

УДК 629.4

**Євген Рябов^{1*}, Сергій Мосін², Лілія Овер'янова³, Лілія Кондратьєва⁴,
Олександр Демидов⁵, Сергій Гулак⁶**

¹ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

² Головний інженер залізничного цеху, ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат», вул. Будівельників, 16, м. Горішні Плавні, Полтавська обл., 39802, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8281-6235>

³ Доцент, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

⁴ Аспірантка, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2788-9116>

⁵ Старший викладач, Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0532-9748>

⁶ Доцент, Кафедра «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

*Автор, відповідальний за листування: riabov.ievgen@gmail.com

ОЦІНКА ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛОКОМОТИВА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО КАР'ЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

Проведено оцінку основних технічних параметрів локомотива для кар'єрного залізничного транспорту. Визначені розрахункові параметри локомотиву та встановлено, що дотична потужність становить 6700 кВт, а тягове зусилля для розрахункового режиму – 1300 кН. Виконано розрахунки тягової характеристики локомотива. Запропоновано процедуру визначення параметрів режимів роботи локомотива при виконанні поїзних задач, в основу якої лежить обробка результатів розв'язання тягової задачі на ділянці шляху. Встановлено, що для тестової ділянки шляху значну частину часу у тяговому режимі локомотив працює з навантаженням, яке становить 10...25% номінального, у зв'язку з чим запропоновано реалізувати режим руху з відключенням тягових електродвигунів. Запропоновано застосування бортової системи накопичення енергії, що дозволить акумулювати енергію при електродинамічному гальмуванні. Запропоновано узагальнену схему тягової системи, яка дозволить реалізувати способи підвищення енергоефективності рухомого складу.

Ключові слова: локомотив, сила тяги, тяговий електропривод, енергоефективність.

Вступ. Декарбонізацію економіки та досягнення кліматичної нейтральності визначено пріоритетним напрямом у Національній економічній стратегії на період до 2030 року [1]. Відповідно до зазначених цілей підприємства гірничо-металургійної галузі сформулювали

власні програми екологізації виробничих процесів, у яких пріоритетне місце займає впровадження інноваційних технологій на усіх етапах виробництва [2].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Важливою ланкою у виробництві залізрудного концентрату є перевезення гірської маси з кар'єру до переробного комплексу комбінату. На цьому етапі широко застосовується залізничний транспорт, який може використовуватись як самостійно (здебільшого на кар'єрах Криворізького басейну), так і у складі комбінованого способу вивезення гірської маси (наприклад, на ПрАТ «Полтавський ГЗК»). На електрифікованих ділянках для цього застосовуються поїзди, що складаються з думпкарів та тягових агрегатів ОПЕ1А(М) (рис. 1, а) при електрифікації змінним струмом та тягові агрегати ПЕ2У/М при електрифікації постійним струмом. Головними перевагами від їх застосування є високий коефіцієнт корисної дії та низькі затрати на перевезення гірської маси. На неелектрифікованих ділянках використовують тепловози 2ТЕ10В/М, 2ТЕ116, ТЕМ2, ТЕМ7 (рис. 1, б).

Хоча вищезазначені локомотиви забезпечують водіння поїздів, однак вони мають тривалі терміни експлуатації (і часто експлуатуються у понад рекомендовані виробником строки). Другим важливим недоліком є підвищене у порівнянні із сучасною технікою споживання паливо-енергетичних ресурсів, що пов'язане з використанням застарілих технічних рішень при побудові тягового електроприводу та допоміжних систем (навіть з урахування модернізації та часткової заміни обладнання). Виходом із цієї ситуації вважаємо перехід до застосування новітнього тягового рухомого складу.



а)



б)

*Рис. 1. Локомотиви для залізничного кар'єрного транспорту
а – тяговий агрегат ОПЕ1АМ, б – тепловози ТЕМ7*

Зважаючи на високу енергетичну та екологічну ефективність електричної тяги вітчизняні гірничодобувні підприємства планують інтенсивно розбудовувати системи електричної тяги

внутрішнього залізничного транспорту [3]. За оцінками [4], на електричну тягу у кар'єрі припадає до 85% всього споживання енергії. Тому створення рухомого складу повинно відбуватися з позицій забезпечення його високої енергоефективності та низького впливу на навколишнє середовище. До таких технологій у електричній тязі можна віднести: рекуперацію енергії у поєднанні із застосуванням бортових систем накопичення енергії [5-9], відключення тягових електродвигунів при роботі з частковим навантаженням [10, 11], керований електропривод допоміжних систем [12-14]. Оптимізація енергоспоживання забезпечується відповідними алгоритмами керування системами локомотива [15-18].

На сьогоднішній день найпоширенішою практикою є застосування на рухомому складі тягового асинхронного електроприводу [19, 20]. У роботі [21] проведено обґрунтування можливості і доцільності застосування асинхронного тягового електроприводу на кар'єрних локомотивах, а також запропоновані технічні параметри перспективних кар'єрних локомотивів. Разом з тим вважаємо за доцільне провести уточнення запропонованих характеристик з метою створення локомотиву, найбільш ефективного в умовах експлуатації у кар'єрі.

Метою роботи є оцінка технічних параметрів локомотива для електрифікованих ліній залізничного кар'єрного транспорту.

Матеріали та методи дослідження. Процедурі оцінки технічних параметрів проведемо на прикладі локомотива для ПрАТ «Полтавський ГЗК». На цьому підприємстві застосована система електричної тяги змінного струму 10 кВ, 50 Гц. На електрифікованих лініях експлуатуються тягові агрегати ОПЕ1А(М). Перевезення гірської маси здійснюються постійно сформованими складами з 14 думпкарів 2ВС105. Маса завантаженого думпкару – 156 т. Обмеження швидкості руху – 20 км/год. За результатами аналізу профілів ділянок встановлено, що розрахунковий (керівний) підйом складає близько 40 %. Довжина підйому – 450 м, на підйомі розташована крива з радіусом близько 500 м. Також є ділянки із ухилом 30 % довжиною 500..600 м. За технологічними умовами роботи рух поїзду від пункту перевантаження до переробного комплексу здійснюється вагонами уперед.

Розрахунки виконано відповідно [22].

Дотична сила тяги розраховується за виразом

$$F_k = \Psi_k (q_0 N_0) N_L \quad (1)$$

де Ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення колеса з рейкою відповідно до [23],

q_0 – осьове навантаження локомотива,

N_0 – кількість осей локомотива в одній секції,

N_L – кількість секцій локомотива.

Сила опору рухові визначається як

$$F_r = (N_L M_L) w_L + (N_w M_w) w_w, \quad (2)$$

де M_L – маса локомотиву, визначається за виразом $M_L = (q_0 N_0) N_L$,

w_L – питомий опір рухові локомотива,

N_w – кількість думпкарів, приймає рівною 14,

M_w – маса навантаженого думпкара, приймаємо рівною 156 т,

w_w – питомий опір рухові думпкара.

Питомий опір рухові локомотива та вагонів у загальному вигляді визначається за таким виразом

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_s + w_d \quad (3)$$

де w_o – основний питомий опір рухові,

w_i – додатковий питомий опір рухові від ухилу,

w_r – додатковий питомий опір рухові від руху у кривій,

w_p – додатковий питомий опір рухові від руху вагонами уперед.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору наведено в [24].

Розглянемо 12-ти, 16-ти та 18-ти вісні локомотиви. Результати розрахунків при різному осьовому навантаженні наведено у табл.1. Розрахункова швидкість визначається як точка перетину кривої сили опору рухові та кривої обмеження по зчепленню.

