riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта uevhen.lysenko@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-1263-7446

⁴Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38(057) 707 65 30, ел. пошта uevhen.chernyshenko@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-9476-1107

⁵ТОВ «Харківський електро-машинобудівний завод», пр. Героїв Харкова, 199, 61037, Харків, Україна, тел. +38 (099) 074 01 95, ел. пошта zukant83@gmail.com, ORCID 0009-0001-5229-1685

Підвищення тягових властивостей маневрового тепловозу ЧМЕЗ за рахунок розподілу тягового зусилля між осями тепловозу

Мета. Дослідження присвячене визначенню впливу перерозподілу сили тяги між осями на підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ. **Методика.** Розроблено математичну модель для визначення коефіцієнту використання зчіпної маси тепловозу ЧМЕЗ при перерозподілі тягового зусилля між осями тепловозу. Показано, що внаслідок дії сил у зубчатому зачепленні тягових редукторів та дії сили тяги на автозчепленні виникає розвантаження першої, другої та четвертої осей та довантаження третьої, п'ятої та шостої осей за напрямком руху тепловозу. **Результати.** Проведено розрахунки коефіцієнту використання зчіпної маси тепловозу при різних значеннях коефіцієнту зчеплення та різних схемах живлення тягових електродвигунів. Визначено, що найбільші значення коефіцієнту використання зчіпної маси локомотиву досягаються у випадку індивідуального живлення та керування тяговими електродвигунами. При такому способі живлення можливе найбільш точне врахування фактичного осьового навантаження при перерозподілі тягового зусилля між осями тепловозу. При груповому живленні тягових двигунів, у випадку об'єднання осей з близькими коефіцієнтами використання зчіпної маси осі, також досягається практично повне використання зчіпної маси. При цьому величина коефіцієнту використання зчіпної маси тепловозу є стабільною і практично не залежить від тягового зусилля. При повізковому живленні та у випадку групового живлення усіх електродвигунів коефіцієнт використання зчіпної маси змінюється у діапазоні 0,8...0,87, при цьому менші значення досягаються при вищому тяговому зусиллі тепловозу. **Наукова новизна.** Обґрунтовано можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ шляхом перерозподілу тягових зусиль між осями тепловозу з урахуванням перерозподілу фактичного осьового навантаження. Визначено раціональні варіанти схем живлення тягових електродвигунів, при яких забезпечується високий коефіцієнт використання зчіпної маси тепловозу. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використанні при модернізації тепловозів ЧМЕЗ, що дозволяє підвищити їх тягові властивості. Запропонований підхід до покращення тягових властивостей може бути застосований для іншого тягового рухомого складу.

Ключові слова: тягово-енергетичні характеристики; тягові властивості; коефіцієнт використання зчіпної маси; тяговий електропривод; тяговий електродвигун; енергоефективність

Вступ

На початкових та завершальних етапах залізничних перевезень здійснюються маневрові операції із застосуванням маневрових локомотивів. На станціях АТ «Укрзалізниця» для цього використовуються маневрові тепловози серії ЧМЕЗ. Наявний парк цих тепловозів характеризується значними термінами служби та недостатньо високими тягово-енергетичними показниками [3]. Усунення цього можливе шляхом модернізації наявних тепловозів ЧМЕЗ. Відомі проекти модернізації цих тепловозів від компанії CZ LOKO [9] та ZOS Zvolen s.r.o. [15], які спрямовані у першу чергу на підвищення паливної ефективності, що досягається застосуванням сучасних дизельних двигунів. Покращення тягових властивостей модернізованих тепловозів ЧМЕЗ пов'язане із застосуванням тягової електричної передачі потужності змінно-постійного струму та мікропроцесорної системи керування, що підвищує протибоксувальні властивості тепловозу.

Іншим напрямком підвищення тягово-енергетичних властивостей тепловозу ЧМЕЗ є удосконалення його тягового електроприводу. У [7] показано, що для наявних тепловозів серії ЧМЕЗ підвищення їх енергоефективності може бути досягнуто при зміні кількості працюючих тягових електродвигунів в залежності від позиції контролера машиніста. На серійних тепловозах ЧМЕЗ такий алгоритм роботи не передбачений, однак його можна впровадити при модернізації тепловозів [12]. Слід очікувати, що при використанні тягового електроприводу з електродвигунами змінного струму та впровадженні подібних енергозберігаючих алгоритмів керування багатодвигунним тяговим електроприводом [13] буде досягнуто значне підвищення енергетичних показників тепловозу. Зважаючи на тенденції до зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог, використання енергозберігаючих технологій на рухомому складі забезпечить стабільність та конкурентоспроможність залізничних перевезень.

