

УДК 629.4.016.2

СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА

Д-р техн. наук О. М. Горобченко, асп. Д. О. Заїка

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING TRACTION AND ENERGY PERFORMANCE INDICATORS OF A MANEUVERING LOCOMOTIVE

Dr. Sc. (Tech.) O. Gorobchenko, postgraduate student D. Zaika

Анотація. У статті розроблено математичну модель із можливістю визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ за роботи на чотирьох і двох паралельно з'єднаних тягових електричних двигунах. Побудовано графіки залежності сили тяги від швидкості руху локомотива; залежності витраченого часу на подолання заданої відстані, залежності витрат палива на подолання заданої відстані; залежності перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму порівняно з шістьма паралельно з'єднаними тяговими електричними двигунами для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста, обравши однакоvu ділянку руху та вагу поїзда, з урахуванням обмежень за коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками.

Ключові слова: ефективність експлуатації, математична модель, тягово-енергетичні показники, тепловоз, економія палива, керування локомотивом.

Abstract. Fuel consumption for traction significantly depends on the locomotive's operating mode, and by selecting a rational mode during station maneuvers or transit, it is possible to reduce fuel consumption. Previous works on this topic do not provide sufficient analysis of locomotive motion with varying numbers of connected engines. To optimize energy resource consumption, a combination of methods for the rational use of the locomotive is necessary. The traction and energy performance indicators for the maneuvering work of the ЧМЕЗ locomotive are calculated by performing traction calculations. In this paper, a mathematical model has been developed to determine these indicators when operating with 4 and 2 parallel-connected traction electric motors. Graphs were constructed to illustrate the relationship between traction force and locomotive speed, the time required to cover a given distance, fuel consumption for a specified distance, and the temperature rise above ambient conditions concerning 6 parallel-connected traction electric motors for the 3rd, 4th, and 5th positions of the engineer's controller. The locomotives were compared while covering the same stretch of track with the same train weight, considering wheel-rail adhesion constraints.

Analyzing the obtained dependencies allows the conclusion that using different configurations of connected engines can result in fuel savings of up to 15 % during maneuvering operations, depending on operational conditions. Furthermore, the engine temperature remains within acceptable limits for insulation class F, based on the results of approximating existing locomotive characteristics and deriving analytical expressions (6, 7, 8, 24). Mathematical models of the motion of the ЧМЕЗ locomotive were created for various engine connection scenarios using the obtained mathematical formulas (9, 10, 11, 13, 20, 21, 22, 23, 24).

Keywords: operational efficiency, mathematical model, traction and energy performance indicators, locomotive, fuel economy, locomotive control.

Вступ. Для ефективного використання локомотива застосовують багато методів удосконалення процесів керування локомотивом [1], у тому числі з використанням методів штучного інтелекту [2-4]. Для якісного керування локомотивом необхідно дослідити наявну базу методів тягових розрахунків. Тягові розрахунки є ключовим елементом у залізничному транспорті та являють собою одну з основних дій для організації залізничних робіт і їхнього проектування. Методологія тягових розрахунків містить різні методи і прийоми, що охоплюють визначення маси поїзда, обчислення швидкості та часу руху, оцінювання витрат палива та електроенергії для тяги, а також вирішення завдань, пов'язаних із гальмуванням. Ключовим напрямом у розвитку методів тягових розрахунків є комп'ютерне моделювання з використанням програмного коду, суть якого полягає в розробленні теоретичного підґрунтя для оптимізації витрат палива та енергії, моделюванні руху поїзда на визначеному шляху для виявлення потенційних резервів підвищення ефективності залізниць і раціонального використання рухомого складу [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оптимізації витрат енергетичних ресурсів необхідно використовувати комплекс методів з раціонального використання локомотива. Багато фахівців присвятили свої праці дослідженню та удосконаленню тягових розрахунків локомотива, які саме в цих комплексах і відображуються. У роботі [6] висвітлено основні положення для тягових розрахунків промислового залізничного транспорту, особливості тягових розрахунків для вантажних поїздів на тепловозній тязі, розглянуто основний питомий опір руху поїзда, додаткові питомі опори руху, повний опір руху поїзда. Посібник [7] описує точність розрахунків, координати і довжини шляхів маневрового рейсу, методи розрахунку параметрів руху на заданому інтервалі шляху, шляху та часу руху

локомотива на заданому інтервалі, максимальної швидкості розгону в маневровому напіврейсі методом ітерації. У монографії [8] проведено аналіз математичної моделі руху, також розглянуто метод тягових розрахунків із використанням механіки Лагранжа. У статті [9] розглянуто питання підходів до проведення тягових розрахунків за допомогою автоматизованих комп'ютерних систем, встановлено основну методіку розрахунку для конкретних умов роботи з метою раціонального використання енергетичних ресурсів. У роботі [10] запропоновано математичну модель руху маневрового локомотива ЧМЕЗ для окремої ділянки руху. Аналіз закордонних статей [11, 12] відкриває сутність енергетичного моделювання залізничного транспорту. Симуляції сили тяги локомотива є фундаментальною складовою таких моделей. У цих роботах створено першу двовимірну модель локомотива (без деталізації контакту колесо-рейка) і більш удосконалену другу версію з повністю деталізованою моделлю контакту колесо-рейка. Авторами роботи [13] подано моделювання тягового електричного привода рухомого складу, за допомогою якого можна аналізувати стан навантаження привода локомотива. У статті [14] вирішено питання збільшення надійності та зменшення витрат палива шляхом використання мікропроцесорних систем у процесі керування локомотивом. У роботі [15] використано оптимізаційні розрахунки за допомогою створеної математичної моделі, яка відображує реальні умови роботи мотор-генераторної установки.

Попередні роботи, які стосуються цієї тематики, не дають змогу повною мірою виконати аналіз руху локомотива на різній кількості підключених ТЕД. Використовуючи сучасні дослідження методів тягових розрахунків і створення математичних моделей руху локомотива, у цій статті запропоновано розроблення нового підходу до тягового розрахунку маневрового локомотива ЧМЕЗ з

урахуванням можливості відключення паралельно з'єднаних ТЕД.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є створення математичних моделей тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ. Це дасть змогу провести аналіз роботи тепловоза на різних варіантах підключення ТЕД за рахунок побудови графіків залежності сили тяги від швидкості руху локомотива $F_k = f(v)$; витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$; кількості витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$; перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ порівняно зі штатним підключенням ТЕД. Поставлені завдання необхідно виконати для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста (найбільш застосовуваних для маневрової роботи) для однакової ділянки руху та маси поїзда з урахуванням обмежень за коефіцієнтом зчеплення коліс з рейками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати апроксимацію характеристик тепловоза;
- побудувати математичну модель руху локомотива;
- проаналізувати залежності $F_k = f(v)$, $t = f(S_{pr})$, $G_e = f(S_{pr})$, $T = f(I_d)$ для двох, чотирьох і шести ТЕД для однакової ділянки руху та ваги поїзда.

