

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.64.029

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, О. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математичного моделювання НАНУ, вул. Дудаєва, 15, Львів, Україна, 79053, тел. +38 (032) 261 18 85, ел. пошта myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}ДП «Проектно-конструкторське технологічне бюро з автоматизації систем управління на залізничному транспорті України», вул. Жилианська, 97, Київ, Україна, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82, ел. пошта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ПОЇЗДІВ

Мета. Робота передбачає розроблення алгоритмічного забезпечення для моделювання й оптимізації режимів руху поїздів. **Методика.** Для описання процесу руху поїзда в просторових координатах із розподіленою масою вздовж траєкторії руху запропонована системна модель. Вона враховує тягові й опірні параметри та їх зміну залежно від зовнішніх і внутрішніх факторів. Для числового інтегрування моделі системи використаний метод скінченних різниць. Крім цього, розроблені ітераційні процедури для задоволення крайових умов, формування послідовності з режимів тяги, гальмування й холостого ходу з відповідними параметрами, щоб забезпечити виконання критерію оптимальності руху й технічних обмежень із достатньою точністю. Критерій оптимальності містить паливно-енергетичні ресурси, частоту зміни режимів роботи тягових засобів (суттєво впливає на зношеність приводів), затратні ставки тощо. **Результати.** Розроблене алгоритмічне, програмне й інформаційне забезпечення дозволило проведення: розрахунків режимів ведення довільних поїздів, зокрема нормативних, для формування графіків руху, розрахунок міжпоїзних і станційних інтервалів, дослідження впливу екстремальних параметрів поїздів на режими їх ведення. У системі передбачена можливість адаптації параметрів моделі руху поїзда за результатами дослідних поїздок. **Наукова новизна.** У роботі запропонована постановка розрахунку режимів ведення поїздів як задачі оптимального керування, з'ясований швидкий метод її розв'язування. Це забезпечило автоматизацію процесу розв'язування великого набору прямих та обернених режимних, із різними критеріями оптимальності, задач. **Практична значимість.** Запропонований підхід щодо постановки й розв'язування задач моделювання та оптимізації режимів ведення поїздів пройшов апробацію в процесі розрахунку основних складових для формування графіків руху, вибору оптимальних параметрів реконструкції полотна для всіх, швидкісних і повільних, типів поїздів.

Ключові слова: тягово-енергетичні розрахунки; оптимальний режим; математичне забезпечення; математична модель поїзда; ідентифікація параметрів моделі; прямі й обернені задачі

Вступ

Тягово-енергетичні розрахунки – одна з центральних проблем ефективного управління перевізними процесами на залізниці. Над постановкою та розв'язуванням цієї проблеми працювали й продовжують роботу багато колективів [1–11]. Протягом усього часу постановка задач і методи їх розв'язування були тісно прив'язані до розвитку обчислювальної техніки

й інформаційних технологій. Тому перші підходи вимагали суттєвого спрощення постановок задач і спеціально поданих вхідних даних, які б дозволили знайти аналітичне представлення розв'язку чи побудувати прості «ручні» ітераційні методи розв'язування відповідних рівнянь. Так, довідники з тягових розрахунків [4] пропонували зображення поїзда у вигляді фізичної точки, рекомендували використовувати тільки номінальні тягові й паливно-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

енергетичні характеристики приводів локомотивів, а для зменшення вхідних даних проводили спрямлення плану та профілю траєкторії руху (колій). Ці та інші спрощення забезпечували постановку однієї задачі – за мінімальний час проходження поїзда між роздільними пунктами. У таких випадках точність моделювання суттєво залежала від діапазону зміни параметрів траєкторії руху поїзда. Тягово-енергетичні розрахунки проводили тільки для певного набору нормативних поїздів не більше ніж один чи два рази на рік. Довідники з тягово-енергетичних розрахунків рекомендували багато обмежень, які спрощували алгоритм розрахунку. Серед рекомендацій було багато варіантів аналітичних і геометричних підходів, які дозволяли проводити розрахунок кривої діаграми швидкості руху «ручним» способом. Перші програмні комплекси були створені з урахуванням рекомендацій щодо наявних вимог до тягових розрахунків. Під час спроби провести оцінку паливно-енергетичних ресурсів за знайденими кривими швидкостей виявилось, що їх величина є суттєво вищою від результатів, отриманих із використанням динамометричних вагонів. У випадку швидкого нарощення вартості паливно-енергетичних ресурсів такі розрахунки уже були незадовільними. Сказане зумовило проведення досліджень для побудови адекватних моделей та алгоритмічного забезпечення, яке б враховувало всі основні фактори впливу на режим руху поїзда й дозволило поставити максимально повний набір прямих та обернених оптимізаційних задач.

Підвищення ефективності експлуатації наявного й перспективного тягового рухомого складу в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) і постійно змінних нормативів становить важливу науково-технічну проблему. Її практична реалізація полягає у створенні комплексної системи оптимального планування та керування рухом поїзда. Крім того, розв'язок названої проблеми пов'язаний із вирішенням низки важливих питань, таких як формування оптимальних режимів ведення поїздів, розроблення оптимального графіка руху поїздів, створення тренажерних навчальних систем та автоматизованих комп'ютерних систем нормування витрат ПЕР.

Розробленню методів формування оптимальних режимів руху поїздів присвячена значна кількість робіт [1–11]. У них можна виділити такі напрямки досліджень: оптимальні стратегії й методи нелінійного програмування для оптимізації траєкторії швидкості руху поїздів; підходи щодо розроблення дорадчих систем для машиністів; інтегровані моделі для оптимізації режимів і графіків руху поїздів; методи динамічного програмування для забезпечення енерго-ефективних режимів руху поїздів з обмеженнями швидкостей і пропускнуою здатністю; основні принципи оптимального управління рухом поїзда; розроблення моделі і розрахунок оптимальних координат зміни режиму роботи локомотивів тощо.

Практично всі згадані методи й підходи не пройшли апробацію в реальних умовах експлуатації, тому наведені результати в цих роботах є чисто теоретичними. Розроблення максимально універсальних програмних комплексів, які б об'єднували засоби моделювання, планування, ідентифікації, адаптації й оптимального керування процесами та були інтегрованими з інформаційним забезпеченням і засобами їх постійної актуалізації, вимагає наявності досвіду в побудові математичних та імітаційних моделей, методів та алгоритмів мінімальної складності, розподілених інформаційних систем тощо. Крім цього, ще необхідні системні знання (технічні, технологічні, економічні), які стосуються об'єкта дослідження. Досвід реалізації широкомасштабних проектів показав, що традиційні підходи й відомі класичні методи не дають змоги ставити й ефективно розв'язувати задачі, які б задовольнили сучасні вимоги щодо їх якості за функціональністю, надійністю, зручністю використання, продуктивністю, адаптивністю тощо. У зв'язку з цим завершені наукоємні програмні продукти промислового значення, необхідні для практичного використання, в основному є відсутніми.

В окремих роботах [7] запропоновано, для розв'язування задач оптимізації режимів руху поїздів використовувати класичні математичні інструменти; проте не наведено будь-яких прикладів їх використання. Результати приведені в монографії [1, 186–191] дають розуміння того, що для розв'язування задач такого рівня складності реалізувати класичні підходи прак-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тично нереально. Для отримання результатів необхідно розробляти нові методи, які б максимально використовували особливості об'єкта дослідження: фізику процесів, наявні емпіричні залежності, результати аналізу замірів отриманих із використанням динамометричних вагонів, тощо.

Розв'язати задачу оптимального керування рухом поїзда не вдається класичними методами, оскільки всі змінні, які його характеризують, є нелінійними, багатопараметричними, зі змінними обмеженнями, а деякі вхідні дані є слабо прогнозованими. Крім цього, важливим є унікальність об'єкта за набором факторів впливу, зосереджених і розподілених, дискретних і неперервних, які нелінійним чином впливають на процес руху [14].

Мета

Ураховуючи вищезазначене, метою статті є: побудувати математичні моделі основних типів тягових засобів і поїздів із розподіленою масою вздовж траєкторії руху; розробити ефективне алгоритмічне забезпечення для моделювання й оптимізації процесу руху поїздів за заданими критеріями оптимальності; розв'язати необхідний набір прямих та обернених тягових і енергетичних задач для систем побудови оптимальних графіків і розрахунку параметрів безпечно-го руху на перегонах і роздільних пунктах.

Методика

Для досягнення поставленої мети використані засоби математичного й імітаційного моделювання. Розроблена математична модель руху поїзда в просторових координатах із розподіленою масою вздовж траєкторії руху реалізується за допомогою числового інтегрування методом скінченних різниць. Для процесу керування локомотивами розроблені детальні імітаційні моделі, які відтворюють їх роботу з урахуванням реальних тягових, енергетичних характеристик і наявних зовнішніх впливів тощо. Поставлені оптимізаційні задачі розв'язані розробленими методами дискретної (комбіаторної) оптимізації.

Результати

Математичне описання моделі поїзда ґрунтується на класичних положеннях теорії локомотивної тяги, уявленні про поїзд як об'єкт керування, а також враховує основні розрахункові залежності, визначені в нормативній літературі [12]. Питання теоретичного описання руху поїзда докладно розроблені у згаданих джерелах. Однак у них багато положень, які стосуються руху поїзда як фізичної точки з використанням тільки номінальних тягових характеристик. Певні обмежувальні рекомендації довелося видозмінити, бо вони не дозволяли поставити коректно математичну задачу оптимального керування поїздом із розподіленою масою вздовж його складу з урахуванням повної множини важливих обмежень і тягово-енергетичних характеристик. У більшості випадків рекомендації, наведені в нормативній літературі, дозволяли постановку тільки однієї задачі, як вже було сказано, руху поїзда за мінімальний час.

