

В. І. Носков, М. В. Ліпчанський, В. І. Панченко, Г. В. Гейко

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

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА НА ДІЛЯНЦІ ШЛЯХУ З ВІДОМИМ ПРОФІЛЕМ

Анотація. Актуальність. Залізничний транспорт є одним із основних споживачів енергоресурсів, тому розробка та впровадження енергозберігаючих технологій є актуальною проблемою, вирішення якої останнім часом є одним із пріоритетних напрямів діяльності фахівців фундаментальної та прикладної науки в цій галузі. **Об'єкт дослідження:** процеси керування тяговими, динамічними та енергетичними характеристиками моторвагонного рухомого складу. **Мета статті:** вирішити задачу оптимального керування рухом дизель-поїзда на ділянці шляху з відомим профілем із урахуванням оптимальної витрати палива та дотримання графіка руху. **Результати дослідження.** У статті сформульовано і за допомогою методу термінальних керувань вирішено задачу синтезу системи керування оптимальним рухом дизель-поїзда з відомим профілем шляху. При цьому використовувалися: теорія тяги поїздів і тягового електроприводу, методи системного аналізу і теорії оптимального керування, математичне моделювання та обчислювальні експерименти. **Висновки.** Розроблено алгоритм оптимальних керувань дизель-поїздом, за допомогою якого визначено програмні закони, що встановлюють залежність тяги від маси поїзда, параметрів шляху та техніко-економічних умов (швидкість, прискорення, графік руху) з урахуванням витрати палива.

Ключові слова: моторвагонний рухомий склад, оптимальний рух поїзда, термінальні керування, синтез системи керування, математичне моделювання, профіль шляху.

Вступ

Постановка проблеми. Питання підвищення техніко-економічних показників тягового рухомого складу України належить до найбільш актуальних. Його рішення можливе як за рахунок оптимізації режимів роботи енергетичного обладнання, так і за рахунок оптимізації руху поїздів. При чому, для різних умов експлуатації оптимальний режим ведення поїзда розробляється для заданого часу ходу по перегонах і для кожного окремого випадку має свої особливості [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема оптимального керування дизель-поїздом може бути поділена на дві незалежні задачі: оптимізацію режимів роботи енергетичного обладнання і процесу руху поїзда.

У роботі [2] зазначено, що однією з головних вимог до систем керування поїздами є забезпечення чіткого виконання графіків руху при мінімальних витратах енергії. Необхідно, щоб поїзд пройшов по перегону за час, що не перевищує заданий, розподіл швидкостей при цьому всередині перегону в значному ступеню довший але підпорядковується низці обмежень [3, 4].

У роботі [5] виконано аналіз схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 та її системи керування, результати якого дозволили розробити метод перевірки використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації.

У роботі [6] розроблено інформаційне, програмне і алгоритмічне забезпечення, яке дозволяє виконувати розрахунки режимів ведення поїздів з можливістю адаптації параметрів моделі руху поїзда за результатами дослідних поїздок.

У роботі [7] визначено, що тяга та гальмування, основний опір руху, маса, коефіцієнт інерції обертових мас рухомого складу у порівнянні з характеристикою коефіцієнта корисної дії (ККД) тягового при-

воду, здійснюють менший вплив на значення питомих витрат електроенергії.

У роботі [8] розроблена математична модель системи керування електрорухомим складом з використанням методу динамічного програмування та зворотного рішення задачі відносно координати часу. У роботі [9] авторами отримано енергозощаджуючу функцію керування тягою, яка залежить від маси рухомого складу та ухилу колії. У роботі [10] запропоновано структуру моделі системи нечіткого задання швидкості поїзда з адаптивною корекцією помилки її регулювання за фактичними параметрами поїзду на ділянках прямуювання. У роботі [11] пропонується підхід, який полягає в розділенні всього шляху на підділянки з обмеженням швидкості та припущенням, що опір руху поїзда є квадратичною функцією швидкості, запропоновано методи вирішення задач оптимального керування поїздом. У роботі [12] наведені результати обґрунтування конструкції мікропроцесорної системи керування електричною передачею з поліпшеними тягово-енергетичними характеристиками локомотивів. Дизель-поїзд ДЕЛ-02 обладнаний мікропроцесорною системою керування (МПС), яка забезпечує оптимальну роботу тягової електропередачі. Для запису інформації про рух дизель-поїзда по перегону з наступною її обробкою розроблено комп'ютерну інформаційну систему (ІС). Розроблене програмне забезпечення дозволяє виконувати оцінку ефективності кожної поїздки і отримувати рекомендації по керуванню рухом дизель-поїзда з мінімальними енерговитратами.