Основна частина дослідження.

Витрати палива на тягу суттєво залежать від режиму руху локомотива. Вибираючи раціональний режим руху на станції або перегоні, можна зменшити витрати палива. Для можливості розроблення системи керування автоматичним переведенням режиму роботи локомотива ЧМЕЗ необхідно виконати розрахунок моделі руху в штатному режимі та на частково відключеному ТЕД за маневрової роботи.

Тягово-енергетичні показники на маневрову роботу локомотива отримують шляхом тягових розрахунків. Тягова характеристика за окремими позиціями контролера машиніста маневрового локомотива ЧМЕЗ подана на рис. 1.

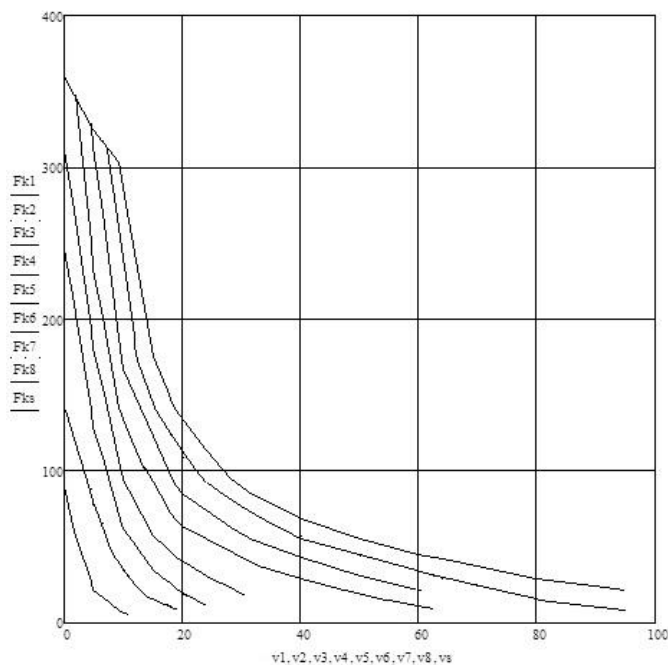


Рис. 1. Тягова характеристика локомотива ЧМЕЗ від першої до восьмої позиції контролера машиніста (F_k , кН, v , км/год)

Для аналітичного опису поданих тягових характеристик (залежності сили тяги F_k від швидкості v) проведено апроксимацію позицій тепловоза ЧМЕЗ методом кубічної та гіперболічної регресій.

Розглянувши кубічну регресію, у якій будують поліном на основі меншої кількості точок, тому що в кожній точці можна обчислювати значення і функції, і її похідної, апроксимація кубічним поліномом записується як

$$F(x) = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + a_3(x - x_1)^2(x - x_2). \quad (1)$$

Параметри рівняння (1) підбирають так, щоб значення $F(x)$ і її похідні в точках

x_1, x_2 збігалися зі значеннями $f(x), f'(x)$ у цих точках. Перша похідна функції $F(x)$

$$\frac{dF(x)}{dx} = a_0 + a_1(x - x_1) + a_2(x - x_1)(x - x_2) + 2a_3(x - x_1)^2(x - x_2). \quad (2)$$

Коефіцієнти a_0, a_1, a_2, a_3 рівняння (2) знаходять за відомими значеннями $f(x_1),$

$f(x_2), f'(x_1), f'(x_2)$ шляхом розв'язання такої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} f_1 &= f(x_1) = a_0; \\ f_2 &= f(x_2) = a_0 + a_1(x_2 - x_1); \\ f'_1 &= f'(x_1) = a_1 + a_2(x_1 - x_2); \\ f'_2 &= f'(x_2) = a_1 + a_2(x_2 - x_1) + a_3(x_2 - x_1)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Цю систему легко розв'язати рекурсивним методом. Після того як коефіцієнти знайдено, діючи за аналогією з випадком квадратичної апроксимації, можна оцінити координату стаціонарної точки $f(x)$ за допомогою полінома (1).

Прирівнявши до похідної нуля (2), можна отримати квадратне рівняння.

Використовуючи формулу для обчислення коренів квадратного рівняння, запишемо розв'язок, що визначає стаціонарну точку кубічного полінома, як

$$\vec{x} = \begin{cases} x_2, & \text{якщо } \mu < 0; \\ x_2 - \mu(x_2 - x_1), & \text{якщо } 0 \leq \mu \leq 1; \\ x_1, & \text{якщо } \mu > 1, \end{cases} \quad (4)$$

де

$$\mu = \frac{f'_2 + w - z}{f'_2 - f'_1 + 2w},$$

$$z = \left[\frac{3 \cdot (f_1 - f_2)}{x_2 - x_1} \right] + f'_1 + f'_2,$$

$$w = \begin{cases} \sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, & \text{якщо } x_1 < x_2 \\ -\sqrt{z^2 - f'_1 \cdot f'_2}, & \text{якщо } x_1 > x_2 \end{cases}.$$
(5)

Формула для визначення значення w забезпечує належний вибір одного з двох коренів квадратного рівняння.

За цими рівняннями отримано аналітичний опис тягових характеристик:

- для третьої позиції була обрана кубічна регресія, похибка якої становила 2.3 %, і отримано математичний вираз

$$y = -0.023211278269 \cdot x^3 + 1.400358362989 \cdot x^2 - 30.194326017237x + 249.846466524097.$$
(6)

Аналітичний опис струмової характеристики тягового генератора має такий

вигляд, як на рис. 2 (залежність струму генератора I_{Γ} , А, від швидкості v , км/год);