Параметри руху поїзда v , F_m , B (швидкість руху, сила тяги й гальмівна сила) задовольняють рівняння:

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\eta(\vec{F}_m \pm \vec{W}_k - \vec{B})}{Q + P} \quad (1)$$

за обмежень

$$v \leq v_m(s), \quad \tau_\infty(1 - e^{t/T}) + \tau_0 e^{t/T} \leq T_m, \quad (2)$$

тут $\vec{F}_m(I)$ – тягова сила, Н; \vec{B} – гальмівна сила, Н; Q – маса вагонів, Н; P – маса локомотива, т; τ_0 – різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря, °С; τ_∞ , T – значення теплових параметрів, що залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун; T_m – максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів, °С; η – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда, км/год²; $W_k = F_{on} + F_{ood}(i_k, R, T_p, V_b, n)$, де \vec{F}_{ood} – сила додаткового опору, яка залежить від ухилу, (‰); радіуса кривизни R траєкторії переміщення, м; температури повітря T_p , °С;

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

швидкості зустрічного вітру V_b , м; кількості увімкнених підвагонних генераторів n ; t – час, год.

Поїзд – це упорядкований набір $(l_1, \dots, l_j, d_1, d_2, \dots, d_k)$ однотипних локомотивів l_i ($i = \overline{1, j}$) і вагонів d_i ($i = \overline{1, k}$). Порядок розміщення локомотивів у поїзді може бути різним.

Локомотиви є різних типів. Тип локомотива визначають за параметрами: масою m_j , довжиною l_j , кількістю осей k_j , силою натиску гальмівних колодок на вісь K_j , конструктивною швидкістю v_{kj} , затратами палива в режимі холостого ходу G_{xj} (для тепловозів і дизель-поїздів), затратами електроенергії на внутрішні потреби E_{0j} , коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками дороги ψ_j .

Повна гальмівна сила поїзда є такою:

$$B_r = \sum \phi_k(K, v)K_k,$$

де ϕ_k – коефіцієнт тертя гальмівних колодок; K_k – сила натиску гальмівних колодок на бандаж.

Основний опір рухові локомотива в режимі тяги визначають за емпіричною формулою:

$$W'_0 = m_j(a_j + b_j v + c_j v^2),$$

опір рухові в режимі холостого ходу:

$$W_x = m_j(e_j + f_j v + g_j v^2),$$

де $a_j, b_j, c_j, e_j, f_j, g_j$ – коефіцієнти для певного типу локомотива й типу колії (ланкова або безстикова).

Коефіцієнт зчеплення коліс із рейками ψ обмежує максимальну силу тяги локомотива ($F_{\max} \leq \psi(v, R)P$). Цей коефіцієнт є різним для різних типів локомотивів.

Привід кожного локомотива має набір із n_j позицій $\{p_{jk}, k = \overline{1, n_j}\}$. Для кожної позиції відомі інтервали її дії за швидкістю, силою тяги $\vec{F}_j(p_{jk}, v)$, струмом $I_j(p_{jk}, v)$. Для силових

позицій є відомими теплові характеристики двигунів: температура перегріву $\tau_{\infty j}(p_{jk}, v)$ й теплова постійна $T_j(p_{jk}, v)$ (для електровозів, моторних вагонів електропоїздів, тепловозів, моторних вагонів дизель-поїздів), паливні характеристики $G_j(p_{jk}, v)$ (для тепловозів, тепловозів із гідравлічною передачею, моторних вагонів дизель-поїздів, моторних вагонів дизель-поїздів із гідравлічною передачею).

Тягові характеристики локомотивів мають обмеження за ресурсами й надійністю роботи; тепловозів – за конструктивною швидкістю й параметрами дизеля, тягової передачі, зчеплення; електровозів – за конструктивною швидкістю й параметрами тягових двигунів, зчеплення.

Характеристики тягового режиму електровоза поділяють на електромеханічні, електротягові й тягові. Електромеханічні характеристики називають характеристиками тягових двигунів, віднесених до валу якоря, а саме:

$$n_\delta = f_1(I_\delta); M = f_2(I_\delta); \eta_\delta = f_3(I_\delta),$$

тобто, залежність числа обертання якоря n_δ , моменту M і ККД η_δ від струму I_δ за постійного значення U_δ на клеммах двигуна.

Електротягові характеристики є віднесеними до ободу рухомого колеса:

$$v = f_4(I_\delta); F = f_5(I_\delta); \eta_e = f_6(I_\delta),$$

тобто, залежність швидкості v , сили тяги F і ККД двигуна з передачею η_e від струму якоря I_δ .

Електротягові характеристики розраховують на основі електромеханічних характеристик тягового двигуна, заданого діаметру D рухомих коліс, передаточного числа μ і η_n – ККД передачі або ΔP_n – втрат у передачі. Швидкісну характеристику локомотива розраховують за формулою:

$$v = \frac{\pi D n 60}{100 \mu} = 0.188 \frac{D}{\mu} n \left[\frac{\text{км}}{\text{год}} \right],$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а дотичну силу тяги можна знайти із рівняння:

$$F_{\partial} = 2 \frac{\mu}{D} M \eta_n = 0.367 \frac{U_{\partial} I_{\partial}}{v} \eta_n [H],$$

а $\eta_e = \eta_{\partial} - \Delta P_n$. Втрати енергії в передачі можна знайти на основі даних табл. 1 [5].

Таблиця 1

Втрати енергії в передачі від тягових двигунів до коліс

Table 1

Energy losses in the transmission from the traction motors to the wheels

I/I_{zod}	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	1	1,25	1,5	2
ΔP_n	0,085	0,067	0,044	0,032	0,027	0,025	0,025	0,027	0,030	0,035

Тягові характеристики $v = f(F_{\kappa})$ отримують із електротягових виключенням I_{∂} . За усталеного електричного режиму швидкість руху електровоза знаходять за формулою:

$$v = \frac{U - Ir}{C\Phi}.$$

За даного струму на вході двигуна його швидкість можна міняти зміною напруги U на колекторі або зміною магнітного потоку Φ тягового двигуна.

Вагони характеризуються типом j , масою m , типом гальмівних колодок, габаритами, довжиною l_j , масою тари m_{0j} , кількістю осей k_j , силою натиску колодок на бандаж K_j .

Основний опір руху вагонів на ланковій і безстиківій коліях визначають такою емпіричною формулою:

$$W_0^* = \left(a_j + \frac{b_j + c_j v + e_j v^2}{q_0} \right) m,$$

де a_j, b_j, c_j, e_j – коефіцієнти, залежні від типу вагона, v – швидкості руху, q_0 – маси, яка припадає на одну вісь колісної пари.

Розглянемо сили, які протидіють рухові. Розрізняють основний і додатковий опір рухові. За основний беруть опір, який діє на поїзд під час руху вздовж прямого горизонтального шляху з рівномірною швидкістю за нормальних метеорологічних умов. Для локомотива розріз-

няють ще опори руху в режимі тяги й за її відсутності. До основного належать також опори внаслідок: тертя між шийками осей і підшипниками, кочення коліс по рейках, ударів коліс об стики рейок, повітряного середовища. До додаткових відносять опори внаслідок: ухилу та кривизни траєкторії руху, зміни метеорологічних умов, роботи підвагонних генераторів, руху з місця.

Силу опору рухові обчислюють за формулою:

$$W = (W' + W'') K_{nm} K_g + W_i + W_r + W_{nz} + W_{pyu},$$

де W' та W'' – основні опори локомотивів і вагонів відповідно; K_{nm} та K_g – коефіцієнти опору внаслідок низької температури й наявності вітру (залежать від температури t_{zn} , густини повітря ρ , швидкості вітру v_g та швидкості руху поїзда v); W_i – опір від ухилу ($W_i = \pm i M$, де $\pm i$ – значення ухилу ділянки руху в проміле (‰), M – маса вагона (локомотива)); W_r – опір, зумовлений кривизною траєкторії; W_{nz} – опір від підвагонних генераторів; W_{pyu} – опір під час рушання з місця.

$W_r = \left(\frac{200}{R} + 1.5\tau_{\kappa} \right) \frac{s_{kp}}{l_n} M [кгс / м]$, де R, s_{kp} – радіус та довжина кривої відповідно, м; l_n – довжина поїзда, м; τ_{κ} – непогашене прискорення в кривій, яке обчислюють за наступною

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

формулою: $\tau_k = \frac{v^2}{13R} - \frac{h}{s_k} g [M/сек^2]$, де h –

підвищення зовнішньої рейки, мм;
 s_k – відстань між кругами кочення коліс, мм;
 W_{nz} – опір від підвагонних генераторів.

$W_{nz} = \frac{136P'}{q_0v} M$, де P' – середня потужність
 пдвагонного генератора, кВт.

$W_{руш} = k \frac{a}{q_0 + 7} M$, де a – коефіцієнт, який за-
 лежить від типу підшипників вагона (локомо-
 тива); k – коефіцієнт, який залежить від кіль-
 кості вагонів у поїзді.

Для всіх типів вагонів (локомотивів) вста-
 новлені емпіричні залежності, які дозволяють
 визначати основну й додаткову сили опору ру-
 ху. Під час розрахунків уважають, що всі сили,
 які діють на вагон чи локомотив, зосереджені
 в його центрі мас. Координати центра мас да-
 ють можливість ідентифікувати (встановити
 координати) місце розташування вагона чи ло-
 комотива на траєкторії руху.

Режим руху поїзда здійснюється чергуван-
 ням режимів тяги, холостого ходу (за відсутно-
 сті режиму тяги) й гальмування. Режим тяги
 може відбуватися за різних тягових позицій.
 Тяговим відповідають відповідні струменеві
 позиції. Режим гальмування визначається вели-
 чиною гальмівної сили, яка залежить від сумар-
 ної сили притискання гальмівних колодок до
 бандажів коліс або до дисків, встановлених на
 осях. Гальмівна сила виникає також у процесі
 переведення тягових електродвигунів у генера-
 тори струму (електричне гальмування). Галь-
 мування може супроводжуватися рекуперацією
 (поверненням електроенергії в мережу) й робо-
 тою тягових електродвигунів на опір рухові
 (реостатне гальмування).

