

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.424:621.333

Є. С. РЯБОВ^{1*}, Б. Х. ЄРЦЯН², А. С. ТИХОНОВ³, О. А. ХАЗОВ⁴

^{1*}Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, 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, Харків, Україна, 61002, 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, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта Andrii.Tykhonov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0002-7014-1186

⁴Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта oleksii.khazov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-8922-5888

Гібридна тягова система для вивізної локомотива промислових кар'єрних залізниць

Мета. У статті передбачено визначити параметри гібридної тягової системи тепловоза для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. **Методика.** Дослідження проведено на прикладі ділянки кар'єрної залізниці Північного гірничо-збагачувального комбінату. Показано, що для визначення параметрів тягової системи необхідно враховувати роботу в тягових і гальмівних системах для вантажного і порожнього напівреїсів. Розрахунки виконано з використанням положень теорії локомотивної тяги. **Результати.** Визначено, що на заданому профілю колії з найбільшим підйомом 35 ‰ двосекційний дванадцятивісний тепловоз може вести поїзд з 12 навантаженими вагонами (думпкерами). Швидкість руху при цьому становить 10 км/год, дотична потужність – близько 2 400 кВт. Для забезпечення гальмування навантаженого поїзда на досліджуваному маршруті (найбільший ухил (спуск) складає 28 ‰) дотична потужність має становити 3 000 кВт, рух буде здійснюватися зі швидкістю 15 км/год. Запропоновано застосувати гібридну тягову систему, до енергетичної установки якої входить накопичувач енергії. Для забезпечення високих тягових властивостей необхідно застосувати тяговий електропривод на основі електродвигунів змінного струму. Під час використання тягових асинхронних електродвигунів можливе повізкове живлення та керування електродвигунами, що дозволить забезпечити високі тягові властивості локомотива. Показано доцільність обладнання локомотива пристроями, які забезпечують його живлення від контактної мережі під час руху по електрифікованих ділянках. Розроблено 3D-ескіз розміщення обладнання гібридної тягової системи на тепловозі 2ТЕ10М. Для розробки ескізу використано моделі дизель-генераторної установки потужністю 800 кВт та накопичувача енергії ємністю 500 кВт·год з піковою потужністю 1 000 кВт. **Наукова новизна.** Визначено параметри локомотива з дворежимним живленням, обладнаного гібридною тяговою системою та призначеного для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. **Практична значимість.** Отримані результати можна використати під час розробки проєктів модернізації вивізних тепловозів та створення нового тягового рухомого складу для кар'єрних і магістральних залізниць.

Ключові слова: рухомий склад; локомотив; гібридна тягова система; дизельний двигун; накопичувач енергії; тяговий електропривод; тяговий асинхронний електродвигун

Вступ

Перехід до зеленої металургії передбачає використання технологій, які забезпечують зниження викидів CO₂ та NO_x на всіх етапах виробництва металу. Видобуток залізної руди є первинною ланкою виробничого процесу. На вітчизняних підприємствах, які ведуть видобуток залізної руди відкритим способом, для її транспортування з кар'єру до збагачувального комбінату, використовують залізничний транспорт. Для водіння поїздів за маршрутами, де є неелектрифіковані ділянки, застосовують магістральні вантажні тепловози 2ТЕ10М(В), 2ТЕ116 та маневрово-вивізні тепловози ТЕМ7. Також застосовують тепловози серій М62, ТЕМ2, ЧМЕЗ та серії ТГМ.

Найпоширенішими є магістральні тепловози 2ТЕ10М(В) та 2ТЕ116. Аналіз показує, що їх експлуатація відбувається в режимах, які не є проектними для тривалої роботи. Так, швидкість руху на лініях гірничо-збагачувальних комбінатів не перевищує 20 км/год на горизонтальних ділянках та знижується до 10 км/год на підйомах. При цьому швидкість тривалого режиму тепловоза 2ТЕ10М складає 23 км/год, тепловоза 2ТЕ116 – 24 км/год. Під час руху на підйомі зі швидкістю 10 км/год сила тяги тепловозів становить близько 700 кН, що перевищує тривалу силу тяги тепловозів, близьку до 500 кН. Унаслідок цього електрообладнання

працює з перевантаженням за струмом, що збільшує ризик його пошкодження. Робота в таких режимах здійснюється зі зменшеним ККД тягових електричних машин, що збільшує споживання пального і так не надто економічних дизельних двигунів. Крім того, застарілі дизелі не відповідають сучасним вимогам щодо викидів шкідливих речовин, що в певних випадках суттєво впливає на конкурентоспроможність продукції. Зношеність локомотивного парку призводить до зростання витрат на технічне обслуговування та ремонт. Тому оновлення локомотивного парку є важливим для забезпечення стабільності та більш ефективної роботи підприємств.