При використанні тягового електроприводу з електродвигунами змінного струму доцільним є провадження перерозподілу сили тяги між осями, що підвищує тягові властивості тепловозу [8]. Це необхідно для роботи з поїздами збі-

льшеної вагової норми, при вивізній та передачній роботі.

Як відомо, при реалізації сили тяги відбувається перерозподіл навантаження між осями локомотиву: навантаження одних осей зменшується, а інших – збільшується відносно статичного значення. Перерозподіл залежить від конструкції екіпажної частини [6, 11, 14]. Це викликає необхідність зниження сили тяги на розвантажених осях. Тому при груповому живленні тягових електродвигунів, яке застосовується на серійному тепловозі ЧМЕЗ, найбільша сила тяги визначається розвантаженням певних осей.

При використанні індивідуального живлення і регулювання тягових електродвигунів або окремих груп з'являється можливість перерозподілу тягового зусилля між колісними парами. Зокрема, можливе підвищення сили тяги на тих осях, які будуть довантажені. Це дозволить підвищити силу тяги локомотиву в цілому.

Мета

Метою статті є визначення впливу перерозподілу сили тяги між осями на підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ.

Методика

Для визначення впливу перерозподілу сил тяги між осями на тягові властивості локомотиву використаємо методику визначення коефіцієнту зчіпної маси локомотиву [1, 5, 10].

Статичний коефіцієнт використання зчіпної маси локомотиву визначається за виразом:

$$\beta = \frac{Q_{\min}}{Q_0} \quad (1)$$

де $Q_{\min}$ – найменше осьове навантаження колісної пари; Q_0 – статичне навантаження колісної пари.

Вираз (1) записаний для варіанту групового живлення тягових електродвигунів, при якому не можливо перерозподіляти силу тяги між осями [2, 4].

Для випадку, коли тяговий електропривод дозволяє перерозподіляти силу тяги між осями, статичний коефіцієнт використання зчіпної маси пропонується визначати за наступним виразом:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n F_{i\max}}{nF_0}, \quad (2)$$

де $F_{i\max}$ – гранична сила тяги i -ої колісної пари;
 n – кількість осей локомотиву, якими здійснюється тяга; F_0 – гранична сила тяги однієї осі при статичному навантаженні.

Граничне значення сили тяги i -ої колісної пари визначається за виразом:

$$F_{i\max} = \Psi_i Q_i, \quad (3)$$

де Ψ_i – коефіцієнт зчеплення i -ої колісної пари;
 Q_i – фактичне навантаження i -ої колісної пари з урахуванням перерозподілу навантаження.

У виразі (3) не враховуються динамічні процеси при коливаннях підресорених мас, які призводять до зміни вертикального навантаження на колісну пару. Для врахування цього необ-

хідне комплексне дослідження на основі моделювання.

Граничне значення сили тяги i -ої колісної пари визначається за виразом:

$$F_0 = \Psi_0 Q_0, \quad (4)$$

де Ψ_0 – коефіцієнт зчеплення колісної пари при статичному навантаженні.

При попередніх розрахунках, для їх спрощення, можна прийняти, що коефіцієнти зчеплення рівні між собою [1, 4].

В конструкції тепловозу ЧМЕЗ передбачено спирання кузова на візки через маятникові підвіски. Нехтуючи пружністю гумових елементів, які передбачені в конструкції маятникових гвинтів, можна прийняти, що спирання кузова на візки є жорстким і візки не можуть переміщуватися відносно кузова у вертикальній поздовжній площині.

На рис. 1 показано схему прикладення сил у тяговому режимі.