Таблиця 1. Розрахункові параметри локомотива

Найменування параметра	Величина					
	12	12	16	16	16	18
Кількість осей локомотива	12	12	16	16	16	18
Навантаження на вісь, т	31,0	33,0	22,5	25,0	27,5	22,5
Сила тяги локомотива, кН	1173	1197	1162	1210	1252	1207
Розрахункова швидкість, км/год	11,5	18,4	8,6	19,7	33,4	21,4
Дотична потужність, кВт	3750	6120	2780	6620	11615	7175

Аналіз даних в табл. 1 показує, що при розрахунковій швидкості руху на керівному підйомі сила тяги становить 1173...1252 кН і змінюється несуттєво. Це обумовлено тим, що сила тяги, яка спрямована на подолання опору від ухилу, складає близько 1000 кН (85% від загального опору руху поїзда). З урахування деякого запасу доцільно прийняти за розрахункову силу тяги, рівну 1300 кН.

Водночас із табл.1 впливає, що розрахункова швидкість змінюється у широкому діапазоні – від 8,6 км/год до 33,4 км/год, внаслідок чого також змінюється дотична потужність локомотива – від 2780 кВт до 11615 кВт. Зважаючи на те, що допустима швидкість руху становить 20 км/ч, доцільним вважаємо забезпечити можливість руху поїзду на керівному підйомі зі швидкістю, близькою до максимально допустимої. Цій умові задовольняють 16-ти вісний локомотив з осьовим навантаженням не менше 25,0 т та 18-ти вісний локомотив з навантаженням 22,5 т. Дотичну потужність при цьому можна прийняти рівною 6700 кВт.

Додаткового дослідження вимагають варіант 12-ти вісного локомотива. Для локомотива з осьовим навантаженням 31 т на керівному ухилі 40 ‰ рівноважна швидкість складе 11,5 км/год при дотичній потужності 3750 кВт, а на ділянці з ухилом 30 ‰ при цій же дотичній потужності – 14,6 км/год. Тобто, внаслідок зменшення швидкості руху на ділянках з суттєвим ухилом зросте тривалість руху по них, а отже зросте і сумарний час руху на ділянці. Можливість збільшення тривалості рейсу роботи потребує додаткового узгодження.

Для 12-ти вісного локомотива з осьовим навантаженням 33 т потрібно додаткове вивчення взаємодії локомотива з інфраструктурою кар'єру в цілому.

З табл.1 видно, що для збільшення розрахункової швидкості руху необхідне збільшення осьового навантаження або кількості осей локомотива. Це пояснюється тим, що сила зчеплення при роботі на кривій по обмеженню зчеплення зменшується зі збільшенням швидкості. З іншого боку, збільшення осьового навантаження або кількості осей локомотива є доцільним з точки зору забезпечення умов стабільного водіння поїздів при зниженні коефіцієнта зчеплення.

Граничну розрахункову тягову характеристику локомотива зчійною масою 400 т подано на рис. 2.

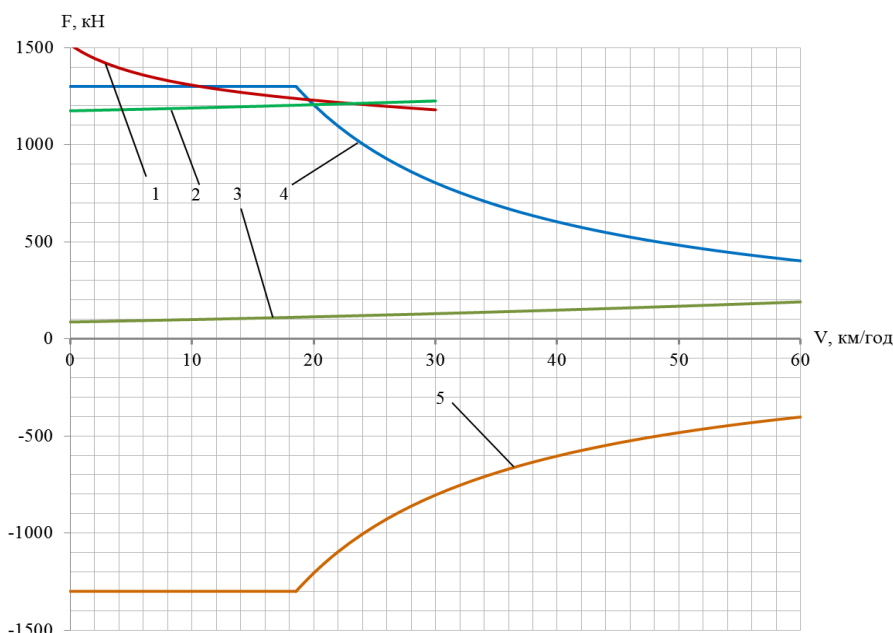


Рис. 2. Гранічні тягова та гальмівна характеристики локомотива

- 1 – обмеження по зчепленню; 2 – сила опору руху на розрахунковому ухилі;
 3 – сила опору руху на горизонтальній ділянці; 4 – гранична тягова характеристика;
 5 – гранична гальмівна характеристика

При визначенні проектних показників енергоефективності кар'єрного локомотива доцільно орієнтуватися на вимоги до локомотивів магістрального транспорту. Для локомотива з асинхронним тяговим електроприводом та живленням від мережі змінного струму нормативними документами встановлюється значення коефіцієнта корисної дії не менше 0,86 при роботі у тривалому режимі з номінальною потужністю, при номінальній напрузі на струмоприймачеві при швидкості, яка відповідає тривалому режиму роботи. Величина коефіцієнта потужності повинна становити не менше 0,95 при роботі з потужністю у діапазоні 25...100 % від номінальної. Тобто вимоги по коефіцієнту потужності враховують зміну режимів роботи локомотива, а додаткових вимог до коефіцієнта корисної дії не має. Однак, аналіз експериментальних даних щодо енергоспоживання рухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом на магістральних залізницях показує, що сумарна витрата енергії цими локомотивами для значної частини поїзної роботи більша, ніж у випадку рухомого складу з колекторними електродвигунами [25]. У більшості випадків причиною цього є саме робота локомотива, обладнаного асинхронним тяговим електроприводом, у режимах з потужністю менше номінальної. Тому вважаємо за необхідне провести дослідження режимів роботи локомотива. Це можливо виконати шляхом моделювання руху потяга.

Математична модель руху потяга як одномасової системи має вигляд

$$\begin{cases} \rho M \frac{dV}{dt} = F_L - F_R \\ \frac{dS}{dt} = V \end{cases} \quad (4),$$

де M – маса поїзда,

ρ – коефіцієнт врахування мас, що обертаються, прийнятий рівним 1,1,

V – швидкість поїзда,
 S – шлях, що пройдено,
 F_L – дотична сила (тяги або гальмування) локомотива,
 F_R – сила опору руху локомотива.

У формулі (4) прийнято, що використовується тільки електродинамічне гальмування. Приймаємо, що гранична гальмівна характеристика симетрична граничній тяговій характеристиці відносно осі абсцис. Приймаємо, що сила тяги (гальмування) може приймати будь-яке значення в області, яка обмежена граничною тяговою (гальмівною характеристикою) [26]. Інтенсивність зміни дотичної сили – 70 кН/с.

Сила опору руху визначається за виразом (2) з урахуванням (3) та рекомендацій, наведених у [24, 27, 28]. Допустима швидкість руху – 20 км/год.

Моделювання виконано для варіанта руху навантаженого локомотива-складу від пункту перевантаження до дробарної фабрики. Маса поїзда прийнята рівною 2584 т (локомотив масою 400 т та 14 думпкарів масою 156 т кожен). Результати розв'язання рівнянь руху наведено у вигляді графіків на рис. 3 та 4.