Підвищення тягово-енергетичних властивостей тепловозів та адаптації до умов експлуатації можна здійснити в разі їх модернізації. Відомі модернізації тепловозів 2ТЕ10М і ТЕМ7 із застосуванням дизелів виробництва АВС, які виконані ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод» (рис. 1, а) [9]. Також тепловози 2ТЕ10М(В) були модернізовані із застосуванням модуля SuperSkid виробництва GE Transportation [3] (рис. 1, б). Це підвищило паливну економічність тепловозів та зменшило шкідливі викиди. Слід зазначити, що на модернізованих тепловозах застосовано електричну передачу змінно-постійного струму. І саме збереження тягових колекторних електродвигунів унеможливило значне підвищення сили тяги в тривалих режимах роботи.

а – а



б – б



Рис. 1. Загальний вигляд модернізованих тепловозів (фото з мережі Internet):
а – модернізація ТОВ «МТРЗ»; б – модернізація з обладнанням GE Transportation

Fig. 1. General view of modernized diesel locomotives (photo from the Internet):
а – modernization by LLC MTRZ; б – modernization with GE Transportation equipment

Роботи з високою силою тяги за низьких швидкостей руху можуть бути забезпечені під час застосування тягового електроприводу на

основі електродвигунів змінного струму, зокрема асинхронних. Крім цього, електропривод такого типу забезпечує вищі коефіцієнти зчеплення [11] та вищу енергетичну ефективність

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

[13]. Також застосування тягового асинхронного електроприводу сприяє підвищенню надійності його роботи та зменшенню витрат на технічне обслуговування.

Іншим напрямом удосконалення тепловозів є підвищення їх паливної економічності. Цього можна досягти шляхом удосконалення керування тепловозом, наприклад, посекційним навантаженням [6]. Перспективним вбачається застосування гібридних енергетичних установок, це забезпечить можливість акумулювання енергії в разі електродинамічного гальмування. Результати робіт із застосування накопичувачів енергії на магістральних локомотивах показують можливість зниження споживання пального понад 25 % [5]. Так, експлуатаційні випробування акумуляторного локомотива FLXdrive розробки Wabtec у складі багатосекційного локомотива забезпечило зниження споживання пального на 11 % під час руху по маршруту [10].

Вбачаємо, що поєднання ефективного тягового електроприводу та гібридної енергетичної установки забезпечить відповідність характеристик тепловоза умовам його експлуатації.

Мета

Основною метою статті є визначення параметрів гібридної тягової системи вивізного локомотива промислових кар'єрних залізниць. Досягнення мети передбачає розв'язання задачі із визначення граничних параметрів локомотива та обґрунтування структури досліджуваної тягової системи.

Методика

Робота кар'єрних локомотивів із номінальними параметрами здійснюється під час руху на керівному підйомі, розгону та гальмування. В інших режимах робота здійснюється з частковим навантаженням, і тривалість таких режимів достатньо велика. Тому вбачаємо доцільним в разі вибору номінальних параметрів тягового електроприводу враховувати режими роботи.

Розв'язання цієї задачі продемонструємо на прикладі. На рис. 2 показано профіль колії на маршруті від пункту розвантаження до станції Відвальна Північного гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг). Вантажний напіврейс здійснено в напрямку пункту розвантаження.

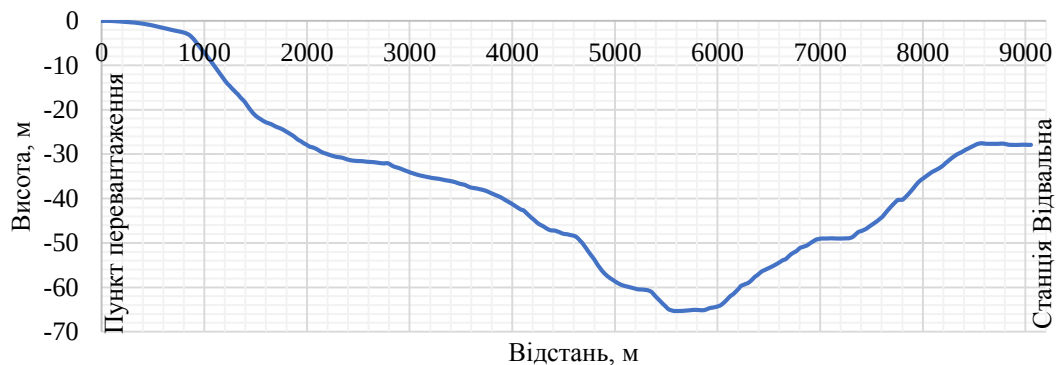


Рис. 2. Поздовжній профіль ділянки колії

Fig. 2. Longitudinal profile of the track section

Для вантажного напіврейсу найбільший підйом складає 35 %, а найбільший спуск – 28 %. Відповідно, для порожнього напіврейсу найбільший підйом складе 28 %, а спуск – 35 %. Довжина цих ділянок не перевищує довжини поїзда, однак для зручності візьмемо ці значення як розрахункові.