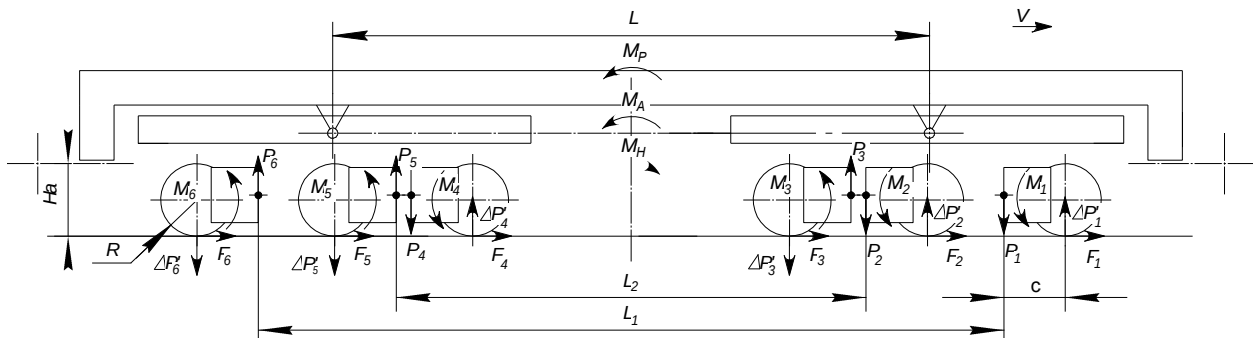


Рис. 1. Схема сил і моментів

Fig. 1. Diagram of forces and moments

Зміна навантаження колісної пари обумовлена двома факторами: перший – передача обертаючого моменту, при якому внаслідок тиску зуба шестерні на зуб зубчастого колеса виникають додаткові навантаження на підвісі тягового двигуна та осі колісної пари; другий – передачею сили тяги через автозчеплення.

Зміна навантаження колісної пари від дії сил та моментів, що передаються на неї через корпус двигуна та тягових редукторів, за величиною дорівнює додатковим навантаженням на підвісі тягового двигуна відповідної колісної пари [1]. Відповідно до розташування тягових двигунів

відносно колісних пар виникають розвантаження I, II та IV-ї колісної пари за напрямком руху. Для III, V та VI-ї колісної пари за напрямком руху виникає довантаження. Таким чином:

$$\begin{cases} \Delta P'_1 = -P_1 \\ \Delta P'_2 = -P_2 \\ \Delta P'_3 = P_3 \\ \Delta P'_4 = -P_4 \\ \Delta P'_5 = P_5 \\ \Delta P'_6 = P_6 \end{cases}, \quad (5)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де $P_1, \dots, P_6$ – додаткові навантаження на підвісі тягового двигуна, що виникають при передачі крутильного моменту внаслідок тиску зуба шестерні на зуб зубчастого колеса.

Розрахунок додаткових навантажень здійснюється за виразом:

$$P_i = \frac{F_i R}{c}. \quad (6)$$

де F_i – сила тяги i -ої колісної пари; R – радіус по колу кочення колісної пари; c – відстань від підвісу тягового двигуна до осі колісної пари.

Момент, який виникає на рамі тепловозу від дії навантажень на опорах тягових двигунів, може бути оцінений наступним виразом:

$$M_n = \frac{(P_1 + P_6)L_1}{2} + \frac{((P_5 - P_4) + (P_2 - P_3))L_2}{2}, \quad (7)$$

де L_1 – відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів; L_2 – відстань між точками підвісу другого та п'ятого тягових електродвигунів.

У виразі (7) прийнято, що точки підвісу другого та третього, четвертого та п'ятого електродвигунів знаходяться на однаковій відстані від осі тепловозу.

Момент, який виникає на рамі тепловозу від передачі тягового зусилля через автозчеплення:

$$M_a = -\left(\sum_{i=1}^n F_i\right)(H_A - R), \quad (8)$$

де H_A – висота осі автозчеплення.

Загальний момент на головній рамі тепловозу:

$$M_p = M_a + M_n. \quad (9)$$

Різниця навантаження на колісні пари візків від дії моменту на головній рамі локомотива визначаються відповідно за виразами:

$$\begin{cases} \Delta P_{\epsilon 1} = -\frac{M_p}{3L}, \\ \Delta P_{\epsilon 2} = \frac{M_p}{3L} \end{cases}, \quad (10)$$

де L – база локомотива по шкворням.

Додаткові навантаження на колісні пари локомотива розраховуються наступним чином:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P_{\epsilon 1} + \Delta P'_1 \\ \Delta P_2 = \Delta P_{\epsilon 1} + \Delta P'_2 \\ \Delta P_3 = \Delta P_{\epsilon 1} + \Delta P'_3 \\ \Delta P_4 = \Delta P_{\epsilon 2} + \Delta P'_4 \\ \Delta P_5 = \Delta P_{\epsilon 2} + \Delta P'_5 \\ \Delta P_6 = \Delta P_{\epsilon 2} + \Delta P'_6 \end{cases}. \quad (11)$$

Фактичне навантаження на колісні пари визначається як:

$$Q_i = Q_0 + \Delta P_i. \quad (12)$$

Таким чином, вирази (2)–(12) складають математичну модель для визначення коефіцієнту використання зчіпної маси.

Результати

Геометричні розміри тепловозу ЧМЕЗ, необхідні для проведення розрахунків, наведено у табл. 1.