Розглянемо задачу керування рухом, яка дозволяє оптимізувати енергетичні витрати при русі поїзда із заздалегідь відомим профілем шляху всередині перегону.

Практичний інтерес становить також задача керування рухом поїзда за мінімальний час. Тут критерієм оптимальності є час. Для цього необхідно

виконувати керування з урахуванням двох складових: одна забезпечує мінімізацію енергетичних витрат при русі дизель-поїзда, а інша – мінімальний час руху з початкового пункту до кінцевого.

Метою роботи є вирішення задачі синтезу системи керування оптимальним рухом дизель-поїзда з відомим профілем шляху; розробка алгоритму оптимального керування дизель-поїздом; встановлення за допомогою розробленого програмного забезпечення залежності тяги від маси поїзда, профілю шляху та техніко-економічних умов.

Основний матеріал

Розглянемо математичну постановку задачі. У нашому випадку об'єкт керування можна описати системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_r, u_1, \dots, u_m), \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, \dots, x_r, u_1, \dots, u_m), \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{x}_r &= f_r(x_1, \dots, x_r, u_1, \dots, u_m),\end{aligned}\quad (1)$$

де $\dot{x}_i = \frac{dx_i}{dt}$, $i = \overline{1, r}$; r – порядок об'єкта; $x_1, \dots, x_r$ – фазові координати; $u_1, \dots, u_m$ – керування ($m \leq r$); $f_1, \dots, f_r$ – безперервні функції фазових координат і керувань.

На керування, фазові координати і функції від них накладено обмеження:

$$\begin{aligned}u_{j \min} &\leq u_j \leq u_{j \max}, \quad j = \overline{1, m}, \\ x_{i \min} &\leq x_i \leq x_{i \max}, \quad i = \overline{1, r}, \\ \dot{x}_{i \min} &\leq \dot{x}_i \leq \dot{x}_{i \max}, \quad i = \overline{1, r}, \\ \ddot{x}_{i \min} &\leq \ddot{x}_i \leq \ddot{x}_{i \max}, \quad i = \overline{1, r}, \\ \phi_{k \min} &\leq \phi_k(x_1, \dots, x_r, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_r, u_1, \dots, u_m) \leq \phi_{k \max}, \\ &k = \overline{1, e},\end{aligned}\quad (2)$$

де e – число функцій від фазових координат, їх похідних і керувань, на які накладено обмеження.

Початкові умови на лівому (при $t = t_0$) і граничні умови на правому (при $t = T$) кінцях фазових траєкторій напишемо таким чином:

$$\begin{aligned}[x_{10}, \dots, x_{r0}]_{t=t_0} &= [x_1(t_0), \dots, x_r(t_0)] = \\ &= [x_{10}, \dots, x_{r0}], \\ [x_{1k}, \dots, x_{rk}, \dot{x}_{1k}, \dots, \dot{x}_{rk}, \dots, x_{1k}^{(s)}, \dots, x_{rk}^{(s)}]_{t=T} &= \\ &= [x_1(T), \dots, x_r(T), \dot{x}_1(T), \dots, \dot{x}_r(T), \\ &\dots, x_1^{(s)}(T), \dots, x_r^{(s)}(T)] = \\ &= [x_{1k}, \dots, x_{rk}, \dot{x}_{1k}, \dots, \dot{x}_{rk}, \dots, x_{1k}^{(s)}, \dots, x_{rk}^{(s)}],\end{aligned}\quad (3)$$

де порядок s похідних не обмежений.

Задано функціонал:

$$I = I(x_1, \dots, x_r, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_r, \dots, u_1, \dots, u_m, t_0, T). \quad (4)$$

Нам необхідно знайти вектор-функцію керувань $u = (u_1, \dots, u_m)$, яка мінімізує функціонал (4) на відрізку часу $[t_0, T]$ при умовах (2) і (3). Це найбільш загальна постановка задачі оптимального керування.

При керуванні рухом поїзда можна обмежитись класом об'єктів, для яких систему керувань (1) можна розв'язати щодо керувань $u_1, \dots, u_m$. У цьому випадку керування можна розглядати як функції фазових координат об'єкта та їхні похідні, а рішення задачі оптимального керування може бути зведено до пошуку набору функцій $x_k(t)$, $k = \overline{1, r}$, що мінімізують функціонал (4).