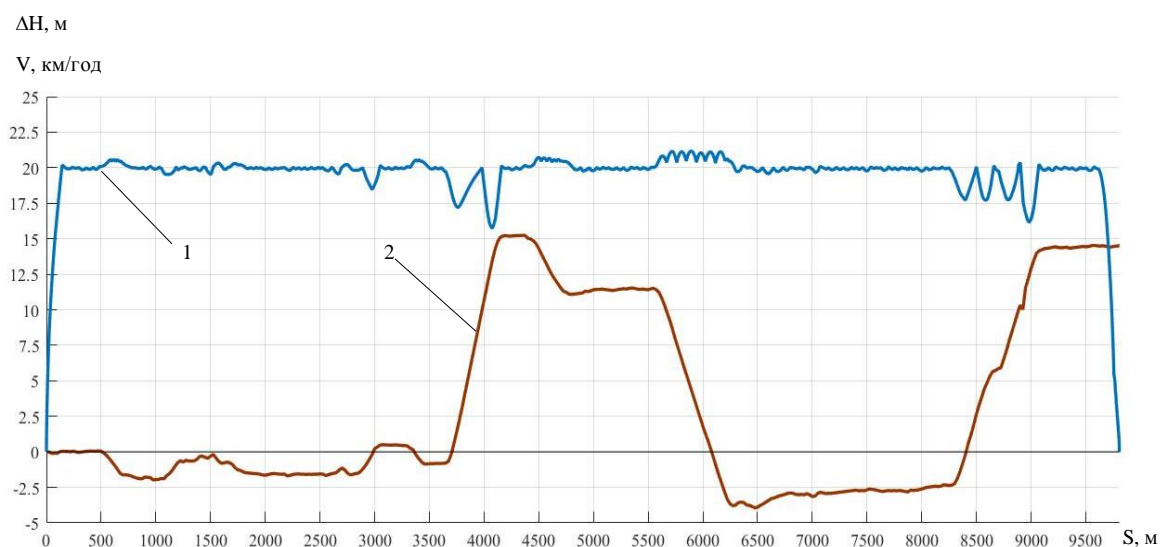
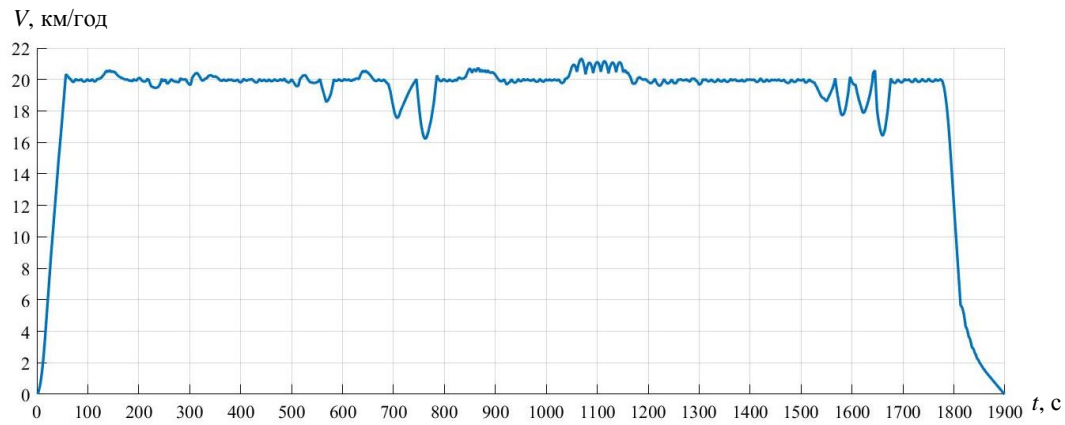


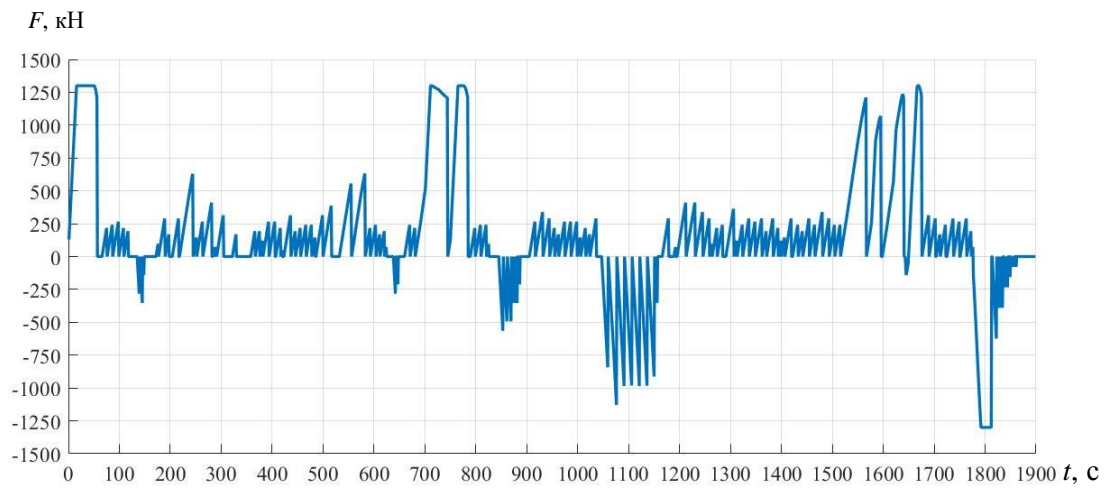
Рис. 3. Швидкість поїзда та профіль шляху
 1 – залежність швидкості руху поїзда від шляху; 2 – профіль шляху

Аналіз залежності швидкості від часу (рис. 3) показує, що поїзд практично весь шлях рухається з допустимою швидкістю. Зменшення швидкості до 16 км/год має місце на крутих підйомах та пояснюється інертністю при збільшенні сили тяги. Перевищення допустимої швидкості складає менше 1 км/год., що обумовлено алгоритмом роботи системи керування.

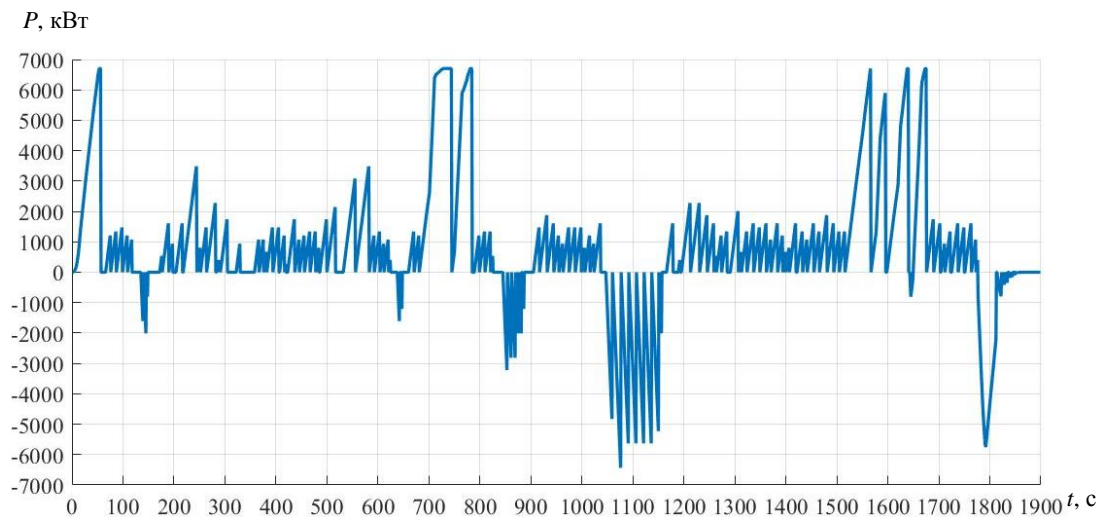
Тривалість рейсу від пункту перевантаження до дробарної фабрики становить 1900 с (31,7 хв.).