З використанням запропонованої математичної моделі проведено розрахунки коефіцієнту використання зчіпної маси для серійного тепловозу (при штатній схемі включення тягових електродвигунів з груповим живленням). Результати розрахунків наведено у табл. 2. Як видно з даних табл. 2, зі зростанням сили тяги коефіцієнт використання зчіпної маси тепловозу зменшується, що негативно впливає на його тягові властивості. Для прикладу у табл. 3 наведені коефіцієнти використання зчіпної маси для окремих осей при силі тяги 240 кН (тобто сила тяги кожної осі – 40 кН). Як видно з даних табл. 3, найбільш розвантаженою є четверта вісь, а також перша та третя осі. Це виникає внаслідок «відтискання» колісної пари зусиллями у зубчастому зачепленні. Найбільш навантаженими є третя, п'ята та шоста колісна пара, що є наслідок їх «притискання» як силами у зубчастому зачепленні, так і довантаженням заднього візка від сили на автозчепленні.

Внаслідок особливостей встановлення третього та четвертого колісно-моторного блоку на передньому та задньому візку відповідно третя вісь виявляється довантаженою, а четверта – розвантаженою. Вказаний характер розподілу розвантажень і довантажень колісних

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

пар буде зберігатися і при інших значеннях сили тяги, але будуть змінюватися їх чисельні значення.

Таким чином, для підвищення тягових властивостей тепловозу необхідно збільшити сили тяги п'ятої, шостої та третьої осі, які виявля-

ються довантаженими у тягових режимах. Додільно провести розрахунки граничних значень коефіцієнта використання зчіпної маси локомотиву, що дозволить оцінити вплив перерозподілу сили тяги між осями локомотиву на підвищення його тягових властивостей.

Таблиця 1

Геометричні розміри тепловозу ЧМЕЗ
(за даними технічної документації)

Table 1

Geometric dimensions of the ChME3 diesel locomotive
(according to technical documentation)

Найменування	Величина
Радіус колеса по колу кочення R , м	0,525
Відстань від точки підвісу тягового двигуна до осі колісної пари c , м	0,891
Висота осі автозчеплення від рівня головок рейок H_A , м	1,055
База локомотива по шкворням L , м	8,66
Відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів, L_1 (м)	10,8
Відстань між точками підвісу першого та шостого тягових електродвигунів, L_2 (м)	6,88
Статичне навантаження на вісь, Q_0 (кН)	201,1

Таблиця 2

Результати розрахунків коефіцієнту використання
зчіпної маси для серійного тепловозу

Table 2

Results of calculations of the coefficient of adhesion weight
for a serial diesel locomotive

Сила тяги тепловозу, кН	Коефіцієнт використання зчіпної маси тепловозу	Найбільший коефіцієнт використання зчіпної маси осі
240	0,858	1,142
270	0,841	1,159
300	0,823	1,177
330	0,805	1,195
360	0,788	1,212
390	0,77	1,23
420	0,752	1,248

Таблиця 3

Коефіцієнти використання зчіпної маси при силі тяги однієї осі, рівній 40 кН

Table 3

Coefficients of adhesion weight at a single axle tractive effort of 40 kN

Номер осі	I	II	III	IV	V	VI
Коефіцієнт використання зчіпної маси осі	0,907	0,907	1,142	0,858	1,093	1,093

Для визначення граничних сил тяги, які можна реалізувати кожною віссю у випадку перерозподілу тяги між осями, застосовано наведений нижче алгоритм, який включає послідовність дій:

1. Задати значення сили тяги для кожної осі $F_{31}, \dots, F_{36}$.

2. Обчислити фактичне навантаження колісних пар за моделлю (5)–(12).

3. Обчислити граничні значення сили тяги за (3) при заданому коефіцієнті зчеплення та порівняти із заданими значеннями сили тяги $F_{31}, \dots, F_{36}$. Шляхом зміни значень $F_{31}, \dots, F_{36}$ досягти рівності цих сил граничним значенням, розрахованим за (3).

4. Обчислити силу тяги при статичному навантаженні за (4).

5. Обчислити коефіцієнт використання зчіпної маси локомотиву за (2).

Розрахунки проведено при різних значення коефіцієнту зчеплення та при різних варіантах живлення тягових електродвигунів. Розглянуто індивідуальне та групове живлення тягових електродвигунів. При індивідуальному живленні можливо досягти повного врахування перерозподілу осьових навантажень. Однак такий варіант потребує індивідуального живлення і керування кожним електродвигуном, що підвищує вартість тягового електроприводу.