Виконаємо синтез керувань, що оптимізують енергетичні витрати при русі дизель-поїзда, за допомогою метода термінальних керувань [13, 14]. Для рішення цієї задачі використовуємо рівняння динаміки руху поїзда і дослідні характеристики дизеля та електропередачі дизель-поїзда.

Математичну модель для оптимізації процесу руху в даному випадку можна записати у вигляді:

$$m \frac{dV_T}{dt} = F_T - \phi(x) - F_C; \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_T, \quad (6)$$

де m – маса поїзда, кг; V_T – швидкість поїзда, м/с; F_T – сила тяги поїзда, Н; $\phi(x)$ – сила опору, що залежить від величини ухилу колії, Н; F_C – сила в'язкого тертя та опору повітря, Н; x – відстань, що відраховується від станції відправлення, м.

Сила опору $\phi(x)$ визначається вагою дизель-поїзда і величиною ухилу колії:

$$\phi(x) = P_C i(x), \quad (7)$$

де P_C – вага поїзда, Н; $i(x)$ – величина ухилу.

Сила опору F_C описується наступним чином:

$$F_C = P_L W'_0 + Q W''_0, \quad (8)$$

де P_L , Q – вага головних і причіпних вагонів, Н; W'_0 , W''_0 – питомі опори руху головних і причіпних вагонів, Н.

Питомі опори руху поїзда визначаються співвідношеннями:

$$W'_0 = c_0 + c_1 V_T + c_2 V_T^2, \quad (9)$$

$$W''_0 = d_0 + d_1 V_T, \quad (10)$$

де c_0 , c_1 , c_2 , d_0 , d_1 – постійні коефіцієнти.

З урахуванням (9) і (10) сила опору F_C визначається таким чином:

$$F_C = F_{C0} + a_0 V_T + a_1 V_T^2, \quad (11)$$

де $F_{C0} = P_L c_0 + Q d_0$, $a_0 = P_L c_1 + Q d_1$, $a_1 = P_L c_2$.

Для оцінки якості керованого процесу замість узагальненого функціоналу (4) візьмемо один із критеріїв. У даному випадку критерієм оптимальності є витрати енергії, тобто для дизель-поїзда – це витрати палива.

Витрати палива на проходження перегону задовжки x_0 за час T пропорційні інтегралу:

$$G = \int_0^T (F_T \frac{dx}{dt} + b_0) dt, \quad (12)$$

де b_0 – коефіцієнт, який визначається із співвідношення

$$\eta_q \eta_p = 1 / (1 + b_0 p), \quad (13)$$

де η_q , η_p – ККД дизеля і електропередачі, p – потужність дизеля.

На рис. 1 наведено дослідні характеристики електропередачі дизель-поїзда. Тут: $\eta_{АН}$, $\eta_{СГ}$, $\eta_{ТАД}$, η_p – ККД автономного інвертора напруги, синхронного генератора, тягового асинхронного двигуна, електропередачі, відповідно. У виразі (12) час T не фіксується, але він не може перевищувати максимально допустимий час.

Іншим критерієм оптимальності може бути час проходження дизель-поїзда по перегону. При цьому ставиться задача переведення об'єкта з початкового фазового стану в кінцевий за мінімально можливий час. Обмеження (2) визначаються гранично допустимими значеннями швидкості, прискорення та сили тяги.

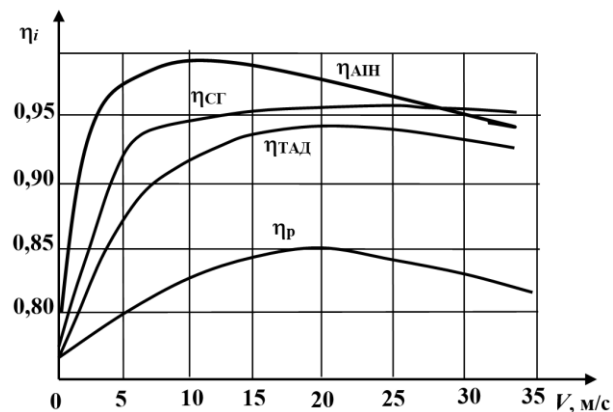


Рис. 1. Дослідні характеристики електропередачі дизель-поїзда

Тягову характеристику можна записати в такому вигляді:

$$F_{ТП} = \begin{cases} F_m, \text{ при } \min[(A - k_1 \dot{x}), B / (\dot{x} - C)] \geq F_m, \\ F_1 = \min[(A - k_1 \dot{x}), B / (\dot{x} - C)], \text{ при } F_1 < F_m, \end{cases} \quad (14)$$

де $F_{ТП}$ – гранично-допустима сила тяги; $\dot{x}$ – швидкість об'єкта; A , B , C , k_1 – постійні величини.

