

В. І. Носков, С. Ю. Гавриленко, В. В. Скороделов, М. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ АВТОНОМНИХ ЛОКОМОТИВІВ

**Анотація.** Одним з основних чинників, які визначають якість роботи автономного локомотива є тягова електропередача (ТЕП), для оцінки якої використовуються показники її роботи у режимах тяги та електричного гальмування. Як правило, оцінка тягової електропередачі проводиться за такими показниками, як установлена та тривала потужність електрообладнання, коефіцієнт корисної дії та ін. В даній статті запропоновано та обґрунтовано метод якісної оцінки тягової електропередачі з використанням інтегрального показника потужності. Оцінку динамічних показників тягової електропередачі пропонується виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

**Ключові слова:** тягова електропередача, інтегральний показник потужності, комп'ютерна модель.

### Вступ

Тягова електропередача (ТЕП) здійснює передачу потужності дизеля до рушійних колес і належить до основних складових, які визначають якість роботи локомотива. При цьому має виконуватися низка вимог, пов'язаних з реалізацією тягового зусилля, яке обмежено зчепленням колеса з рейками, повна передача потужності дизель-генератора на осі локомотива в заданому діапазоні швидкостей руху, забезпечення роботи дизеля за економічними характеристиками в статичних і динамічних режимах. Комплексна оцінка ТЕП відіграє важливу роль при створенні локомотивів та їх експлуатації.

**Аналіз літератури.** Оцінка якості роботи автономного локомотива вимагає вибору та обґрунтування відповідного критерію або цільової функції. У загальному випадку таким критерієм є мінімум витрати палива [1–5]. Аналіз виразу, що визначає цей критерій, показує його пряму залежність від таких факторів, як ефективність роботи дизеля, ККД ТЕП, витрати енергії на власні потреби та ін.

При створенні та експлуатації автономних локомотивів виникає низка питань, пов'язаних з оцінкою основних факторів, що впливають на їх якісні показники.

Існують різні методи досліджень тягової електропередачі у статичних і динамічних режимах роботи, але не всі вони дають достатньо об'єктивну та наочну інформацію про характеристики тягової електропередачі, а математичні моделі, що їх описують, досить складні.

В даній статті пропонується проводити якісну оцінку тягової електропередачі в режимах тяги та гальмування з використанням інтегрального показника потужності, а оцінку динамічних властивостей тягової електропередачі виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

### Основна частина

У загальному випадку в якості критерію для оцінки якості роботи локомотива використовується цільова функція мінімуму витрати палива:

$$W = B \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $B$  – витрати палива.

Визначення експлуатаційних витрат палива локомотивом виконується по формулі, яка відносить його сумарні витрати до тягової роботи локомотива на колесі:

$$W = q_n = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ei} \cdot P_{di} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_{ki} \cdot t_i} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $q_n$  – питома витрата палива в заданому режимі,  
 $P_{di}$  – потужність дизеля на  $i$ -й позиції контролера машиніста (КМ),

$b_{ei}$  – питома витрата палива при реалізації  $P_{di}$  на  $i$ -й позиції КМ,

$t_i$  – час роботи на  $i$ -й позиції контролера машиніста,

$P_{ki}$  – потужність, що реалізується на колесі:

$$P_{ki} = P_{di} - P_{en} - P_m \cdot \eta_{en}, \quad (3)$$

де  $P_{en}$  – потужність, що відбирається на власні потреби локомотива,

$P_T$  – потужність дизеля, яка віддається на тягу,

$\eta_{en}$  – ККД електропередачі, включаючи тяговий редуктор [6, 7].

Тягова електропередача відноситься до основних факторів, що впливають на якість роботи локомотива.

При перетворенні механічної енергії дизеля на механічну енергію руху локомотива повинен виконуватися ряд вимог, пов'язаних з реалізацією тягового зусилля, обмеженого зчепленням колес з рейками; повної передачі потужності дизель-генератора в заданому діапазоні швидкостей руху; забезпечення роботи дизеля за економічними характеристиками в статичних і динамічних режимах.

На рис. 1 приведена структурна схема ТЕП моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02. Тяговий генератор, який обертається від дизеля, через випрямну установку і автономні інвертори напруги (АН1, АН2) живить асинхронні тягові двигуни (АТД1, АТД2).