При груповому живленні і керуванні електродвигуни об'єднуються у кілька груп, кожна з яких отримує живлення від окремого перетворювача. Це зменшує вартість тягового електроприводу. Однак слід зазначити, що через розкид характеристик електродвигунів навантаження електродвигунів в одній групі не може бути ідентичним. Це буде зменшувати тягові зусилля окремих осей. У цій роботі це аспект не враховується.

У дослідженні розглянуто такі варіанти групового живлення:

а) групове живлення усіх тягових електродвигунів. Це відповідає серійному тепловозу;

б) групове повізкове живлення, при якому три електродвигуни кожного з візків під'єднуються до тягового перетворювача;

в) групове живлення трьох груп електродвигунів, в якій є два електродвигуни. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I та II, III та IV, V та VI;

г) групове живлення двох груп електродвигунів по три електродвигуна. Електродвигуни з'єднані у групи наступним чином: I, II та IV, III, V та VI.

З'єднання електродвигунів за варіантами в) і г) має на меті об'єднати осі з близькими коефіцієнтами використання зчіпної маси.

У табл. 4–6 наведено результати розрахунків граничних сил тяги і коефіцієнта використання зчіпної маси для різних значень коефіцієнту зчеплення при різних варіантах живлення. З даних табл. 4–6 та рис. 2 слідує, що найвищі значення коефіцієнта використання зчіпної маси локомотиву досягаються при індивідуальному живленні. В цьому випадку можливе окреме керування кожним електродвигуном з урахуванням фактичного навантаження осей. Слід відзначити, що при високих значення сили тяги коефіцієнт використання зчіпної маси стає більшим одиниці. Це є наслідком довантаження заднього візка силою на автозчепленні. Найменші коефіцієнти використання зчіпної маси локомотиву є при груповому живленні усіх електродвигунів (варіант а) та по візковому живленні (варіант б). Це пояснюється тим, що у складі кожної групи є осі з низькими коефіцієнтами використання зчіпної маси і відповідно такі осі обмежують величину сили тяги решти осей, які входять до цієї

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

групи. Найнижчі значення коефіцієнту використання зчіпної маси, рівні 0,8...0,847, досягаються при груповому живленні усіх електродвигунів. При по візковому живленні коефіцієнт ви-

користання зчіпної маси знаходиться у діапазоні 0,828...0,87. При цьому з ростом загального тягового зусилля коефіцієнт використання зчіпної маси локомотиву зменшується.

Таблиця 4

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,25$

Table 4

Limit values of traction forces at a coefficient of adhesion $\psi=0.25$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН							β
	Номер осі						Загальна	
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	45,1	45,1	60,0	42,4	57,1	57,1	306,8	1,014
Групове (всі електродвигуни)	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	42,6	255,6	0,847
Групове по візкове	44,9	44,9	44,9	42,6	42,6	42,6	262,5	0,87
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	45,5	45,5	42,0	42,0	56,5	56,5	295,0	0,955
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	42,5	42,5	57,1	42,5	57,1	57,1	298,8	0,99

Таблиця 5

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,3$

Table 5

Limit values of traction forces at a coefficient of friction $\psi=0.3$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН							β
	Номер осі						Загальна	
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	53,1	53,1	75,9	49,3	70,5	70,5	372,4	1,029
Групове (всі електродвигуни)	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	298,2	0,824
Групове по візкове	52,8	52,8	52,8	49,6	49,6	49,6	307,2	0,849
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	53,8	53,8	48,7	48,7	69,5	69,5	344,0	0,95
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	49,4	49,4	70,6	49,4	70,6	70,6	360,0	0,995

Таблиця 6

Граничні значення сил тяги при коефіцієнті зчеплення $\psi=0,35$

Table 6

Limit values of traction forces at a coefficient of adhesion $\psi=0.35$

Варіанти живлення	Сила тяги, кН							β
	Номер осі						Загальна	
	I	II	III	IV	V	VI		
Індивідуальне	60,8	60,8	92,4	55,8	84,8	84,8	441,5	1,04
Групове (всі електродвигуни)	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	337,8	0,8
Групове по візкове	60,4	60,4	60,4	56,3	56,3	56,3	349,8	0,828
Групове по два електродвигуни (I+II, III+IV, V+VI)	61,9	61,9	54,7	54,7	83,2	83,2	399,6	0,946
Групове по три електродвигуни (I+II+IV, III+V+VI)	55,8	55,8	84,8	55,8	84,8	84,8	421,8	1,0