Траєкторія руху поїзда $s(x), x \in [x_0, x_n]$, де
 x_0, x_n – початкова й кінцева координати сусід-
 ніх роздільних пунктів (станцій). Траєкторія
 руху представлена як послідовність $[x_i, x_{i+1}]$
 лінійних $L_{ij}(l, i)$, які визначаються ухилом i
 й довжиною l , та криволінійних елементів
 $R_{ij}(R, l)$, що визначаються довжиною l і радіу-
 сом кривизни R . Уздовж траєкторії руху

$s(x), x \in [x_0, x_n]$ задають максимально допусти-
 му швидкість руху
 $v_{j,j+1}(x), x \in [x_j, x_{j+1}] \subset [x_0, x_n]$.

Будемо вважати, що типи локомотивів і їх
 технічні, тягово-енергетичні й опірні параметри
 є відомі, також для кожного вагона заданий
 тип, маса вантажу та його опірні параметри.

Інтегрування диференціального рівняння
 руху (1) вимагає багатократного розв'язування
 прямих та обернених задач. Ітераційний процес
 побудовано таким чином, що він проходить за
 траєкторією руху необхідний шлях уперед, по-
 тім повертається необхідну кількість разів на-
 зад, поки не задовольнить усі умови на оптима-
 льність, виконання технічних і технологічних
 обмежень, неперервність траєкторії швидкості.
 Важливо, що такий алгоритм не вимагає зазда-
 легідь знання всіх умов, які впливають на оп-
 тимальність руху, і тому він є адаптивним до
 можливих змін у процесі руху. Алгоритм у ма-
 ксимальній мірі реалізовує наявний потенціал
 оптимізації.

Траєкторія швидкості режиму руху поїзда за
 мінімальний час є максимально близькою до
 максимально допустимої. Такий режим руху
 формується під час використання максимально
 можливих силових характеристик тяги й галь-
 мівної сили та мінімально можливої частоти
 зміни тягових позицій. Для цього критерію оп-
 тимальності економія паливно-енергетичних
 ресурсів не передбачена.

Оптимізація режиму здійснюється тільки
 у випадку наявності задання часу на перемі-
 щення, який перевищує мінімальний. Енерге-
 тичні затрати нелінійно залежать від швидкості
 руху. У разі зміни швидкості руху (зміни сило-
 вих позицій) у напрямку її збільшення затратні
 величини зростають на значну величину. Тому
 для зменшення затрат проводять мінімізацію
 кількості й величини перехідних режимів.
 Втрати інерції руху й, відповідно, енергії від-
 буваються в режимі використання гальмівної
 сили. Якщо дозволяє час, варто економити іне-
 рційний потенціал у режимі холостого руху
 й гальмування (пригальмовування) проводити
 максимально пізніше і тільки для того, щоб за-
 безпечити рух за заданий час.

Алгоритм оптимізації вимагає багатократ-
 них розрахунків режиму руху. Зменшення ене-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ргетичних затрат проводять за допомогою: коригування в сторону зменшення максимальних швидкостей на окремих ділянках перегону (при цьому зменшується кількість і величини перехідних режимів), використання мінімально можливих тягових позицій і режиму гальмування; використання в максимальній мірі інерції руху на підйомах і спусках тощо. Процес розрахунку завершується за умови достатньої близькості розрахованого часу руху до заданого.

Для забезпечення максимального рівня автоматизації процесу розв'язування оптимізаційних задач формування оптимальних режимів поставлена як задача оптимального керування рухом поїзда. Розроблення підходів щодо її розв'язування дозволило забезпечити максимальний рівень автоматизації процесу розв'язування великого набору оптимізаційних задач. Керування – послідовний набір параметрів зміни режимів тяги, холостого ходу й гальмування. Зміна керування формується за умов досягнення меж коридору швидкостей $[v_{\max}(s), v_{\min}(s)]$ на заданому інтервалі траєкторії руху $s \in [s_i, s_{i+1}]$. Вибір ширини меж зміни швидкостей дозволяє регулювати частоту зміни керування. Корегування верхньої межі швидкості в напрямку її зменшення, для окремих додаткових умов, є одним із важливих складових алгоритму розв'язування оптимізаційних задач. Холостий хід на інтервалі часу характеризується координатою початку й швидкістю в кінцевій координаті $[s_p, v(s_k)]$, гальмування визначається силою натиску гальмівних колодок на бандаж, початок – координатою чи швидкістю руху, а завершення – координатою і швидкістю руху.

У загальному випадку задача розрахунку режимів ведення поїздів вимагає задання:

- траєкторії руху поїзда $s(x), x \in [x_0, x_n]$ у просторових координатах;
- поїзда, тобто впорядкованого набору $(l_1, \dots, l_j, d_1, d_2, \dots, d_k)$ однотипних локомотивів l_i ($i = \overline{1, j}$) і вагонів d_i ($i = \overline{1, k}$);

- зовнішніх умов – напрям вітру, температура повітря, стан підвагонних генераторів тощо;

- додаткових умов – час руху, частота зміни силових позицій тощо;

- крайових умов для початкової й кінцевої координати траєкторії руху на швидкість.

За заданими даними необхідно знайти:

- траєкторію швидкості руху поїзда $v(x), x \in [x_0, x_n]$;

- траєкторію зміни паливно-енергетичних параметрів уздовж траєкторії руху;

- режим роботи тягових засобів;

- траєкторію зміни температури нагрівання обмоток якорів двигунів за електричної тяги;

- $t_{\min}(x_0, x_n)$ – мінімальний час на проходження траєкторії руху;

- мінімальні паливно-енергетичні затрати й раціональну експлуатацію тягових засобів за заданого часу $t(x_0, x_n)$ ($t(x_0, x_n) \geq t_{\min}(x_0, x_n)$) на переміщення;

- сумарні затрати паливно-енергетичних параметрів (за витратними ставками на перевезення);

- максимальну масу поїзда;

- залежність між масою, часом руху й енергетичними затратами поїзда для різних типів локомотивів;

- оптимальний час руху тільки за енергетичним критерієм;

- необхідну мінімальну додаткову тягу під час проходження перевалів;

- мінімальну швидкість на окремих перегонах руху, яка гарантує рух без зупинки та без додаткової тяги.

Система розрахунку режимів руху поїздів складається з інформаційного забезпечення, задання розрахунку, алгоритмічного й програмного забезпечення, табличного й графічного представлення результатів моделювання (рис. 1–5).

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

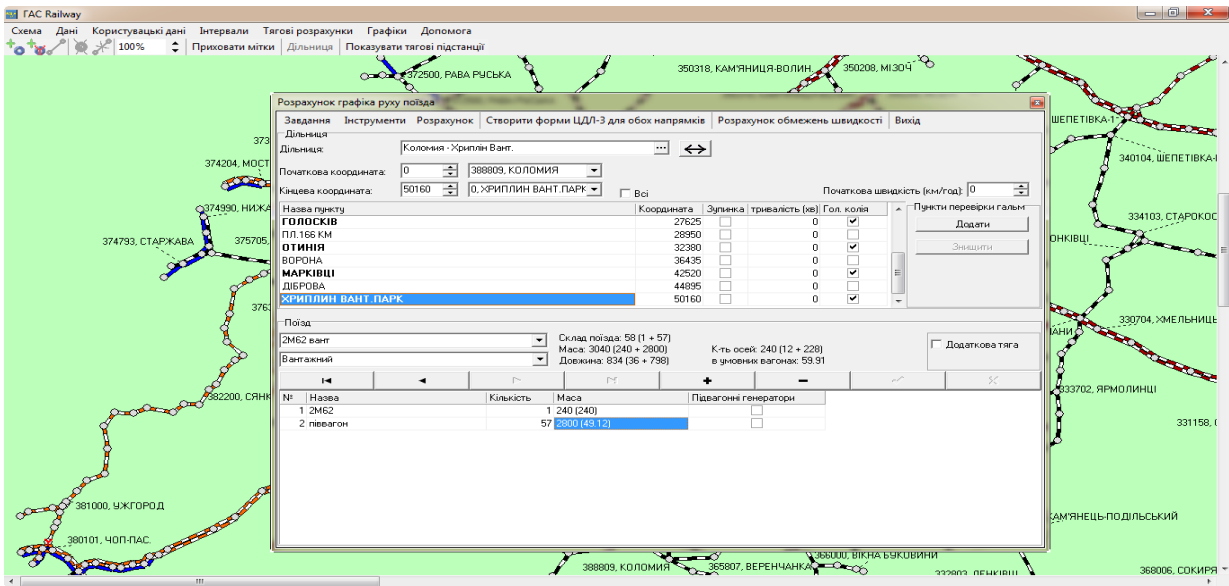


Рис. 1. Діалогове вікно вибору шляху руху й задання на розрахунок режиму руху поїзда

Fig. 1. Dialog box for choosing a way of motion and task for calculation of the train’s operating condition