Від тягового генератора та перетворювачів частоти власних потреб (ПЧВП) живляться допоміжні споживачі енергії.

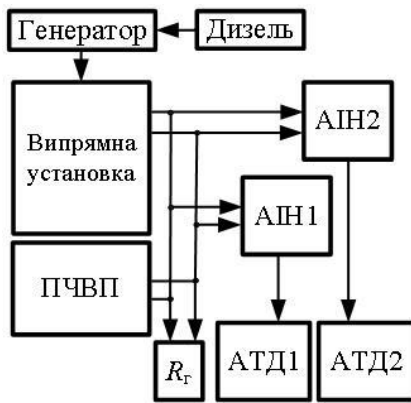


Рис. 1. Структурна схема ТЕР моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02

При електричному гальмуванні АТД працюють у режимі генераторів і через АПН1, АПН2 навантажуються на гальмовий резистор  $R_r$  [8].

Гранична тягова характеристика локомотиву  $F = f(V)$  (рис. 2) містить область пуску (1) і область постійної потужності (2). Тягове зусилля в області пуску обмежується допустимим значенням зчеплення колеса з рейкою [9, 10].

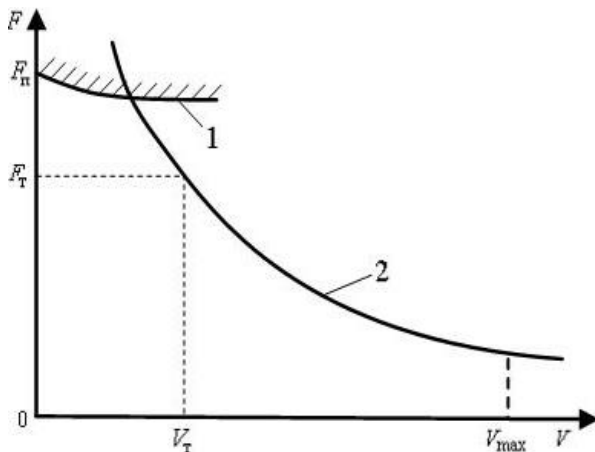


Рис. 2. Гранична тягова характеристика ( $F_n$  – пускова тяга,  $F_r$  і  $V_r$  – тривала тяга і швидкість відповідно (для ТЕР з колекторними двигунами),  $V_{max}$  – максимальна швидкість руху локомотива)

Для ТЕР із колекторними тяговими двигунами (КТД) послідовного збудження коефіцієнт зчеплення  $\psi$  визначається за виразом:

$$\psi = 0,25 + \frac{8}{100 + V}. \quad (4)$$

Тягове зусилля при цьому буде:

$$F = \psi \cdot G, \quad (5)$$

де  $G$  – маса поїзда.

Для ТЕР з АТД коефіцієнт зчеплення у зоні пуску в 1,3 рази вищий, ніж з КТД, що зумовлено особливостями електромеханічної характеристики двигуна. Область постійної потужності має початок від області пуску та кінець на максимальній швидкості локомотива.

Тягове зусилля у цій області визначається за виразом:

$$F = P_0 / V. \quad (6)$$

Необхідно зазначити, що розширення швидкісного діапазону за рахунок зниження потужності ТЕР неприпустимо.

Аналогічним чином представляється характеристика локомотива в режимі електричного гальмування, коли механічна енергія руху дизель-поїзда через ТЕР гаситься на гальмових резисторах.

При цьому можливе її використання для живлення допоміжних навантажень і опалення пасажирських вагонів.

Гранична гальмівна характеристика локомотива  $B = f(V)$  наведена на рис. 3 [9, 10].

