

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.423:[621.33:622.683]

Є. С. РЯБОВ<sup>1\*</sup>, Л. Ю. КОНДРАТЬЄВА<sup>2</sup>, Л. В. ОВЕР'ЯНОВА<sup>3</sup>, Б. Х. ЄРЦЯН<sup>4</sup>,  
С. О. ГУЛАК<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>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

<sup>2</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта kondratieva.lilia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2788-9116

<sup>3</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта overanova@ukr.net, ORCID 0000-0002-4827-572X

<sup>4</sup>Каф. «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 65 30, ел. пошта bagish\_ericjan@ukr.net, ORCID 0000-0003-0579-3882

<sup>5</sup>Каф. «Електромеханіка та рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (096) 563 12 53, ел. пошта sgoolak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2294-5676

## Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту

**Мета.** Ця робота спрямована на обґрунтування структури та визначення основних параметрів тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту з урахуванням режимів його роботи. **Методика.** Дослідження виконано шляхом математичного моделювання, яке передбачало розв'язання тягової задачі та оцінку параметрів процесів енергетичного обміну між компонентами тягового електропривода. Моделювання проведено для руху поїзда по ділянці шляху та під час маневрування, що істотно відрізняється за їх математичного опису. Під час моделювання руху по ділянці шляху розв'язано тягову задачу з використанням рекомендацій щодо тягових розрахунків для поїзної роботи. Для моделювання переміщень під час маневрування розроблено спрощену модель. Визначення параметрів компонент тягового електропривода проведено шляхом аналізу процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі на основі балансу потужності. У ході досліджень узято, що бортовий накопичувач енергії в режимі тяги живить тягові електродвигуни бустерної секції. У режимі електродинамічного гальмування накопичувач енергії запасє енергію від усіх тягових електродвигунів електровоза. **Результати.** Автори отримали часові залежності параметрів, які характеризують рух поїзда на всіх етапах циклу «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження» (на прикладі електровоза ПрАТ «Полтавський ГЗК»). Аналіз отриманих залежностей дозволив визначити параметри основних компонент тягового електропривода для запропонованого сценарію роботи накопичувача. Установлено, що енергоємність накопичувача енергії має становити 250 кВт·год для одного циклу руху. Потужність накопичувача енергії – 6 000 кВт. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи вперше запропонували структуру тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту, у якому живлення електродвигунів електровоза керування здійснюється від контактної мережі, а електродвигуни бустерної секції живляться від накопичувача енергії й починають працювати за навантаження, яке перевищує 50 % від номінального. **Практична значимість.** Розроблені математичні моделі руху та процесів енергетичного обміну можуть бути застосовані для дослідження тягових електроприводів транспортних засобів різного призначення.

*Ключові слова:* кар'єрний залізничний транспорт; електровоз; тяговий електропривід; накопичувач енергії; тягова задача

## Вступ

В Україні на відкритих гірських розробках корисних копалин широко застосовують електрифікований залізничний транспорт [1]. Його перевагами є низькі експлуатаційні витрати та незначна шкода навколишньому середовищу. Проте зростання вартості енергоносіїв та вимог щодо зниження викидів CO<sub>2</sub> спонукає до подальшого вдосконалення електричної тяги. З урахуванням зношеності наявного рухомого складу, який експлуатують на гірничо-видобувних підприємствах, доцільним є його оновлення.

У [3] визначено основні технічні параметри електровоза з асинхронним тяговим електроприводом для залізничного кар'єрного транспорту (на прикладі електровоза для ПрАТ «Полтавський ГЗК»). Найпоширенішими режимами роботи такого електровоза є режими з частковим навантаженням. Робота з номінальним навантаженням відбувається тільки під час руху на керівному підйомі, у разі розгону та в режимах електродинамічного гальмування. За такого характеру навантаження багатодвигунного електропривода доцільним є пошук шляхів підвищення його енергетичної ефективності.

Для багатодвигунного асинхронного електропривода електровозів у режимах роботи з частковим навантаженням характерне підвищене споживання енергії [6]. Один зі способів зниження енергоспоживання такого електропривода полягає у відмиканні частини тягових електродвигунів. Його ефективність було підтверджено експериментально [6]. Інший підхід до оптимізації енергоспоживання багатодвигунного електропривода полягає в розподілі навантаження між електродвигунами [15, 17, 18]. Робота [19] присвячена аналізу енергетичних показників багатодвигунного електропривода для визначення можливості його застосування. Варто зазначити, що в цих роботах досліджено колісний електротранспорт, однак методика дослідження може бути розповсюджена і на рейковий рухомий склад.

Для забезпечення оптимальних режимів роботи багатодвигунного електропривода важливою є його структура. У [11] запропоновано нову структуру тягового електропривода рейкового транспортного засобу з бортовою системою накопичення енергії. У [18] розроблено концепцію вантажного локомотива з бортовим

накопичувачем енергії. У [8] розглянуто структуру тягових електроприводів рухомого складу, що перебуває в експлуатації. У [13, 14] досліджено можливість застосування накопичувачів енергії для забезпечення функції «last mile» в магістральному електровозі. Застосування акумуляторного локомотива FLXdrive [9] у складі багатосекційного тепловоза дозволяє знизити споживання палива.

Як свідчать дослідження, застосування у складі тягового електропривода накопичувача енергії сприяє зменшенню енергоспоживання. Застосування бортового накопичувача енергії в електровозі для залізничного кар'єрного транспорту дозволить здійснювати рекуперацію енергії, автономний рух неелектрифікованими ділянками та оптимізувати енергоспоживання [3, 8].

Таким чином, визначення раціональної структури багатодвигунного асинхронного електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту вважаємо необхідним.

## Мета

Основна мета статті полягає в обґрунтуванні структури та визначенні основних енергетичних параметрів тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту з урахуванням режимів його роботи.

## Методика

У [3] проаналізовано режими роботи електровоза в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК». Установлено, що в тяговому режимі електровоз працює з потужністю не більше 1 500 кВт близько 70 % тривалості напіврейсу під час руху навантаженого поїзда. Під час руху з порожніми вагонами потужність не перевищує 1 000 кВт протягом 80 % тривалості напіврейсу. При цьому номінальна потужність локомотива складає 6 700 кВт. У режимах електродинамічного гальмування під час руху з порожніми вагонами потужність не перевищує 4 500 кВт (67 % від номінальної), а понад 60 % часу роботи в цьому режимі потужність не перевищує 2 500 кВт (37 % від номінальної). Характерним є рух із практично постійною швидкістю, що дорівнює 20 км/год.

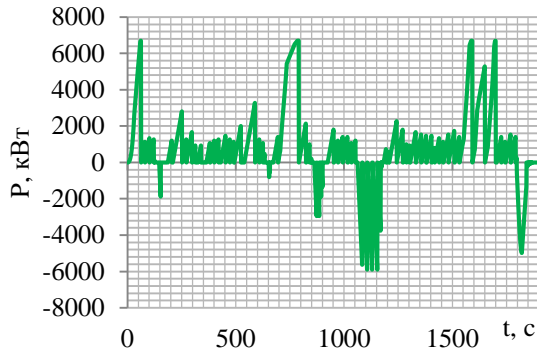
На рис. 1 показана дотична потужність для навантаженого (рис. 1, а) та порожнього

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

(рис. 1, б) напіврейсів [3]. Як бачимо з рисунка 1, переважну частину часу електровоз працює з потужністю менше 50 % від номінальної. Цей факт дозволяє запропонувати структуру тягового електропривода, у якому частина еле-

ктродвигунів живиться від тягової мережі, а частина – від накопичувача енергії. Схема такого електропривода для 16-вісного двосекційного електровоза показана на рис. 2.

*a – a*



*б – б*

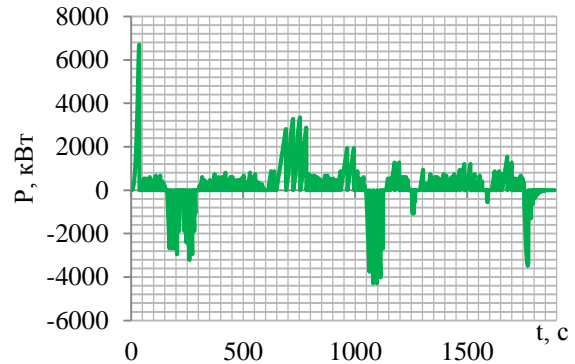


Рис. 1. Залежність дотичної потужності електровоза:

*a* – для навантаженого напіврейсу; *б* – для порожнього напіврейсу

Fig. 1. Dependence of the tractive power of the electric locomotive:

*a* – for loaded half-passage; *b* – for empty half-passage

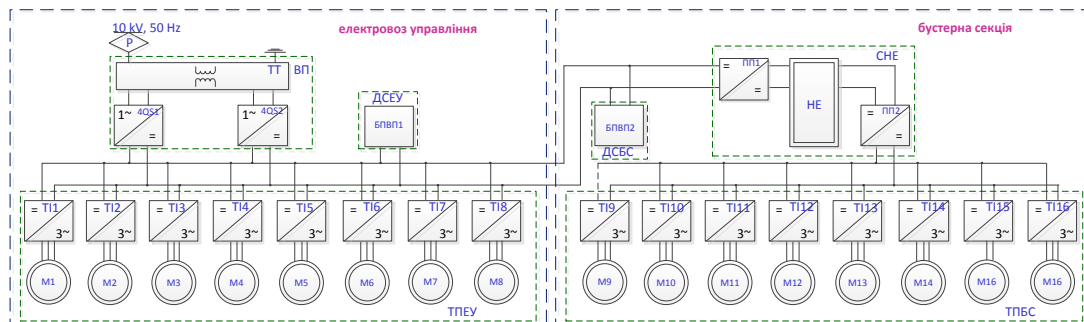


Рис. 2. Схема тягового електропривода електровоза з індивідуальним живленням електродвигунів:

*P* – струмоприймач; *ТТ* – тяговий трансформатор; *4QS1, 4QS2* – входні перетворювачі; *ТТ1...ТТ16* – тягові перетворювачі; *М1...М16* – тягові асинхронні електродвигуни; *БПВП1, БПВП2* – блоки перетворювачів власних потреб;

*ПП1, ПП2* – погоджувальні перетворювачі; *НЕ* – накопичувач енергії; *ВП* – входний перетворювач;

*ТПЕУ* – тяговий привід електровоза управління; *ДСЕУ* – допоміжні системи електровоза управління;

*ТПБС* – тяговий привід бустерної секції; *ДСБС* – допоміжні системи бустерної секції;

*СНЕ* – система накопичення енергії

Fig. 2. Scheme of traction electric drive of an electric locomotive with individual power supply of electric motors:

*P* – current collector; *ТТ* – traction transformer; *4QS1, 4QS2* – input converters; *ТТ1...ТТ16* – traction converters;

*М1...М16* – traction asynchronous electric motors; *БПВП1, БПВП2* – auxiliary converter assemblies; *ПП1, ПП2* – matching

converters; *НЕ* – energy storage; *ВП* – input converter; *ТПЕУ* – traction drive of the electric locomotive; *ДСЕУ* – auxiliary

control systems of the electric locomotive; *ТПБС* – traction drive of the booster section;

*ДСБС* – auxiliary systems of the booster section; *СНЕ* – energy storage system

Розглянемо режими роботи запропонованого тягового електропривода. У режимі тяги (рис. 3, *a*) тягові електродвигуни *М1...М8* електровоза керування отримують живлення від контактної мережі через тяговий трансформатор *ТТ*, входні перетворювачі *4QS1, 4QS2* та

тягові перетворювачі *ТТ1...ТТ8*. Тягові електродвигуни *М9...М16* бустерної секції отримують живлення від системи накопичення енергії *СНЕ* через погоджувальний перетворювач *ПП2* та тягові перетворювачі *ТТ9...ТТ16*. Живлення допоміжні системи електровоза управління *ДСЕУ*

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

та бустерної секції ДСБС отримують від вхідного перетворювача. Рух електровоза за потужності менше 50 % від номінальної здійснює тяговий електропривод електровоза керування. За необхідності збільшення потужності чи сили тяги до роботи включають тяговий електропривод бустерної секції.

У режимі електродинамічного гальмування (ЕДГ) (рис. 3, б) енергію від тягового електропривода електровоза управління ТПЕУ використовують для живлення допоміжних систем електровоза управління ДСЕУ та бустерної секції ДСБС і заряджання системи накопичення СНЕ через погоджувальний перетворювач ПП1. Енергію від тягового електропривода бустерної секції використовують для заряджання накопичувача енергії через погоджувальний перетворювач ПП2.

У випадку маневрування під час навантаження та розвантаження живлення тягового електропривода та допоміжних системи здійснюється від системи накопичення енергії СНЕ (рис. 3, в).

У режимі заряджання накопичувача енергії під час руху на ділянці шляху енергія від контактної мережі живить тяговий електропривід, допоміжні системи та заряджає бортовий накопичувач (рис. 3, г).

Неавтономний рух здійснюється в разі живлення всіх систем електровоза від контактної мережі (рис. 3, д).

У цій статті не досліджено будову системи накопичення енергії й тип накопичувачів.

Таким чином, вище зазначена структура тягового електропривода забезпечує всі режими роботи електровоза.

Для визначення параметрів тягового електропривода виконано моделювання та обробку його результатів.

Під час створення моделі руху поїзда на ділянці шляху взято, що поїзд являє собою ланцюг твердих тіл, які з'єднані абсолютно жорстким зв'язком. Це підвищує точність розрахунків сил опору рухові. Система рівнянь руху має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\xi}{\rho} (f_L - (w_L + w_W) - b) \\ \frac{dS}{dt} = V \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, який враховує одиниці вимірювання;  $V$  – швидкість поїзда;  $t$  – час;  $S$  – шлях;  $\rho$  – коефіцієнт, який враховує обертання вузлів екіпажної частини;  $f_L$  – питома дотична сила локомотива в режимі тяги або електродинамічного гальмування;  $w_L$  – питома сила опору рухові електровоза;  $w_W$  – питома сила опору рухові вагонів;  $b$  – питома гальмівна сила пневматичних гальм.

Питома дотичну силу локомотива в режимі тяги або електродинамічного гальмування визначали за виразом:

$$f_L = \frac{F_L}{\sum_{k=1}^s M_{Lk} + \sum_{j=1}^n M_{Wj}}, \quad (2)$$

де  $F_L$  – дотична сила електровоза в режимі тяги або електродинамічного гальмування;  $M_{Lk}$  – маса секції локомотива;  $s$  – кількість секцій локомотива;  $M_{Wj}$  – маса вагона;  $n$  – кількість вагонів.

Дотична сила локомотива може набувати будь-якого значення в тяговій області. Для багатодвигунного електропривода з індивідуальним приводом колісних пар за умови однакового навантаження електродвигунів дотичну силу визначали за виразом:

$$F_L = F_D N_D, \quad (3)$$

де  $F_D$  – дотична сила, яку реалізує одна обмоторена вісь;  $N_D$  – кількість працюючих електродвигунів електровоза.

Питомий опір рухові локомотива та вагонів визначали за виразом:

$$w = w_o + w_i + w_r + w_p + w_b, \quad (4)$$

де  $w_o$  – основний питоми опір рухові;  $w_i$  – додатковий питоми опір рухові від ухилу;  $w_r$  – додатковий питоми опір від руху по кривій;  $w_p$  – додатковий питоми опір від руху вагонами вперед;  $w_b$  – додатковий питоми опір під час рухання поїзда.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

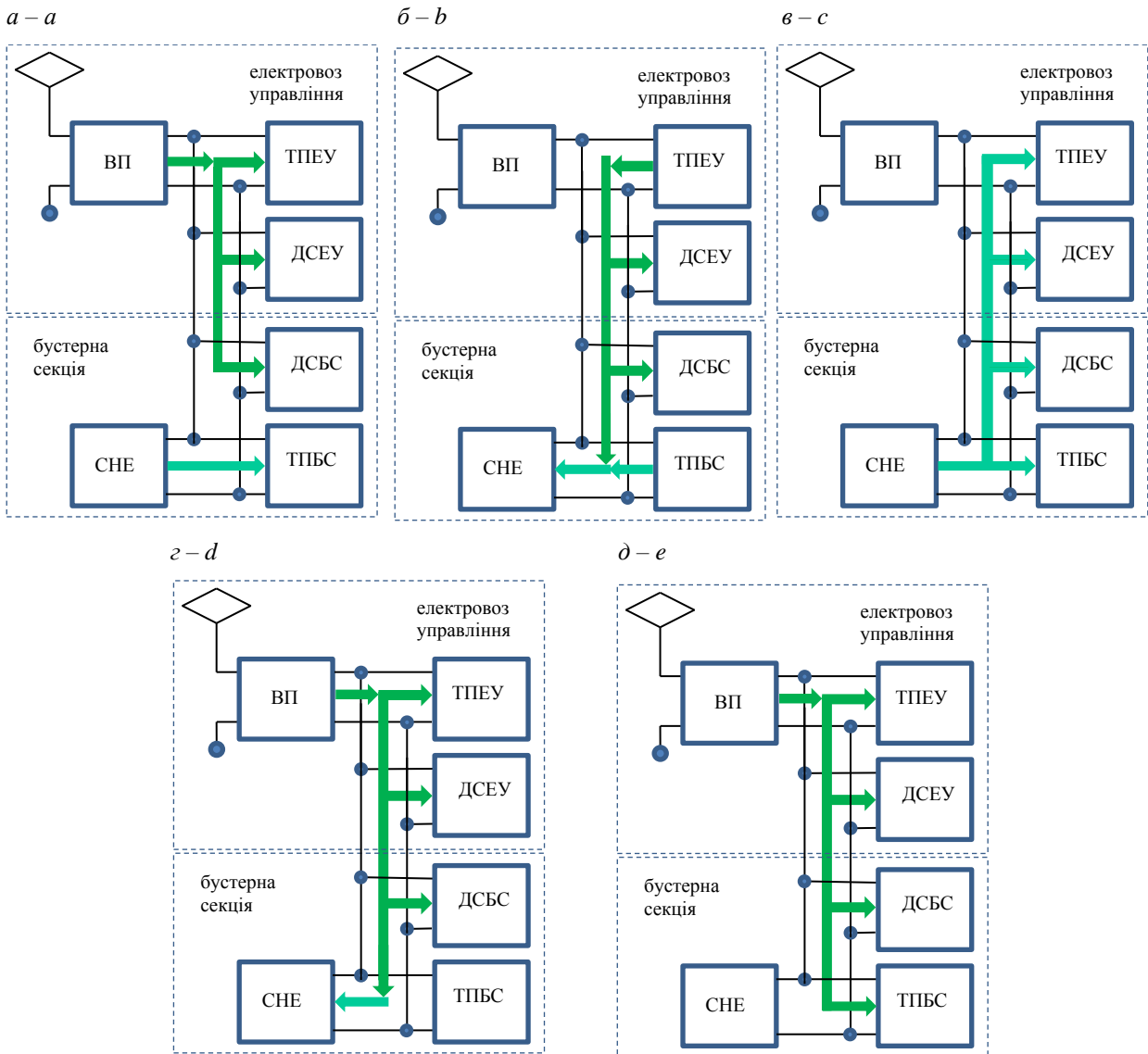


Рис. 3. Потоки енергії у системах електровоза:  
 а – тяга; б – електродинамічне гальмування; в – маневрування або автономний рух;  
 г – зарядження накопичувача енергії під час руху; д – неавтономний рух

Fig. 3. Energy flows in electric locomotive systems:  
 a – traction; b – electrodynamic braking; c – shunting or autonomous movement;  
 d – charging the energy storage during movement; e – non-autonomous movement

У зв'язку з можливістю роботи електровоза з вимкненими електродвигунами його основний питомий опір визначали за виразом:

$$w_o = w'_o \frac{N_{D1}}{N_{M1}} + w'_x \left( 1 - \frac{N_{D1}}{N_{M1}} \right), \quad (5)$$

де  $w'_o$  – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги;  $w'_x$  – основний питомий опір

руху локомотива в режимі вибігу;  $N_{M1}$  – загальна кількість обмоторених осей секцій;  $N_{D1}$  – кількість працюючих тягових електродвигунів секції.