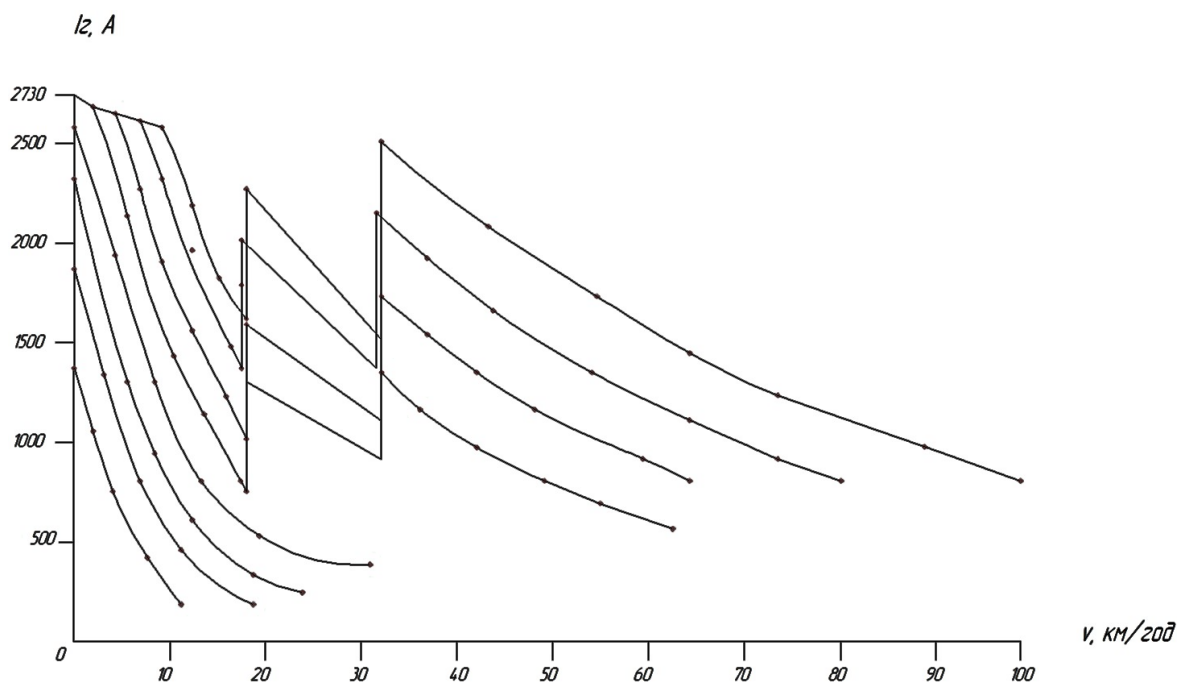


Рис. 2. Струмова характеристика тягового генератора локомотива ЧМЕЗ від першої до восьмої позиції контролера машиніста (I_{Γ} , А, v , км/год)

- для третьої позиції була обрана кубічна регресія, похибка якої становила 1.9 %, і отримано математичний вираз

$$y = -0.123756657010 \cdot x^3 + 9.260371985943 \cdot x^2 - 239.534045890959 \cdot x + 2385.843400085908 \quad (7)$$

Навантажувальна характеристика тепловоза має такий вигляд, як на рис. 3 (за дослідженнями Демченка Є. Б.);

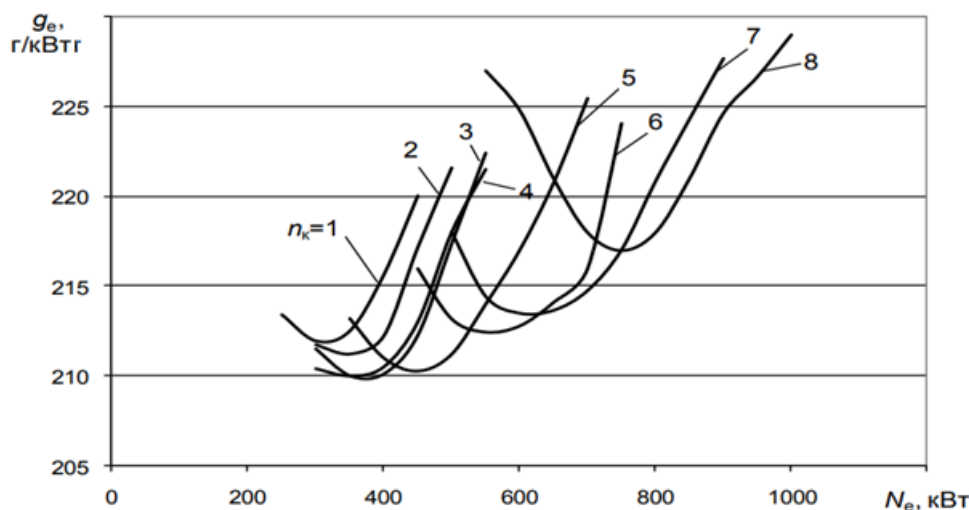


Рис. 3. Навантажувальна характеристики $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ

- для третьої позиції була обрана квадратична регресія, похибка якої становила 0.2 %, і отримано математичний вираз

$$y = 0.000419023539 \cdot x^2 - 0.314625500417 \cdot x + 269.324921960171 \quad (8)$$

Тягові розрахунки здійснюють у такий спосіб.

Для визначення прискорення локомотива a , m/s^2 , використовуючи другий закон Ньютона, отримаємо вираз

$$F_k - F_{опору} = m \cdot a, \quad (9)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;

$F_{опору}$ – сили опору руху, Н;

m – маса складу, кг.

Звідки отримуємо вираз

$$a = \frac{F_k - F_{опору}}{\Sigma m} = \frac{F_k - (W_{04} + W_l)}{(m_s + m_l)}, \quad (10)$$

де F_k – сила тяги локомотива, Н;

W_{04} – основний питомий опір руху поїзда, Н;

W_l – основний питомий опір руху локомотива, Н;

$m_s + m_l$ – сумарна маса локомотива та рухомого складу, кг.

Для подальших розрахунків необхідно задати початкові значення:

n_{ted} – кількість тягових електричних двигунів, задіяних під час руху; для наступних розрахунків приймаємо за шести тягових електричних двигунів $n_{ted} = 1$, за чотирьох $n_{ted} = 0,66$, за двох $n_{ted} = 0,33$;

m_l – маса локомотива (маса локомотива ЧМЕЗ = 123 т = 123000 кг, значення $m_l = 123000$ кг);

m_s – маса складу (обираємо для подальших розрахунків 10 чотиривісних

вагонів вагою 65 т і отримуємо значення $m_s = 65 \cdot 10 = 650m = 650000 \text{ кг}$

$m_s = 650000$ кг);

q_{04} – середню масу, т/вісь, яка припадає відповідно на вісь чотиривісного вагона, розраховують за формулою, її значення $q_{04} = 65/4 = 16.25$ т/вісь;

$v_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива, км/год (5 км/год);

t_{int} – інтервал часу (1 с);

F_k – сила тяги локомотива, кН, яку розраховують за допомогою апроксимації тягових характеристик і отриманого математичного виразу (6) для позиції тепловоза ЧМЕЗ,

$$F_{k(v)} = -0.023211278269 \cdot v_{початкове}^3 + 1.400358362989 \cdot v_{початкове}^2 - 30.194326017237 \cdot v_{початкове} + 249.846466524097 \cdot n_{ted} ; \quad (11)$$

g_e – витрати палива, $г/кВт \cdot г$, визначають за допомогою навантажувальної характеристики $g_e = f(N_e, n_k)$ тепловоза ЧМЕЗ і математичного виразу (9).

Для розрахунку витрат палива g_e , $г/кВт \cdot г$, необхідно розрахувати потужності локомотива N_e , кВт, у момент швидкості за формулою

$$N_e = F_k \cdot v_{початкове}, \quad (12)$$

$$g_e = 0.000419023539 \cdot N_e^2 - 0.314625500417 \cdot N_e + 269.324921960171, \quad (13)$$

де N_e – потужність локомотива, кВт.