Тепер виконаємо синтез керувань рухом

об'єкта, мінімізуючи при цьому витрати палива або час руху об'єкта.

Система рівнянь (5), (6) має тільки одне керування (силу тяги) і може бути представлена як окремий випадок об'єкта, що описується рівнянням виду:

$$f(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(s)}, u(t)) = 0$$

або

$$u(t) = f_1(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^{(s)}), \quad (15)$$

де фазовими координатами є функція $x(t)$ та її похідні.

Визначимо функцію $x(t)$ і керування $u(t)$ за допомогою метода термінальних керувань. Якщо відомий початковий (A_1) і кінцевий (B_1) стан об'єкта керування в багатовимірному просторі, то існує множина фазових траєкторій, які з'єднують ці точки (рис. 2).

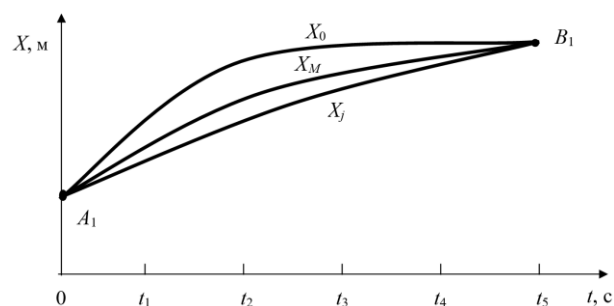


Рис. 2. Траєкторії руху об'єкта (X_0 , X_j , X_M – відповідно початкова, проміжна і екстремальна траєкторія)

Робити висновок про близькість фазової траєкторії X_j до екстремалі пропонується за швидкістю зміни функціоналу, який поблизу екстремуму прагне нуля. Оскільки екстремаль являє собою неперервну функцію часу, то вона може бути апроксимована поліномом:

$$X_M = \sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i, \quad (16)$$

де r – кількість початкових умов; n – кількість кінцевих умов; C_i – коефіцієнти полінома; t – час. При цьому бажаний рух об'єкта описується неперервною та r разів диференційованою функцією $x(t)$.

Закон керування знаходиться як функція фазових координат шляхом рішення вихідної системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку руху об'єкта.

Задача оптимізації зводиться до знаходження коефіцієнтів C_i полінома (16).

Якщо за умовою задачі необхідно задовольнити r початковим і n кінцевим умовам, то, використовуючи їх для визначення C_i , знайдемо закон керування, який забезпечує вирішення крайової задачі.

Перші r невідомих коефіцієнтів для фазової траєкторії, що апроксимується поліномом (16), визначаються таким чином:

$$C_i = \frac{x_0^{(i)}}{i!}, \quad i = 0, 1, \dots, r-1, \quad (17)$$

де $x_0^{(i)}$ – початкові значення функції $x(t)$ та її похідних. Інші n коефіцієнтів знаходимо згідно формули:

$$C_i = \sum_{v=0}^{i-1} \frac{(r+n-v-1)!}{(r+n-i-1)!(i-v)!T^{i-v}} C_v + \sum_{v=0}^{r+n-i-1} \frac{(-1)^v}{i!(r+n-i-v-1)!v!T^{i-v}} x_k^{(v)}, \quad (18)$$

$$i = r, r+1, \dots, r+n-1,$$

де $x_k^{(v)}$ – кінцеві значення функції $x(t)$ та її похідних при $t = T$.

Мінімізація функціонала може здійснюватися як за допомогою підбору вільних кінцевих умов $x_k^{(n+1)}, x_k^{(n+2)}, \dots, x_k^{(n+m)}$, так і підбором коефіцієнтів C_i .

Для об'єкта керування (5), (6) потрібний керуючий вплив (15) (сила тяги) з урахуванням відношень (11) і (16) обчислюється таким чином:

$$F_T = m \frac{d^2}{dt^2} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) + a_0 \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) + a_1 \left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) \right)^2 + \phi(x) + F_{C0}. \quad (19)$$

У (19) коефіцієнти C_i визначаються за початковим x_{i0} і граничним x_{ik} ($i = \overline{1, r}$) значеннями фазових координат.