Розрахункові вирази для визначення питомого опору та рекомендації щодо застосування наведено в [4].

Як зазначено вище, з метою уточнення розрахунку сил опору поїзд змодельовано я як ла-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

нцюг твердих тіл. У цьому випадку питомий опір від ухилу та під час руху по кривій визначено для кожного вагона чи секції електровоза окремо. При цьому припущено, що вагон повністю перебуває на ділянці шляху, якщо його центр мас перепадає на межі ділянки.

Модель руху поїзда доповнено регулятором дотичної сили у вигляді:

$$F = \begin{cases} F_L, & V < (V_{\max} - \Delta V) \\ 0, & (V_{\max} - \Delta V) \leq V < V_{\max} \\ -F_L, & V > V_{\max} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $V_{\max}$  – допустима швидкість руху;  $\Delta V$  – зона «нечутливості».

У режимі електродинамічного гальмування зростання дотичної сили відбувається з максимальною інтенсивністю. Такий опис зміни дотичної сили в певному сенсі відповідає ручному керуванню електровозом.

Дотичну потужність визначали за виразом:

$$P_L = F_L V. \quad (7)$$

Таким чином, вирази (1)–(7) становлять математичну модель руху поїзда на ділянці шляху.

*Моделювання руху поїзда під час маневрування* викликає труднощі, оскільки режим руху у випадку навантаження або розвантаження – поштовхи для переміщення вагонів. Безпосереднє вирішення тягової задачі для цього режиму пов'язане з труднощами через неточності в математичному описі сил опору рухові за швидкостей, близьких до нуля. Тому проведемо оцінку дотичної потужності, виходячи з інших міркувань.

Силу опору рухові поїзда визначаємо за виразом:

$$F_{Wi} = \sum_{k=1}^s M_{Lk} (w'_{Lk} + w_b) + \sum_{j=1}^n (M_{Tj} + M_{Ri}) (w'_{Wj} + w_b), \quad (8)$$

де  $w'_{Lk}$  – питомий опір (сила опору) рухові електровоза під час маневрування;  $w'_{Wj}$  – питомий опір (сила опору) рухові вагонів під час маневрування;  $M_{Tj}$  – маса тари одного вагона;  $M_{Ri}$  –

маса руди, яку завантажують чи розвантажують.

За необхідності у виразі (8) можна врахувати інші складові питомого опору рухові поїзда.

Питомий опір визначаємо за швидкості, якої досягає поїзд у кінці поштовху.

Якщо взяти, що протягом поштовху швидкість поїзда зростає лінійно, то тривалість поштовху можна визначити за виразом:

$$T_i = \sqrt{\frac{2M_i L_i}{F_{Mi} - F_{Wi}}}, \quad (9)$$

де  $F_{Mi}$  – дотична сила електровоза під час маневрування в  $i$ -му переміщенні (для розрахунків беремо постійною);  $M_i$  – маса поїзда за  $i$ -го поштовху;  $L_i$  – шлях, який проходить поїзд за  $i$ -го поштовху під тягою.

Дотична сила електровоза під час маневрування повинна перевищувати силу опору навантаженого поїзда:

$$F_{Mi} > F_{Wi}, \quad (10)$$

тому її доцільно взяти як постійну величину. Залежність швидкості визначали за виразом:

$$V_i(t) = a_i t; \quad 0 < t < T_i, \quad (11)$$

де  $a_i$  – прискорення поїзда за  $i$ -го переміщення.

Прискорення поїзда за  $i$ -го переміщення визначаємо за виразом:

$$a_i = \frac{F_{Mi} - F_{Wi}}{M_{\rho i}}, \quad (12)$$

де  $M_{\rho i}$  – маса поїзда за  $i$ -го переміщення.

Масу поїзду визначаємо за виразом:

$$M_{\rho i} = \sum_{k=1}^s \rho_{Lk} M_{Lk} + \sum_{j=1}^n \rho_{Tj} (M_{Tj} \pm M_{Ri}), \quad (13)$$

де  $\rho_{Lk}$  – коефіцієнт обертових мас для електровоза;  $\rho_{Tj}$  – коефіцієнт обертових мас для вагонів.

Швидкість поїзда у кінці поштовху:

$$V_{Ti} = a_i T_i. \quad (14)$$

Потужність «на колесі» визначаємо як

$$P_i(t) = V_i(t)F_{Mi}; \quad 0 < t < T_i. \quad (15)$$

Максимальну потужність «на колесі» визначаємо за виразом:

$$P_{\max i} = a_i F_M T_i. \quad (16)$$

Тривалість руху поїзда після поштовху визначаємо за виразом:

$$T_{im} = \frac{L_m}{V_{\max i}}, \quad (17)$$

де  $L_m$  – довжина шляху, який проходить поїзд після поштовху;  $V_{\max i}$  – швидкість у кінці поштовху

Швидкість у кінці поштовху визначаємо за виразом:

$$V_{\max i} = a_i T_i. \quad (18)$$

Таким чином, вирази (8)–(18) складають математичну модель руху поїзда під час маневрування.

Моделювання процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі має такий вигляд.

Потужність, яку споживає від вхідного перетворювача електровоз керування в режимі тяги ( $p_k(t) \geq 0$ ):

$$P_{in(e)}(t) = (p_e(t) + \Delta p_e(t)) + P_{aux}(t), \quad (19)$$

де  $p_e(t)$  – дотична потужність електровоза керування;  $\Delta p_e(t)$  – втрати в тяговому електроприводі електровоза керування;  $P_{aux}(t)$  – потужність допоміжних систем електровоза керування та бустерної секції.

У режимі електродинамічного гальмування (ЕДГ,  $p_k(t) < 0$ ) за умови, що потужності, яка надходить у проміжний контур від тягового електропривода, достатньо для живлення допоміжних систем, потужність, у споживана від вхідного перетворювача, дорівнює нулю;

$$P_{in(e)}(t) = 0. \quad (20)$$

Потужність, яка надходить до накопичувача енергії від тягового електропривода електровоза керування в режимі ЕДГ, становить:

$$P_{out(e)}(t) = p'_e(t) - \Delta p'_e(t) - p'_{aux}(t), \quad (21)$$

де  $p'_e(t)$  – дотична потужність електровоза керування в режимі ЕДГ;  $\Delta p'_e(t)$  – втрати в тяговому електроприводі електровоза керування;  $p'_{aux}(t)$  – потужність допоміжних систем електровоза керування та бустерної секції.

Потужність, яку споживає від накопичувача енергії тяговий електропривід бустерної секції в режимі тяги, можна визначити за виразу:

$$P_{in(b)}(t) = p_b(t) + \Delta p_b(t), \quad (22)$$

де  $p_b(t)$  – дотична потужність бустерної секції;  $\Delta p_b(t)$  – втрати в тяговому електроприводі бустерної секції.

Потужність, яка надходить до накопичувача енергії від тягового електропривода бустерної секції в режимі ЕДГ, визначаємо так:

$$P_{out(b)}(t) = p'_b(t) - \Delta p'_b(t), \quad (23)$$

де  $p'_b(t)$  – дотична потужність бустерної секції в режимі ЕДГ;  $\Delta p'_b(t)$  – втрати в тяговому електроприводі бустерної секції.

Енергію накопичувача визначаємо за виразом;

$$e_{oess}(t) = \begin{cases} E_p + k_{OESS} \int_0^{t_p} p_{oess}(t) dt; & p_k(t) < 0; \\ E_q - \int_0^{t_q} (p_{in(b)}(t) + \Delta p_2(t)) dt; & p_k(t) > 0, \end{cases} \quad (24)$$

де  $P_{oess}(t)$  – потужність накопичувача енергії під час заряджання;  $E_p, E_q$  – енергія накопичувача перед  $p$ -м та  $q$ -м етапом заряджання та розряджання відповідно;  $t_p, t_q$  – тривалість  $p$ -го та  $q$ -го етапу заряджання та розряджання відповідно;  $\Delta p_2(t)$  – втрати в погоджувальному перетворювачі під час живлення тягового електропривода бустерної секції;  $k_{OESS}$  – коефіцієнт, який враховує втрати в накопичувачі енергії під час процесів заряджання та розряджання.

Потужність накопичувача в режимі заряджання визначаємо за виразом:

$$P_{eoss}(t) = (P_{out(e)}(t) - \Delta p'_1(t)) + (P_{out(b)}(t) - \Delta p'_2(t)), \quad (25)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

де  $\Delta p_1'(t)$ ,  $\Delta p_2'(t)$  – втрати в погоджувальних перетворювачах у режимі запасання енергії.

Під час маневрування енергія з накопичувача живить тягові електродвигуни та допоміжні системи електровоза.

Потужність, споживана від накопичувача енергії, можна знайти з виразу:

$$p_{in(m)}(t) = \left( p_m(t) + \Delta p_m(t) + \Delta p_1''(t) \right) + p_{aux}''(t), \quad (26)$$

де  $p_m(t)$  – дотична потужність під час маневрування;  $\Delta p_m(t)$  – втрати в тяговому електроприводі в режимі маневрування;  $\Delta p_1''(t)$  – втрати у погоджувальному перетворювачі під час живлення тягового електропривода та допоміжних систем;  $p_{aux}''(t)$  – потужність допоміжних систем під час маневрування.