Граничні режими роботи тягового електроприводу, за якими буде визначено номінальні параметри, такі:

- тяга на керівному підйомі у вантажному напіврейсі;
- електродинамічне гальмування на керівному спуску у вантажному напіврейсі;
- тяга на керівному підйомі в порожньому напіврейсі;
- електродинамічне гальмування на керівному спуску в порожньому напіврейсі.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вибір таких режимів ґрунтується на тому, що в них різна маса поїзда та швидкості руху, від яких залежить потужність [7].

Аналіз тягових характеристик тепловозів з асинхронним приводом показує, що розрахунковий коефіцієнт зчеплення можна взяти щонайменше на 10...15 % більшим, ніж для тепловозів із колекторними електродвигунами.

Тоді розрахунковий коефіцієнт зчеплення можна визначити за виразом:

$$\Psi = k_{\Psi} \left(0,118 + \frac{5}{27,5 + V} \right), \quad (1)$$

де k_{Ψ} – коефіцієнт, який враховує тип тягового електроприводу. Для розрахунків узято рівним 1,15.

Вираз у дужках визначає коефіцієнт зчеплення серійних тепловозів [1].

Кількість думпкарів, яку зможе вести двосекційний тепловоз на керівному підйомі:

$$N_d = \left\lfloor \frac{F_k - w_l M_l - i g M_l}{w_d M_d - i g M_d} \right\rfloor, \quad (2)$$

де $F_k = M_l g \Psi$ (M_l – маса тепловозу, взята рівною 300 т; g – прискорення вільного падіння, рівне 9,81 м/с²); $w_l = (1,9 + 0,01V + 0,0003V^2)g$ – питомий опір руху тепловоза (V – швидкість руху у км/год); $w_d = (3,6 + 0,04V)g$ – питомий опір руху думпкарів; M_d – маса навантаженого думпкара, взято рівною 165 т; i – керівний ухил для вантажного напіврейсу, рівний 35 ‰.

Швидкість усталеного руху поїзда на керівному підйомі для певної кількості думпкарів визначено з рівняння:

$$\begin{aligned} M_l g k_{\Psi} \left(0,118 + \frac{5}{27,5 + V_p} \right) = \\ = (1,9 + 0,01V_p + 0,0003V_p^2) g M_l + \\ + (3,6 + 0,04V_p) g M_d N_d + i g (M_l + M_d N_d), \end{aligned} \quad (3)$$

де V_p – швидкість усталеного руху.

Після обчислення швидкості усталеного руху визначено дотичну потужність за виразом:

$$P_k = \frac{F_k V_p}{3,6}. \quad (4)$$

Результати розрахунків кількості думпкарів, усталеної швидкості та потужності наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку параметрів поїзда

Table 1

Results of calculation of train parameters

Кількість думпкарів	Швидкість усталеного руху на підйомі, км/год	Дотична потужність тепловоза, кВт
10	20,3	4 245
11	13,7	3 082
12	8,6	2 072

На рис. 3 показано залежність обмеження за зчепленням та опір руху поїзда з 10, 11 і 12 думпкарами. З нього видно, що обмеження за зчепленням знижується, що призводить до необхідності зменшення кількості думпкарів.

У випадку підвищення коефіцієнта зчеплення можливе деяке збільшення швидкості руху. У табл. 2 наведено результати розрахунку дотичної потужності для можливих варіантів складу поїзда та швидкостей руху 10 та 15 км/год на керівному підйомі.

Дотичну потужність визначено за (4) для значень швидкості, вказаних у табл. 2.

Дотичне тягове зусилля визначено за виразом:

$$F_k = w_l g M_l + w_d g M_d N_d + i g (M_l + M_d N_d). \quad (5)$$

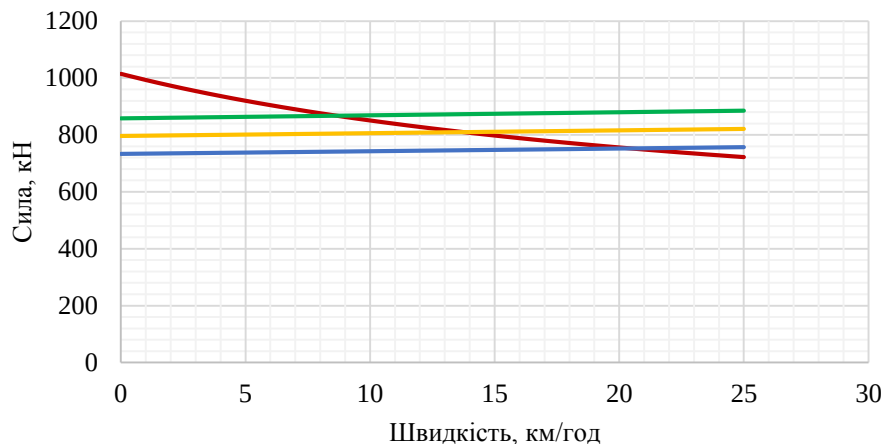


Рис. 3. Розрахункові залежності за зчепленням та опір руху на керівному підйомі (лінія червоного кольору – обмеження за зчепленням; лінія зеленого кольору – опір руху поїзда з 12 думпкарми; лінія жовтого кольору – опір руху поїзда з 11 думпкарми; лінія синього кольору – опір руху поїзда з 10 думпкарми)