Вага поїзда Q'' , Н,

$$Q'' = m_s \cdot g, \quad (14)$$

де m_s – маса складу, кг;

g – прискорення вільного падіння, $м/с^2$.

Питомий опір w''_{04} , Н/кН, руху для чотиривісних вагонів [6-8]

$$w''_{04} = 0.7 + \frac{3 + 0.1 \cdot v_{початкове} + 0.0025 \cdot v_{початкове}^2}{16.25}, \quad (15)$$

де $v_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива, км/год.

Основний питомий опір руху поїзда W_{04} , Н,

$$W_{04} = \frac{(w_{04} \cdot Q)}{1000}. \quad (16)$$

Вага локомотива Q , Н,

$$Q = m_1 \cdot g, \quad (17)$$

де m_1 – маса складу, кг;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Основний опір w_0 , Н/кН, руху локомотива [6-8]

$$w_0' = 1,9 + 0,01 \cdot v_{\text{початкове}} + 0,0003 \cdot v_{\text{початкове}}^2, \quad (18)$$

де $v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість локомотива, км/год.

Основний питомий опір Wl , Н, руху локомотива

$$Wl = \frac{(w_0 \cdot Q)}{1000}. \quad (19)$$

Визначення тягово-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ

Отримавши значення прискорення локомотива a , розраховані за формулою (11), визначасмо поточну швидкість $v_{\text{поточне}}$ локомотива через момент часу t_{int} , км/год:

$$v_{\text{поточне}}' = v_{\text{початкове}} + a \cdot t_{\text{int}}, \quad (20)$$

де $v_{\text{початкове}}$ – початкова швидкість локомотива, м/с;

a – прискорення локомотива, м/с²;

t_{int} – інтервал часу, с.

Пройдений шлях локомотива $S_{\text{пройдене}}$, м, через час t_{int}

$$S_{\text{пройдене}} = v_{\text{поточне}} \cdot t_{\text{int}}, \quad (21)$$

де $v_{\text{поточне}}$ – поточна швидкість локомотива, м/с;

t_{int} – інтервал часу, с.

Отримавши значення пройденого шляху локомотива, можна розрахувати витрати палива, г:

$$Ge = \frac{F_k \cdot S_{\text{пройдене}}}{t_{\text{int}}} \cdot t_{\text{int}} \cdot \frac{g_e}{3600}. \quad (22)$$

Для визначення перевищення температури ТЕД порівняно з температурою навколишнього середовища розраховуємо струм тягового електричного двигуна ТЕ-006:

$$I_D = (-0.123756657010 \cdot v^3 + 9.260371985943 \cdot v^2 - 239.534045890959 \cdot v + 2385.843400085908) / n_{\text{тед}}, \quad (23)$$

де v – швидкість руху локомотива, км/год;

$n_{\text{тед}}$ – кількість паралельно з'єднаних ТЕД.

Температури перевищення порівняно з температурою навколишнього середовища

$$T = (0.000000364219 \cdot I_{\text{д}}^3 - 0.000310314685 \cdot I_{\text{д}}^2 + 0.148228438228 \cdot I_{\text{д}} + 32.699300699231) \cdot (1 - 2.72^{-\frac{t}{0.000000065851 \cdot I_{\text{д}}^3 - 0.000038170163 \cdot I_{\text{д}}^2 + 0.014696969697 \cdot I_{\text{д}} + 29.993006992981}}) \quad (24)$$

Використовуючи отримані результати розрахунку моделі тягово-енергетичних показників, аналізуємо отримані залежності сили тяги від швидкості руху локомотива $F_k = f(v)$; витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{\text{пр}})$; кількості витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{\text{пр}})$; перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_{\text{д}})$ через інтервал часу t порівняно з шістьма паралельно з'єднаними

ТЕД для третьої, четвертої, п'ятої позицій контролера машиніста (найбільш застосовуваних для маневрової роботи).

Для третьої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 4.

Залежності витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{\text{пр}})$ подано на рис. 5.

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{\text{пр}})$ подано на рис. 6.

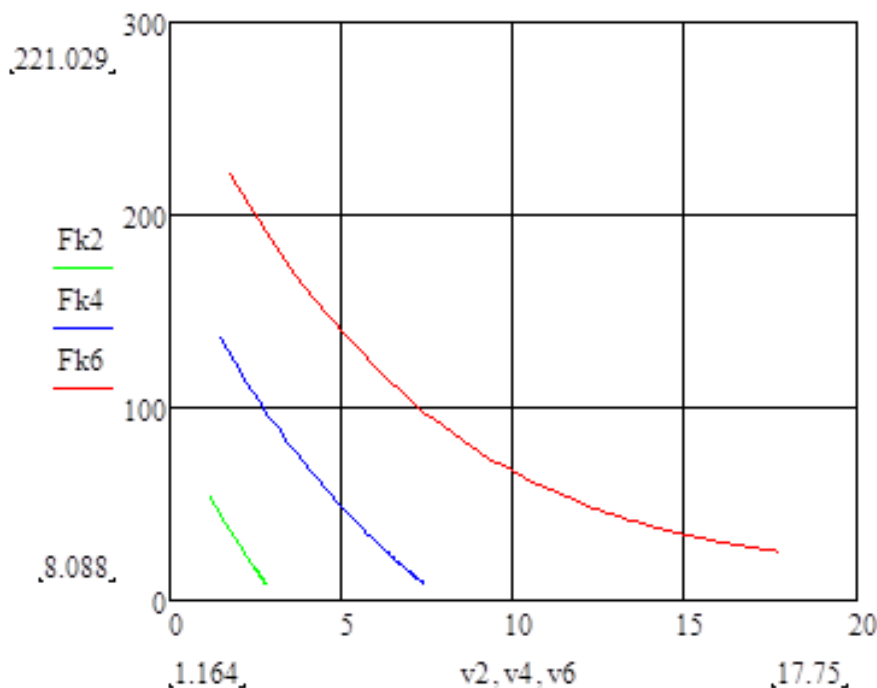


Рис. 4. Залежність $F_k = f(v)$:
 $F_{k6} = f(v_6)$ – від швидкості руху для шести ТЕД;
 $F_{k4} = f(v_4)$ – від швидкості руху для чотирьох ТЕД;
 $F_{k2} = f(v_2)$ – від швидкості руху для двох ТЕД