Енергію, яку відбирають із накопичувача енергії (НЕ, англ. OESS), визначають за виразом:

$$e'_{oess}(t) = E_k - \int_0^{t_k} p_{in(m)}(t) dt, \quad (27)$$

де  $E_k$  – енергія накопичувача перед  $k$ -м етапом розряджання;  $t_k$  – тривалість  $k$ -го етапу розряджання відповідно.

Для визначення втрат у тяговому електроприводі виконали розрахунки тягового асинхронного електродвигуна за синусоїдального живлення відповідно до [5]. Основні технічні параметри електродвигуна наведено в табл. 1.

Оскільки тяговий електродвигун живиться від напівпровідникового перетворювача, необхідно оцінити, по-перше, втрати в ньому, по-друге – втрати в тяговому електродвигуні від вищих гармонійних струму та напруги.

Розрахунок втрат в електродвигуні за несинусоїдального живлення потребує визначення параметрів ШІМ-модуляції інвертора, що не передбачено цим дослідженням. За оцінками [16], ККД тягового електродвигуна внаслідок живлення від інвертора напруги може знижуватися на 1,2...1,7 %. Тому припустимо, що зменшення ККД електродвигуна становить 1,5 % для усіх режимів роботи.

Розрахунок втрат у тяговому інверторі потребує, як і у випадку тягового електродвигуна, визначення параметрів ШІМ-модуляції інвертора залежно від режиму роботи. Однак аналіз характеристик ККД тягових інверторів показує, що їх ККД перевищує 98 % у широкому діапазоні навантажень [7, 10]. Тому вважаємо припускаємо, що втрати в інверторі будуть постійною величиною, яка відповідає втратам у номінальному режимі. За ККД інвертора 98 % і потужності 460 кВт втрати в інверторі складуть 9,4 кВт у разі індивідуального живлення електродвигунів.

Таблиця 1

**Номинальні параметри  
тягового електродвигуна**

Table 1

**Rated parameters of  
traction electric motor**

Параметр	Од. вим.	Значення
Потужність	кВт	430
Лінійна напруга	В	760
Фазний струм	А	395
Частота	Гц	25,5
Частота обертання	об./хв	501
Момент	Нм	8 200
ККД	%	93,6
Коефіцієнт потужності	д.е.	0,88
Найбільша частота обертання	об./хв	1 800
Кількість фаз	–	3
Кількість полюсів	–	6

Для оцінки енергоефективності також визначаємо втрати у тяговому редукторі. Розрахунки втрат в тяговому редукторі виконували відповідно до [2]. Для номінального режиму роботи тягового електродвигуна втрати в редукторі складають 1,7 кВт. Для розрахунків беремо, що втрати в редукторі не залежать від навантаження.

Під час розрахунків узято, що втрати в погоджувальних перетворювачах складають 2 % від потужності, яку передають.



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Для моделювання часткового відімкнення тягових електродвигунів кількість працюючих електродвигунів визначено в нижчеописаний спосіб з умови:

$$N_{TM} = \max(N_1, N_2), \quad (28)$$

де  $N_1$  – кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги;  $N_2$  – кількість тягових осей, необхідних для реалізації дотичної потужності.

Кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги, визначаємо за виразом:

$$N_1 = \frac{F_c}{\frac{F_s}{N_M}}, \quad (29)$$

де  $F_c$  – поточне значення дотичної сили;  $F_s$  – сила тяги на граничній характеристиці за поточної швидкості руху;  $N_M$  – загальна кількість обмоторених осей електровоза.

Отриману з виразу (29) кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої сили тяги, округляємо до цілого числа.

Кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої дотичної потужності, визначаємо за виразом:

$$N_2 = \frac{P_c}{P_{TMном}}, \quad (30)$$

де  $P_c$  – поточне значення дотичної потужності;  $P_{TMном}$  – номінальна потужність тягового електродвигуна.

Отриману з (30) кількість тягових осей, необхідних для забезпечення заданої потужності, округлюємо до цілого числа.

### Результати

Для розв'язання тягових задач та розрахунків параметрів енергетичних потоків складено скрипти в середовищі Matlab [12]. Візьмемо, що осьова формула електровоза –  $2(V_0 - V_0 + V_0 - V_0)$ , маса –  $2 \times 200$  т, довжина – 20 м. Граничні тягова та гальмівна характеристики електровозу, а також профіль шляху від дробарної фабрики до кар'єру (для порожнього напіврейсу) наведено в [3]. Завантажений напіврейс здійс-

нюється від пункту перевантаження до дробарної фабрики. Узято, що для перевезення руди використовують думпкари моделі 33–7141 підвищеної вантажопідйомності, що дорівнює 115 т. Маса тари думпкара – 50 т, довжина – 15 м. Кількість думпкарів у поїзді – 14. Для розрахунків візьмемо, що потужність допоміжних систем складає 300 кВт. Допустима швидкість руху – 20 км/год.

Для розрахунку режимів маневрування припустимо таке. Завантаження думпкара здійснюють за чотири цикли роботи екскаватора. Відповідно, за один цикл завантажується 28,75 т руди –  $\frac{1}{4}$  вантажопідйомності думпкара. Після цього поїзд переміщується на  $\frac{1}{4}$  довжини думпкара. Усього під час навантаження поїзд здійснює 56 переміщень. Перед початком навантаження поїзд переміщується на шлях 210 м на пункт перевантаження. Для розрахунків візьмемо, що потужність допоміжних систем складає 50 кВт.

Розвантаження думпкара здійснюють на дробарній фабриці, після поїзд переміщується на довжину вагона що дорівнює 15 м. Після ж 14 переміщень поїзд виїжджає з дробарної фабрики. Довжина цих переміщень становить 210 м. Для розрахунків беремо, що потужність допоміжних систем складає 100 кВт.

Описаний алгоритм руху під час завантаження й розвантаження ідеалізований, однак дозволяє провести розрахунки для визначення енергоспоживання. Для розрахунків узято, що рух забезпечують чотири електродвигуни бустерної секції.

Результати розв'язання тягових задач для ділянки шляху наведено на рис. 4 та 5 у вигляді часових залежностей.

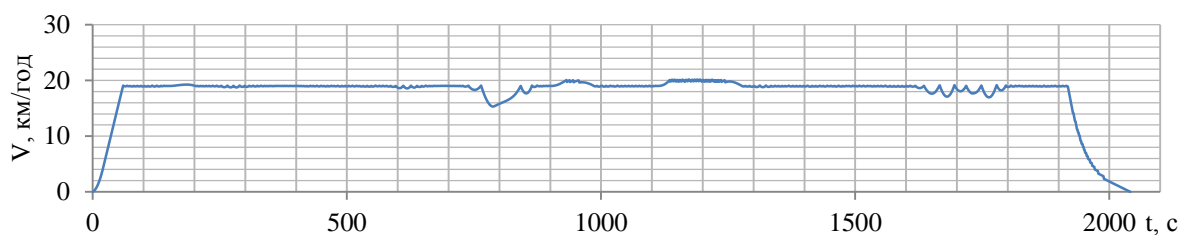
Аналіз рис. 4 та 5 показує, що фактична швидкість руху складає близько 19 км/год, що обумовлено алгоритмом завдання дотичної сили. Під час завантаженого напіврейсу рух із повним навантаженням у режимі тяги здійснюється на керівному підйомі. Під час порожнього напіврейсу в тяговому режимі рух здійснюється з потужністю не більше 50 % від номінальної. У режимах ЕДГ електровоз гальмує з номінальною потужністю відповідно до алгоритмів завдання дотичної сили.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

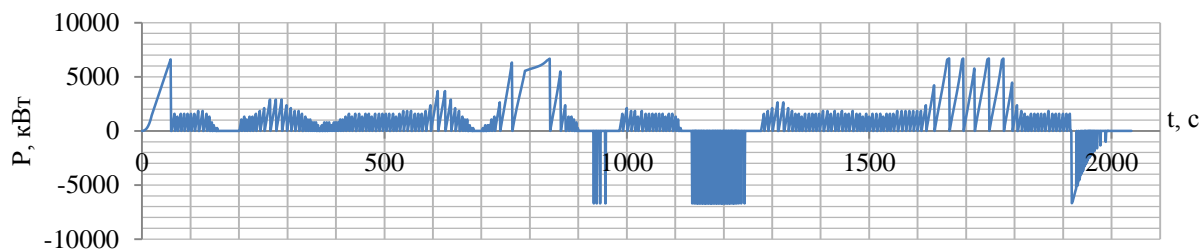
Аналіз залежності кількості працюючих електродвигунів (рис. 4, *в* та 5, *в*) показує, що ввімкнення електродвигунів бустерної секції відбувається тільки під час розгону та руху з потужністю, більше ніж 50 % від номінальної. Зокрема, під час порожнього напіврейсу працює тільки тяговий електропривід електровоза керування.

Як бачимо з рис. 4 та 5, значну частину руху в режимі тяги електровоз працює з 2...4 електродвигунами. При цьому в режимах тяги під час порожнього напіврейсу для руху фактично достатньо 8 електродвигунів електровоза керування. Під час завантаженого напіврейсу на підйомах умикаються електродвигуни бустерної секції. У режимі ЕДГ гальмування здійснюють усі електродвигуни.