Розробка алгоритма пошуку оптимальних керувань

Згідно розглянутого методу загальна стратегія рішень поставленої задачі полягає у:

- 1) визначенні за відомими параметрами об'єкта керування коефіцієнтів диференціальних рівнянь (5) і (6), які описують його динаміку;
- 2) рішенні системи диференціальних рівнянь відносно керувань;
- 3) обчисленні за початковими і кінцевими умовами вихідної фазової траєкторії і початкового значення функціонала;
- 4) виконанні за допомогою випадкового пошуку підбору відповідних вільних кінцевих умов $x_k^{(n+1)}, x_k^{(n+2)}, \dots, x_k^{(n+m)}$ з урахуванням заданих обмежень;
- 5) отриманні закону керування рухом об'єкта, шляхом підстановки значень C_i у вирази для керувань.

Алгоритм синтезу оптимальних термінальних керувань рухом дизель-поїзда по ділянці шляху і з урахуванням обмежень наведено на рис. 3.

На початку роботи задаються вихідні дані: маса поїзда, довжини ділянок шляху, величини їх ухилів, початкові і кінцеві умови, масштабні коефіцієнти для роботи процедури випадкового пошуку, точність оптимізації, верхні ($GV(I)$) і нижні ($GN(I)$) обмеження та їх число (блоки 2 та 3 на рис. 3).

У даному випадку розглядаються три обмеження ($KOG = 3$), а саме: по допустимій швидкості, прискоренню й керуванню. Точність оптимізації (TOL) задається у відсотках і є мінімальною відмінністю між двома послідовними значеннями функціонала FNL , при досягненні якої задача вважається вирішеною.

У блоці 4 обчислюється початкове значення функціоналу FL з урахуванням лише крайових умов, проводиться розрахунок термінальних керувань та моделювання руху об'єкта під дією цих керувань. Процес розрахунку використовує процедуру визначення коефіцієнтів C_i згідно виразів (17)–(18) і процедуру рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь. У результаті виконання обчислень отримується вихідна траєкторія руху та початкове значення функціоналу.

У блоці 5 процедурою обчислюються значення коефіцієнтів C_i вихідної функції $x(t)$ по заданим початковим і кінцевим умовам.

Далі визначається N похідна в момент часу $t = T$ для початкового наближення шуканої фазової траєкторії. Оскільки $N = 2$ (задані кінцева точка шляху і швидкість), то при першому проході будуть підбиратися оптимальні кінцеві значення других похідних (блок 6 на рис. 3).

Після збільшення кількості кінцевих умов на одиницю (блок 7 на рис. 3) виконується моделювання вихідної траєкторії та виведення результатів моделювання динаміки об'єкта (блок 8 на рис. 3).

Наступним кроком задаються вихідні дані для роботи процедури випадкового пошуку, відбувається масштабування змінних та їх передача до процедури пошуку екстремуму функції багатьох змінних шляхом підбору кінцевих умов з урахуванням обмежень (блоки 9-11 на рис. 3).

Перевірка обмежень здійснюється шляхом обчислення в задані моменти часу необхідних змінних і виконання їх порівняння з величинами, заданими співвідношеннями (2).

При невиконанні умов генерується нова точка і процес обчислень і перевірки повторюється. Інакше – обчислюється значення функціоналу I і виконується порівняння з попереднім його значенням. Завершення процедури пошуку виконується після знаходження оптимальних значень змінних, що мінімізують функціонал.

Після зворотного масштабування змінних відбувається моделювання руху об'єкта по оптимальній траєкторії та виведення результатів (блоки 12-14 на рис. 3).