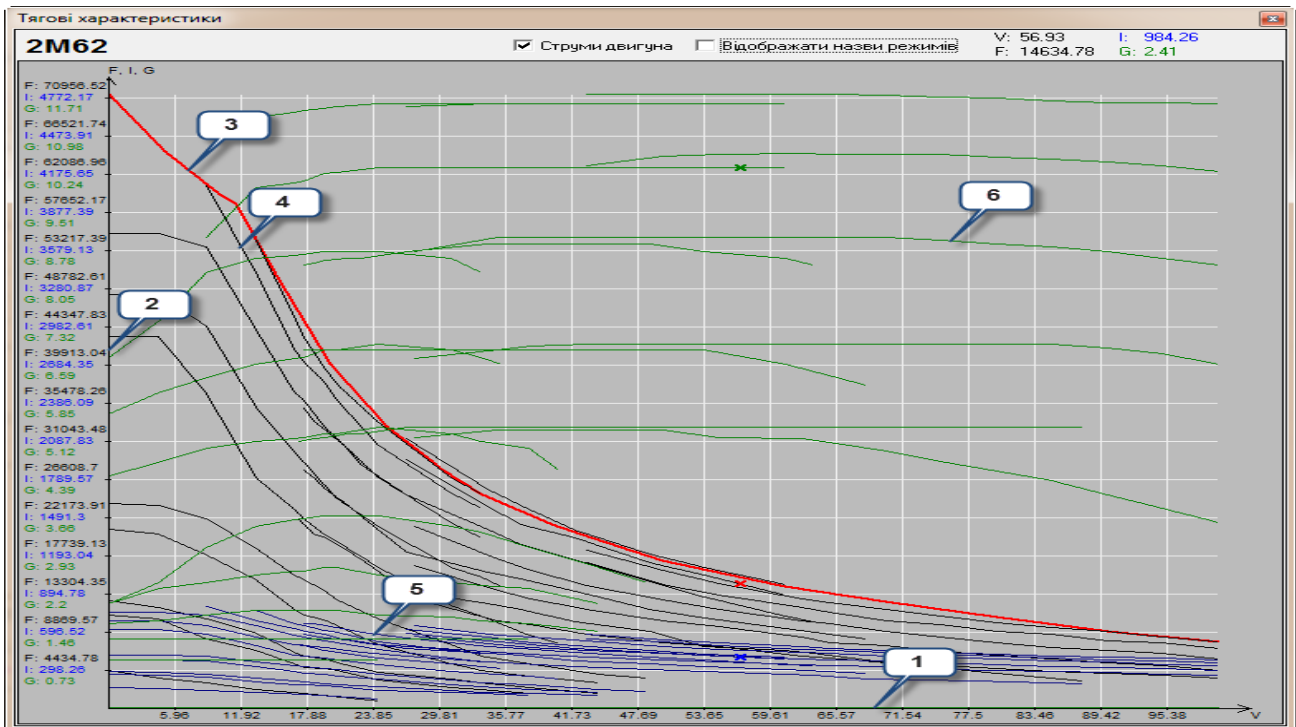


Рис. 2. Тягові (2, 3, 4), струменеві (1, 5) і паливні (6) характеристики локомотива 2М62

Fig. 2. Traction (2, 3, 4), jet (1, 5) and fuel (6) characteristics of the locomotive 2M62

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

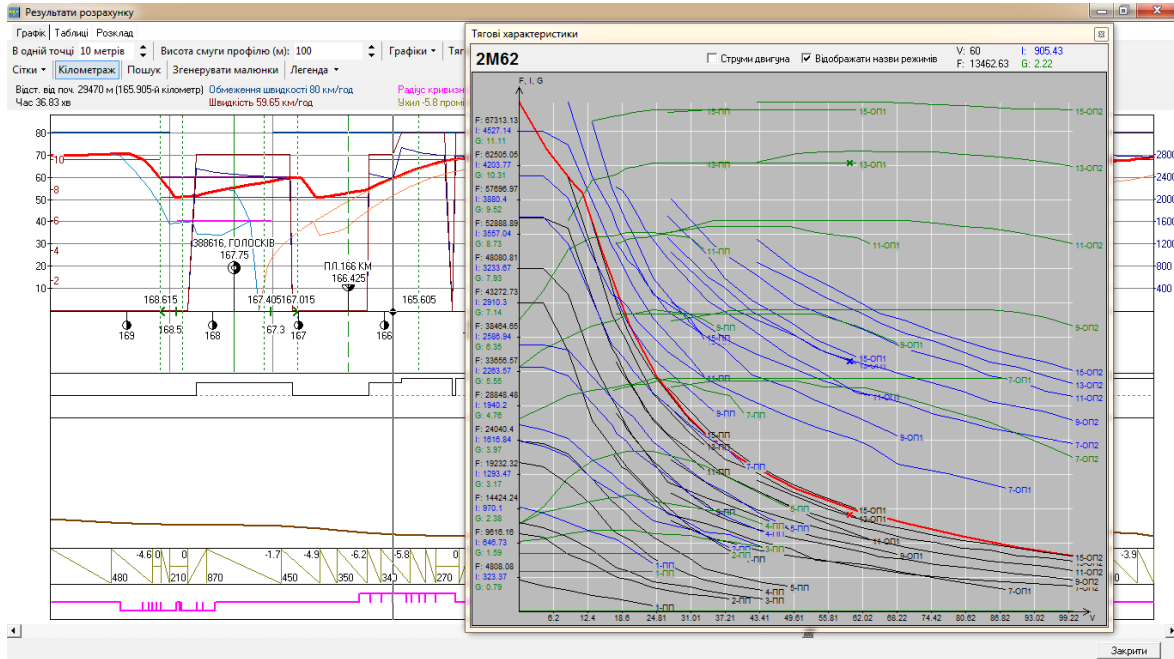


Рис. 3. Графічне представлення результатів і робочих точок на схемі – тягові й струменеві характеристики локомотива 2M62

Fig. 3. Graphical presentation of results and operating points at the scheme – traction and jet characteristics of the locomotive 2M62

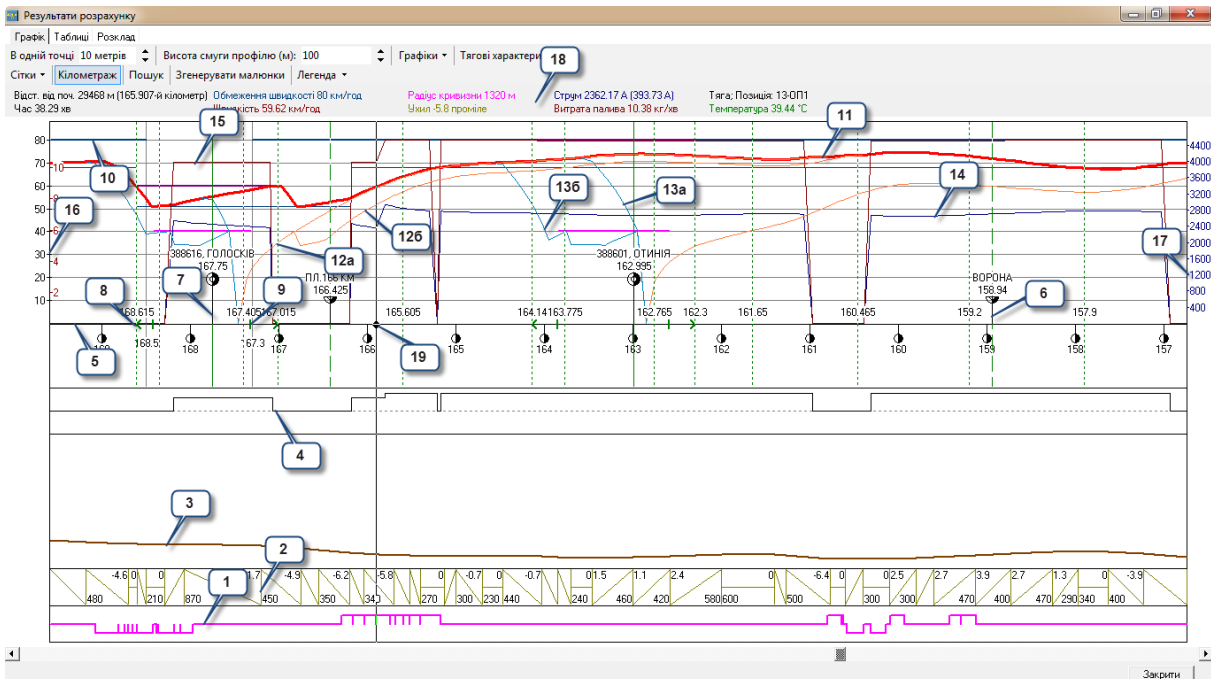


Рис. 4. Представлення інформаційного забезпечення й результатів моделювання за заданим критерієм оптимальності

Fig. 4. Presentation of information support and simulation results by the given criterion of optimality

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

На рис. 4 наведена наступна графічна формація:

1. поздовжній план колії в елементах (прямі, криві ділянки);
2. елементи профілю колії (довжина елемента, ухил);
3. поздовжній профіль колії;
4. діаграма режимів ведення локомотива (використання тяги по позиціях);
5. кілометрова розмітка лінії;
6. посадкова платформа на перегоні;
7. роздільний пункт (станція, блокпост, роз'їзд);
8. вхідна стрілка роздільного пункту;
9. межа роздільного пункту;
10. допустима швидкість руху;
11. діаграма швидкості руху поїзда;

12. діаграма сповільнення поїзда за умови зупинки на роздільному пункті:

- а) слідування по головній колії;
- б) слідування по бічній колії;

13. діаграма розгону поїзда за умови зупинки на роздільному пункті:

- а) слідування по головній колії;
- б) слідування по бічній колії;

14. діаграма сили струму, А;

15. діаграма миттєвих витрат палива, кг/хв;

16. шкала осі сили струму;

17. шкала осі швидкостей руху;

18. інформаційне вікно;

19. бігунок курсора (за яким відображають дані в інформаційному вікні й у вікні тягових характеристик)