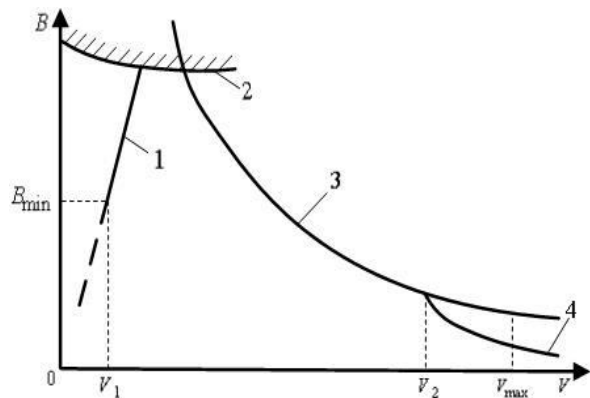


Рис. 3. Гранична гальмівна характеристика локомотива ( $B_{min}$  – мінімальне гальмівне електричне зусилля)

Гальмівна характеристика (рис. 3) має кілька ділянок, які визначаються параметрами ТЕР:

- область обмеження магнітного потоку тягових двигунів (1);
- область обмеження гальмівного зусилля в умовах зчеплення коліс з рейками (2);
- область обмеження гальмівної потужності (3);
- область обмеження комутації для КТД (4), для якої зазвичай виконується рівняння:

$$V_2 = (0,7 \dots 0,8) \cdot V_{max}. \quad (7)$$

При зростанні швидкості локомотива гальмівна потужність  $P_r$  зменшується відповідно з наступним виразом:

$$P_r / V = const. \quad (8)$$

При зниженні швидкості локомотива приблизно до 5-10 км/год електричне гальмо стає неефективним і відбувається перехід на пневматичне (зупинкове) гальмування.

Одним із показників, який використовується при порівнянні ТЕР, є встановлена потужність електроустановки, яка оцінюється як відношення добутку значень пускової тяги на максимальну швидкість локомотива до потужності дизеля, що використовується для тяги.

Оскільки пускові тягові зусилля локомотива визначають струми в елементах тягової електропере-

дачі, а максимальна швидкість визначає напругу, цей показник певною мірою характеризує електричну потужність, закладену в електроустаткування.

Зв'язок між параметрами ТЕП та характеристиками локомотива виконується через: механічну частину приводу, передавальне число редуктора, діаметр колеса.

Другим показником для порівняння ТЕП є тривала потужність електрообладнання, яка оцінюється як відношення добутку значень тривалої тяги на максимальну швидкість до потужності дизеля. Цей показник характеризує область, у якій локомотив може працювати тривалий час.

В даній роботі пропонується проводити оцінку тягової електропередачі локомотивів за інтегральним показником потужності  $K_p$ , який враховує коефіцієнт корисної дії тягової електропередачі і механічної частини приводу, тягові та швидкісні характеристики локомотива, і є відношенням площі тягової характеристики до потужності дизеля:

$$K_p = \frac{1}{P_0} \int_{V=0}^{V_{\max}} F dV. \quad (9)$$

Для порівняльної оцінки ТЕП в режимі електричного гальмування можна використовувати вираз, в якому замість тягової використовується гальмівна характеристика:

$$K_p = \frac{1}{P_0} \int_{V=0}^{V_{\max}} B dt. \quad (10)$$

Запропонованим методом оцінювання було проведено порівняння тягової електропередачі локомотивів з різними двигунами і виявлено, що в режимі тяги інтегральний показник з АТД вище на 15 %, а в режимі електричного гальмування вище на 40 %, ніж з КТД.

Для якісної оцінки динамічних властивостей тягової електропередачі локомотивів були виконані дослідження на комп'ютерній моделі динаміки руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з різними типами тягових приводів.

Як відомо, математична модель руху дизель-поїзда описується рівнянням виду:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c, \quad (11)$$

де  $J$  – момент інерції ( $J = G \cdot R_k^2$ ),

$R_k$  – радіус колеса,

$\omega$  – кутова швидкість ( $\omega = V/R_k$ ),

$M_t$  – момент тяги,

$M_c$  – момент опору руху,

$V$  – швидкість руху дизель-поїзда.

Швидкість дизель-поїзда з урахуванням одиниць вимірювання, що використовуються в даному випадку, визначається співвідношенням:

$$V = 3,6 \cdot \omega \cdot R_k. \quad (12)$$

Для розробки комп'ютерної моделі були використані рівняння (11 – 12).