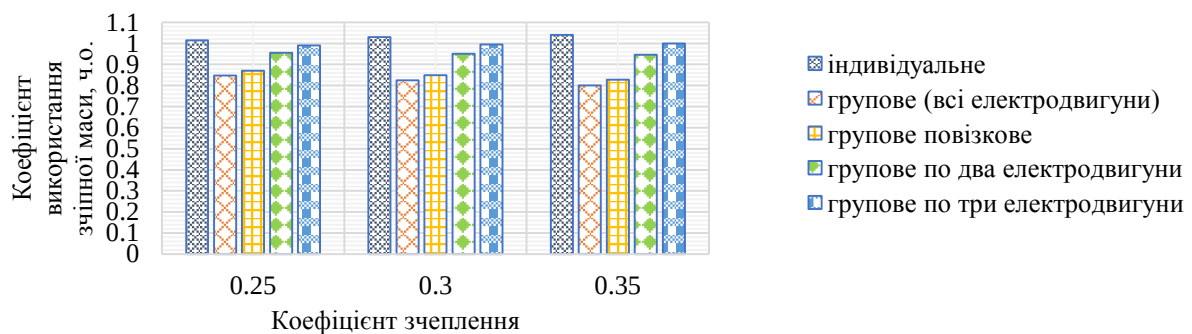


Рис. 2. Залежність коефіцієнту використання зчипної маси локомотиву при різних коефіцієнтах зчеплення та варіантах живлення тягових електродвигунів

Fig. 2. Dependence of the coefficient of adhesion weight for different adhesion coefficients and traction motor power supply options

Високі коефіцієнти використання зчипної маси локомотиву, рівні 0,99...1,0, досягаються при груповому живленні варіанті 2, який передбачає дві групи з об'єднанням у групи електродвигунів I, II та IV, III, V та VI осей. У варіанті 6, який передбачає три групи з об'єднанням у групи електродвигунів I та II, III та IV, V та VI осей, коефіцієнти використання зчипної маси знаходяться у діапазоні 0,946...0,95. Високі значення коефіцієнту використання зчипної маси для цих варіантів живлення пояснюється тим, що у межах однієї групи об'єднуються осі з близькими навантаженнями. Це забезпечує високі значення загального тягового зусилля таких

груп, при цьому коефіцієнт використання зчипної маси практично не змінюється при зміні загального тягового зусилля. Таким чином, проведені розрахунки показують можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЗ при використанні перерозподілу тягових зусиль між осями локомотиву з урахуванням їх фактичного навантаження. Це дозволяє забезпечити коефіцієнт використання зчипної маси близьким до одиниці. Найвищі показники коефіцієнту використання зчипної маси досягаються при індивідуальному живленні та груповому живленні у варіантах з двома групами (до однієї групи входять

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

електродвигуни I, II та IV осей, до другої – електродвигуни III, V та VI осей) та з трьома групами (з об'єднанням у групи електродвигунів I та II, III та IV, V та VI осей). При індивідуальному та груповому живленні з трьома групами сила тяги однієї осі досягає 84,8 кН. При груповому живленні з трьома групами електродвигунів найбільша сила тяги однієї осі становить 83,2 кН. Фактичне осьове навантаження у цих режимах складає близько 240 кН. Для вибору варіанту групового живлення необхідно врахувати показники енергоефективності, вартість тягового електроприводу та фактори, які пов'язані з безпекою руху при реалізації алгоритму перерозподілу тягових зусиль.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано можливість підвищення тягових властивостей тепловозу ЧМЕЗ шляхом встановлення тягових зусиль осей тепловозу з урахуванням перерозподілу фактичного осьового навантаження. Визначено раціональні варіанти схем живлення тягових електродвигунів, при яких забезпечується високий коефіцієнт використання зчипної маси тепловозу.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх використання при модернізації тепловозів, що дозволяє підвищити їх тягові властивості.

Висновки

Підвищення тягово-енергетичних показників маневрових тепловозів необхідне для забезпечення стабільного виконання маневрової роботи.

Підвищення тягових властивостей маневрових локомотивів може бути здійснено засобами тягового електроприводу. Впровадження керування силою тяги окремих осей чи їх груп дозволяє враховувати перерозподіл навантаження між осями локомотиву при реалізації сили тяги. Внаслідок цього можливе підвищення загальної сили тяги локомотиву.

