

Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів

Мирослав Притула¹, Роман Шпакович²

¹ к. ф.-м. н., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудаєва, 15, Львів, 79005, e-mail: prytula@cmm.lviv.ua

² Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудаєва, 15, Львів, 79005, e-mail: prytula@cmm.lviv.ua

У роботі запропоновано модель, методика розрахунку та принципи, на яких побудовані алгоритми визначення оптимальних параметрів руху поїзда. Розрахунки параметрів руху поїзда проведені із врахуванням розподіленої маси вздовж його довжини. Наведено результати числових експериментів. Зроблено порівняльний аналіз впливу режимних параметрів руху поїзда на його енергетичні затрати.

Ключові слова: модель руху, керування рухом, критерії оптимального керування.

Вступ. Для переміщення пасажирів і вантажів дорогами Укрзалізниці задіяна значна кількість одиниць рухомого складу, які перебувають у процесі руху на мережі доріг залізниці або обслуговування на станціях. Такі перевезення вимагають великих затрат. Для економії енергоресурсів необхідно оптимізувати організацію вагонопотоків, як у часі, так і за напрямками руху. Це вимагає розв'язання цілого комплексу взаємопов'язаних задач. Базовою задачею такого комплексу є розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів.

Реальні вимірювання енергетичних затрат показують, що потенціал для оптимізації, у багатьох випадках, складає до 20% від затрат енергоресурсів (це стосується однотипних поїздів, перевезень на одному і тому ж перегоні та при рівності часу на переміщення). Ефективність оптимізації може зрости, якщо розрахунки параметрів руху поїздів проводити з метою вдосконалення графіків руху поїздів. Це зумовлено тим, що при формуванні графіку руху поїзда стає відомим час, який затрачається на переміщення поїзда і він може виявитися дещо більшим від часу, попередньо розрахованого на графік. Це можна використати для формування економнішого режиму. Вказані розрахунки використовують і для знаходження параметрів надійності руху поїздів, до яких, зокрема, належать мінімальні міжпоїздні та станційні часові інтервали між рухомими поїздами. У підсумку такі розрахунки дозволяють максимізувати пропускну здатність доріг залізниці.

1. Постановка задачі

Параметри руху поїзда \vec{v} , \vec{F}_m , \vec{B} — швидкість руху, сила тяги та гальмівна сила задовольняють рівняння [1, 2]

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

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 , \vec{B} — тягова та гальмівна сили; Q — вага вагонів; P — вага локомотива; τ_0 — різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря; τ_∞ , T — значення теплових параметрів, що залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун; T_m — максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів; η — коефіцієнт обертових мас поїзда; $\vec{W}_k = \vec{F}_{on} + \vec{F}_{ood}(i_k, R, T_p, V_b, n)$, де \vec{F}_{ood} — сила додаткового опору, яка залежить від ухилу i_k , радіуса кривизни R траєкторії переміщення, температури повітря T_p , швидкості зустрічного вітру V_b , кількості увімкнених підвагонних генераторів n ; t — час.

Поїзд — це упорядкований набір $(l_1, \dots, l_j, d_1, d_2, \dots, d_k)$ однотипних локомотивів l_i ($i=1, j$) і вагонів d_i ($i=1, k$). Порядок розміщення локомотивів у поїзді може бути різним. Локомотиви є різних типів. Тип локомотива визначається такими 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 та дизель-поїздів), затратами електроенергії на внутрішні потреби E_{0j} , коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками дороги ψ_j .

Основний опір рухові локомотива у режимі тяги визначається емпіричною формулою

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

опір рухові у 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, які залежать від типів локомотива та колії (ланкова чи безстикова).

Коефіцієнт зчеплення ψ коліс із рейками обмежує максимальну силу тяги локомотива ($F_{\max} \leq \psi(v, R)P$). Цей коефіцієнт визначається типом локомотива.

Привід кожного локомотива має набір із n_j позицій $\{p_{jk}, k=1, n_j\}$. Для кожної позиції відомі інтервали її дії за: швидкістю, силою тяги $\vec{F}_{mj}(p_{jk}, v)$, струмом $I_j(p_{jk}, v)$. Для вказаних позицій є відомими теплові характеристики двигунів: температура перегріву $\tau_{\infty j}(p_{jk}, v)$ та тепла 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 із гідравлічною передачею, моторних вагонів дизель-поїздів із гідравлічною передачею).

Тягові характеристики локомотивів обмежуються ресурсами та надійністю роботи, для тепловозів — конструктивною швидкістю та параметрами дизеля, тягової передачі, зчеплення; для електровозів — конструктивною швидкістю та параметрами тягових двигунів, зчеплення.

Вагони характеризуються типом, масою m_j , типом гальмівних колодок, габаритами, довжиною, масою тари, кількістю осей, силою натиску колодок на бандаж.