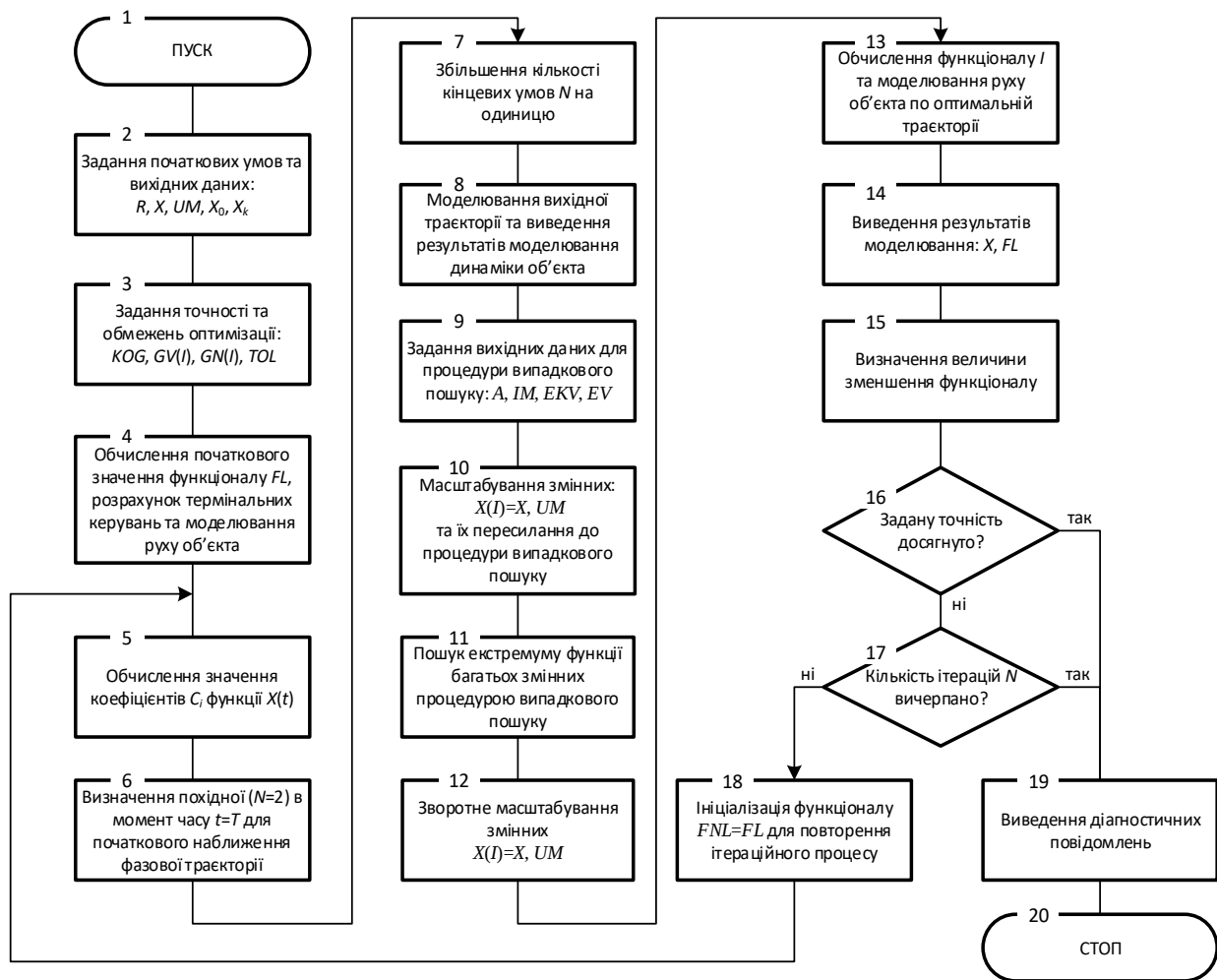


Рис. 3. Блок-схема алгоритму синтезу оптимальних керувань

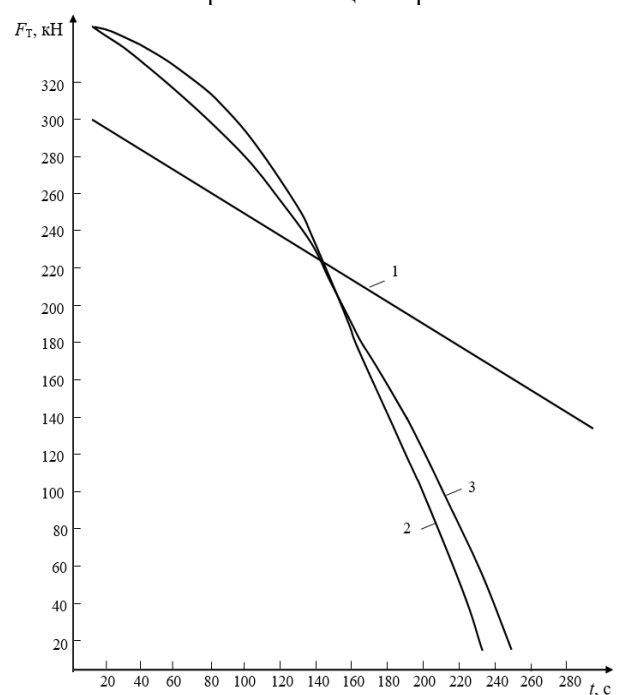
Після визначення величини зменшення функціоналу приймається рішення про продовження обчислень (блоки 15 та 16 на рис. 3): якщо зменшення функціоналу недостатньо і кількість ітерацій не досягла максимально допустимого значення, робиться ще одна ітерація (перехід на блок 5 на рис. 3). Інакше виводиться відповідне повідомлення (блок 19).