Fig. 3. Estimated dependences on traction and resistance on the control climb (red line – traction limitations; green line – resistance to trains with 12 dump cars; yellow line – resistance to trains with 11 dump cars; blue line – resistance to trains with 10 dump cars)

Питомі опори руху локомотива та думпкарів визначено для швидкості руху, вказаній у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку параметрів руху

Table 2

Results of calculation of motion parameters

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	2 063
	11	2 239
	12*	2 414
15	10	3 116
	11*	3 380

*прогнозований варіант у разі підвищення коефіцієнта зчеплення

Аналіз даних табл. 1 і 2 показує, що для швидкості руху 10 км/год дотична потужність тепловоза становить від 2 063 до 2 414 кВт. Рух може здійснюватися з 10, 11 та 12 думпкарми.

Для швидкості руху 15 км/год дотична потужність становить 3 116 та 3 380 кВт, рух може здійснюватися з 10 та 11 думпкарми.

Рух зі швидкістю 20 км/год можливий із 10 думпкарми в поїзді. У цьому випадку дотична потужність буде 4 181 кВт.

Як бачимо, зі зменшенням кількості думпкарів у поїзді зростає швидкість руху на керівному підйомі. При цьому збільшення швидкості руху на керівному підйомі сприяє зменшенню тривалості рейсу, що опосередковано впливає на підвищення продуктивності локомотиво-складу. Водночас збільшення кількості думпкарів має безпосередній вплив на зростання продуктивності локомотиво-складу. Вбачаємо, що збільшення кількості думпкарів у поїзді є пріоритетним перед підвищенням швидкості. Однак варто відзначити, що визначення раціональних параметрів поїзда і режимів його руху є комплексною задачею.

Результати розрахунку параметрів руху в разі електродинамічного гальмування для навантаженого поїзда наведено в табл. 3. Для розрахунків узято, що обмеження за зчепленням не змінюється в гальмівних режимах роботи.

Зіставлення даних табл. 1–3 показує, що тяговий електропривід потужністю 2 200...2 500 кВт у тягових режимах та 3 000 кВт у режимах електродинамічного гальмування забезпечить водіння поїздів на досліджуваному профілі.

Таблиця 3

Результати розрахунку параметрів для руху навантаженого поїзда на спуску 28 ‰

Table 3

Results of calculating the parameters for the movement of a loaded train on a 28 ‰ grade

Швидкість на спуску, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	1 284
	11	1 392
	12	1 500
15	10	1 906
	11	2 067
	12	2 227
20	10	2 514
	11	2 727
	12	2 939

У табл. 4 і 5 наведено розрахунки для руху порожнього напіврейсу.

Таблиця 4

Результати розрахунку параметрів руху порожнього рейсу на підйомі 28 ‰

Table 4

Results of calculating the parameters of an empty flight on a 28 ‰ climb

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	689
	11	735
	12	776
15	10	1 044
	11	1 110
	12	1 176
20	10	1 406
	11	1 495
	12	1 583

Таблиця 5

Результати розрахунку параметрів руху порожнього рейсу на спуску 35 ‰

Table 5

Results of calculating the parameters of an empty flight on a 35 ‰ descent

Швидкість на підйомі, км/год	Кількість думпкарів	Дотична потужність, кВт
10	10	686
	11	727
	12	769
15	10	1 016
	11	1 079
	12	1 142
20	10	1 340
	11	1 424
	12	1 507

Як бачимо, під час руху у порожньому напіврейсі дотична потужність не перевищує значень, отриманих для вантажного напіврейсу. Тому вибір будемо проводити за даними для вантажного напіврейсу.

Згідно з розрахунками дотичної сили тяги за (5), тривала сила тяги для двосекційного тепловоза має становити 860...870 кН. Пускова сила тяги – 980...1 000 кН. Рух на кар’єрних залізницях здійснюють з низькими швидкостями – близько 20 км/год, і навряд чи будуть суттєво збільшувати. Тому швидкість роботи з повною потужністю можна взяти на рівні 25...30 км/год. Для можливості пересилання тепловозів необхідно забезпечити більш високу допустиму швидкість руху.