Визначення моменту тяги  $M_t$  у процесі руху поїзда здійснюється відповідно до рівнянь:

$$M_m = F(V) \cdot R_k, \quad (13)$$

$$F_{\max} = 9,81 \cdot G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a_{\max} + W_0), \quad (14)$$

де  $F(V)$  – тягова характеристика ТЕП,

$F_{\max}$  – максимальне зусилля при розгоні,

$(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції мас, що обертаються ( $\gamma = 0,1$ ),

$a_{\max}$  – максимальне прискорення поїзда,

$W_0$  – коефіцієнт опору руху (при розгоні  $W_0 = 1,1$ ).

Визначення моменту опору руху  $M_c$  у процесі руху поїзда здійснюється відповідно до таких рівнянь:

$$M_c = 9,81 \cdot i \cdot R_k \cdot W_0 \cdot G, \quad (15)$$

$$W_0 = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,00025 \cdot V^2, \quad (16)$$

де  $i$  – коефіцієнт ухилу колії (для горизонтальної ділянки  $i = 1$ ).

Згідно з виразами (11 – 16) розроблено комп'ютерну модель для обчислення швидкості поїзда в залежності від параметрів ТЕП та умов руху, яка складається з блоків обчислення моменту тяги і моменту опору руху, блоку обчислення коефіцієнтів і блоку інтегрування (рис. 4).

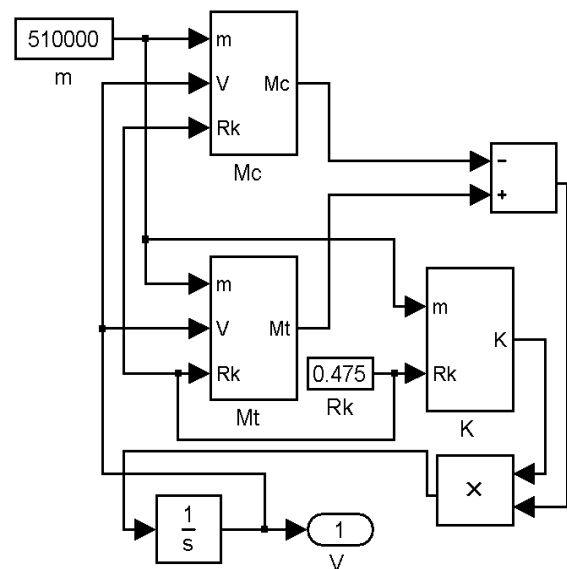
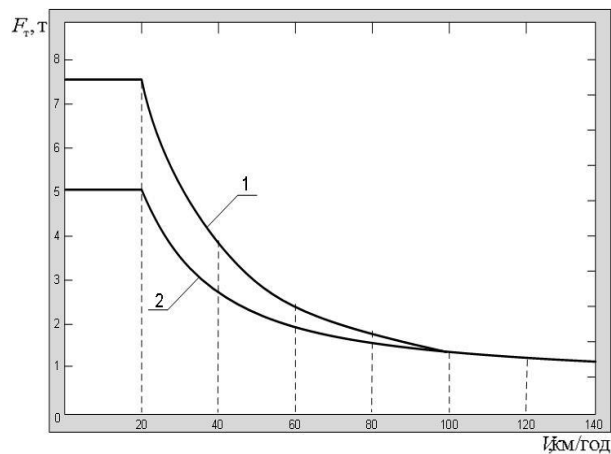


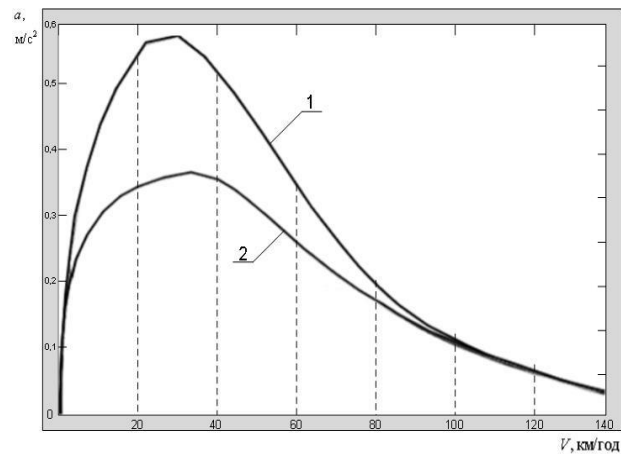
Рис. 4. Комп'ютерна модель для обчислення швидкості руху дизель-поїзда

На рис. 5 приведені порівняльні тягові характеристики, які отримані розрахунковим шляхом при використанні дизель-генератора фірми MTU потужністю 550 кВт і максимальною напругою генератора після впрямної установки 1500 В для різних типів ТЕП. На розробленій комп'ютерній моделі були проведені дослідження динамічних характеристик дизель-поїзда ДЕЛ-02 з різними типами ТЕП.