а)



б)



в)

Рис. 4. Результати тягових розрахунків

а – залежність швидкості від часу; б – залежність дотичної сили від часу;

в – залежність дотичної потужності від часу

Аналіз залежності швидкості від часу (рис. 4, а) свідчить, що поїзд практично весь час рухається з допустимою швидкістю. Зменшення швидкості до 16 км/год має місце на крутих підйомах та пояснюється інертністю при збільшенні сили тяги. Перевищення допустимої швидкості складає менше 1 км/год, що обумовлено алгоритмом роботи системи керування.

Аналіз залежності дотичної сили локомотива (рис. 4, б) свідчить, що робота на граничній тяговій характеристиці здійснюється при розгоні, під час руху на керівних підйомах та при гальмуванні. Під час руху на ділянці шляху найбільше значення дотичної сили становить близько 600 кН. При цьому найчастіше сила тяги має значення не більше 300 кН.

Аналіз залежності дотичної потужності (рис. 4, в) свідчить, що робота з розрахунковою потужністю здійснюється при розгоні, на розрахункових підйомах та при гальмуванні. Під час руху по ділянці найбільше значення дотичної потужності складає 3500 кВт. Найчастіше локомотив працює з дотичною потужністю, яка не перевищує 2000 кВт.

Варто звернути увагу, що залежності дотичної сили та дотичної потужності мають ідентичний вигляд, оскільки рух здійснюється при практично постійній швидкості.

Для більш детального аналізу режимів роботи тягового електроприводу проведено визначення параметрів його роботи у тяговій області. На рис. 5 показано розподіл швидкості та дотичної сили у тяговій області під час руху від пункту перевантаження до збагачувальної фабрики.

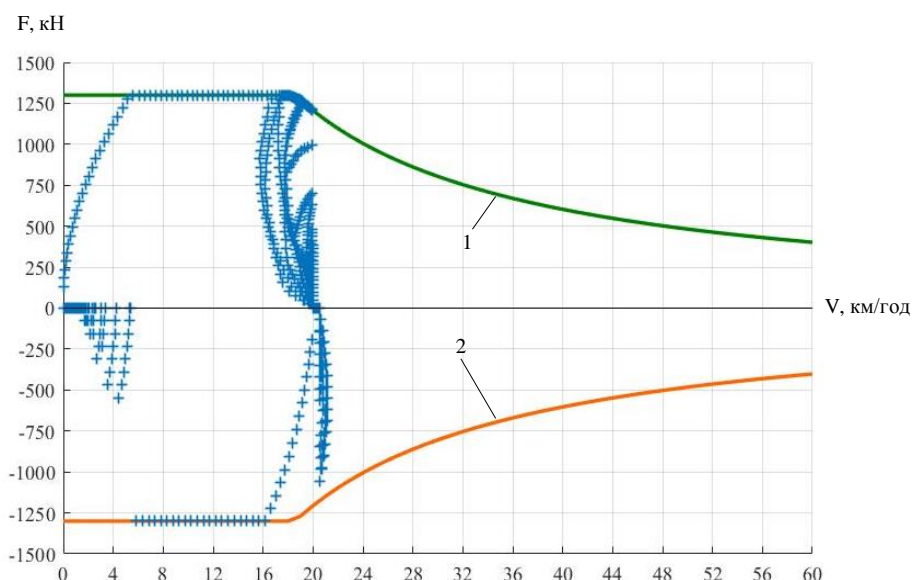


Рис. 5. Розподіл швидкості та дотичної сили у тяговій області

1 – гранична тягова характеристика, 2 – гранична гальмівна характеристика

Для оцінки тривалості роботи виконаємо таку процедуру. Розділимо тягову область на діапазони за швидкістю та силою тяги. Чисельні значення діапазонів наведено у табл. 2. Для кожної із можливих комбінацій діапазонів визначаємо тривалість роботи електроприводу.

На рис. 6 подано графічне зображення розподілу часу у відсотках від загального часу руху по ділянці. На рис. 6 і далі на шкалі « N_V » чисельне значення вказує номер діапазону за швидкістю, на шкалі « N_F » – номер діапазону за дотичною силою. На вертикальній шкалі показано тривалість роботи у відсотках від загального часу.

Таблиця 2. Розподіл тягової області на діапазони

Номер діапазону за швидкістю	Значення швидкості у діапазоні, км/год	Номер діапазону за дотичною силою	Значення дотичної сили (по модулю) у діапазоні, кН
1	0...1	1	0...100
2	1...2	2	100...200
3	2...3	3	200...300
4	3...4	4	300...400
5	4...5	5	400...500
6	5...6	6	500...600
7	6...7	7	600...700
8	7...8	8	700...800
9	8...9	9	700...900
10	9...10	10	900...1000
11	10...11	11	1000...1100
12	11...12	12	1100...1200
13	12...13	13	1200...1300
14	13...14	–	–
15	14...15	–	–
16	15...16	–	–
17	16...17	–	–
18	17...18	–	–
19	18...19	–	–
20	19...20	–	–
21	20...21	–	–
22	21...22	–	–

Для оцінки дотичної потужності розглянемо розподіл часу роботи на прикладі руху зі швидкістю, близькою до допустимої, як найбільш тривалого режиму роботи.

Аналіз даних, за результатами яких побудовано залежності на рис. 6, показує, що тривалість роботи локомотива у режимі тяги складає 66,2 % (1258 с), у гальмівному режимі – 11,9% (227 с), у режимі вибігу – 21,9 % (415 с).

Значну частину часу локомотив працює у тяговому режимі в діапазоні зі швидкістю близько 20 км/год при значеннях сили тяги, які не перевищують 300 кН.

Тривалість роботи з силою тяги, яка відповідає максимальній на граничній тяговій характеристиці, становить 1,7% від загального часу руху.

У табл. 3 наведено розподіл часу при роботі локомотива у тяговому режимі у діапазоні швидкості 19...20 км/год, на який припадає значна тривалість роботи.

З табл. 3 випливає, що під час руху поїзда у режимі підтримання швидкості у тяговому режимі тяговий електропривід найчастіше працює з потужністю не більше 1500 кВт, що становить 22% від номінальної потужності. У режимі електродинамічного гальмування тяговий електропривід найбільш тривалий час працює з потужністю до 2500 кВт (37% номінальної) та з потужністю, близькою до номінальної.

Витрата енергії на тягу «на колесі» – 435 кВт·год, доступна для запасання енергія «на колесі» – 232 кВт·год.