На рис. 4 показано граничну тягову та гальмівну характеристику двосекційного тепловоза за дотичної потужності 2 500 кВт у тяговому режимі і 3 000 кВт у режимі електродинамічного гальмування.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

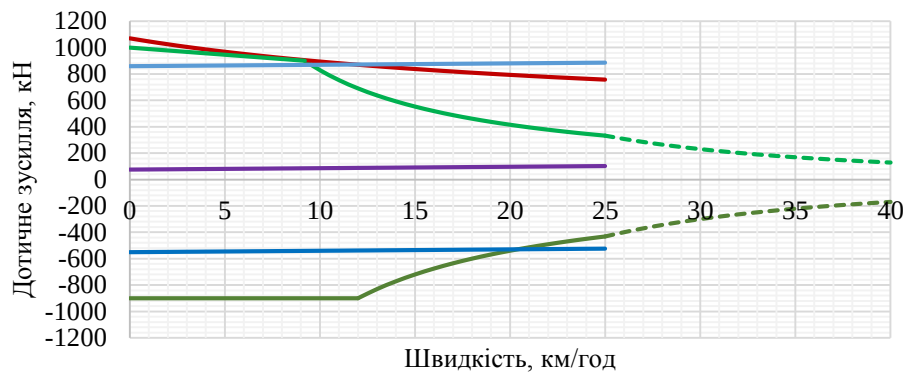


Рис. 4. Тягові характеристики тепловоза (лінія бордового кольору – обмеження за зчеплення для зчіпної маси 2х150 т; лінія світло-зеленого кольору – гранична тягова характеристика (пунктиром показано можливе зниження потужності); лінія блакитного кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпками на підйомі 35 %; лінія фіолетового кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпками на горизонтальній ділянці; лінія темно-зеленого кольору – гранична гальмівна характеристика; лінія синього кольору – опір руху навантаженого поїзда з 12 думпками на спуску 28 %)

Fig. 4. Traction characteristics of the locomotive (burgundy line – limit on traction at a coupling weight of 2x150 t; light green line – limit traction characteristic (dotted line shows possible power reduction); blue line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a 35% grade; purple line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a horizontal section; dark green line – limit braking characteristic; blue line – resistance to movement of a loaded train with 12 dump cars on a 28 % grade)

Результати

Для забезпечення високих показників тяговий електропривід має працювати з найвищими тяговими зусиллями. Це досягається за індивідуального живлення і керування тяговими асинхронними електродвигунами. У цьому випадку керування тяговим електродвигуном можна здійснювати з урахуванням фактичного зчеплення колеса з рейкою, яке може змінюватися як від стану поверхонь, які контактують, їх забруднення тощо, так і внаслідок коливань екіпажної частини, за яких буде виникати розвантаження осей. Такий тип приводу може бути створений як із редукторним приводом колісної пари, так і мати безредукторний колісно-моторний блок.

Можливим варіантом є повізкове (групове) живлення та керування тяговими асинхронними електродвигунами. Такий вид живлення застосовано на тепловозах серії Eurorunner виробництва Siemens [10], SD90MAC виробництва EMD та інших. Використання групового живлення і керування зменшує вартість напівпровідникового перетворювача. Однак при цьому втрачається можливість індивідуального керування тя-

говими асинхронними електродвигунами. Водночас теоретичні дослідження за результатами випробувань показують високі зчіпні властивості локомотивів із повізковим живленням і керуванням під час застосування асинхронних двигунів. У випадку використання серійних візків тепловозів 2TE10M, 2TE116 з розміщенням тягових електродвигунів один за одним у статичних режимах не виникає перерозподілу навантажень між осями візка під час дії обертового моменту електродвигуна [2]. Розвантаження осей виникає внаслідок коливань підресорених частин тепловоза, технологічних неточностей та під впливом експлуатаційних факторів, які порушують нормативний розподіл осьового навантаження. Для усунення цього негативного впливу можливе використання пристроїв, що довантажують візок.

Альтернативним варіантом є застосування моноmotorного візка з груповим приводом колісних пар [4, 5]. Також можливе застосування групового приводу усіх колісних пар, хоча це створить труднощі під час розміщення паливних баків під рамою тепловоза. Перевагою групового приводу колісних пар є їх механічне з'єднання, що суттєво підвищує стабільність зчеп-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лення. Однак такі варіанти потребують щонайменше розробки нового візка.

На багатьох ГЗК є як електрифіковані, так і неелектрифіковані ділянки. Для уніфікації локомотивного парку доцільно мати локомотив із дво-режимним живленням. Варіанти такого локомотива для кар'єрних залізниць наведено в [14]. При цьому для досліджуваного тепловоза рух під контактним проводом є додатковою функцією,

тому потужність у цьому режимі не буде перевищувати потужність під час руху від дизеля.

На рис. 5 показано варіант схеми тягової системи з комбінованою енергетичною установкою та тяговим електроприводом із повізковим живленням тягових електродвигунів, а на рис. 6 – варіант розміщення обладнання гібридної тягової системи в секції тепловоза 2ТЕ10М.