Виконані розрахунки показують, що при індивідуальному живленні тягових електродвигунів та у випадках групового живлення з об'єднанням кількох електродвигунів можливе досягнення величини коефіцієнту використання зчипної маси локомотиву, близької до одиниці. Це свідчить про максимальне використання тягових властивостей тепловозу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбунов М. І. *Теорія та практична реалізація системного підходу при створенні екіпажної частини локомотива* : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07. Луганськ, 2006. 422 с.
2. Горобченко О. М. *Удосконалення тягових характеристик локомотивів шляхом підвищення коефіцієнта використання зчипної маси* : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.22.07. Харків, 2007. 18 с.
3. Кара С. В., Петренко В. О., Прокопенко П. М., Гордієнко Т. М. Дослідження несучих конструкцій тепловозів серії ЧМЕЗ та визначення можливості продовження терміну їх експлуатації. *Залізничний транспорт України*. 2019. № 3. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13>
4. Ковтанець М. В., Кузьменко С. В., Ноженко В. С., Сергієнко О. В., Климаш А. О., Ковтанець Т. М. Шляхи покращення тягових і динамічних показників локомотива. *Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2021. № 4(268). С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-53-58>
5. Кравченко К. О. *Обґрунтування резервів підвищення тягових якостей локомотива та їх реалізація керуванням ковзання в системі колеса з рейкою* : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07. Луганськ, 2010. 188 с.
6. Маслій В. Г. *Сучасні конструкції та динаміка руху складу залізниць* : навч. посіб. Харків : НТУ “ХПІ”, 2014. 106 с.
7. Шайда В. П., Юр'єва О. Ю., Лисенко Є. В., Сич О. А. Підвищення енергетичної ефективності тягового колекторного електроприводу для маневрових тепловозів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2024. № 2(18). С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2024.02.10>
8. Шапран Е. Н. Удосконалення систем керування тяговими електродвигунами тепловозів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2005. № 8. С. 122–129. URL: <https://stp.ust.edu.ua/article/view/20156/17786>
9. Locomotion Excellence. CZ LOKO. URL: <https://www.czloko.com/> (date of access: 20.09.2025).

10. Gerlici J., Kravchenko K., Gorbunov M., Lack T. Increasing the Traction Properties of Locomotives for the Account of Improvement of Body and Bogies Connexions. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7, Iss. 4.3. P. 377–382. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19837>
11. Ishchuk V., Kravchenko K., Blatnický M., Lovska A., Dižo J. Research into the Possibilities of Improving the Adhesion Properties of a Locomotive. *Machines*. 2025. Vol. 13, Iss. 1. P. 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13010044>
12. Kostenko, I., Nezlina O., Maliuk S., Lysenko Y., Popovich, D. Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*. 2024. № 43. P. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>
13. Riabov Ie., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>
14. Semenov S., Mikhailov E., Spivak O., Dižo J., Blatnický M., Bučko M. Features of Locomotive Adhesive Mass Utilization in a Braking Mode. *Manufacturing Technology Journal*. 2025. Vol. 25, Iss. 3. P. 374–382. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2025.040>
15. Everything that rides on the rails. *ZOS Zvolen*. URL: <https://zoszvolen.sk/en/> (date of access: 20.09.2025)

YE. S. RIABOV^{1*}, B. KH. YERITSYAN², YE. V. LYSENKO³, YE. G. CHERNYSHENKO⁴,
A. YU. ZHUKOV⁵

^{1*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 302 14 54, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

²Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail bag.eritsyan@gmail.com, ORCID 0000-0003-0579-3882

³Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail yevhen.lysenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-1263-7446

⁴Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail yevhen.chernyshenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0000-9476-1107

⁵Kharkiv Electric Machine Building Plant LLC, Heroiv Kharkova Av., 199, 61037, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (099) 074 01 95, e-mail zukunft83@gmail.com, ORCID 0009-0001-5229-1685

Improving the Traction Properties of the Shunting Diesel Locomotives ChME3 by Distributing the Traction Force Between the Axles of the Diesel Locomotive

Purpose. Research into the specific determination of the influence of redistribution of traction force between axles on increasing the traction properties of the ChME3 diesel locomotive. **Methodology.** A mathematical model has been developed to determine the coefficient of utilization of the coupling mass of the ChME3 diesel locomotive when redistributing the tractive effort between the axles of the diesel locomotive. It is shown that as a result of the action of forces in the gear meshing of traction reducers and the action of the traction force on the automatic coupling, the unloading of the first, second, and fourth axles and the loading of the third, fifth, and sixth axles occurs in the direction of movement of the locomotive. **Finding.** Calculations of the coefficient of utilization of the traction mass of a diesel locomotive were carried out at different values of the coefficient of coupling and different schemes of power supply of traction electric motors. It was determined that the highest values of the coefficient of utilization of the traction mass of a locomotive are achieved in the case of individual power supply and control of traction electric motors. This method of power supply allows for the most accurate consideration of the actual axle load when redistributing the tractive effort between the axles of the locomotive. With group power supply of traction motors, in the case of combining axles with close axle coupling mass utilization coefficients, almost full utilization of coupling mass is also achieved. At the same time, the value of the coefficient of utilization of the traction mass of the diesel locomotive is stable and practically does not depend on the traction force. With by-bogie power supply and group power supply of all electric motors, the coupling mass utilization coefficient varies in the range of 0.8...0.87, with lower values being achieved at higher traction force of the diesel locomotive. **Originality.** The possibility of increasing the traction properties of the ChME3 diesel locomotive by redistributing traction forces between the axles of the diesel locomotive,