*a – a*



*б – b*



*в – c*

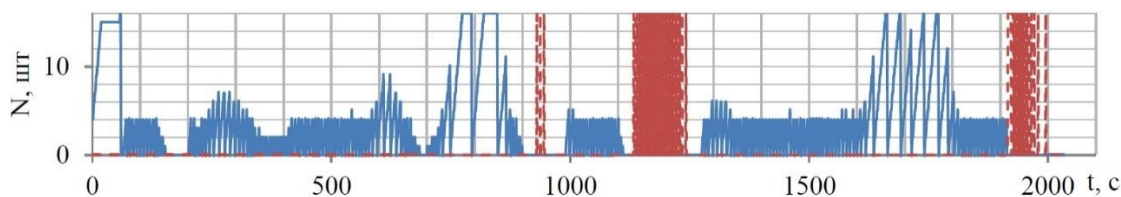


Рис. 4. Залежність швидкості поїзда (*a*), дотичної потужності електровозу (*б*) та кількості працюючих електродвигунів (*в*) для завантаженого напіврейсу (суцільна лінія – режим тяги, пунктирна лінія – режим ЕДГ)

Fig. 4. Dependence of the train speed (*a*), the tangential power of the electric locomotive (*b*) and the number of working electric motors (*c*) for a freight half passage (continuous line – traction mode, dashed line – EDB mode)

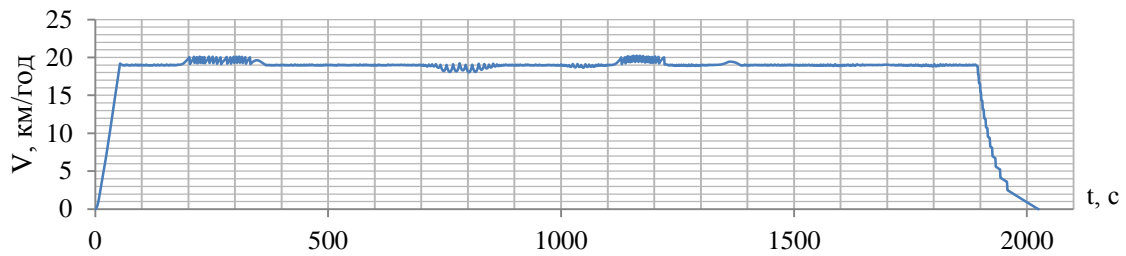
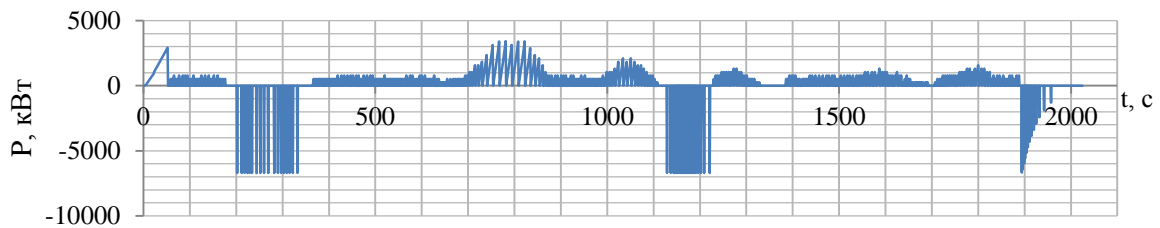
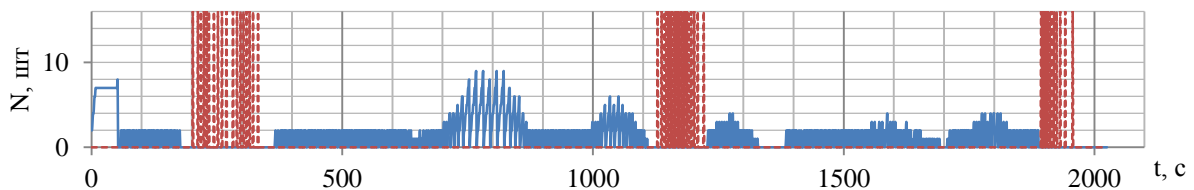
*a – a**b – b**в – в*

Рис. 5. Залежність швидкості поїзда (а), дотичної потужності електровоза (б) та кількості працюючих електродвигунів (в) для порожнього напіврейсу (суцільна лінія – режим тяги, пунктирна лінія – режим ЕДГ)

Fig. 5. Dependence of the train speed (a), the tangential power of the electric locomotive (b) and the number of working electric motors (c) for an empty half passage (continuous line – traction mode, dashed line – EDB mode)

У разі часткового навантаження електродвигуни працюють із потужністю 250...400 кВт (58...93 % від номінальної потужності). Варто зауважити, що під час руху з повним числом електродвигунів їх потужність складає 50...150 кВт (12...35 % від номінальної потужності).

Для ілюстрації зниження енергоспоживання під час роботи з відімкненими електродвигунами виконано розрахунки ККД системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач» за швидкості руху 20 км/год (для розрахунків взято, що діаметр тягового колеса складає 1,05 м, а передатне відношення тягового редуктора – 5,33). Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Енергетичні параметри системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач»**

Table 2

**Energy parameters of the «traction reducer-traction electric motor-traction converter» system**

Параметр	Од. вим.	Значення					
		100	80	60	40	20	0
Відносна потужність	%	100	80	60	40	20	0
ККД	%	90,3	90,3	89,8	88,0	81,8	0

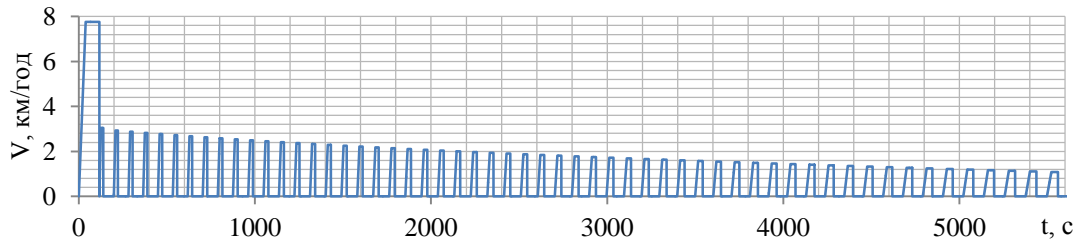
## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Як бачимо з табл. 2, у діапазоні навантажень 60...100 % (260...430 кВт) потужності ККД системи «тяговий редуктор – тяговий електродвигун – тяговий перетворювач» становить близько 90 %. І саме в цьому діапазоні потужності працюють тягові електродвигуни, що й забезпечує зменшення споживання енергії. Крім то-

го, для розрахунків узято, що непрацюючі електродвигуни розмагнічені. Це виключає втрати холостого ходу в ненавантажених електродвигунах [6].

Результати розрахунків параметрів руху під час маневрування наведено на рис. 6 і 7 у вигляді часових залежностей.

*a – a*



*б – б*

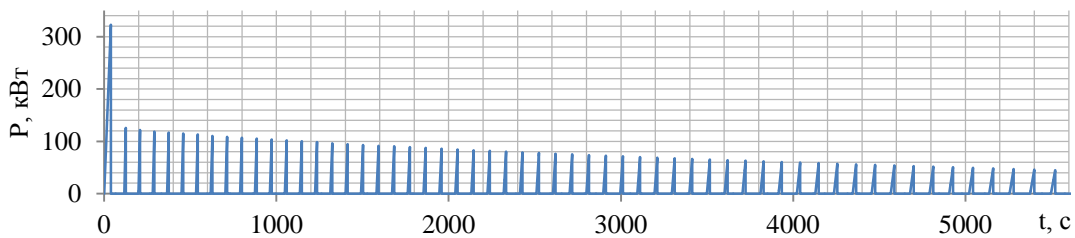
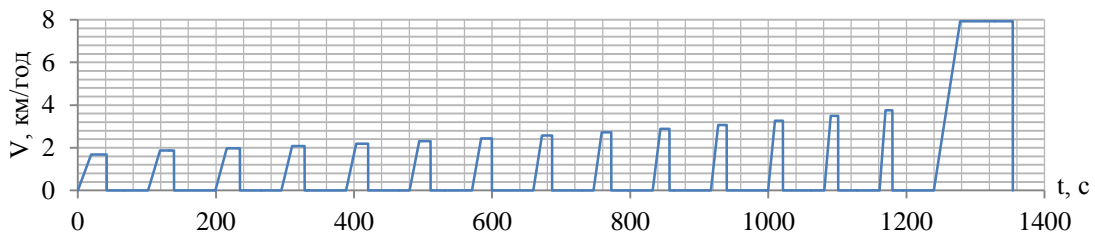


Рис. 6. Швидкість поїзда (*a*) та дотична потужність (*б*) під час маневрування протягом навантаження

Fig. 6. Speed of train (*a*) and tractive power (*b*) when shunting during loading

*a – a*



*б – б*

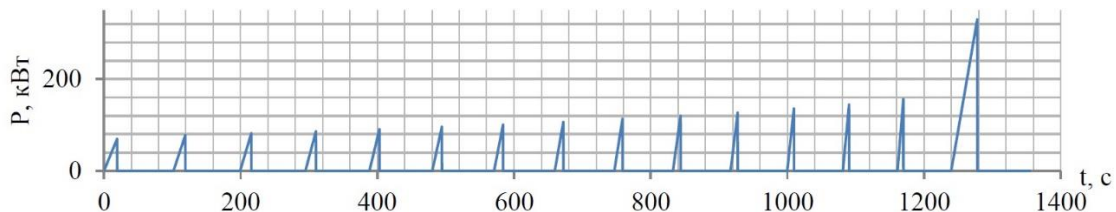


Рис. 7. Швидкість поїзда (*a*) та дотична потужність (*б*) під час маневрування протягом розвантаження

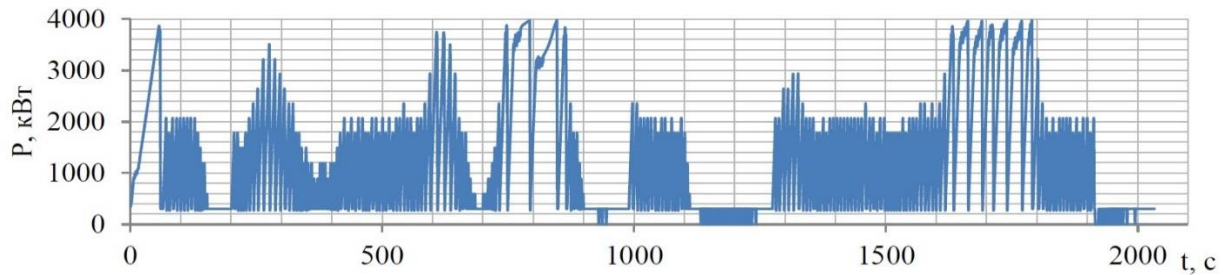
Fig. 7. Speed of train (*a*) and tangential power (*b*) when shunting during unloading

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Із рис. 6 і 7 випливає, що характер руху є імпульсним. Максимальна дотична потужність складає 330 кВт. Однак за обмеження швидкості пересування вона може бути зменшена.