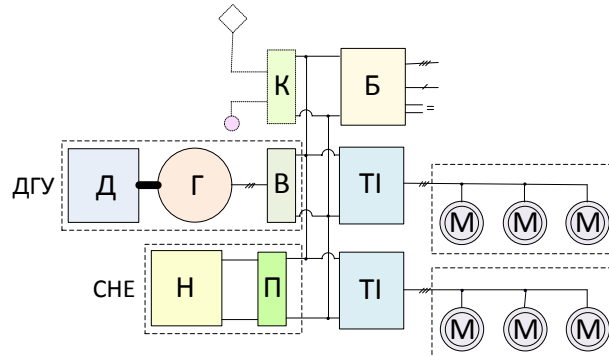


Рис. 5. Функціональна схема тягової системи шестивісної секції:

ДГУ – дизель-генераторна установка; СНЕ – система накопичення енергії; К – напівпровідниковий перетворювач контактної мережі; Д – дизель; Г – генератор; В – випрямляч; Н – накопичувач енергії;

П – погоджувальний перетворювач; ТІ – тяговий інвертор; М – тяговий асинхронний електродвигун;

Б – блок живлення допоміжних систем)

Fig. 5. Functional diagram of the traction system of a six-axle section:

ДГУ – diesel-generator set; СНЕ – energy storage system; К – semiconductor converter of the contact network;

Д – diesel; Г – generator; В – rectifier; Н – energy storage; П – matching converter; ТІ – traction inverter,

М – traction induction electric motor; Б – power supply unit for auxiliary systems

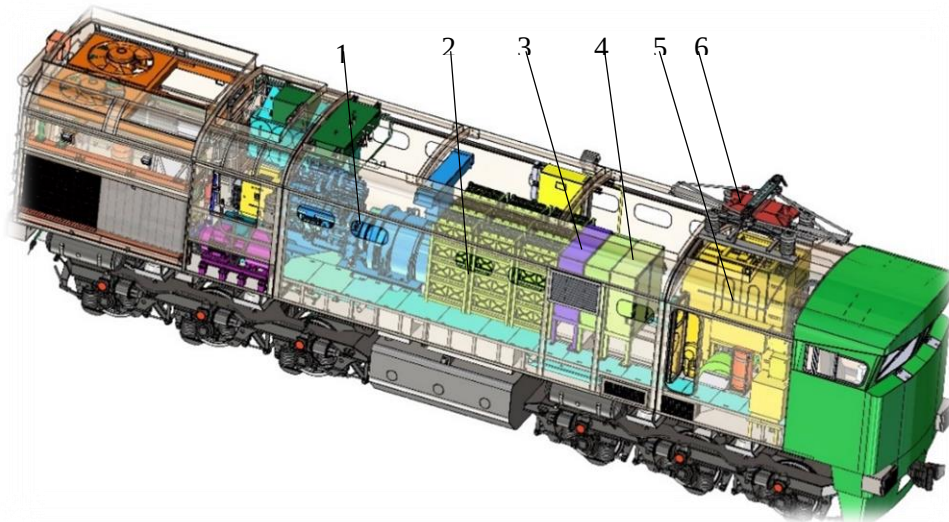


Рис. 6. 3D-ескіз розміщення обладнання гібридної тягової системи:

1 – дизель-генератор; 2 – система накопичення енергії; 3 – погоджувальний перетворювач;

4 – тягові інвертори; 5 – мережевий перетворювач; 6 – струприймач

Fig. 6. 3D sketch of the hybrid traction system equipment placement:

1 – diesel generator; 2 – energy storage system; 3 – shaving converter; 4 – traction inverters;

5 – network converter; 6 – pantograph

Енергетична установка складається з дизель-генераторної установки (ДГУ) та бортової системи накопичення енергії (СНЕ). Дизель-генераторна установка утворена дизельним двигуном (Д) та генератором змінного струму (Г). Випрямлення струму здійснюється випрямлячем (В), який вихідними виводами під'єднаний до спільної ланки постійної напруги. Система накопичення енергії утворена накопичувачем (Н) та погоджувальним перетворювачем (П). Для забезпечення можливості живлення від контактної мережі використовують мережевий перетворювач (К) та систему струмознімання, вид якого визначається родом струму, яким електрифіковано лінії на кар'єрі. Також мережевий перетворювач та супутні системи можна використовувати під час заряджання накопичувача енергії від стаціонарного зарядного пристрою.

Тяговий електропривід складається з двох ідентичних тягових інверторів (ТІ), за допомогою яких здійснюється живлення та керування тяговими асинхронними електродвигунами (М). До складу тягових інверторів можуть входити гальмівні перетворювачі. У цьому випадку у схемі будуть наявні гальмівні резистори. Для живлення допоміжних систем використовують блок джерел живлення (Б), у якому передбачено напівпровідникові перетворювачі для живлення мотор-вентиляторів охолодження тягових електричних машин, мотор-вентиляторів охолоджувальних пристроїв дизель-генераторів, гальмівного компресора, бортової мережі і т. д.