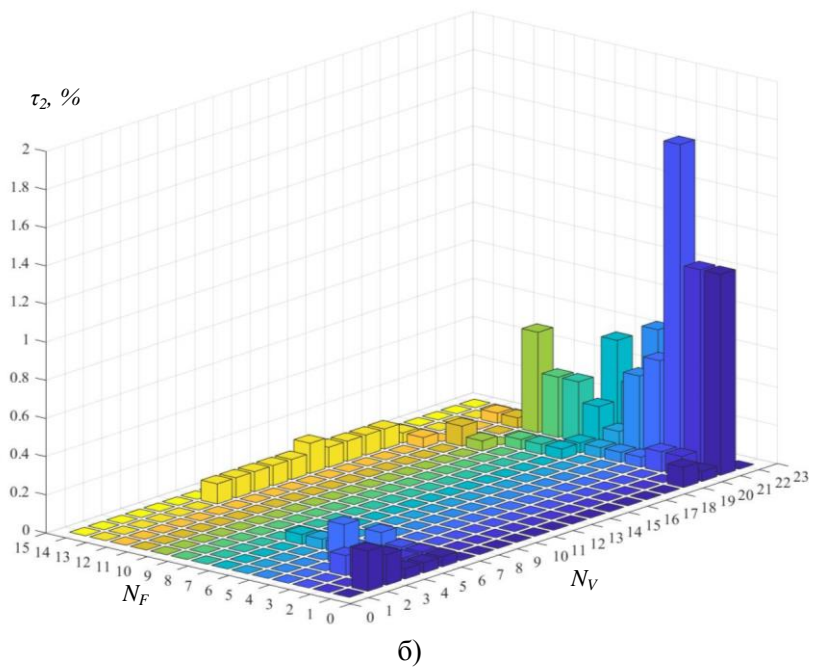
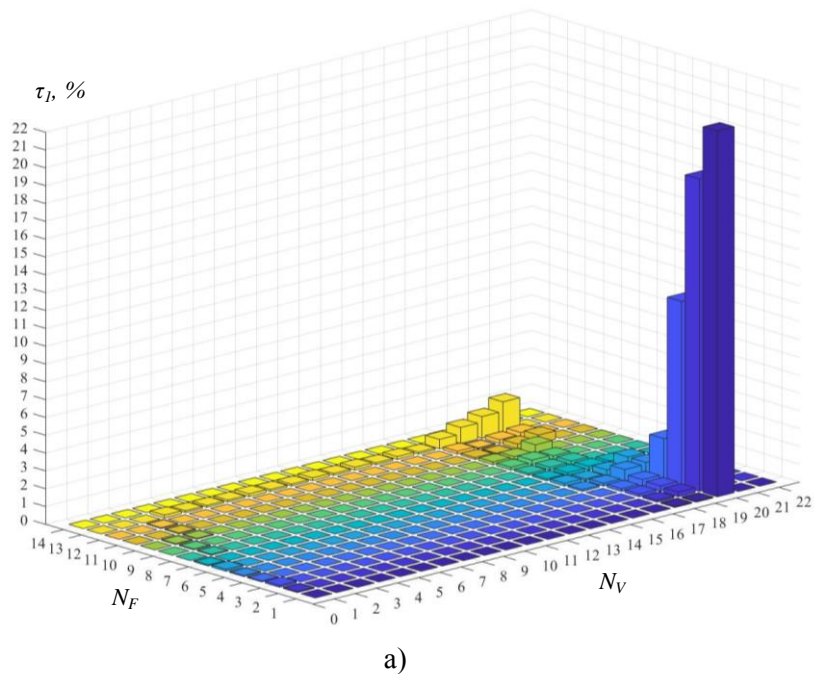


Рис. 6. Розподіл часу роботи при русі у прямому напівреїсі
а – у режимі тяги; б – у режимі електродинамічного гальмування

Таблиця 3. Розподіл часу роботи під час руху з допустимою швидкістю

Номер діапазону за дотичною потужністю	Значення потужності у діапазоні, кВт	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі тяги, %	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі гальмування, %
1	0...500	23,6	6,5
2	500...1000	27,8	6,2
3	1000...1500	19,1	6,2
4	1500...2000	4,8	5,1
5	2000...2500	1,9	8,7
6	2500...3000	1,1	3,6
7	3000...3500	0,7	4,0
8	3500...4000	0	3,2
9	4000...4500	0	5,8
10	4500...5000	0	2,9
11	5000...5500	0,2	2,5
12	5500...6000	0,4	2,5
13	6000...6500	0,4	4,0
14	6500...7000	2,6	8,7

Аналогічно вище викладеному, виконано тягові розрахунки та проведено аналіз їх результатів для випадку руху поїзда у зворотному напрямку – від дробарної фабрики до пункту перевантаження. При цьому маса порожнього думпкара прийнята рівною 52 т, рух здійснюється у спосіб «локомотив уперед». На рис. 7 подано розподіл тривалості роботи тягового електроприводу для зворотного напрямку руху – від дробарної фабрики до пункту перевантаження.

Аналіз результатів розрахунків для цього випадку свідчить, що тривалість роботи локомотива у режимі тяги складає 56,3 % (1062 с), у гальмівному режимі – 13,0% (246 с), у режимі вибігу – 30,7 % (578 с) від загального часу руху. Загальний час руху – 1887 с (31,5 хв.). Витрата енергії на тягу «на колесі» – 193 кВт·год, доступна для запасання енергії «на колесі» – 101 кВт·год

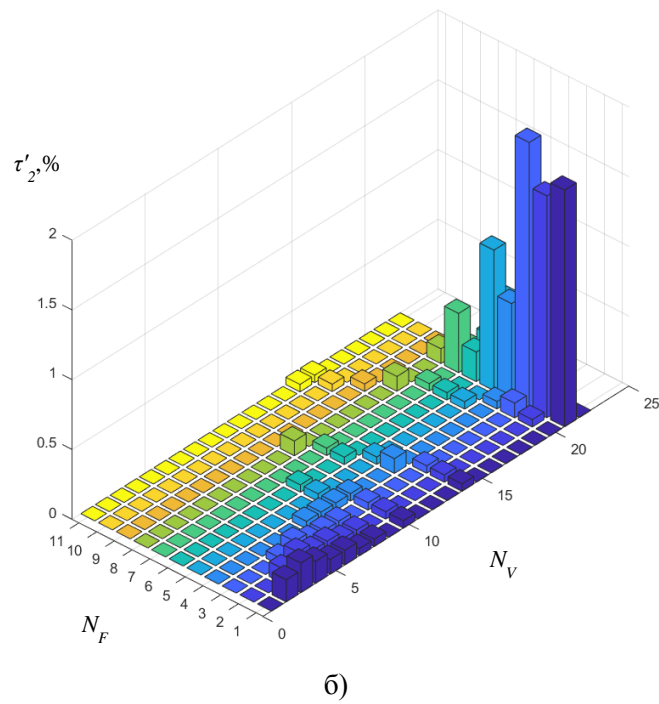
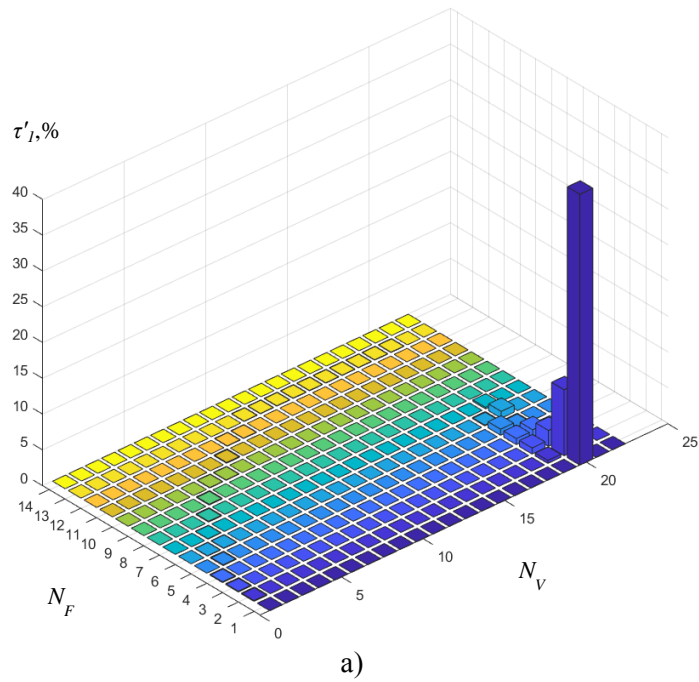


Рис. 7. Розподіл часу роботи під час руху у зворотному напівреїсі
а – у режимі тяги, б – у режимі електродинамічного гальмування

У табл. 5 наведено дані про потужність та тривалість роботи під час руху з допустимою швидкістю.