Результати розрахунку														
Графік Таблиці Розклад														
Зберегти таблицю Створити форму ЦДЛ-3 Створити форму попереджень														
назва	роздільний пункт			координата			план - профіль			розрахунок руху			енергетика	
	пач. (м)	кінц. (м)	ухил	Р кривої (м)	V макс. (км/год)	V (км/год)	шляк (м)	час (с)	стан	струм (А)	температура (°C)			
370307. Сквиляк	715					0	0 [кв]			0 [кВт.год]				
	715	800	-6.4	0	80	0	0	0	0	0 Тяга; Позиція: 5-П	375	19.33		
	800	1000	-8.2	0	80	31.53	85	19.41	Тяга; Позиція: 17-П-0П2	1276.79	20.67			
	1000	1020	-8.2	0	80	49.13	285	37.27	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	2098.56	20.77			
	1020	1220	-7.7	0	80	50.72	305	38.71	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1988.5	21.59			
	1220	1397	-7.7	0	80	63.61	505	51.3	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1995.91	22.2			
	1397	1430	-7.7	0	80	72	682	60.7	Холостий хід	0	22.19			
	1430	1630	-4	0	80	72.21	715	62.35	Холостий хід	0	22.14			
	1630	1710	-4	0	80	73.46	915	72.23	Холостий хід	0	22.12			
	1710	1910	1.3	0	80	73.72	995	76.15	Холостий хід	0	22.07			
	1910	1943	1.3	0	80	74.22	1195	85.88	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1700.87	22.15			
	1943	1980	1.3	0	91	75.02	1228	87.47	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1680.84	22.23			
	1980	2180	-3.5	0	91	75.87	1265	89.24	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1659.82	22.86			
	2180	2280	-3.5	0	91	79.9	1465	98.48	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1588.66	22.85			
	2280	2296	-9.4	0	91	81.65	1565	102.94	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1569.45	22.88			
	2296	2320	-9.4	0	91	81.9	1581	103.65	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1555.23	22.92			
	2320	2430	-9.4	950	91	82.31	1605	104.7	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1548.32	23.11			
	2430	2590	-3.3	950	91	84.19	1715	109.45	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1516.94	23.36			
	2590	2660	-3.3	0	91	87.16	1875	116.18	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1467.23	23.46			
	2660	2826	1.9	0	91	88.34	1945	119.05	Тяга; Позиція: 29-П-0П3	1447.4	23.68			
	2826	2990	1.9	0	91	91	2111	125.71	Холостий хід	0	23.64			
	2990	3125	0	0	91	90.47	2275	132.22	Холостий хід	0	23.61			
	3125	3190	0	980	91	89.55	2410	137.62	Тяга; Позиція: 25-П-0П1	681.6	23.62			
	3190	3390	-7.7	980	91	89.53	2475	140.23	Тяга; Позиція: 25-П-0П1	681.79	23.67			
	3390	3440	-7.7	980	91	89.34	2675	148.28	Холостий хід	0	23.65			
	3440	3470	-7.7	-1050	91	89.15	2725	150.3	Холостий хід	0	23.65			
	3470	3675	-2.8	-1050	91	89.06	2755	151.51	Холостий хід	0	23.59			
	3675	3800	-2.8	-1050	80	80	2960	160.24	Холостий хід	0	23.56			
	3800	3815	1.7	-1050	80	79.9	3085	165.87	Холостий хід	0	23.95			
	3815	3930	1.7	0	80	79.89	3100	166.55	Холостий хід	0	23.52			
	3930	4130	4	0	80	79.81	3215	171.73	Холостий хід	0	23.46			
	4130	4185	7.7	0	80	79.04	3415	180.8	Тяга; Позиція: 25-П	595.89	23.47			
	4185	4230	7.7	-590	80	78.97	3470	183.3	Тяга; Позиція: 29-П	815.94	23.48			
	4230	4430	6	-590	80	78.97	3515	185.36	Тяга; Позиція: 25-П-0П1	785.43	23.57			
	4430	4510	6	-590	80	78.67	3715	194.49	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1087.7	23.63			
	4510	4665	6	0	80	78.62	3795	198.15	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1088.55	23.75			
	4665	4865	6	-1000	80	78.36	3950	205.26	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1092.74	23.89			
	4865	4880	6	-1000	80	77.93	4150	214.47	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1100.14	23.9			
	4880	4895	9	-1000	80	77.91	4165	215.17	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1100.63	23.92			
	4895	5030	9	0	80	77.88	4180	215.86	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1101.1	24.02			
	5030	5230	6.9	0	80	77.65	4315	222.11	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1105.35	24.17			
	5230	5358	0	0	80	77.12	4515	231.41	Тяга; Позиція: 29-П-0П1	1115.38	24.27			
370311. Оброшин	5358					4643	3.96 [кв]			169.95 [кВт.год]				
	5358	5430	0	0	80	76.81	4643	237.4	Тяга; Позиція: 25-П-0П2	1012.82	24.33			
	5430	5480	0	0	80	76.71	4715	240.78	Тяга; Позиція: 25-П-0П1	810.43	24.36			
	5480	5650	-2.3	0	80	76.57	4765	243.13	Тяга; Позиція: 25-П-0П1	812.06	24.44			
	5650	5760	-2.3	3500	80	76.26	4935	251.14	Тяга; Позиція: 25-П	617.51	24.45			
	5760	5800	-2.3	0	80	76.23	5045	256.33	Холостий хід	0	24.44			
	5800	6000	-2.3	590	80	75.99	5085	258.22	Холостий хід	0	24.38			
	6000	6110	-2.3	590	80	74.99	5285	267.76	Холостий хід	0	24.34			

Час ходу (кв): 180.74 Загальні витрати електроенергії (кВт.год): 7595.16 Основна - додаткова тяга

Рис. 5. Розрахована режимна карта руху поїзда в табличному вигляді

Fig. 5. Calculated mode map of the train motion in a tabular form

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наведемо приклади розв’язування основних режимних оптимізаційних задач.

Приклад 1 – розрахунок максимальної маси поїзда. Розрахунок максимальної маси поїзда проведено для заданої серії локомотивів, розрахункової ділянки за умов максимальної реалізації кінетичної енергії руху поїзда і його тягових характеристик. На рис. 6 наведені результати числового експерименту.

У результаті розрахунку отримано, що для локомотивів типу 2М62 й М62 максимальна допустима маса є рівною – 1 782 й 892 відповідно. Збільшення маси призведе до зупинки поїзда у вказаних координатах траєкторії руху (рис. 6). Для збільшення маси поїзда необхідна додаткова тяга.

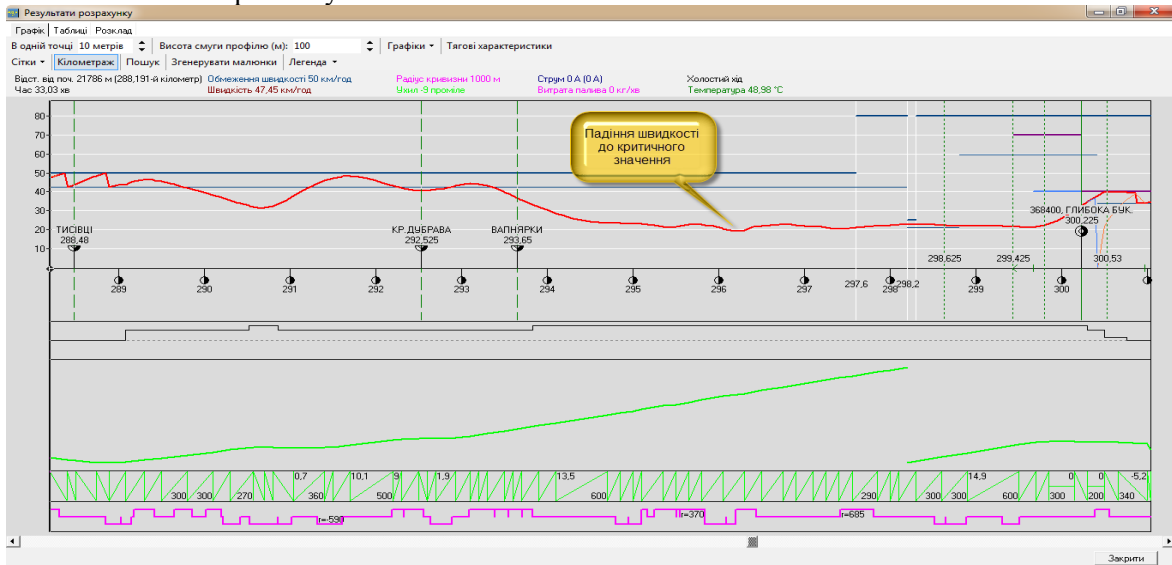


Рис. 6. Графічне представлення результатів числового експерименту

Fig. 6. Graphical representation of the results of the numerical experiment

Приклад 2 – розрахунок поїздів із різною кількістю вагонів. Розрахунки проведені на ділянках Чернівці Південні – Великий Ку-

чурів і Вигнанка – Гадинківці – Копичинці. Траєкторії швидкості руху наведені на рис. 7.