На основі розроблених моделі та алгоритму пошуку термінальних керувань визначимо закон керування, який би забезпечив переведення дизель-поїзда масою m та швидкістю руху $V = V_{t_1}$ за час $T = t_2 - t_1$ на відстань S та з кінцевою швидкістю руху $V_t = V_{t_2}$ з урахуванням мінімізації обраного функціоналу.

При цьому в процесі розгону швидкість і прискорення об'єкта не повинні перевищувати гранично допустимі значення швидкості (V_{don}) і прискорення $\left. \frac{dV}{dt} \right|_{don}$ на заданій ділянці шляху, а керування (сила тяги) – гранично допустиму силу тяги (F_{TH}), яка визначається співвідношенням (5).

На рис. 4 наведено зміни сили тяги: крива з індексом «1» відповідає початковому рішенню крайової задачі, крива з індексом «2» – зміни сили тяги

при мінімізації часу руху, крива з індексом «3» – зміни сили тяги при оптимізації витрат палива.

Рис. 4. Зміна сили тяги поїзда (F_t) під час вирішення задач мінімізації часу руху та витрат палива

Синтезований оптимальний закон керування рухом, що забезпечує мінімальні витрати палива, при русі поїзда на заданій ділянці шляху та дотриманні обмежень на фазові координати та керування має вигляд:

$$F_T = F_{T0} + m \cdot \left(\frac{2C_2 + 6C_3t + 12C_4t^2 + 20C_5t^3 + 30C_6t^4 + 42C_7t^5}{+} \right) + a_0 \cdot \left(\frac{C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 + 4C_4t^3 + 5C_5t^4 + 6C_6t^5 + 7C_7t^6}{+} \right) + a_1 \cdot \left(\frac{C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 + 4C_4t^3 + 5C_5t^4 + 6C_6t^5 + 7C_7t^6}{+} \right)^2, \quad (20)$$

де $F_{T0} = \phi(x) + F_{C0}$; $\phi(x)$ – функція, що визначається вагою поїзда та величиною ухилу колії; m – маса поїзда; t – час, що відраховується від початку інтервалу керування; a_0 , a_1 – коефіцієнти апроксимації, що залежать від маси поїзда, визначаються з виразів (7) – (9); C_i ($i = 1, \dots, 7$) – коефіцієнти полінома (16), обумовлені програмою пошуку оптимальних керувань, виходячи з початкових та кінцевих умов, при оптимізації витрат пального.

Синтезований оптимальний закон керування рухом, що забезпечує мінімальний час проходження заданої ділянки шляху та дотримання обмежень на фазові координати та керування має такий вигляд:

$$F_T = F_{T0} + m \cdot (2C_2 + 6C_3t + 12C_4t^2 + 20C_5t^3 + 30C_6t^4) + a_0 \cdot (C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 + 4C_4t^3 + 5C_5t^4 + 6C_6t^5) + a_1 \cdot (C_1 + 2C_2t + 3C_3t^2 + 4C_4t^3 + 5C_5t^4 + 6C_6t^5)^2, \quad (21)$$

де C_i ($i = 1, \dots, 6$) – коефіцієнти полінома (16), які визначаються програмою пошуку оптимальних керувань, виходячи з початкових та кінцевих умов при мінімізації часу руху.

На основі запропонованого алгоритму було розроблено програмне забезпечення для визначення економічного ведення дизель-поїздів серії ДЕЛ-02, яке призначене для роботи у складі МПС керування і дозволяє обирати та контролювати до 20 аналогових та 46 дискретних сигналів (період опитування датчиків становить 10 мс, тривалість безперервного запису – до 24 годин).

Висновки

У роботі досліджено можливість підвищення економічних характеристик дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 за рахунок оптимізації їх руху:

1) виконано аналіз задачі оптимального керування рухом, який показав, що її рішення знаходиться в певних рамках обмежень, пов'язаних як із дотриманням графіка руху, так і обмежень на фазові координати, їх похідні та керування;

2) досліджено два основних критерія оптимальності: витрати палива та час проходження ділянки шляху (мінімізація часу руху при накладених обмеженнях вимагає більших витрат палива і не призводить до суттєвого виграшу за часом руху поїзда);

3) розроблено алгоритм синтезу оптимальних термінальних керувань рухом дизель-поїзда на ділянці шляху з урахуванням техніко-економічних обмежень;