Таблиця 5. Розподіл часу роботи під час руху у зворотному напрямку

Номер діапазону за дотичною потужністю	Значення потужності у діапазоні, кВт	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі тяги, %	Тривалість роботи у частках від загального часу роботи у режимі гальмування, %
1	0...500	54,5	13,0
2	500...1000	27,2	12,6
3	1000...1500	5,0	10,5
4	1500...2000	1,9	9,3
5	2000...2500	0,7	15,4
6	2500...3000	0,9	5,6
7	3000...3500	1,1	3,6
8	3500...4000	0	2,0
9	4000...4500	0	2,8
10	4500...5000	0	–
11	5000...5500	0	–
12	5500...6000	0	–
13	6000...6500	0	–
14	6500...7000	0,1	–

З табл. 5 випливає, що під час руху поїзда у режимі підтримання швидкості у тяговому режимі тяговий електропривід найчастіше працює з потужністю не більше 1000 кВт, що становить 15% від номінальної потужності. У режимі електродинамічного гальмування тяговий електропривід найбільш тривалий час працює з потужністю до 2500 кВт (37% номінальної), а максимальна потужність у режимі електродинамічного гальмування не перевищує 4500 кВт (67% від номінальної).

Узагальнюючи результати, бачимо, що значну частину часу тяговий електропривід працює у режимі з неповним навантаженням. За результатами аналізу енергоспоживання магістральними електровозами з асинхронним приводом [25], саме це призводить до підвищеного енергоспоживання. Для усунення цього недоліка провідними виробниками тягового рухомого складу пропонуються алгоритми керування, при яких відключається частина тягових асинхронних електродвигунів [11]. Тому вважаємо доцільним при розробці тягового електроприводу застосувати такий підхід, який технічно може бути реалізований шляхом повісного або повізкового регулювання сили тяги.

Внаслідок застосування електродинамічного гальмування виникає можливість акумулювання енергії з подальшим її використанням [29, 30]. В умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК» застосування системи накопичення енергії на локомотиві забезпечить:

- запасання енергії рекуперації та її вторинне використання;
 - живлення тягового приводу під час руху на неелектрифікованих ділянках з технологічними переїздами для кар'єрних самоскидів;
 - автономний рух, зокрема без підключення бічного струмоприймача на пунктах перевантаження;
 - підтримання тягової потужності при низькому рівні напруги у тяговій мережі;
 - роботу допоміжних систем локомотиву при опущеному струмоприймачі.
- Узагальнену схему тягового електроприводу подано на рис. 8.

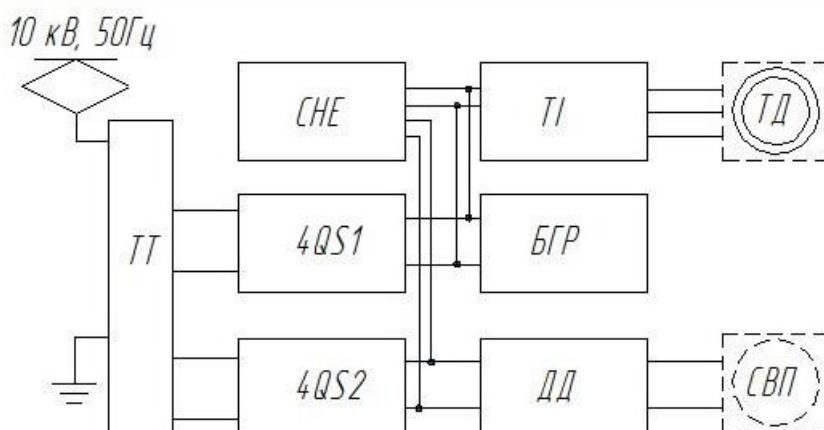


Рис. 8. Узагальнена структурна схема тягової системи локомотива

ТТ – тяговий трансформатор, СНЕ – система накопичення енергії з погоджувальними перетворювачами, 4QS1 – тягові 4QS-перетворювачі, 4QS2 – 4QS-перетворювач допоміжних систем; ТІ – тягові інвертори, ДД – допоміжні інвертори та джерела живлення, БГР – блок гальмівних резисторів, ТД – тягові асинхронні електродвигуни, СВП – споживачі власних потреб

Локомотив отримує живлення від контактної мережі змінного струму напругою 10 кВ промислової частоти. Первинна обмотка трансформатора через електричні апарати захисту приєднується до контактної мережі. Вторинні тягові обмотки трансформатора ТТ живлять тягові 4QS-перетворювачі 4QS1, вихід яких утворює проміжний контур з постійною за величиною напругою. Від проміжного контуру живляться тягові інвертори ТІ, від яких отримують живлення тягові асинхронні електродвигуни ТД. Тягова система обладнується блоком гальмівних резисторів БГР для реостатного гальмування.

Для живлення споживачів власних потреб СВП застосовано 4QS-перетворювач допоміжних систем 4QS2, до виходу якого під'єднуються допоміжні інвертори та джерела живлення ДД.

СНЕ через погоджувальні перетворювачі під'єднуються до проміжних ланок тягових інверторів та джерел живлення споживачів власних потреб. При цьому рівень напруги у проміжних ланках тягового електроприводу та системи власних потреб різний.

Таким чином, показана на рис.8 схема тягової системи забезпечить реалізацію усіх функцій, необхідних для забезпечення енергоефективності локомотиву.

Висновки. Проведено оцінку технічних параметрів локомотиву для кар'єрного залізничного транспорту. За результатами розрахунків встановлено, що 16-ти та 18-ти вісні локомотиви з осьовим навантаженням не менше 25 т задовольняють умовам поїзної роботи. Можливість експлуатації 12-ти вісних локомотивів з осьовим навантаженням 31...33 т потребує додаткового дослідження.

Для оцінки режимів роботи тягового електроприводу вирішено тягову задачу. Встановлено, що значна частина часу руху поїзда відбувається з потужністю менше номінальної. Це може привести до збільшення енергоспоживання.

З метою створення енергоефективного локомотива запропоновано застосування режимів роботи з відключенням тягових асинхронних електродвигунів та бортової системи накопичення енергії для акумулювання енергії при електродинамічному гальмуванні. Запропоновано узагальнену схему тягової системи, яка дозволяє реалізувати вищезазначені способи підвищення енергоефективності рухомого складу.