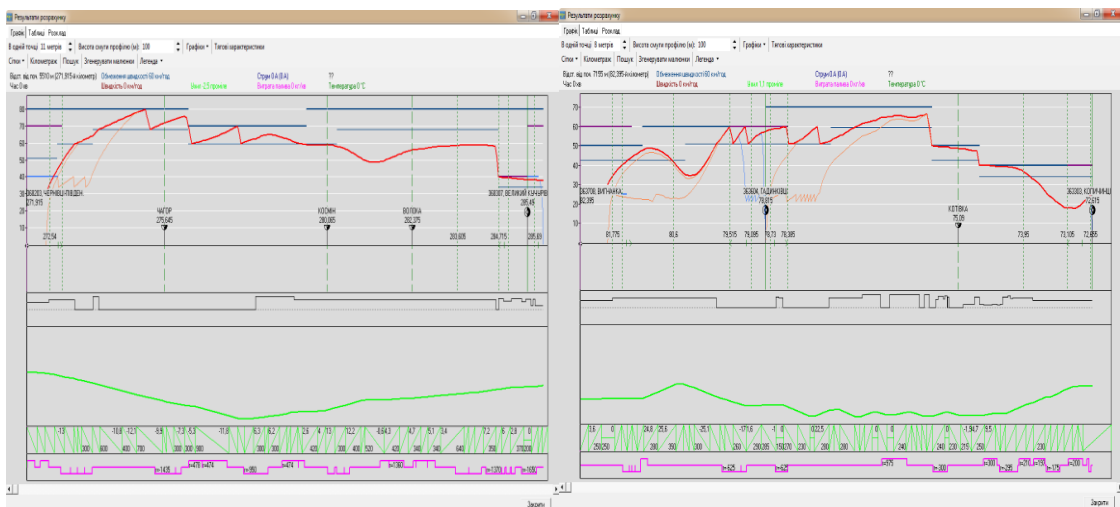


Рис. 7. Траєкторія швидкості руху поїзду: 57 вагонів – зліва, 15 вагонів – справа

Fig. 7. Trajectory of the speed of trains: 57 cars - left, 15 cars - right

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наведено по два приклади ведення поїзда на різних дільницях із різною кількістю вагонів. В обох випадках використаний локомотив серії 2М62, склад поїзда масою 1 250 т, режим ведення поїзда – з максимально допустимою швидкістю (мінімум часу). У першому варіанті розрахунку склад поїзда 57 вагонів, у другому – 15 вагонів. На дільниці Чернівці Південні – Великий Кучурів час ходу поїзда зі складом у 57 вагонів на 2 хв більший, ніж у короткого складу, витрата палива також збільшена на 12 %. На дільниці Вигнанка – Гадинківці – Копичинці час ходу обох складів поїздів практично не відрізняється, а витрата палива у довшого складу поїзда виявилася меншою на 3,8 %. Для поїзда з більшою кількістю вагонів необхідна менша тяга для руху по місцевості зі значними перепадами висот.

Приклад 3 – вплив окремих обмежень на режим руху. Проведені числові експерименти для оцінки впливу на режим руху поїзда окремих обмежень. Для цього взяті дільниці Здолбунів – Ківерців і поїзд із 57 вагонів загальною масою 1 438 т і локомотивом ВЛ-80к. Довжина шляху дорівнює 81,130 км. Кількість зупинок на проміжних станціях – 4. Переходити в режим гальмування дозволили за швидкості 60 км/год. Отримані такі результати розрахунків:

- зміна частоти тягових позицій величинами інтервалу швидкості руху в межах 5–15 % збільшує на 2,8 % час руху і зменшує енергетичні затрати на 2,35 %;

- використання режиму гальмування за швидкостей 40 і 20 км/год збільшує час руху на 4 й 10 хв і зменшує затрати електроенергії в межах 5 і 7,5 % відповідно;

- зменшення верхніх обмежень на швидкість до 15 % призводить до зменшення енерговитрат на 3,5 % і збільшення часу на рух на 9,7 %.

Приклад 4 – вплив зміни тяги. Розрахунки проведені на дільниці Чернівці Південні – Великий Кучурів із зміною типу тяги. Склад поїзда – 57 вагонів, маса – 1 254 т. Критерій руху – за мінімальний час ходу.

Заміна тепловоза 2М62 (час ходу 14 хв, витрата палива 100 кг, витрати на паливо – 696 грн, за витратними ставками 1 423 грн) на тепловоз 2ТЕ10л, згідно з розрахунком, дозволяє незначно пришвидшити рух поїзда по перегону, але збільшення витрати палива складе 24 %. При цьому витрати на тягу складуть 873 грн, а за витратними ставками – 1 423 грн. Для тепловоза ТЕ33а час ходу зменшено на 1 хв, а витрата палива – на 17,6 %. Витрати на тягу складуть 598 грн, а за витратними ставками – 1 422 грн. Для електровоза ВЛ-80к час ходу зменшено на 1 хв, а витрата електроенергії на тягу поїзда становить 446 кВт/год. Витрати на тягу складуть 245 грн, а за витратними ставками – 1 185 грн.

Приклад 5 – оптимізаційні розрахунки на перегоні. Проведені числові експерименти для різних типів тяги, маси поїздів і середньої швидкості. Отримані затратні величини на рух поїздів і максимальні маси поїздів (рис. 8).

Результати експерименту показали, що:

- максимальна маса поїзда залежить від типу тяги;

- зі збільшенням маси поїзда зростуть і енергетичні затрати;

- енергетичні затрати зростають зі збільшенням середньої швидкості руху поїзда нелінійно;

- за незначних мас поїздів енерговитрати можуть бути непропорційними їх зростанню, це пов'язано як із дискретністю тягових силових позицій, так із формалізацією поняття «режим (оптимальний режим) руху поїзда».

Приклад 6 – сумарні витрати, розраховані за витратними ставками на вантажні й пасажирські перевезення. Були задані витратні ставки, дільниця, початкова й кінцева станції, зупинки, поїзд і час на його переміщення від початкової до кінцевої станції. Потрібно знайти такий режим руху поїзда, який задовольняє задані умови й забезпечує мінімальні витрати на його переміщення. Перелік витратних ставок наведений на рис. 9, а результати досліджень – у табл. 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

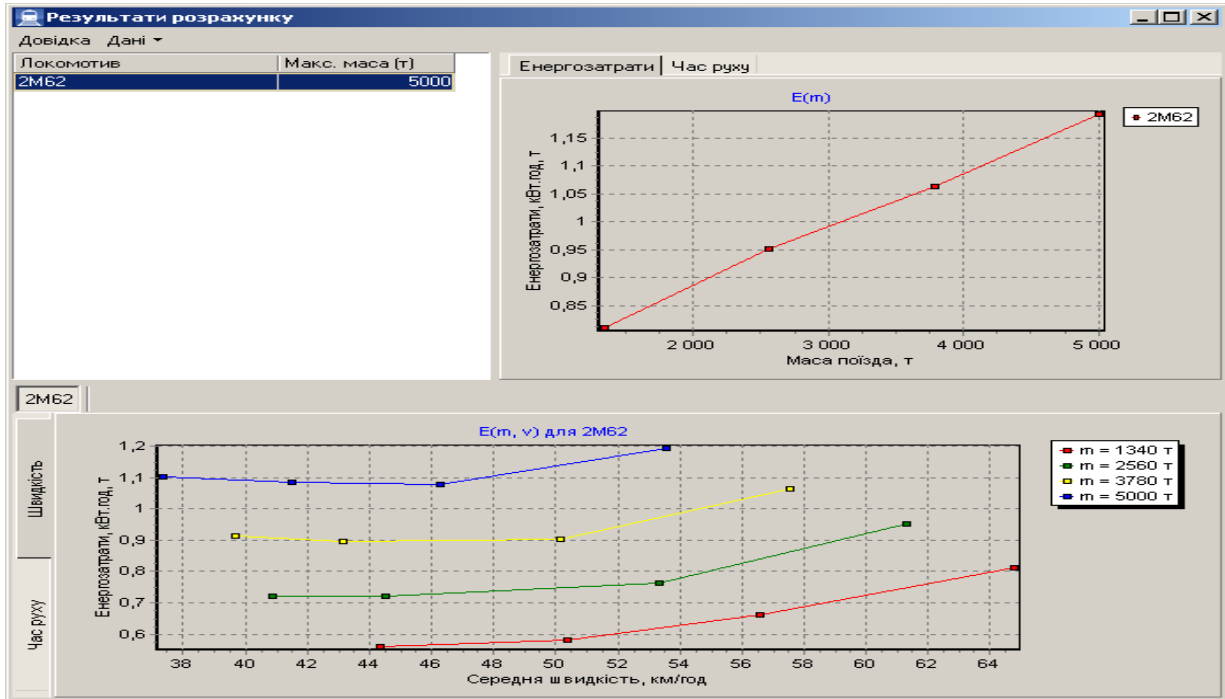


Рис. 8. Графічне представлення результатів проведених експериментів

Fig. 8. Graphical representation of the results of the experiments conducted

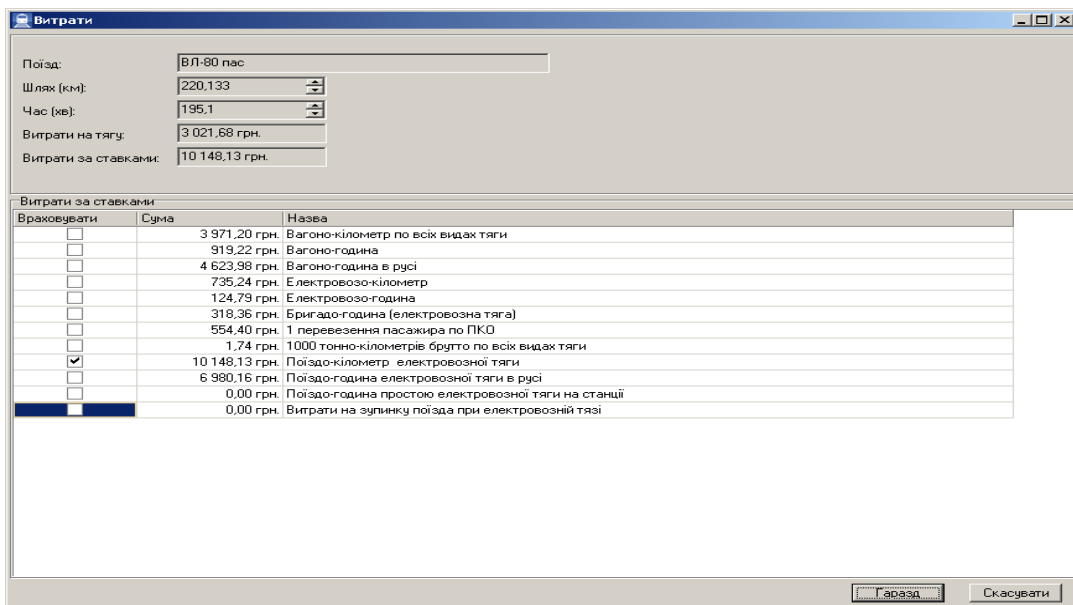


Рис. 9. Форма представлення розрахунку сумарних витрат за витратними ставками

Fig. 9. Form of presentation of calculation of total expenses at cost rates

Енергетичні витрати та витрати за ставками

Table 2

Energy costs and costs at rates

Енергетичні витрати, грн	Витрати за витратними ставками, грн	Сумарні витрати, грн	Час руху, хв
2 776,67	18 332,89	21 109,56	195
2 629,09	19 310,1	21 939,19	226
2 631,59	20 571,88	23 203,47	254

Як бачимо, сумарні витрати за ставками зі збільшенням часу руху поїзда зростають, а суми паливно-енергетичних витрат і витрати за ставками, як правило, завжди будуть зі збільшенням часу руху поїзда зростати.