На рис. 8–11 показано результати розрахунків параметрів енергетичних процесів у тяговому електроприводі під час руху по ділянці у вигляді часових залежностей.

*a – a*



*б – b*

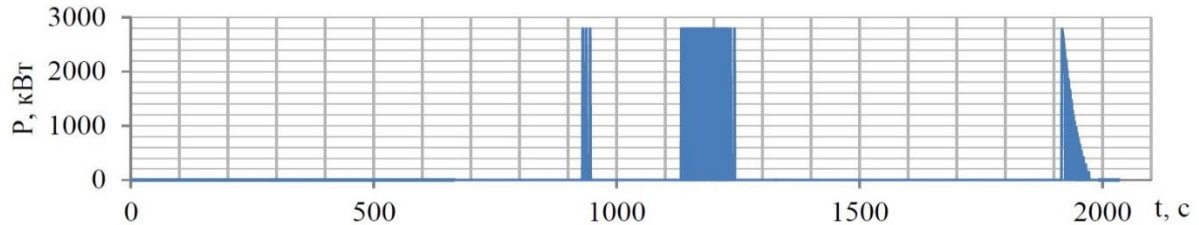
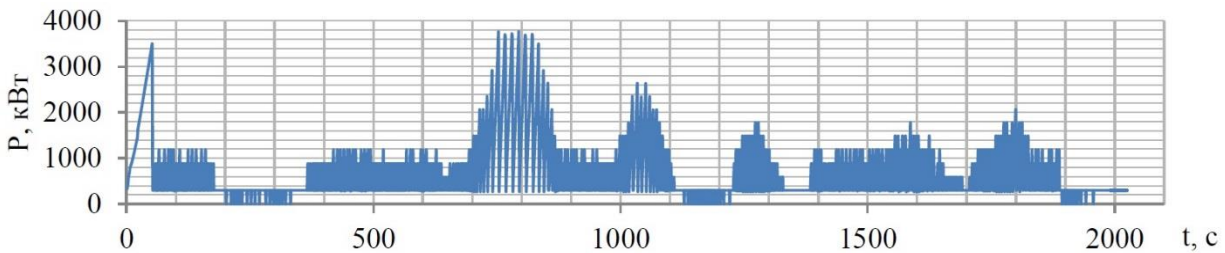


Рис. 8. Потужність проміжної ланки електровоза керування під час завантаженого напіврейсу:  
*a* – потужність, споживана від вхідного перетворювача; *b* – потужність, яка надходить до НЕ

Fig. 8. The power of the intermediate link of the control electric locomotive during the cargo half passage:  
*a* – the power consumed from the input converter; *b* – power, which is given to OESS

*a – a*



*б – b*

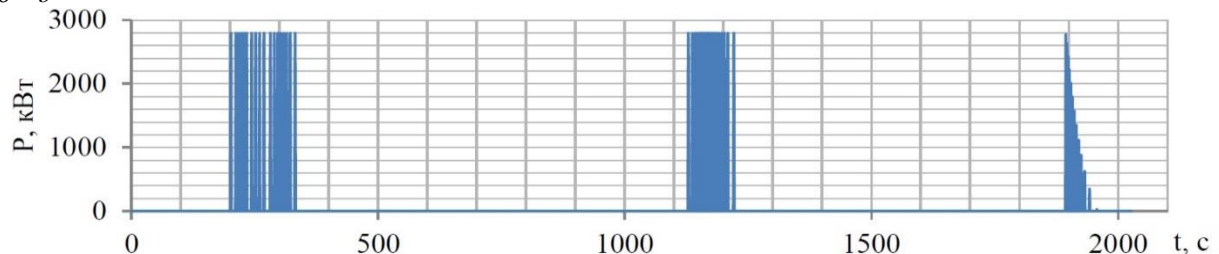


Рис. 9. Потужність проміжної ланки електровоза керування під час порожнього напіврейсу:  
*a* – потужність, споживана від вхідного перетворювача; *b* – потужність, яка надходить до НЕ

Fig. 9. The power of the intermediate link of the control electric locomotive at an empty half passage:  
*a* – the power consumed from the input converter; *b* – the power, which is supplied to OESS

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

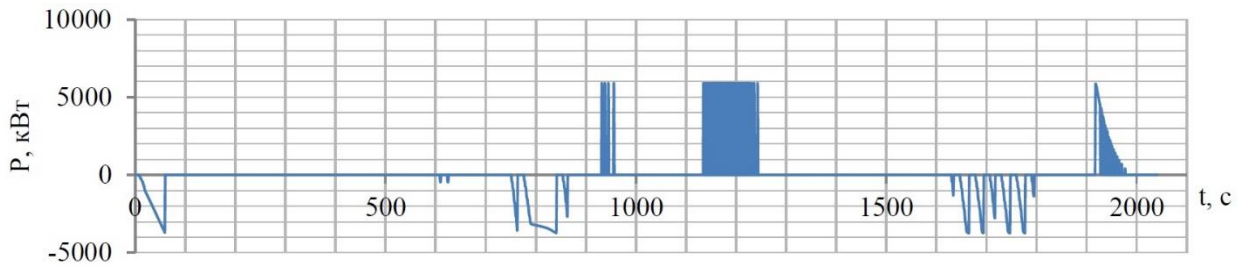
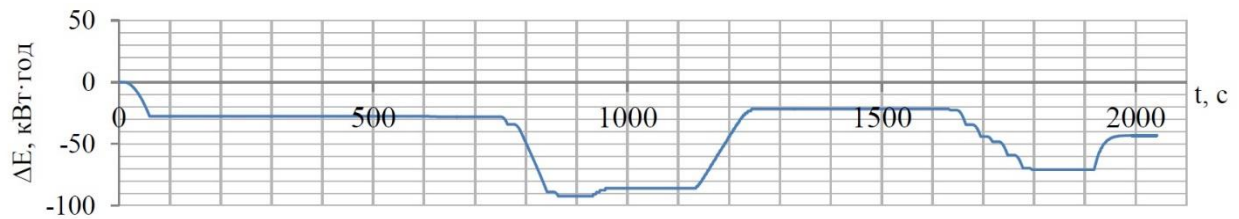
*a – a**б – б*

Рис. 10. Залежність потужності (*a*) та зміни енергії накопичувача (*б*) під час завантаженого напіврейсу (від'ємні значення потужності відповідають розряджанням НЕ, додатні – заряджанням)

Fig. 10. Dependence of power (*a*) and changes in the energy of the energy storage (b) during a cargo half passage (negative power values correspond to OESS discharge, positive values – to charging)

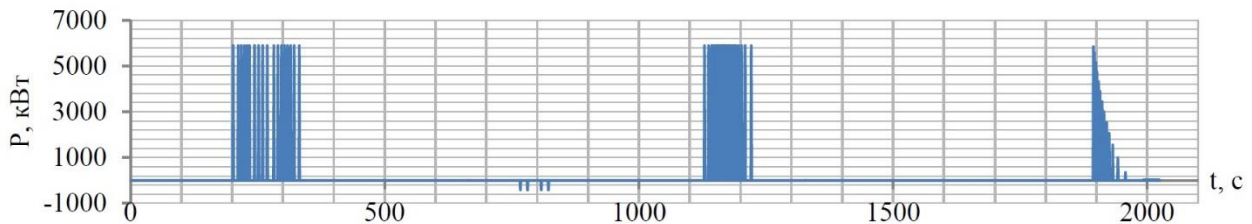
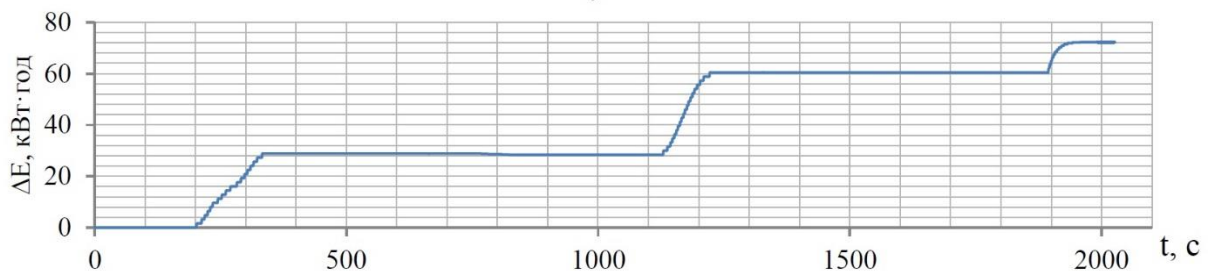
*a – a**б – б*

Рис. 11. Залежність потужності (*a*) та зміни енергії накопичувача (*б*) під час порожнього напіврейсу (від'ємні значення потужності відповідають розряджанням НЕ, додатні – заряджанням)

Fig. 11. Dependence of power (*a*) and changes in the energy of the energy storage device (*b*) at an empty half passage (negative power values correspond to OESS discharge, positive values – to charging)

Із рис. 8–11 випливає, що здебільшого рух поїзда забезпечує тяговий електропривід електровоза керування за його живлення від контактної мережі. Тяговий електропривід бустерної секції, який живиться від накопичувача енергії,

залучають до роботи тільки в певних режимах, коли тягове навантаження перевищує 50 % номінальної потужності або максимальної сили тяги.