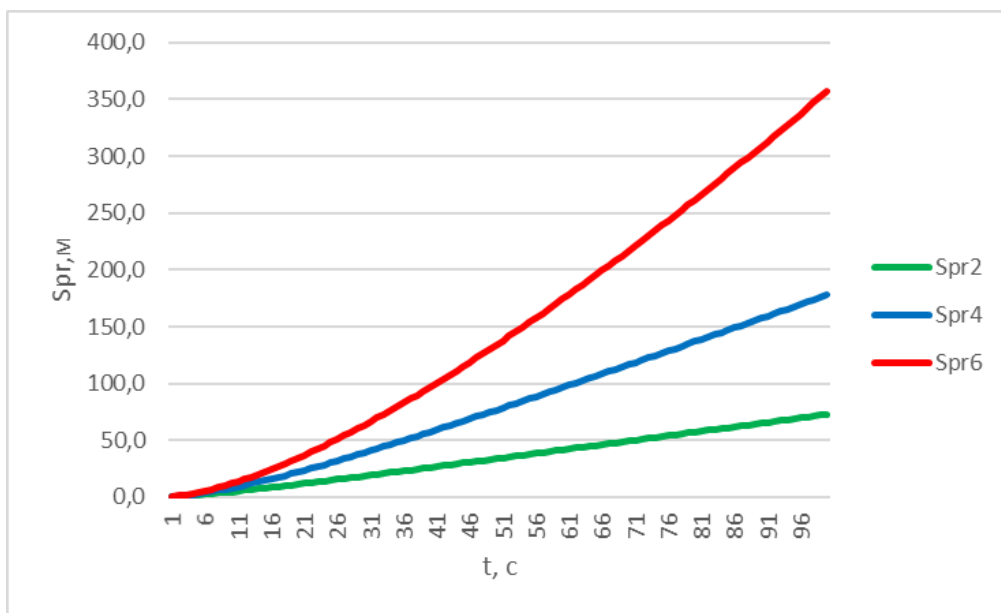


Рис. 5. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

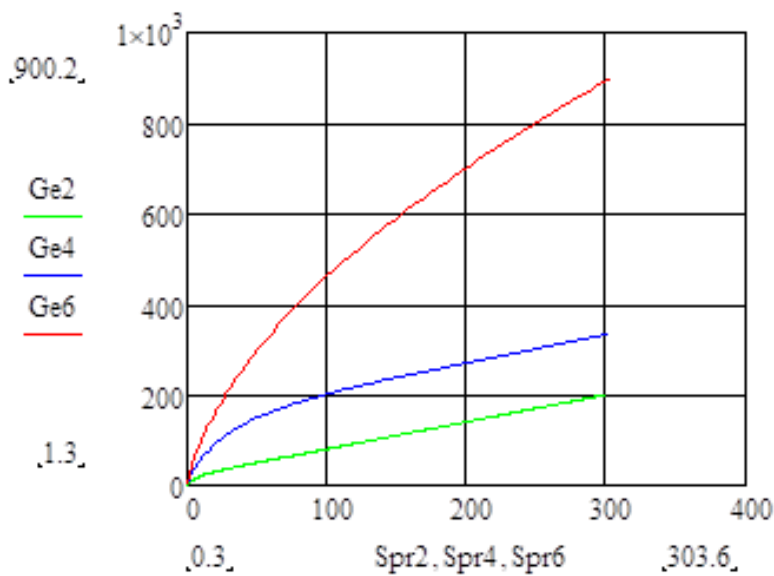


Рис. 6. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД;
 $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього

середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 7.

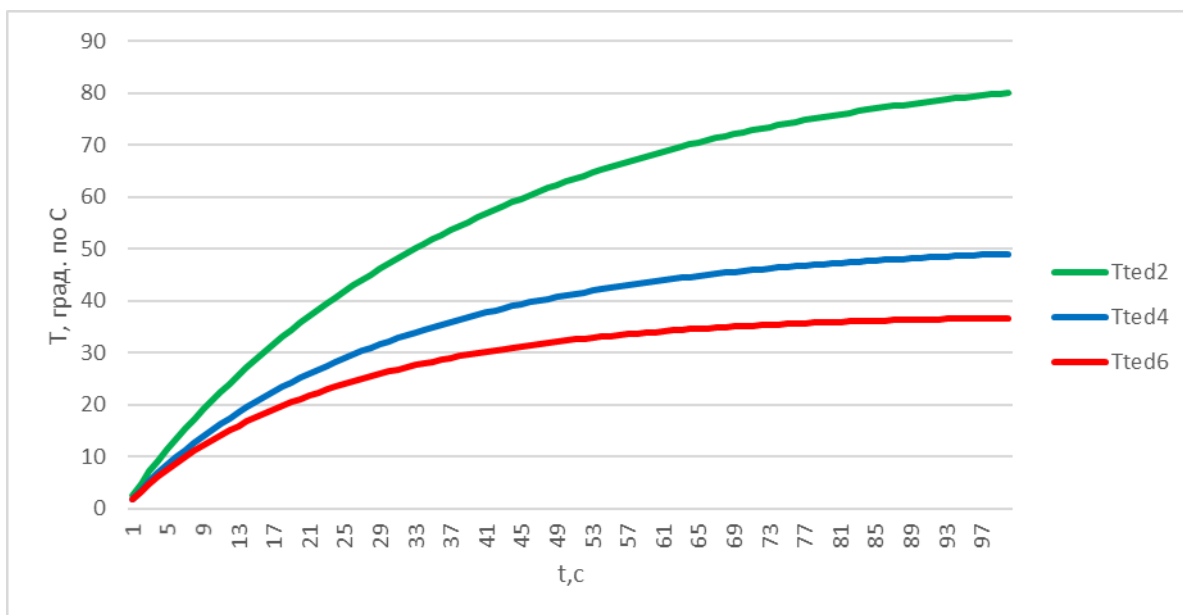


Рис. 7. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) - \text{для шести ТЕД};$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) - \text{для чотирьох ТЕД};$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) - \text{для двох ТЕД}$$

Для четвертої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 8.

Залежність витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$ подано на рис. 9.

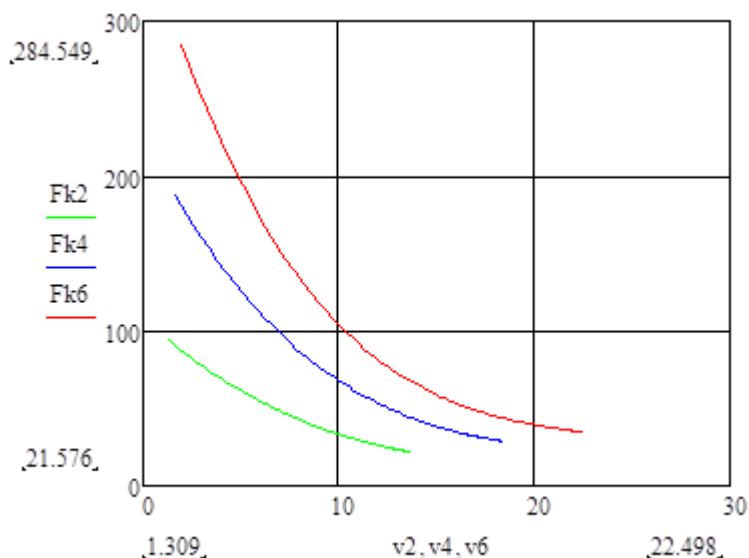


Рис. 8. Залежність $F_k = f(v)$:

$$F_{k6} = f(v_6) - \text{сили тяги від швидкості руху для шести ТЕД};$$

$$F_{k4} = f(v_4) - \text{сили тяги від швидкості руху для чотирьох ТЕД};$$

$$F_{k2} = f(v_2) - \text{сили тяги від швидкості руху для двох ТЕД}$$

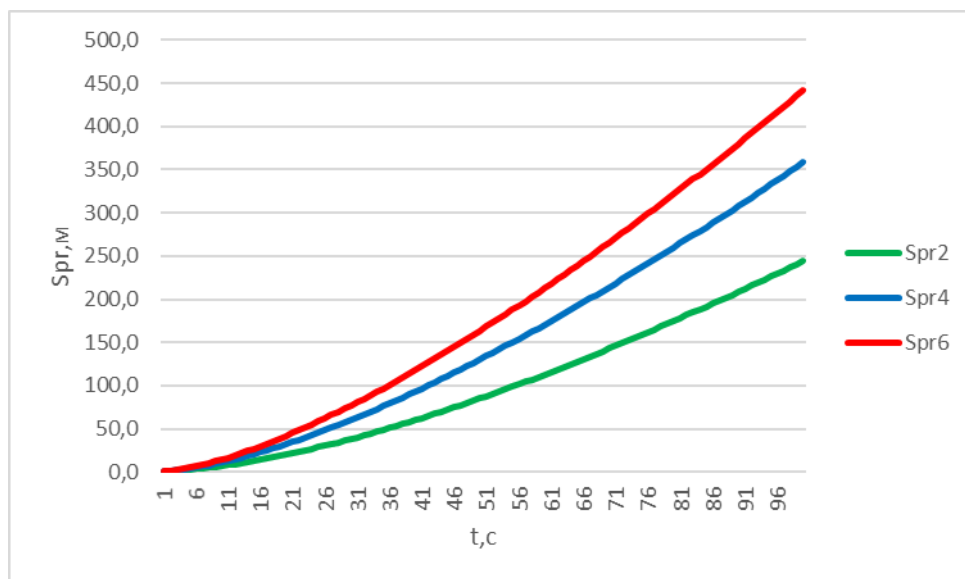


Рис. 9. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$ подано на рис. 10.

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 11.

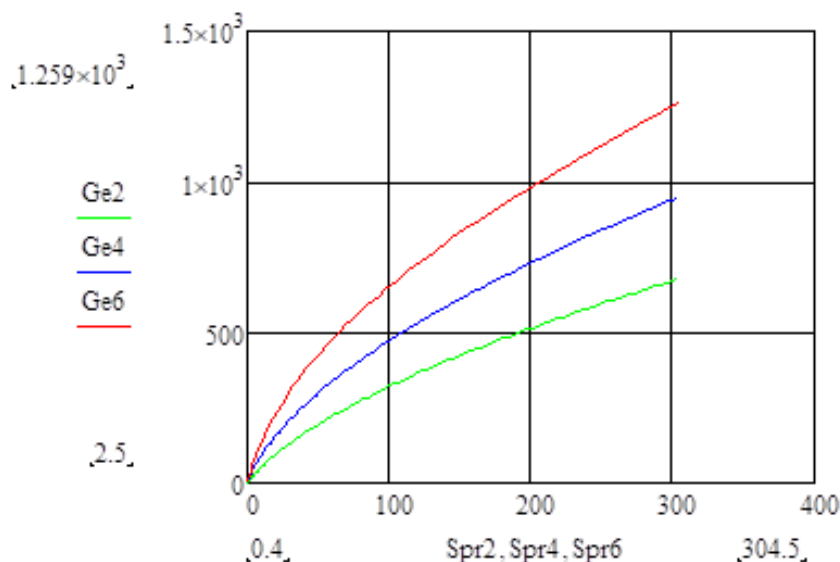


Рис. 10. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД;
 $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

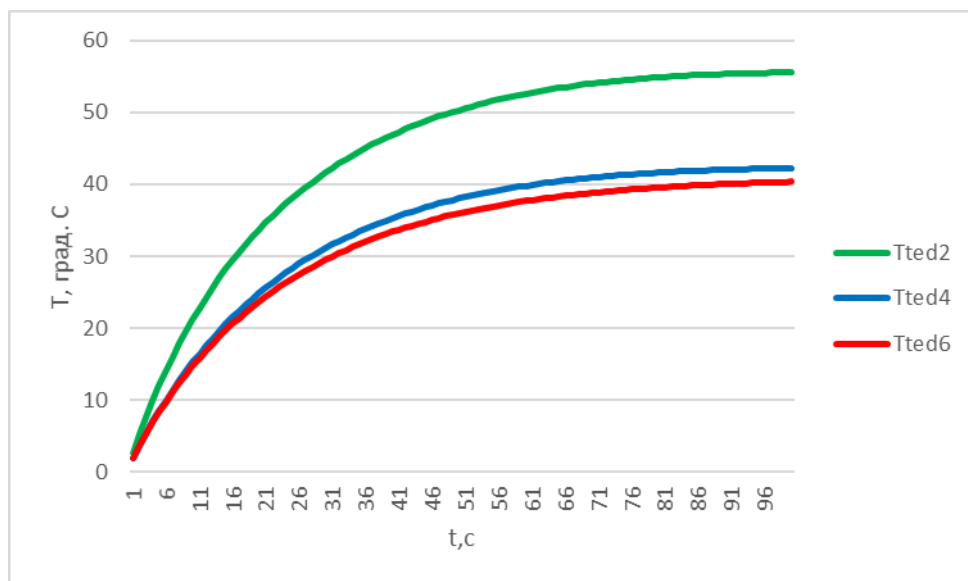


Рис. 11. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) \text{ – для шести ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) \text{ – для чотирьох ТЕД;}$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) \text{ – для двох ТЕД}$$

Для п'ятої позиції контролера машиніста графічна залежність $F_k = f(v)$ має такий вигляд, як на рис. 12.

Залежність витраченого часу на подолання заданої відстані $t = f(S_{pr})$ подано на рис. 13.