Автори висловлюють щире подяку директору ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод» С.В. Рой за сприяння дослідженню, у тому числі за актуальну інформацію щодо реальних потреб вітчизняних підприємств гірничо-видобувної промисловості у рухомому складі та можливості аналізу результатів експлуатації модернізованого тягового агрегату ОПЕІАМ, а також влучні критичні зауваження щодо результатів дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова КМУ від 03 березня 2021 р. № 179 «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> (дата звернення: 09.05.2022)
2. Залізний бонус: український ГМК пробивається на ринок преміальної сировини URL: <https://gmk.center/posts/zheleznyj-bonus-ukrainskij-gmk-probivaetsya-na-rynok-premialnogo-syrua/> (дата звернення: 09.05.2022)
3. За 2,5 року Ferrexpo вклала в екопроекти понад 891 млн грн.. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/za-2-5-roku-ferrexpo-vklala-v-ekoproekti-ponad-891-mln-grn/> (дата звернення: 09.05.2022)
4. Гетьман Г. К., Васильев В. Е. Анализ резервов снижения энергоемкости железнодорожных перевозок на горнодобывающих предприятиях / Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2019. № 17. С.61-67.
5. Yasuhiro N., Oishi R., Motomi S., & Takashi, K. Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook. 2017.
6. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Overianova L., Omelianenko H. Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. Proceedings of 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems). 2020. P. 158-163.
7. Xuan Liu, Kang Li. Energy storage devices in electrified railway systems: A review. Transportation Safety and Environment, Volume 2, Issue 3, September 2020, Pages 183–201, <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>
8. Huang X., Liao, Q., Li, Q. et al. Power management in co-phase traction power supply system with super capacitor energy storage for electrified railways. Rail. Eng. Science 28. 2020. P. 85–96 <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00206-x>
9. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sydorenko. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. Computational Problems of Electrical Engineering. Lviv Politechnic Publishing House. 2019. Vol 9. No 1. P. 44–52.
10. Energy-optimized propulsion system mitrac 3000 for locomotives. Dr. E. Karl Behr. International Seminar on Emerging Technologies & Strategies for Energy Management in Railways. 2008
11. Technologies and potential developments for energy efficiency and co2 reductions in rail systems. International Union of Railways (UIC) – Paris, December 2016.
12. Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Коваливкер Г. Н., Литовченко В. В. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. Рига: Зинатие. 1991. 352 с.
13. Jaroslav Ilonchiak, DSuboEÛ StruharnanskĬS, Jozef Kuchta, Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. Procedia Engineering, Volume 192, 2017, Pages 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
14. J. Suganthi Vinodhini, R. Samuel Rajesh Babu, A Review on Various Converters Used In Dc and Ac Locomotives. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 5, 2015, pp. 13305-13325
15. Su S.; Tang Y.; Wang Y. Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. Energies 2016, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/en9020105>
16. Scheepmaker G.M.; Goverde R.M.P. The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements. J. Rail Transp. Plan. Manag. 2015, doi:10.1016/j.jrtpm.2015.10.003
17. Radu P.V.; Lewandowski M.; Szlag A. On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems-Case Study Analysis for Power Applications. Energies 2020, 13, 2013. <https://doi.org/10.3390/en13082013>
18. Urbaniak M., Kardas-Cinal E.; Jacyna, M. Optimization of Energetic Train Cooperation. Symmetry 2019, 11, 1175. <https://doi.org/10.3390/sym11091175>
19. Spiryagin, M., Cole, C., Sun, Y.Q., McClanachan, M., Spiryagin, V., & McSweeney, T. Design and Simulation of Rail Vehicles. 2014. <https://doi.org/10.1201/b17029>
20. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
21. Браташ В.А. Тяговые агрегаты типа ОПЭА с асинхронными тяговыми двигателями для открытых горных разработок. Конструкция и параметры. Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2007. Вип.79. С. 93-98.
22. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Локомотивостроение». А. А. Камаев, Н. Г. Апанович, В. А. Кашев и др.; / Под ред. А. А. Камаева. М.: Машиностроение, 1981, 351 с
23. Правила тягових розрахунків для поїзної роботи по електровозах ЧС7, ЧС8, ДЕ1, ДС3, 2ЕЛ5, 2ЕС5К, тепловозах ТЕП150, ТЕМ103, дизель-поїздах ДЕЛ-02, електропоїздах ЕПЛ2Т, ЕПЛ9Т. ЦТ-0199 : Затв. Наказ. Укрзалізниця № 206-ЦЗ від 22.12.2010 / М-во транспорту та зв'язку України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління локомотивного господарства. К. : НВП Поліграфсервіс, 2011. 60 с.

24. Л. В. Балон, В. А. Браташ, М. Л. Бичуч и др. Электроподвижной состав промышленного транспорта: Справочник. Под ред. Л. В. Балона. М.: Транспорт. 1987.
25. Френкель, С. Я. Сравнительный анализ расхода энергоресурсов на тягу поездов электровозами ВЛ80С и БКГ1 / С. Я. Френкель, А. Г. Федоренко // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов. 2018. Ч. 1. – С. 73-75
26. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Sapronova, S.; Lukoševičius, V.; Keršys, R.; Makaras, R.; Keršys, A.; Liubarskyi, B. 2022. Synthesis of the Current Controller of the Vector Control System for Asynchronous Traction Drive of Electric Locomotives. *Energies*, 15, 2374. <https://doi.org/10.3390/en15072374>
27. Falendish, A., Hatchenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Varybin, M. (2020). Математичне моделювання основних Параметрів в тягових розрахунках. *Транспортні системи і технології*, (35), 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
28. Слащов В.А. Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті / В.А. Слащов. Луганськ: Вид-во СЧУ ім. В.Даля, 2005. 182 с.
29. Omelyanenko, V. I., Riabov, I. S., Overianova, L. V., & Omelianenko, H. V. Тяговый электропривод на основе батареи топливных элементов и бортового инерционного накопителя энергии для мотор-вагонного поезда. *Електротехніка і Електромеханіка*, (4), 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08>
30. S. Yatsko [et al.] Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage [Electronic resource] // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Vol. 9, № 2. P. 848-858. URL: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf>.

REFERENCES

1. Постанова КМУ від 03 березня 2021 р. № 179 «Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku» [Resolution of the Cabinet of Ministers of March 3, 2021 № 179 "On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030"]. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-nacionalnoyi-eko-a179> [in Ukrainian].
2. Zaliznyi bonus: ukrainskyi HMK prybyvaietsia na rynek premialnoi syrovyny [Iron bonus: Ukrainian MMC makes its way to the market of premium raw materials]. Retrieved from <https://gmk.center/posts/zheleznyj-bonus-ukrainskij-gmk-probivaetsya-na-rynek-premialnogo-syrya/> [in Ukrainian].
3. Za 2,5 roku Ferrexpo vkladla v ekoproekty ponad 891 mln hrn [Ferrexpo invested over 891 million in environmental projects in 2.5 years]. Retrieved from <https://gmk.center/ua/opinion/za-2-5-roku-ferrexpo-vkladla-v-ekoproekty-ponad-891-mln-grn/> [in Ukrainian]
4. Hetman H. K., Vasylev V. E. (2019) Analiz rezervov snyzheniya enerhoemkosti zheleznodorozhnykh perevozk na hornodobyvaiushchykh predpriyatiakh [Analysis of reserves for reducing the energy intensity of rail transportation at mining enterprises] / *Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti*, № 17, 61-67 [in Russian].
5. Yasuhiro N., Oishi R., Motomi S., & Takashi, K. (2017). Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook.
6. Buriakovskiy S., Maslii A., Pomazan D., Overianova L., Omelianenko H. (2020). Multi-criteria Quality Evaluation of Energy Storage Devices for Rolling Stock Using Harrington's Desirability Function. *Proceedings of 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems*. (p. 158-163).
7. Xuan Liu, Kang Li. (2020). Energy storage devices in electrified railway systems: A review. *Transportation Safety and Environment*, (Volume 2), (Issue 3), (pages 183–201), <https://doi.org/10.1093/tse/tdaa016>
8. Huang X., Liao, Q., Li, Q. et al. (2020). Power management in co-phase traction power supply system with super capacitor energy storage for electrified railways. *Rail. Eng. Science*, (28), (p. 85–96) <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00206-x>
9. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sydorenko. (2019) Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Lviv Politechnic Publishing House. (Vol 9, (No 1), (p. 44–52).
10. E. Karl Behr. (2008) Energy-optimized propulsion system mitrac 3000 for locomotives *International Seminar on Emerging Technologies & Strategies for Energy Management in Railways*.
11. Technologies and potential developments for energy efficiency and co2 reductions in rail systems. (2016) International Union of Railways (UIC)
12. Solodunov A. M., Ynkov Yu. M., Kovalyuker H. N., Lytovchenko V. V. (1991). Preobrazovatelnye ustroistva elektropoezdov s asynkhronnymy tiahovymy dyvhateliamy [Converter devices for electric trains with asynchronous traction motors]. Riga: Zinatie. 352 p. [in Russian].
13. Jaroslav Ilonchiak, Subo Struhamansk, Jozef Kuchta. (2017) Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*, Volume 192, 2017, Pages 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
14. J. Suganthi Vinodhini, R. Samuel Rajesh Babu, A. (2015) Review on Various Converters Used In Dc and Ac Locomotives. *International Journal of Applied Engineering Research* (Volume 10), (Number 5), (pp. 13305-13325)