Приклад 7 – характер зміни енергетичних витрат від типу тяги й часу руху. На рис.10 наведені результати розрахунку зміни енергетичних витрат для різних типів тяги як функції від заданого часу на рух, який є більшим за мінімальний.

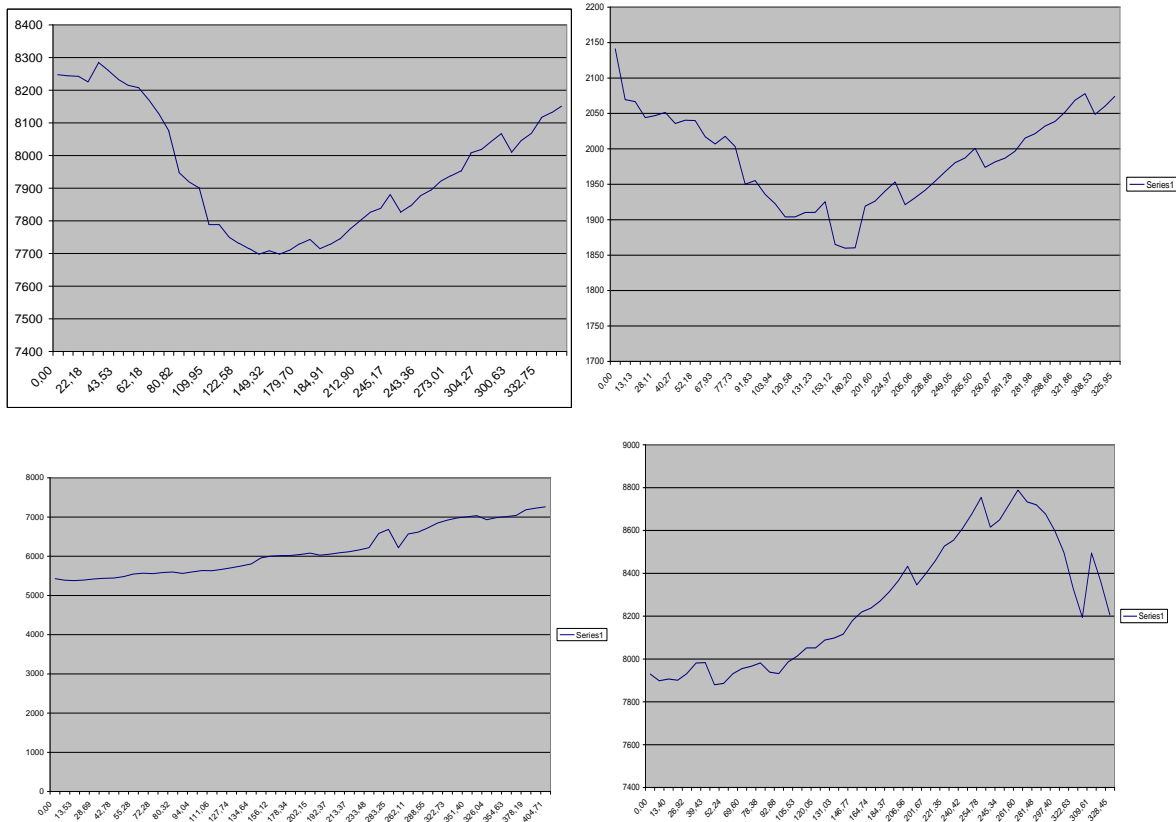


Рис. 10. Характер зміни енергетичних витрат залежно від заданого на рух часу по дільниці Івано-Франківськ – Рахів для заданих типів поїздів і локомотивів: вантажний, 2М62; вантажний, ВЛ-11; вантажний, ВЛ-80, 3 000 т; вантажний, 2М62

Fig. 10. Nature of the change in energy costs depending on the defined time for the motion in the Ivano-Frankivsk-Rakhiv section for the specified types of trains and locomotives: cargo, 2M62; cargo, VL-11; cargo, VL-80, 3000 tons; cargo, 2M62

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Як бачимо, характер залежності паливних та енергетичних величин від часу руху для різних типів тяги суттєво відрізняється. Частково на такий характер залежності вплинув наявний план і профіль траєкторії руху.

Приклад 8 – використання для системи проектування й модернізації колії. Запропоновано алгоритм розрахунку обмежень швидкостей на незаданих інтервалах траєкторії руху за заданого часу на рух і визначення прийнятності проєктованих радіусів кривих за розрахованими швидкостями руху й необхідне для цього підвищення зовнішньої рейки в кривій і довжину перехідної кривої з урахуванням допустимого непогашеного прискорення. Указавши допустиме значення непогашеного прискорення, можна отримати інформацію про прийнятність радіуса кожної кривої. Якщо запроєктовані радіуси будуть неприйнятними, користувач отримує зручну форму для вибору параметрів кривої (радіус кривої, підвищення зовнішньої рейки або допустиму швидкість). Користувачеві потрібно буде вказати, які параметри є незмінними (фіксованими), а система запропонує решту параметрів автоматично.

Для розрахунку значення непогашеного прискорення використана формула [4]:

$$\tau_k = \frac{v^2}{13R} - \frac{h}{s_k} g [\text{м/сек}^2].$$

Довжина перехідної кривої повинна задовольняти наступні умови:

– $l_0 \geq \frac{h}{i}$, обмеження на ухил зовнішньої рейки, мм;

– $l_0 \geq \frac{h v_{max}}{f}$, обмеження на швидкість підйому колеса на підвищення зовнішньої рейки, м/сек²;

– $l_0 \geq 0.56 v_{max}$, обмеження на швидкість збільшення непогашеного прискорення, м/сек²;

– $l_0 \geq 0.08 \frac{v_{max}^3}{R}$, обмеження на удар об зовнішню рейку гребеня першої осі;

– $l_0 \geq 10 \sqrt{\frac{h^3 R}{1000^3}}$, обмеження на величину непогашеного прискорення;

– $l_0 \geq 0.7 \sqrt{R}$, обмеження, яке впливає з можливості практичної розбивки кривої на місцевості.

Тут h , v_{max} , R – відповідно висота підняття зовнішньої рейки, мм; максимально допустима швидкість у кривій (м/сек²) й радіус кривої, м. Нормативні величини i та f – ухил зовнішньої рейки та найбільша допустима швидкість підйому колеса по зовнішній рейці. Для кожної кривої цієї дільниці система обчислить мінімальну довжину перехідної кривої. При цьому користувач зможе налаштувати, які із заданих шести обмежень враховувати. Також користувач зможе редагувати значення нормативних констант, які входять у формули.

Процес встановлення обмежень на максимальну швидкість на певних ділянках, проведення тягово-енергетичних розрахунків за заданим критерієм та автоматична оцінка затрат на можливі ремонтні роботи дають можливість з'ясувати мінімальні ресурси для забезпечення заданої швидкості на заданому перегоні для заданого набору поїздів.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропонована постановка задачі розрахунку режимів ведення поїздів як задача оптимального керування. Розроблено алгоритм мінімальної складності, який забезпечив ефективне розв'язання прямих та обернених нелінійних оптимізаційних задач у всій галузі їх паливних, енергетичних і тягових характеристик. Це забезпечило автоматизацію процесу розв'язування великого набору прямих та обернених режимних, із різними критеріями оптимальності, задач. Розроблено програмний комплекс, який пройшов апробацію в процесі розрахунку основних складових для формування графіків руху, вибору оптимальних параметрів реконструкції полотна й формування режимних параметрів руху нових швидкісних поїздів.

Висновки

Запропонована модель та алгоритмічне забезпечення дають можливість урахувати сумарний вплив на екстремальні параметри руху поїздів різних факторів: зміну коефіцієнта (за-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

лежить від багатьох зовнішніх факторів) зчеплення коліс локомотива з колійним полотном; силу й напрямку вітру; температуру повітря; відхилення напруги в контактних мережах від номінальних характеристик; коефіцієнт технічного стану локомотива за тягою; зміну радіусу тягових коліс тощо.

Кожна задача оптимізації вимагає певного ресурсу (часового, можливості вибору локомотива із заданої множини локомотивів, корегування маси поїздів, вибору траєкторії руху між заданими роздільними пунктами, можливості встановлювати чи коригувати обмеження за швидкістю на певних ділянках тощо), ефективне використання якого забезпечує мінімізацію витрат на переміщення між двома роздільними пунктами.

Більшість задач оптимізації можна звести до ефективного використання наявного часового ресурсу. Для цього необхідно ефективно використати кінетичну енергію руху поїздів і мінімізувати затрати на перехідні режими способом їх зменшення за кількістю й величиною. Для розв'язання задач оптимізації (прямих та обернених) основна увага була приділена центральній задачі – оптимізація за заданих умов на часовий ресурс.