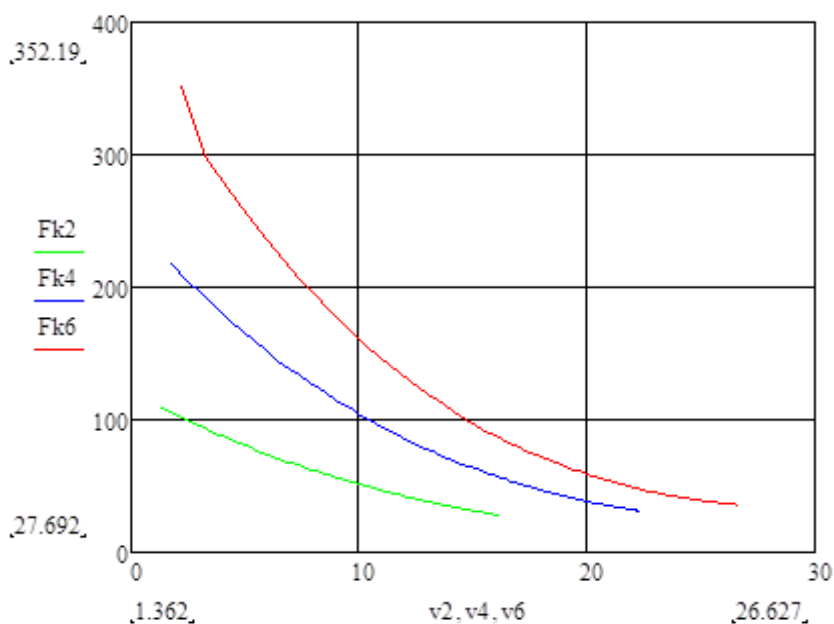


Рис. 12. Залежність $F_k = f(v)$:
 $F_{k6} = f(v_6)$ – для шести ТЕД;
 $F_{k4} = f(v_4)$ – для чотирьох ТЕД;
 $F_{k2} = f(v_2)$ – для двох ТЕД

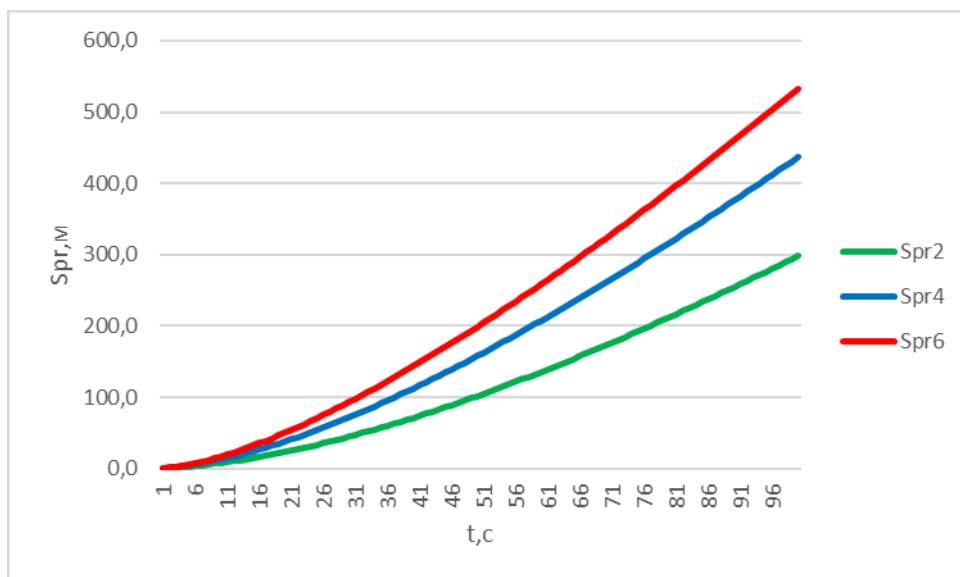


Рис. 13. Залежність $t = f(S_{pr})$:
 $t = f(S_{pr2})$ – на двох ТЕД;
 $t = f(S_{pr4})$ – на чотирьох ТЕД;
 $t = f(S_{pr6})$ – на шести ТЕД

Кількість витраченого палива на подолання заданої відстані $G_e = f(S_{pr})$ подано на рис. 14.

Залежність перевищення температури порівняно з температурою навколишнього середовища від сили струму ТЕД $T = f(I_d)$ через інтервал часу t подано на рис. 15.

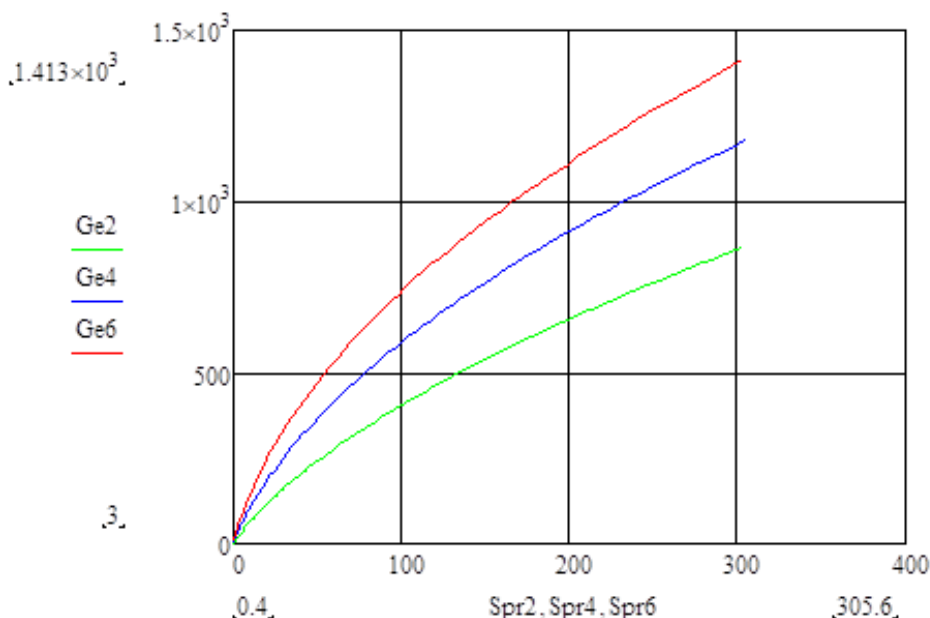
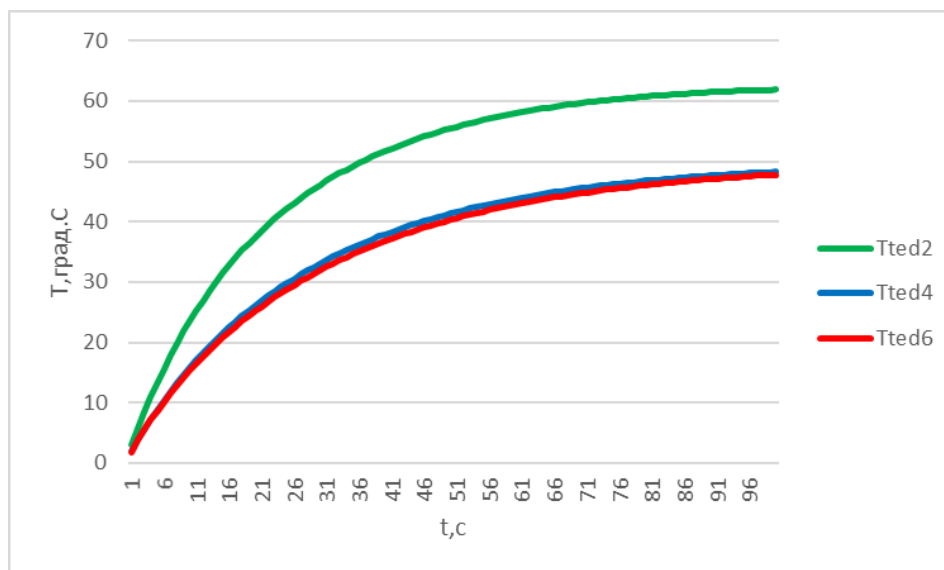