15. Su S.; Tang T.; Wang Y. (2016) Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*, 9, 105. <https://doi.org/10.3390/en9020105>
16. Scheepmaker G.M.; Goverde R.M.P. (2015) The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements. *J. Rail Transp. Plan. Manag.*, doi:10.1016/j.jrtpm.2015.10.003
17. Radu P.V.; Lewandowski M.; Szelag A. (2020) On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems—Case Study Analysis for Power Applications. *Energies*, 13, 2013. <https://doi.org/10.3390/en13082013>
18. Urbaniak M., Kardas-Cinal E.; Jacyna, M. (2019) Optimization of Energetic Train Cooperation. *Symmetry* 2019, 11, 1175. <https://doi.org/10.3390/sym11091175>
19. Spiriyagin, M., Cole, C., Sun, Y.Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. (2014) Design and Simulation of Rail Vehicles. 337 p. <https://doi.org/10.1201/b17029>
20. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. (2008) Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 334 p.
21. Bratash V.A. (2007). Tiahovye ahrehaty typu OPEA s asynkronnymy tiahovymy dvyhateliamy dlia otkrytykh hornykh razrabotok. Konstruktsiya y parametry [Traction units of OPEA type with asynchronous traction motors for open pit mining. Design and parameters] *Girn. electromechanics and automation: Nauk.-tekhn. zb.* V.79. pp. 93-98. [in Russian].
22. A. A. Kamaev, N. G. Apanovich, V. A. Kashev et al. (1981). Konstruktsiya, raschet i proektyrovanye lokomotyvov: Uchebnyk dlia studentov vtuzov, obuchaiushchyyhsia po spetsyalnosti «Lokomotyvostroenye» [Design, calculation and design of locomotives: A textbook for students of technical universities studying in the specialty "Locomotive building"]. Ed. A. A. Kamaeva. M.: Mashinostroenie, 351 p. [in Russian].
23. Pravyla tiahovykh rozrakhunkiv dlia poiznoi roboty po elektrovozhakh ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2ES5K, teplovozhakh TEP150, TEM103, dyzel-poizdakh DEL-02, elektropoizdakh EPL2T, EPL9T. TsT-0199 : Zatv. Nakaz. Ukrzaliznytsi № 206-TsZ vid 22.12.2010 [Rules of traction calculations for train work on electric locomotives ChS7, ChS8, DE1, DS3, 2EL5, 2ES5K, locomotives TEP150, TEM103, diesel trains DEL-02, electric trains EPL2T, EPL9T. CT-0199: Approved. Order. Ukrzaliznytsia № 206-TsZ dated 22.12.2010] (2011) Ministry of Transport and Communications of Ukraine, State Administration of Railway Transport of Ukraine, Ukrzaliznytsia, Main Department of Locomotive Industry. 60 p. [in Ukrainian]
24. LV Balon, VA Bratash, ML Bichuch, etc (1987). Elektropodvyzhnoi sostav promyshlennoho transporta: Spravochnyk [Electric rolling stock of industrial transport: Handbook]. Ed. L. W. Balloon. M.: Transport. [in Russian].
25. Frenkel, S. Ya. Sravnytelnyi analiz rashoda enerhoresursov na tiahу poezdov elektrovozamy VL80S i BKH1 [Comparative analysis of energy consumption for traction of trains by electric locomotives VL80S and BKH1] *Current issues and prospects for the development of transport and construction complexes*. Part 1. (P. 73-75) [in Russian].
26. Goolak, S.; Tkachenko, V.; Sapronova, S.; Lukoševičius, V.; Keršys, R.; Makaras, R.; Keršys, A.; Liubarskyi, B. (2022). Synthesis of the Current Controller of the Vector Control System for Asynchronous Traction Drive of Electric Locomotives. *Energies*, 15, 2374. <https://doi.org/10.3390/en15072374>
27. Falendish, A., Hachenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Barybin, M. (2020). Matematychni modeliuvannia osnovnykh Parametriv v tiahovykh rozrakhunkakh [Mathematical modeling of the basic parameters in the traction calculations]. *Transport Systems and Technologies*, (35), 102-112. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> [in Ukrainian]
28. Slashchov VA. (2005) Tiahovi ta halmovi rozrakhunky na reikovomu transporti [Traction and brake calculations on rail transport] / V.A. Slashtov. - Luhansk: SNU Publishing House. V.Dalya, 182 p.
29. Omelyanenko, V., Riabov, I., Overianova, L., et al. (2021). Tiahovyi elektropryvod na osnove batarey toplyvnykh elementov i bortovoho inertsyonnoho nakopytelia enerhyy dlia motor-vahonnoho poezda [Traction electric drive based on fuel cell batteries and on-board inertial energy storage for multi unit train]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 4, p. 64–72. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.08> [in Russian].
30. S. Yatsko et al. (2019) Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage [Electronic resource] // *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 9, № 2. P. 848-858. URL: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf>.

Riabov Ievgen^{1*}, Mosin Serhiy², Overianova Liliia³, Kondratieva Liliia⁴, Demydov Oleksandr⁵, Goolak Sergiy⁶

¹ Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Kyrychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0753-514X>

² Chief engineer of the railway plant, FERREXPO POLTAVA MINING, 16 Budivel'nykiv Street, Horishni Plavni, Poltava region, 39802, Ukraine ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8281-6235>

³ Assistant professor, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Кyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-572X>

⁴ Postgraduate student, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Кyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2788-9116>

⁵ Senior Lecturer, Department of Electric Transport and Locomotive Engineering, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2, Кyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0532-9748>

⁶ Assistant professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2294-5676>

EVALUATION OF TECHNICAL PARAMETERS LOCOMOTIVE FOR RAILWAY CAREER TRANSPORT

The main technical parameters of the locomotive for quarry railway transport have been evaluated. The design parameters of the locomotive have been determined and it is established that the tangential power is 6700 kW, and the traction force for the design mode is 1300 kN. The calculations of the traction characteristics of the locomotive have been performed. The procedure for determining the parameters of the locomotive operating modes during train tasks performing has been proposed, which is based on the processing of the results of traction task solving on the section of the track. It has been established that for the test section of the track a significant part of the time in the traction mode the locomotive operates with a load of 10... 25% of the nominal, therefore it has been proposed to implement the mode of movement with disconnection of traction motors. The use of an onboard energy storage system, which allows the accumulation of energy during electrodynamic braking has been proposed. The generalized scheme of traction system which allows realizing ways of increase of energy efficiency a rolling stock has been offered.

Keywords: locomotive, traction force, traction electric drive, energy efficiency.