4) розроблено і втілено на дизель-поїзді ДЕЛ-02 програмне забезпечення, яке дозволяє: виконувати знімання інформації з ІС за весь час руху дизель-поїзда; надавати рекомендації машиністу щодо ведення дизель-поїзда з мінімальною витратою палива; виконувати статистичний аналіз записів для пошуку мінімальних, максимальних та середніх значень потрібних параметрів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергозберігаючі технології в локомотивному господарстві: навч. посі. Частина 1 / Е.Д. Тартаковський, Д.О. Аулін, Д.М. Коваленко, М.О. Котов. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 130 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/2172>
2. Щербак Я., Нерубацький В. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць. *Автоматизовані системи електричного транспорту*. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, Вип. 127, 2011. С. 137–142. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4425>
3. Запоровський М., Мезенцев М. Синтез керувань дизель-поїзда з електроприводом змінного струму. *Системи управління, навігації та зв'язку*, Випуск 3 (61), 2020. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.057>
4. Кислий Д. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, № 1 (61), 2016. С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
5. Носков В., Гавриленко С., Гейко М., Панченко В. Контроль використання потужності дизеля на тягу в умовах експлуатації дизель-поїздів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Том 4. № 78, 2024. С. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.038>
6. Притула М., Пасечник О. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. № 6 (78), 2018. С. 82–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154641>
7. Сулим А., Мельник О., Бялобржеський О., Ломонос А. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала*, № 4 (268), 2021. С. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-118-127>
8. Петренко О., Любарський Б. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана. *Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті*. № 2, 2016. С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.67639>

9. Боднар Б., Капіца М., Афанасов А., Кислий Д. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, № 5 (59), 2015. С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/55359>
10. Ситнік Б., Бриксін В., Ломотко Д., Ситник В., Давидов І. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 1. Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду. *Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті*. № 4, 2021. С. 24 – 35. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247235>
11. Hongbo Ye, Ronghui Liu. Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 82, September 2017. P. 102–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.011>
12. Шапран Е. Удосконалення систем керування тяговими електродвигунами тепловозів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, Вип. 8, 2005. С. 122–129. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/83b437bf-d806-4ca5-9f7e-7b8c15db0d77>
13. Боровська Т.М. Теорія автоматичного управління: курс лекцій. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 256 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/2021/Borovska_2018_256.pdf
14. Кравченко С., Шматько Д. Синтез систем термінального управління з прогнозуючими моделями. *Автоматизація та Приладобудування («Automation and development of electronic devices» ADED-2025)*. Вип. 1, 2025. С. 233–236. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/30943>

Received (Надійшла) 24.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Носков Валентин Іванович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Valentin Noskov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Valentyn.Noskov@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-0706>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57331254200>.

Ліпчанський Максим Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Maksym Lipchanskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Maksym.Lipchanskyi@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2837-0444>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218514897>.

Панченко Володимир Іванович – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Volodymyr Panchenko – Senior Lecturer of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Volodymyr.Panchenko@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-3398>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58759071400>.

Гейко Геннадій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Hennadii Heiko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Hennadii.Heiko@khi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6958-8306>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58759078500>.

Determination of optimal diesel train motion on a section of a route with a known profile

Valentin Noskov, Maksym Lipchanskyi, Volodymyr Panchenko, Hennadii Heiko

Abstract. Relevance. Railway transport is one of the main consumers of energy resources, therefore, the development and implementation of energy-saving technologies is a relevant task, the solution of which has recently become one of the priority areas of activity for specialists in both fundamental and applied science in this field. **Object of research:** the processes of controlling the traction, dynamic and energy characteristics of multiple-unit rolling stock. **Purpose of the article.** To solve the problem of optimal control of a diesel train's movement along a section of the track with a known profile, taking into account optimal fuel consumption and compliance with the traffic schedule. **Research results.** The article formulates and solves the problem of synthesizing a control system for the optimal movement of a diesel train with a known track profile using the terminal control method. The following were applied: the theory of train traction and traction electric drive, methods of system analysis and optimal control theory, mathematical modeling and computational experiments. **Conclusions.** An algorithm for optimal control of a diesel train has been developed, with the help of which program laws have been determined that establish the dependence of traction on the train's mass, track parameters, and technical and economic conditions (speed, acceleration, traffic schedule) taking fuel consumption into account.

Keywords: multiple unit rolling stock, optimal train movement, terminal controls, control system synthesis, mathematical modeling, railway track profile.