Рис. 14. Залежність $G_e = f(S_{pr})$:
 $G_{e6} = f(S_{pr6})$ – для шести ТЕД; $G_{e4} = f(S_{pr4})$ – для чотирьох ТЕД;
 $G_{e2} = f(S_{pr2})$ – для двох ТЕД

Рис. 15. Залежність $T = f(I_d)$ через інтервал часу t :

$$T_{ted6} = f(I_{d6}) \text{ – для шести ТЕД;}$$

$$T_{ted4} = f(I_{d4}) \text{ – для чотирьох ТЕД;}$$

$$T_{ted2} = f(I_{d2}) \text{ – для двох ТЕД}$$

Висновки. За результатами апроксимації наявних характеристик тепловоза було отримано аналітичні вирази (6)-(8), (24). За допомогою формул (9)-(11), (13), (20)-(24) створено математичні моделі руху маневрового локомотива ЧМЕЗ для різних варіантів підключення ТЕД. Результати розрахунків створеної математичної моделі тягово-енергетичних показників залежності $F_k = f(v)$, $t = f(S_{pr})$, $G_e = f(S_{pr})$, $T = f(I_d)$ для двох, чотирьох і шести ТЕД свідчать про те, що доцільно використовувати різні варіанти підключення ТЕД. На п'ятій позиції рух на

ділянці з відстанню 300 м і вагою поїзда 773 000 кг для шести двигунів склав 1.68 хв, на виконану роботу витрачено 1 кг 958 г дизельного палива. Для чотирьох ТЕД час руху склав 1.68 хв, тобто не змінився, на виконану роботу локомотив витратив 1 кг 457 г палива. Отже, в результаті використання різних варіантів підключення ТЕД можна отримати економію палива на виконання маневрової роботи на часткових навантаженнях до 15 % залежно від експлуатаційних умов. При цьому температура ТЕД залишається в межах допустимої для класу ізоляції F.

Подяка.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках розроблення проєкту 2022.01/0224 за темою «Розробка наукових засад комплексного підвищення безпеки, ефективності експлуатації та управління критичними об'єктами залізничного транспорту в умовах післявоєнного розвитку України».

Список використаних джерел

1. Zvolenský P., Barta D., Grenčík J., Drożdziel P. & Kašiar Ľ. Improved method of processing the output parameters of the diesel locomotive engine for more efficient maintenance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 315–323. URL: <https://doi.org/10.17531/ein.2021.2.11> (date of access 26.02.2024).

2. Gorobchenko O., Nevedrov O. Development of the structure of an intelligent locomotive DSS and assessment of its effectiveness. *Archives of Transport*. 2020. Vol. 56, no. 4. P. 47–58. DOI: 10.5604/01.3001.0014.5517 (date of access: 26.02.2024).
3. Горобченко О. М. Теоретичні основи оцінки інформативності ознак поїзної ситуації для роботи інтелектуальних систем керування локомотивом. *Транспортні системи і технології*. 2021. № 38. С. 223–231. DOI: 10.32703/2617-9040-2021-38-220-21 (дата звернення 26.02.2024).
4. Горобченко О. М., Заїка Д. О. Огляд методів та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті. *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference : матеріали Міжнар. науково-практ. конф., м. Vancouver, 2–4 лют. 2022 р. Vancouver, 2022*. С. 184–192. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and-prospects-of-world-science-2-4-fevralya-2022-goda-vankuver-kanada-arhiv/> (дата звернення 26.02.2024).
5. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу / М. А. Барибін, А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 4. С. 15–27. URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v25i4.219530>.
6. Бобирь Д. В., Капіца М. І., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2022. 112 с.
7. Бобирь Д. В., Білоконь І. М., Очкасов О. Б., Сердюк В. Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для маневрової роботи: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2023. 129 с.
8. Сорока К. О. Тягові розрахунки на основі аналізу процесів перетворення енергії: монографія. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2022. 242 с.
9. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках / А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко, С. І. Возненко та ін. *Транспортні системи і технології*. 2020. № 35. С. 102–112. DOI: 10.32703/2617-9040-2020-35-11 (дата звернення 26.02.2024).
10. Kostenko I., Bilokon I., Lysenko Y., Chernyshenko Y., Riabov I. Analysis of shunting locomotive operating modes when performing traction tasks. *Транспортні системи і технології*. 2023. № 42. С. 18–33. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-42-2> (дата звернення 26.02.2024).
11. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. Train energy simulation with locomotive adhesion model. *Railway Engineering Science*. 2020. Vol. 28. P. 75–84. URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00202-1> (date of access 26.02.2024).
12. Wu Q., Spiryagin M., Wolfs P., Cole C. Traction modelling in train dynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 233, no. 4. P. 382–395. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409718795496> (date of access 26.02.2024).
13. Macii D., Dalpez S., Passerone R., Corrà M., Avancini M., Benciolini L. A safety instrumented system for rolling stocks: Methodology, design process and safety analysis. *Measurement*. 2015. Vol. 67. P. 164–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.002> (date of access 26.02.2024).
14. Liudvinavičius L., Jastremskas V. Modernization of diesel-electric locomotive 2M62 and ТЕР-70 locomotives with respect to electrical subsystem. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 272–280. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.375> (date of access 26.02.2024).

15. BAbel M., Szkoda M. Diesel locomotive efficiency and reliability improvement as a result of power unit load control system modernisation. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2016. Vol. 18, no. 1. P. 38–49. URL: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2016.1.6>.

Горобченко Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000 – 0002 – 9868 – 3852. Тел.: +38(050) 972-04-71. E-mail: gorobchenko.a.n@gmail.com.

Заїка Денис Олександрович, аспірант кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000 – 0003 – 0693 – 9580. Тел.: +38(066) 836-09-91. E-mail: zaika_do@gsuite.duit.edu.ua.

Oleksandr Gorobchenko, Dr. Sc. (Tech.), professor, Electromechanics and Rolling Stock of Railways department, State University of Infrastructure and Technologies. ORCID iD: 0000 – 0002 – 9868 – 3852. Тел.: +38(050) 972-04-71.

E-mail: gorobchenko.a.n@gmail.com.

Denys Zaika, postgraduate student, Electromechanics and Rolling Stock of Railways department, State University of Infrastructure and Technologies. ORCID iD: 0000 – 0003 – 0693 – 9580. Тел.: +38(066) 836-09-91.

E-mail: zaika_do@gsuite.duit.edu.ua.

Статтю прийнято 14.05.2024 р.