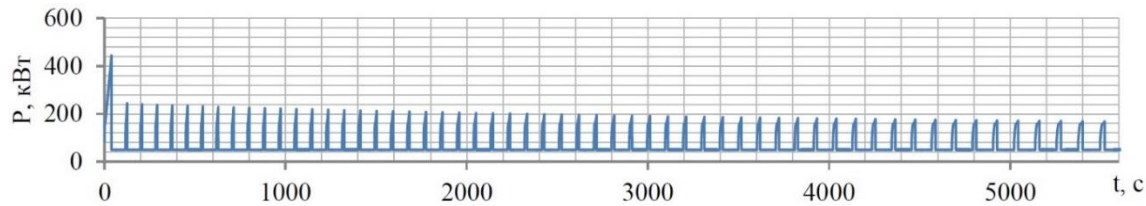
## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Під час вантаженого напіврейсу накопичувач енергії працює як у режимі накопичення за електродинамічного гальмування електровоза, так і в режимі розрядження в разі живлення тягового електропривода бустерної секції. Під час порожнього напіврейсу накопичувач енергії

працює тільки в режимі запасання енергії в разі електродинамічного гальмування.

На рис. 12 і 13 показано результати розрахунків параметрів енергетичних процесів у тяговому електроприводі під час маневрування у вигляді часових залежностей.

*a – a*



*б – б*

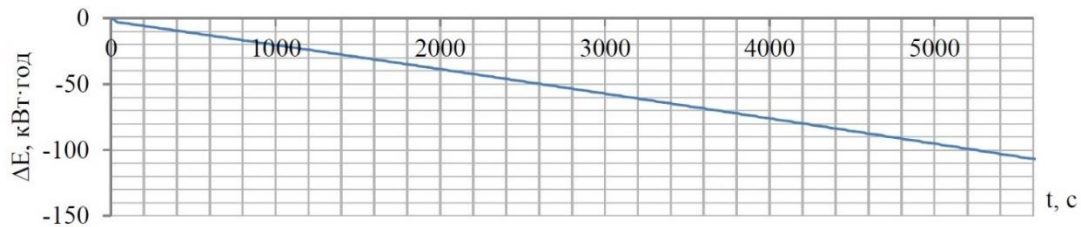
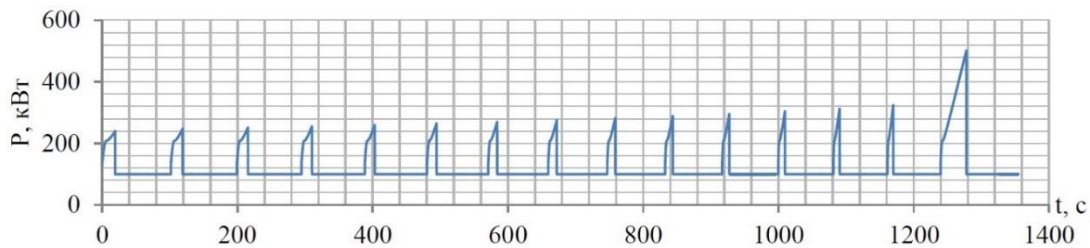


Рис. 12. Потужність НЕ (*a*) та зміна енергії НЕ (*б*) під час маневрування протягом навантаження

Fig. 12. OESS power (*a*) and OESS energy change (*b*) when shunting during loading

*a – a*



*б – б*

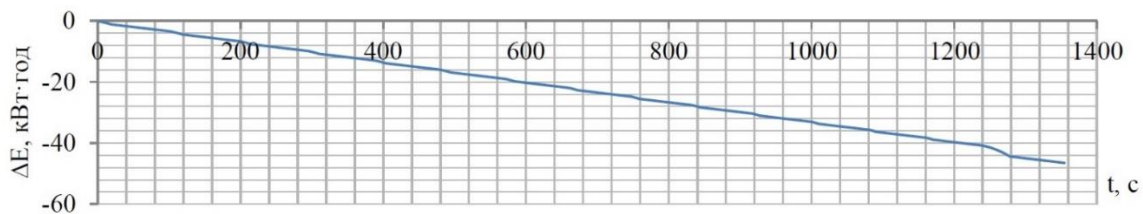


Рис. 13. Потужність НЕ (*a*) та зміна енергії НЕ (*б*) під час маневрування протягом розвантаження

Fig. 13. OESS power (*a*) and OESS energy change (*b*) when shunting during unloading

Із рис. 12 і 13 бачимо, що під час маневрування відбувається розрядження накопичувача енергії. Для виконання операцій під час навантаження потрібно близько 110 кВт·год енергії, під час розвантаження – 45 кВт·год. Значну ча-

стину цієї енергії споживають допоміжні системи.

На рис. 14 показано залежність зміни енергії НЕ під час руху за циклом «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження».

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

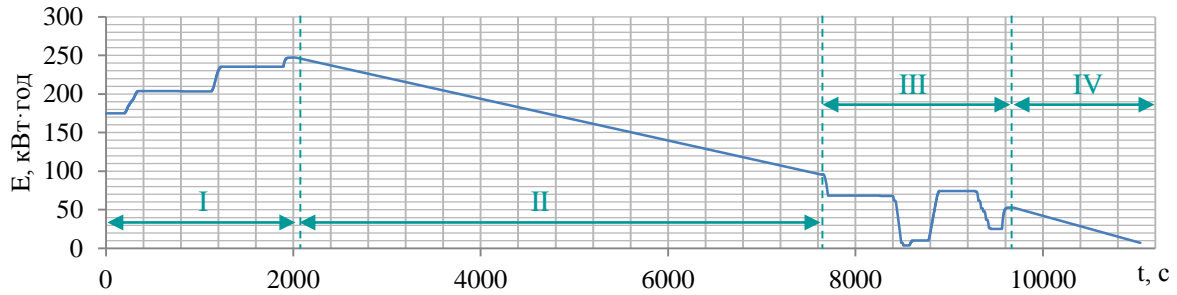


Рис. 14. Зміна енергії НЕ за рейс:

I – порожній напіврейс; II – маневрування протягом навантаження; III – завантажений напіврейс;  
IV – маневрування протягом розвантаження

Fig. 14. OESS energy change per passage:

I – empty half passage; II – shunting during loading; III – loaded half passage; IV – shunting during unloading

Із рис. 14 випливає, що для забезпечення роботи електровоза в циклі «порожній напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження» початкова енергія має становити не менше 175 кВт·год. Під час порожнього напіврейсу (етап I) енергія НЕ збільшується внаслідок рекуперації. Під час маневрування протягом навантаження (етап II) відбувається

розрядження НЕ на величину 110 кВт·год. Під час вантажного напіврейсу НЕ (етап III) як розряджається, так і накопичує енергію. У разі маневрування протягом розвантаження (етап IV) відбувається розрядження НЕ.

Із рис. 8–14 визначаємо параметри компонент тягового електропривода. Результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

## Параметри тягового електропривода електровоза

Table 3

## Parameters of traction electric drive of an electric locomotive

Параметр	Од. вим.	Значення
Потужність вхідного перетворювача	кВт	4 000
Потужність погоджувального перетворювача ПП1	кВт	2 800
Потужність погоджувального перетворювача ПП2	кВт	3 800
Потужність накопичувача енергії	кВт	6 000
Робоча енергоємність накопичувача енергії	кВт·год	250
Початкова енергія перед циклом руху	кВт·год	175

Таким чином, проведені дослідження показують можливість створення тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту із запропонованою структурою. Шляхом моделювання роботи електровоза визначено параметри основних компонентів тягового електропривода.

## Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи вперше запропонували структуру тягового електропривода електровоза для кар'єрного залізничного транспорту, у якій живлення електродвигунів електровоза керування здійснюється від контактної мережі, а електродвигуни бустерної секції живляться від накопичувача енергії і починають працювати за навантаження, яке перевищує 50 % номінального.



Практична значимість роботи полягає в розроблених математичних моделях руху поїзда та процесів енергетичного обміну в тяговому електроприводі, які можна застосувати для дослідження тягових електроприводів транспортних засобів різного призначення.

### Висновки

У статті запропоновано структуру тягового багатодвигунного електропривода з накопичувачем енергії електровоза для кар'єрного залізничного транспорту. Шляхом математичного моделювання обґрунтовано доцільність застосування тягового електропривода із запропонованою структурою для циклу роботи «порожній

напіврейс – навантаження – завантажений напіврейс – розвантаження».

Визначено параметри основних компонент тягового електропривода. Для електровоза ПрАТ «Полтавський ГЗК» робоча енергоємність накопичувача енергії становить 250 кВт·год за потужності 6 000 кВт. Це забезпечує автономний хід електровоза в разі маневрування під час навантаження та розвантаження, а також найповніше використання енергії рекуперації.