3D-моделювання показало можливість розміщення в секції тепловоза дизель-генераторної установки потужністю 800 кВт та накопичувача енергії ємністю 500 кВт·год з піковою потужністю 1 000 кВт. Обладнання з такими параметрами забезпечує роботу локомотива з граничними тяговими характеристиками. Уточнення параметрів може бути виконано шляхом моделювання руху поїзда та процесів енергетичного обміну.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано параметри тепловоза для вивізної роботи на промислових кар'єрних залізницях. Запропоновано структуру гібридної тягової системи для досліджуваного тепловоза та розроблено 3D-ескіз компонування обладнання такої системи.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час оновлення рухомого складу промислових та магістральних залізниць.

Висновки

Підвищення тягово-енергетичних показників тепловозів для вивізної роботи потребує вдосконалення їх тягових систем. Для підвищення тягових властивостей необхідно застосовувати тяговий електропривід з електродвигунами змінного струму. Зокрема, застосування асинхронного тягового електроприводу забезпечить тривалу роботу з великими значеннями сили тяги за низької швидкості.

Для зменшення споживання пального раціональним є використання гібридної енергетичної установки, яка може бути утворена дизелем та накопичувачем енергії. Доцільно обладнати локомотив пристроями, які забезпечуватимуть його живлення від контактної мережі під час руху по електрифікованих ділянках. Це сприяє зменшенню витрат на паливно-енергетичні ресурси.

За результатами розрахунків встановлено, що для водіння поїзда з 12 думпками на підйомах 35 % необхідний 12-вісний двосекційний тепловоз. Дотична потужність тепловоза має становити 2 200...2 500 кВт, що забезпечує рух зі швидкостями 8,6...10 км/год.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. *Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту*: навчальний посібник. Укр. держ. ун-т науки і технологій, Навч.-наук. ін-т «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». Дніпро, 2022. 113 с.
DOI: <https://doi.org/10.15802/978-966-2394-62-7>
2. Горобченко О. М. *Удосконалення тягових характеристик локомотивів шляхом підвищення коефіцієнта використання зчпної маси*: автореф. дис. ... канд.техн. наук. Укр. держ. акад. залізн. трансп. Харків, 2007. 22 с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Модернізація тягового рухомого складу. URL: <https://trz.com.ua/modernization-ua/>
4. Прокопов А. Є., Рябов Є. С. Покращення тягових властивостей промислових локомотивів. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»* (Харків, 19–22 лист. 2024 р.): Харків : НТУ «ХПІ», 2024. С. 305–308.
5. Рой С. В., Качан А. В., Тихонов А. С., Якунін Д. І., Рябов Є. С. Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 46. С. 93–102. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177>
6. Рябов Є. С., Єріцян Б. Х., Колодій І. М., Іванов С. В., Сич О. А., Галич А. В. Підвищення паливної ефективності магістрального тепловоза з роздільним навантаженням секцій. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306145>
7. Рябов Є. С., Мосін С. В., Овер'янова Л. В., Кондратьєва Л. Ю., Демидов О. В. Оцінка технічних параметрів локомотива для залізничного кар'єрного транспорту. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 39. С. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9>
8. *Diesel-electric freight locomotive Eurorunner ER20 CF for Lithuanian Railways (LG)*. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/22796773/diesel-electric-freight-locomotive-eurorunner-er20-cf-siemens>
9. *Engines for traction*. URL: <https://www.abc-engines.com/en/markets/engines-for-traction>
10. *FLXdrive*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuellocomotives/flxdrive>
11. Graff M. Vectron as an Example of a Modern and Versatile Electric and Diesel Locomotive for Passenger and Freight Transport. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*. 2022. Vol. 66. Iss. 196. P. 105–130. DOI: <https://doi.org/10.36137/1962e>
12. Iden M. E. Battery Storage of Propulsion-Energy for Locomotives. *2014 Joint Rail Conference* (Colorado, 2–4 April, 2014). Colorado, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3805>
13. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołbiewski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L., Opala M. Method of Seleting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives—Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ЧМЕ3, ЧКД S200). *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 1. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010317>
14. Riabov Ie., Iakunin D., Tykhonov A., Roi S., Kachan A. Dual-Powered Locomotive for Hauling Operations in Quarries. *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. 2024. P. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P26-29>

Ie. S. RIABOV^{1*}, B. Kh. YERITSIAN², A. S. TYKHONOV³, O. A. KHAZOV⁴

^{1*}Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrychova Str., 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», Kyrychova Str., 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», Kyrychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail Andrii.Tykhonov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0002-7014-1186

⁴Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 65 30, e-mail oleksii.khazov@iee.khpi.edu.ua, ORCID 0009-0007-8922-5888

Hybrid Traction System for a Haulage Locomotive for Industrial Quarry Railways

Purpose. The article aims to determine the parameters of a hybrid traction system for a diesel locomotive for haulage work on industrial quarry railways. **Methodology.** The study was carried out on the example of a section of the quarry railroad of the Northern Mining and Processing Plant. It is shown that in order to determine the parameters of the traction system, it is necessary to take into account the work in the traction and braking systems for the freight and empty semi-trains. The calculations were performed using the provisions of the theory of locomotive traction. **Findings.** It has been determined that on a given track profile with a maximum elevation of 35 ‰, a two-section twelve-axle diesel locomotive can drive a train with 12 loaded cars (dump cars). The speed is 10 km/h, and the power