На рис. 6 наведені характеристики прискорення  $a = f(V)$  дизель-поїзда.



**Рис. 5.** Тягові характеристики дизель-поїзда з різними типами ТЕП (1 – з використанням АТД, 2 – з використанням КТД)



**Рис. 6.** Залежність прискорення дизель-поїзда від його швидкості при використанні АТД (1) і КТД (2)

### Висновки

За результатами досліджень для комплексної оцінки ТЕП запропоновано та обґрунтовано використання інтегрального показника потужності. Оцінку динамічних показників ТЕП запропоновано виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

Наведений метод оцінки тягової електропередачі з асинхронним тяговим двигуном і колекторним тяговим двигуном був використаний при дослідженні дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Отримані результати показали перевагу показників асинхронного приводу у порівнянні з колекторним.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Притула М.Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М.Г. Притула, О.А. Пасечник // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 6 (78). – 2018. – С. 82 – 100.
2. Логвінова Н.О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н.О. Логвінова, Д.О. Босий, О.М. Полях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 42. – 2012. – С. 110 – 113.
3. Кислий Д.М. Визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів / Д.М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 1 (61). – 2016. – С. 71 – 84.
4. Мозолевич Г.Я. Енергоефективне керування поїздопотоком як засіб удосконалення перевізного процесу / Г.Я. Мозолевич, А.В. Троян // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 10. – 2015. – С. 80 – 87.
5. Сулим А.О. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу / А.О. Сулим, О.О. Мельник, О.В. Бялобжеський, А.І. Ломонос // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 4 (268). – 2021. – С. 118 – 127.
6. Брагін М.І. Аналіз праць вчених по визначенню техніко-економічних показників тягових транспортних засобів / М.І. Брагін, М.В. Володарець, А.П. Фалендиш // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – № 3 (233). – 2017. – С. 31 – 35.
7. Коссов Є.С. Удосконалення режимів роботи силових енергетичних систем тепловозів. Монографія / Є.С. Коссов, Є.М. Шапран, В.В. Фурман // Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля. – 2006. – 280 с.
8. Носков В.І. Перевірка і налаштування параметрів тягового електроприводу у стаціонарних режимах / В.І. Носков, В.С. Блиндюк, В.В. Скороделов, Г.В. Гейко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – вип. 3 (65). – 2021. – С. 56 – 59.
9. Далека В.Х. Основи електричної тяги: навч. посібник / В.Х. Далека, П.М. Пушков, В.П. Андрійченко, Ю.В. Мінесва // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків: ХНАМГ. – 2012. – 312 с.
10. Тартаковський Е.Д. Теорія та конструкція локомотивів. Ч.2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів: Навч. посібник / Е.Д. Тартаковський, А.Ф. Агулов, А.П. Фалендиш // Харків: УкрДАЗТ. – 2009. – 150 с.

Received (Надійшла) 30.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

### Development of a method for assessing the indicators of traction power transmissions of autonomous locomotives

Valentin Noskov, Svitlana Gavrylenko, Volodymyr Skorodielov, Maksym Heiko

**Abstract.** One of the main factors determining the quality of autonomous locomotive operation is traction power transmission (TPT), which is assessed using indicators of its operation in traction and electric braking modes. As a rule, the assessment of TPT is carried out according to such indicators as the installed and continuous power of electrical equipment, efficiency, etc. This article proposes and substantiates a method for qualitative assessment of TPT using an integrated power indicator. It is proposed to evaluate the dynamic characteristics of TPT using the developed computer model.

**Keywords:** traction power transmission, integrated power index, computer model.