Для розробленого алгоритмічного й програмного забезпечення характерно:

– математична модель тягових засобів є максимально повною – використана повна множина тягових, струмових, енерговитратних,

теплових, опірних характеристик для всіх типів приводів і вагонів, а також розподілена маса вздовж довжини поїзда, яка прив'язана до центру мас тягових засобів і вагонів;

– врахований вплив основних зовнішніх факторів – температури повітря, сил зустрічного вітру, підвагонних генераторів тощо;

– для розрахунків застосована траєкторія руху поїздів без її спрямлення;

– усі задачі поставлені як задачі оптимального керування;

– запропоноване алгоритмічне забезпечення дозволило поставити й розв'язати достатньо повний набір прямих та обернених задач оптимізації;

– забезпечена повна автоматизація задання вхідних даних і процесу розв'язування поставлених задач;

– створені засоби для проведення числових експериментів та порівняльного аналізу результатів;

– усі задачі можуть бути розв'язані в оптимізаційній постановці за паливно-енергетичними ресурсами без додаткових умов;

– алгоритмічне забезпечення дозволяє розв'язати оптимізаційні задачі з додатковими умовами і врахуванням усіх суттєвих технологічних обмежень;

– розроблена ефективна система графічного й табличного представлення результатів розв'язування задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – Москва: Высш. шк., 2003. – 615 с.
2. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасьев, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. doi: 10.15802/stp2015/55359
3. Кульбашна, Н. І. Нові підходи щодо складання раціональних режимів водіння рухомого складу по маршрутах / Н. І. Кульбашна, А. Г. Тарновецька, О. І. Балас // Проблеми та перспективи розвитку техн. засобів трансп. та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (1.10–3.10.2014) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – С. 84–85.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва: Транспорт, 1985. – 289 с.
5. Пригула, М. Г. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів / М. Г. Пригула, Р. Р. Шпакович // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології : наук. зб. – Львів, 2007. – Вип. 5. – С. 139–145.
6. Сорока, К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106. doi: 10.15802/stp2015/46056
7. Сорока, К. О. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії / К. О. Сорока, Т. П. Павленко, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 77–91. doi: 10.15802/stp2017/104360

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model / A. Capasso, R. Lamedica, F. M. Gatta [et al.] // Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (22.06–24.06.2016) : Conf. Paper. – Anacapri, Italy, 2016. – P. 665–670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929
9. Wang, P. Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations: doctoral thesis [Електронний ресурс] / Pengling Wang ; Delft University of Technology. – Delft, 2017. – 197 p. – Режим доступу: <http://clc.am/2oMizA> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.12.2018.
10. Haahr, J. T. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points / J. T. Haahr, D. Pisinger, M. Sabbaghian // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2017. – Vol. 99. – P. 167–182. doi: 10.1016/j.trb.2016.12.016
11. Scheepmaker, G. M. Review of energy efficient train control and timetabling / G. M. Scheepmaker, R. M. P. Goverde, L. G. Kroon // European Journal of Operational Research. – 2017. – Vol. 257. – Iss. 2. – P. 355–376. doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044
12. The key principles of optimal train control – Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points / Amie Albrecht, Phil Howlett, Peter Pudney, Xuan Vu, Peng Zhou // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2016. – Vol. 94. – P. 482–508. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023
13. The key principles of optimal train control – Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques / Amie Albrecht, Phil Howlett, Peter Pudney, Xuan Vu, Peng Zhou // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2016. – Vol. 94. – P. 509–538. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.024
14. Ye, H. Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control / Hongbo Ye, Ronghui Liu // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2017. – Vol. 82. – P. 102–123. doi: 10.1016/j.trc.2017.06.011

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, А. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математического моделирования НАНУ, ул. Дудаева, 15, Львов, Украина, 97053, тел. +38 (032) 261 18 85, эл. почта myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}ГП «Проектно-конструкторское технологическое бюро по автоматизации систем управления на железнодорожном транспорте Украины», ул. Жилинская, 97, Киев, Украина, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82, эл. почта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Цель. Работа предусматривает разработку алгоритмического обеспечения для моделирования и оптимизации режимов движения поездов. **Методика.** Для описания процесса движения поезда в пространственных координатах с распределенной массой вдоль траектории движения предложена системная модель. Она учитывает тяговые и опорные параметры и их изменение в зависимости от внешних и внутренних факторов. Для численного интегрирования модели системы использован метод конечных разностей. Кроме этого, разработаны итерационные процедуры для удовлетворения краевых условий, формирования последовательности из режимов тяги, торможения и холостого хода с соответствующими параметрами, чтобы обеспечить выполнение критерия оптимальности движения и технических ограничений с достаточной точностью. Критерий оптимальности включает топливно-энергетические ресурсы, частоту смены режимов работы тяговых средств (существенно влияет на износ приводов), затратные ставки и тому подобное. **Результаты.** Разработанное алгоритмическое, программное и информационное обеспечение позволило проведение: расчетов режимов ведения произвольных поездов, в том числе нормативных, для формирования графиков движения, расчет между поездными и станционными интервалами, исследование влияния экстремальных параметров поездов на режимы их ведения. В системе предусмотрена возможность адаптации параметров модели движения поезда по результатам исследовательских поездок. **Научная новизна.** В работе предложена постановка расчета режимов ведения поездов как задачи оптимального управления, определён быстрый метод ее решения. Это обеспечило автоматизацию процесса решения большого набора прямых и обратных режимных, с различными критериями оптимальности, задач.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Практическая значимость. Предложенный подход к постановке и решению задач моделирования и оптимизации режимов ведения поездов прошел апробацию в процессе расчета основных составляющих для формирования графиков движения, выбора оптимальных параметров реконструкции полотна для всех, скоростных и новых, типов поездов.

Ключевые слова: тягово-энергетические расчеты; оптимальный режим; математическое обеспечение; математическая модель поезда; идентификация параметров модели; прямые и обратные задачи

М. Г. ПРЯТУЛА^{1*}, О. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Center of Mathematical Modelling NASU, Dudaev St., 15, Lviv, Ukraine, 79053, tel. +38 (032) 261 18 85, e-mail myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}SE «Design and Development Bureau of Automation of Control Systems in the Railway Transport of Ukraine», Zhylianska St., 97, Kyiv, Ukraine, 01135, tel. +38 (044) 226 24 82, e-mail sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMS FORMATION OF ENERGY-OPTIMIZED TRAINS TRAFFIC MODES

Purpose. The paper involves the development of algorithmic support for simulation and optimization of train traffic modes. **Methodology.** To describe the process of the train movement in spatial coordinates with the distributed mass along the trajectory of motion, a system model is proposed. The model takes into account traction and support parameters and their changes depending on external and internal factors. For a numerical integration of a system model, a finite-difference method is used. In addition, iterative procedures are developed to meet the boundary conditions, the formation of a sequence of traction, braking and idling modes with appropriate parameters to satisfy the criterion of optimality of traffic and technical limitations with sufficient accuracy. The criterion of optimality includes fuel and energy resources, the frequency of changes in the modes of work of traction means (significantly affect the wear of drives), cost rates, etc. **Findings.** The developed algorithmic, software and information support provided: calculation of driving modes of arbitrary, including standard ones for formation of traffic schedules, calculation of inter-station and station intervals, and research of influence of extreme parameters of trains on their modes of operation. The system provides for the adaptation of the parameters of the train model based on the results of experimental trips. **Originality.** The paper proposes the task of calculating train driving modes as a problem of optimal control and proposes a quick method for its solution. This ensured the automation of the process of solving a large set of direct and inverse modes with different optimality criteria. **Practical value.** The proposed approach to the formulation and solution of tasks of modeling and optimization of train driving modes was tested in the process of calculating the main components for the formation of traffic schedules, the selection of optimal parameters for the reconstruction of the roadbed for high-speed and new types of trains.

Key words: traction–energy calculations; optimal mode; mathematical support; mathematical model of train; identification of model parameters; direct and inverse problems

REFERENCES

1. Afanasev, V. N., Kolmanovskiy, V. B., & Nosov, V. R. (2003). *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
2. Bodnar, B. Y., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of Energy Saving Acceleration Modes of Trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. doi: 10.15802/stp2015/55359 (in Ukrainian)
3. Kulbashna, N. I., Tarnovetska, A. H., & Balas, O. I. (2014). Novi pidkhody shchodo skladannia ratsionalnykh rezhymiv vodinnia rukhomoho skladu po marshrutakh. *Proceedings of the International Conference Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii, October, 01-03, 2014*, Kharkiv. 84-85. Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. (in Ukrainian)
4. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty*. (1985). Moscow: Transport. (in Russian)
5. Prytula, M. H., & Shpakovych, R. R. (2007). Modeliuvannya ta rozrakhunok optimalnykh parametriv rukhu poizdiv. *Fizyko-matematychne modeliuvannya ta informatsiini tekhnologii*, 5, 139-145. (in Ukrainian)
6. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2015). The Content Model and the Equations of Motion of Electric Vehicle. *Science and Transport Progress*. 3(57), 97-106. doi: 10.15802/stp2015/46056 (in Ukrainian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Soroka, K. O., Pavlenko, T. P., & Lychov, D. A. (2017). System for Automatic Selection of the Speed Rate of Electric Vehicles for Reducing the Power Consumption. *Science and Transport Progress*, 3(69), 77-91. doi: 10.15802/stp2017/104360 (in Ukrainian)
8. Capasso, A., Lamedica, R., Gatta, F. M., Geri, A., Maccioni, M., Ruvio, A., ... Carones, N. (2016). Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. doi: 10.1109/speedam.2016.7525929 (in English)
9. Wang, P. (2017). *Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations: doctoral thesis*. Retrived from <http://clc.am/2oMizA> (in English)
10. Haahr, J. T., Pisinger, D., & Sabbaghian, M. (2017). A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 167-182. doi: 10.1016/j.trb.2016.12.016 (in English)
11. Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376. doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044 (in English)
12. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou, P. (2016). The key principles of optimal train control – Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 482-508. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023 (in English)
13. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou, P. (2016). The key principles of optimal train control – Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 509-538. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.024 (in English)
14. Ye, H., & Liu, R. (2017). Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82, 102-123. doi: 10.1016/j.trc.2017.06.011 (in English)

Надійшла до редколегії: 28.07.2018

Прийнята до друку: 30.11.2018