Подальші дослідження запропонованого тягового електропривода пов'язані з розробкою енергоефективних алгоритмів керування процесами енергетичного обміну між його компонентами та системою тягового енергопостачання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дриженко А. Ю. *Відкриті гірничі роботи*. Дніпропетровськ : НГУ, 2014. 590 с.
2. Павлище В. Т. *Основи конструювання та розрахунок деталей машин* : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 556 с.
3. Рябов Є., Мосін С., Овер'янова Л., Кондратьєва Л., Демидов О., Гулак С. 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>
4. Слащов В. А. *Тягові та гальмові розрахунки на рейковому транспорті* : навч. посібник для вузів. Луганськ : СХУ ім. В. Даля, 2005. 232 с.
5. Ципленков Д. В., Іванов О. Б., Бобров О. В., Кузнецов В. В., Артемчук В. В., Баб'як М. О. *Проектування електричних машин* : навч. посіб. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 408 с.
6. Andryushchenko A., Kolpahchyan P., Zarifyan A. Reduction of Electric Locomotive's Energy Consumption by Scalable Tractive Power Control. *Transport Problems*. Vol. 13. Iss. 2. P. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.10>
7. Bhatnagar P. *Benefits of Using the 1700V and 3300V High Power Modules for Traction Applications*. URL: <https://cutt.ly/mVFswLa>
8. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard energy storage in rail transport : Review of real applications and techno-economic assessments. *IET electrical systems in transportation*. 2021. Vol. 11. Iss. 4. P. 279–309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026>
9. *FLXdrive battery electric locomotive at a glance*. URL: <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/flxdrive>
10. Liang H., Wenqing M., YuLiang W., Yongcan L., Xiangyu F., Yan J. Experimental Study of the PWM Control Strategy for SiC Traction Inverter of Metro Vehicles. *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc49601.2020.9330853>
11. Lin C, Cheng X. A traction control strategy with an efficiency model in a distributed driving electric vehicle. *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/261085>
12. *Matlab*. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
13. Mazzone A., Schönbacher M., Larrea X. Future Freight Locomotives in Shift2Rail – Development of Full Electric Last Mile Propulsion System. *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018* (Vienna, 16-19 April 2018). Vienna, Austria, 2018. P. 1–10.
14. Pirouz H. M. A New Multi-Motor Traction Drive for Rail Vehicles with On-Board Braking Energy Saver. *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/pedstc49159.2020.9088435>
15. Rasul M., Patel A., Cole C., Sun Y., Spiriyagin M., Godber T., Hames S. Train motive power technologies : a review on existing and emerging (hybrid) technologies. *10th World Congress on Railway Research (WCRR2013)*. 2013. P. 1–12.

16. Schmidt E., Müllner F., Neudorfer H. Additional Losses of Inverter Fed Asynchronous Induction Machines of Traction Drives – Comparison of Modelling and Measurements. *Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS)*. 2011. P. 1–5.
17. Voytenko V. A., Vodichev V. A., Kalinin A. G. Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport. *Problemele energeticii regionale*. 2019. № 1-2 (41S). P. 95–106.
18. Xu S., Wei L., Zhang X., Bai Z., Jiao Y. Research on Multi-Mode Drive Optimization Control Strategy of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles with Multiple Motors. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 12. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127378>
19. Yun S., Yi K., Cheon S., Yoon Y. Development of a Motor Torque Distribution Strategy of Six-wheel-Driven Electric Vehicles for Optimized Energy Consumption. *SAE Technical Paper Series*. 2013. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1746>

Y. S. RIABOV<sup>1\*</sup>, L. Y. KONDRATIEVA<sup>2</sup>, L. V. OVERIANOVA<sup>3</sup>, B. K. YERITSYAN<sup>4</sup>,  
S. O. HULAK<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Transport and Locomotive Engineering», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kyrpychova St., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 3021454, e-mail riabov.ievgen@gmail.com, ORCID 0000-0003-0753-514X

<sup>2</sup>Dep. «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 kondratieva.lilia@gmail.com, ORCID 0000-0002-2788-9116

<sup>3</sup>Dep. «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 overanova@ukr.net, ORCID 0000-0002-4827-572X

<sup>4</sup>Dep. «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 bagish\_ericjan@ukr.net, ORCID 0000-0003-0579-3882

<sup>5</sup>Dep. «Electromechanics and Rolling Stock of Railways», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, 04071, Ukraine, tel. +38 (096) 563 12 53, e-mail sgoolak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2294-5676

## Justification of the Structure of the Electric Traction Drive of the Electric Locomotive for Railway Quarry Transport

**Purpose.** The study is aimed at substantiating the structure and determining the main parameters of the traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport, taking into account its modes of operation. **Methodology.** The research was carried out by means of mathematical modeling, which included solving the traction problem and evaluating the parameters of the energy exchange processes between the components of the traction electric drive. The simulation was carried out for the movement of the train along the track section and during shunting, which differ significantly in their mathematical description. During simulation of movement along the track section, the traction problem was solved using recommendations for traction calculations for train operation. A simplified model was developed to simulate movements during shunting. Determination of the parameters of the traction electric drive components is carried out by analyzing the processes of energy exchange in the traction electric drive based on the power balance. During the studies, it was assumed that the on-board energy storage in the traction mode feeds the traction electric motors of the booster section. In the electrodynamic braking mode, the energy accumulator stores energy from all traction electric motors of the electric locomotive. **Findings.** The authors obtained time dependences of the parameters that characterize the train movement at all stages of the cycle «empty half passage – loading – loaded half passage – unloading» (on the example of an electric locomotive for PJSC «Ferrexpo Poltava Mining»). The analysis of the obtained dependencies made it possible to determine the parameters of the main components of the traction electric drive for the proposed storage operation scenario. It was established that the energy capacity of the energy storage should be 250 kWh for one movement cycle. The energy storage power is 6000 kW. **Originality.** The authors of this paper for the first time proposed the structure of the traction electric drive of an electric locomotive for quarry railway transport, in which the electric motors of the control electric locomotive are powered from the catenary network, and the electric motors of the booster section are powered from the energy accumulator and are included in the operation at a load that exceeds 50% of the nominal one. **Practical value.** The practical value lies in the developed mathematical models of movement and energy exchange processes, which can be applied to the study of traction electric drives of vehicles of various purposes.

**Keywords:** quarry railway transport; electric locomotive; traction electric drive; energy storage; traction task

## REFERENCES

1. Dryzhenko, A. Yu. (2014). *Vidkryti hirnychi roboty*. Dnipropetrovsk: NHU. (in Ukrainian)
2. Pavlyshche, V. T. (1993). *Osnovy konstruiuvannia ta rozrakhunok detalei mashyn: pidruchnyk*. Kyiv: Vyscha shkola. (in Ukrainian)
3. Riabov, I., Mosin, S., Overianova, L., Kondratieva, L., Demydov, O., & Goolak, S. (2022). Evaluation of the technical parameters of the locomotive for railway quarry transport. *Transport Systems and Technologies*, 39, 83-100. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-9> (in Ukrainian)
4. Slashchov, V. (2005). *Tjaghovi ta ghaljmovi rozrakhunky na rejkovomu transporti: navchalnyj posibnyk dlja vuziv*. Luhansk: SNU im. V.Dalja. (in Ukrainian)
5. Tsyplenkov, D. V., Ivanov, O. B., Bobrov, O. V., Kuznetsov, V. V., Artemchuk, V. V., & Babiak, M. O. (2020). *Proiektuvannia elektrychnykh mashyn: navchalnyj posibnyk*. Dnipro: NTU «DP» (in Ukrainian)
6. Andryushchenko, A., Kolpahchyan, P., & Zarifyan, A. (2018). Reduction of Electric Locomotive's Energy Consumption by Scalable Tractive Power Control. *Transport Problems*, 13(2), 103-110. (in English)
7. Bhatnagar, P. *Benefits of Using the 1700V and 3300V High Power Modules for Traction Applications*. Retrieved from <https://cutt.ly/mVFswLa> (in English)
8. Fedele, E., Iannuzzi, D., & Del Pizzo, A. (2021). Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET electrical systems in transportation*, 11(4), 279-309. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12026> (in English)
9. *FLXdrive battery electric locomotive at a glance*. Retrieved from <https://www.wabteccorp.com/locomotive/alternative-fuel-locomotives/flxdrive> (in English)
10. Liang, H., Wenqing, M., YuLiang, W., Yongcan, L., Xiangyu, F., & Yan, J. (2020). Experimental Study of the PWM Control Strategy for SiC Traction Inverter of Metro Vehicles. In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-5). DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc49601.2020.9330853> (in English)
11. Lin, C., & Cheng, X. (2014). A traction control strategy with an efficiency model in a distributed driving electric vehicle. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/261085> (in English)
12. *Matlab*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (in English)
13. Mazzone, A., Schönbacher, M., & Larrea, X. (2018). Future Freight Locomotives in Shift2Rail—Development of Full Electric Last Mile Propulsion System. In *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018* (pp. 1-10). Vienna, Austria. (in English)
14. Pirouz, H. M. (2020). A New Multi-Motor Traction Drive for Rail Vehicles with On-Board Braking Energy Saver. In *2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC)* (pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1109/pedstc49159.2020.9088435> (in English)
15. Rasul, M., Patel, A., Cole, C., Sun, Y., Spiriyagin, M., Godber, T., & Hames, S. (2013). Train motive power technologies : a review on existing and emerging (hybrid) technologies. In *10th World Congress on Railway Research (WCRR2013)* (pp. 1-12). (in English)
16. Schmidt, E., Müllner, F., & Neudorfer, H. (2011). Additional Losses of Inverter Fed Asynchronous Induction Machines of Traction Drives - Comparison of Modelling and Measurements. In *Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems (ELECTRIMACS)* (pp. 1–5). (in English)
17. Voytenko, V. A., Vodichev, V. A., & Kalinin, A. G. (2019). Analysis of Technical and Energy Indicators of a Multi-Motor Electric Drive for Urban Public Transport. *Problemele energeticii regionale*, 1-2(41S), 95-106. (in English)
18. Xu, S., Wie, L., Zhang, X., Bai, Z., & Jiao, Y. (2022). Research on Multi-Mode Drive Optimization Control Strategy of Four-Wheel-Drive Electric Vehicles with Multiple Motors. *Sustainability*, 14(12), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127378> (in English)
19. Yun, S., Yi, K., Cheon, S., & Yoon, Y. (2013). Development of a Motor Torque Distribution Strategy of Six-wheel-Driven Electric Vehicles for Optimized Energy Consumption. *SAE Technical Paper Series*, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1746> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.02.2022

Прийнята до друку: 10.06.2022