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

output is about 2,400 kW. To ensure the braking of a loaded train on the studied route (the largest slope (downhill) is 28 ‰), the tangential power should be 3,000 kW, and the movement will be carried out at a speed of 15 km/h. It is proposed to use a hybrid traction system, the power plant of which includes an energy storage device. To ensure high traction properties, it is necessary to use a traction electric drive based on AC motors. When using traction asynchronous electric motors, it is possible to use bogie power supply and control of electric motors, which will ensure high traction properties of the locomotive. The expediency of equipping the locomotive with devices that provide its power supply from the contact network while moving along electrified sections is shown. A 3D sketch of the hybrid traction system equipment placement on the 2TE10M diesel locomotive was developed. To develop the sketch, models of an 800 kW diesel generator set and a 500 kWh energy storage device with a peak capacity of 1,000 kW were used.

Originality. The parameters of a dual-mode locomotive equipped with a hybrid traction system and designed for haulage operations on industrial quarry railways have been determined. **Practical value.** The obtained results can be used in the development of projects for the modernization of diesel locomotives and the creation of new traction rolling stock for quarry and mainline railways.

Keywords: rolling stock; locomotive; hybrid traction system; diesel engine; energy storage; traction electric drive; traction induction motor

REFERENCES

1. Bobyr, D. V., Kapitsa, M. I., & Serdiuk, V. N. (2022). *Theory of locomotive traction. Traction calculations for industrial railway transport: manual*. Ukr. State Univ. of Science and Technologies, Educational and Scientific Institute «Dnipro Institute of Infrastructure and Transport». Dnipro.
DOI: <https://doi.org/10.15802/978-966-2394-62-7> (in Ukrainian)
2. Gorobchenko, A. N. (2007). *Increase of locomotives traction properties by increase operating ratio of coupling weight* (Extended abstract of PhD dissertation). Ukrainian state academy of a railway transport. Kharkov, Ukraine. (in Ukrainian)
3. *Modernization of locomotives*. Retrieved from <https://trz.com.ua/modernization-ua/> (in Ukrainian)
4. Prokopov, A. Ye., & Riabov, Ye. S. (2024). Pokrashchennia tiahovykh vlastyvostei promyslovykh lokomotyviv. In *XVIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh»*. Kharkiv: NTU «KhPI». (in Ukrainian)
5. Roi, S. V., Kachan, A. V., Tykhonov, A. S., Iakunin, D. I., & Riabov, Ye. S. (2023). Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 46, 93-102.
DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288177> (in Ukrainian)
6. Riabov, Ye. S., Yeritsian, B. Kh., Kolodii, I. M., Ivanov, S. V., Sych, O. A., & Halych, A. V. (2024). Increasing the Fuel Efficiency of a Mainline Diesel Locomotive with Separate Section Loading. *Science and Transport Progress*, 2(106), 64-79. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/306145> (in Ukrainian)
7. Riabov, I., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Goolak, S. (2022). Evaluation of technical parameters locomotive for railway career transport. *Transport systems and technologies*, 39, 83-100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> (in Ukrainian)
8. *Diesel-electric freight locomotive Eurorunner ER20 CF for Lithuanian Railways (LG)*. Retrieved from <https://www.yumpu.com/en/document/view/22796773/diesel-electric-freight-locomotive-eurorunner-er20-cf-siemens> (in English)
9. *Engines for traction*. Retrieved from <https://www.abc-engines.com/en/markets/engines-for-traction> (in English)
10. *FLXdrive*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuellocomotives/flxdrive> (in English)
11. Graff, M. (2022). Vectron as an Example of a Modern and Versatile Electric and Diesel Locomotive for Passenger and Freight Transport. *Problemy Kolejnictwa – Railway Reports*, 66(196), 105-130.
DOI: <https://doi.org/10.36137/1962e> (in English)
12. Iden, M. E. (2014, April). Battery Storage of Propulsion-Energy for Locomotives. In *2014 Joint Rail Conference*. Colorado, USA. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3805> (in English)
13. Kuznetsov V., Kardas-Cinal E., Gołębowski P., Liubarskyi B., Gasanov M., Riabov I., Kondratieva L. & Opala M. (2022). Method of Selecting Energy-Efficient Parameters of an Electric Asynchronous Traction Motor for Diesel Shunting Locomotives – Case Study on the Example of a Locomotive Series ChME3 (ЧМЭ3, ČME3, ČKD S200). *Energies*, 15(1), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010317> (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Riabov Ie., Iakunin D., Tykhonov A., Roi S., Kachan A. (2024). Dual-Powered Locomotive for Hauling Operations in Quarries. In *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference* (pp. 26-29). DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P26-29> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.11.2024

Прийнята до друку: 14.03.2025