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

taking into account the redistribution of the actual axle load, is substantiated. Rational options for power supply schemes for traction electric motors have been identified, which ensure a high utilization factor of the traction mass of the diesel locomotive. **Practical value.** The results obtained can be used in the modernization of ChME3 diesel locomotives, which allows to increase their traction properties. The proposed approach to improving traction properties can be applied to other traction rolling stock.

Keywords: traction and energy characteristics; traction properties; coupling mass utilization factor; traction electric drive; traction electric motor; energy efficiency

REFERENCE

1. Ghorbunov, M. I. (2006). *Teoriia ta praktychna realizatsiia systemnoho pidkhodu pry stvorenni ekipazhnoi chastyiny lokomotyva* (Doctoral dissertation). Luhansk. (in Ukrainian)
2. Horobchenko, O. M. (2007). *Udoskonalennia tiahovykh kharakterystyk lokomotyviv shliakhom pidvyshchennia koefitsiienta vykorystannia zchipnoi masy* (Extended abstract dissertation). Kharkiv. (in Ukrainian)
3. Kara, S. V., Petrenko, V. O., Prokopenko, P. M., & Hordiienko, T. M. (2019). Study of load-bearing structures diesel locomotives of the ChME3 series and determination of the possibility of extending their service life. *Railway transport of Ukraine*, 3, 9-13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-09-13> (in Ukrainian)
4. Kovtanets, M. V., Kuzmenko, S. V., Nozhenko, V. S., Sergienko, O. V., Klimash, A. O., & Kovtanets, T. M. (2021). Ways to improve traction and dynamic performance of a locomotive. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 4(268), 53-58. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-53-58> (in Ukrainian)
5. Kravchenko, K. O. (2010). *Obgruntuvannia rezerviv pidvyshchennia tiahovykh yakosti lokomotyva ta yikh realizatsiia keruvanniam kovzannia v systemi koleasa z reikoiu* (Candidate of technical sciences dissertation). Luhansk. (in Ukrainian)
6. Masliiev, V. H. (2014). *Suchasni konstruktsii ta dynamika rukhomoho skladu zaliznyts*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
7. Shaïda, V. P., Yurieva, O. Yu., Lysenko, Ye. V., & Sych, O. A. (2024). Increasing the energy efficiency of the traction collector electric drive for shunting diesel locomotives. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, 2(18), 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2024.02.10> (in Ukrainian)
8. Shapran, E. N. (2005). Udoskonalennia system keruvannia tiahovymy elektrodvyhunamy teplovoziv. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 8, 122-129. Retrieved from <https://stp.ust.edu.ua/article/view/20156/17786> (in Ukrainian)
9. Locomotion Excellence. (б. д.). *CZ LOKO*. Retrieved from <https://www.czloko.com/> (in Czech)
10. Gerlici, J., Kravchenko, K., Gorbunov, M., & Lack, T. (2018). Increasing the Traction Properties of Locomotives for the Account of Improvement of Body and Bogies Connexions. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.3), 377-382. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19837> (in English)
11. Ishchuk, V., Kravchenko, K., Blatnický, M., Lovska, A., & Dižo, J. (2025). Research into the Possibilities of Improving the Adhesion Properties of a Locomotive. *Machines*, 13(1), 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13010044> (in English)
12. Kostenko, I., Nezlina, O., Maliuk, S., Lysenko, Y., & Popovich, D. (2024). Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*, 43, 100-110. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8> (in English)
13. Riabov, Ie., Goolak, S., Kondratieva, L., & Overianova, L. (2023). Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 42, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2023.101416> (in English)
14. Semenov, S., Mikhailov, E., Spivak, O., Dižo, J., Blatnický, M., & Bučko, M. (2025). Features of Locomotive Adhesive Mass Utilization in a Braking Mode. *Manufacturing Technology Journal*. 25(3), 374-382. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2025.040> (in English)
15. Everything that rides on the rails. (б. д.). *ZOS Zvolen*. Retrieved from <https://zoszvolen.sk/en/> (in English)

Надійшла до редколегії: 20.08.2025

Прийнята до друку: 25.12.2026