Основний опір руху вагонів на ланковій і безстиковій коліях визначається такою емпіричною формулою

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

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

Сили, які протидіють рухові. Розрізняють основний і додатковий опір рухові. За основний опір приймають опір, який діє на поїзд під час руху вздовж прямого горизонтального шляху з рівномірною швидкістю за нормальних метеорологічних умов. Для локомотива розрізняють ще опори руху в режимі тяги та за відсутності тяги. До основного опору входять також опори внаслідок: тертя між шийками осей і підшипниками, кочення коліс рейками, ударів коліс до стиків рейок, повітряного середовища. До додаткових відносять опори внаслідок: підйому, кривизни траєкторії, зміни метеорологічних умов, підвагонних генераторів, рушання з місця.

Сила опору рухові обчислюється за формулою

$$W = (W' + W'') K_{нт} K_e + W_i + W_r + W_{nc} + W_{руш}, \quad (3)$$

де W' та W'' — основні опори локомотивів та вагонів відповідно; $K_{нт}$ та K_e — коефіцієнти опору внаслідок низької температури та наявності вітру (залежать від температури, густини повітря, швидкостей вітру та руху поїзда); W_i — опір від ухилу ($W_i = \pm img$, де $\pm i$ — значення ухилу ділянки руху в проміле (‰), m — маса вагона (локомотива)); W_r — опір, зумовлений кривизною траєкторії; W_{nc} — опір від підвагонних генераторів; $W_{руш}$ — опір при рушанні з місця.

Для усіх типів вагонів (локомотивів) записані емпіричні залежності, які дозволяють визначати основну та додаткову сили опору рухові. При розрахунках приймають, що всі сили, які діють на вагон чи локомотив, зосереджені в його центрі мас. Координати центра мас дають можливість ідентифікувати місцерозташування вагона чи локомотива на траєкторії руху.

Траєкторія руху поїзда складається з послідовності лінійних і криволінійних елементів. Лінійні елементи визначаються ухилом і довжиною, криволінійні — довжиною та радіусом кривизни. Вздовж траєкторії руху задається максимально допустима швидкість руху $v_m(s)$.

Керування рухом поїзда здійснюється чергуванням режимів тяги, холостого ходу та гальмування. Режим тяги може реалізовуватися за різних тягових позицій. Режим гальмування визначається величиною гальмівної сили, яка залежить від сумарної сили натиску гальмівних колодок до бандажів коліс або до дисків, встановлених на осях. Гальмівна сила виникає ще в процесі переведення тягових електродвигунів у генератори струму (електричне гальмування). Такий спосіб гальмування використовується з рекуперацією (поверненням електроенергії у мережу) та роботою тягових електродвигунів на опір рухові (реостатне гальмування). Повна гальмівна сила поїзда є такою

$$B_G(v) = \sum \varphi_k(K_j, v) K_j k_j,$$

де φ_k — коефіцієнт тертя гальмівних колодок; K_j — сила натиску гальмівних колодок на бандаж.

2. Метод розв'язування задачі

Задача. Для обраного поїзда та для кожної точки траєкторії руху на заданому перегоні знайти таку позицію приводу p_{jk} або гальмівну силу B_G , при яких би виконувалися умова (2) та один із критеріїв оптимальності управління рухом.

Подамо рівняння (1) у вигляді

$$\frac{dv}{dt} = \varphi(s, v), \quad (4)$$

звідки

$$ds = \frac{v dv}{\varphi(s, v)}. \quad (5)$$

Траєкторію $[s_0, s_n]$ руху поїзда поділимо на n інтервалів $[s_{i-1}, s_i]$ $i=\overline{1, n}$. Центр мас кожного локомотива та вагона належить одному з інтервалів $[s_{i-1}, s_i]$ $i=\overline{1, n}$. Тому сили опору рухові, які діють на вагон чи локомотив, будуть залежати в кожен момент часу від їх розміщення на шляху руху. Функція $\varphi(s, v)$ на малому інтервалі шляху $[s_{i-1}, s_i]$ є слабозмінною і тому можна прийняти, що на цьому інтервалі $\varphi(s, v)$ є незмінною величиною, рівною $\varphi_{i-1}(s_{i-1}, v_i)$.

Після інтегрування рівняння (5) отримаємо

$$s_i - s_{i-1} = \frac{v_{i-1}^2 - v_i^2}{2\varphi_{i-1}(s_{i-1}, v_{i-1})},$$

звідки

$$v_i = \sqrt{v_{i-1}^2 - 2\varphi_{i-1}(s_{i-1}, v_{i-1})(s_i - s_{i-1})}.$$

Тоді час проходження поїздом інтервалу шляху $[s_{i-1}, s_i]$ визначається такою формулою

$$t_i = t_{i-1} + 2(s_i - s_{i-1}) / (v_{i-1} + v_i).$$

3. Критерії оптимального управління рухом поїзда

Управління рухом поїзда полягає в зміні режимів руху та його параметрів у часі в допустимих межах, при якому реалізується певна ціль. У більшості практичних випадків потрібно знайти управління, яке забезпечить одну з таких цілей

- рух за мінімальний час;
- мінімальне значення енергетичних затрат $E(v) = \int_0^t [I(v, K, S), G(v, K, S)] dt$, t — час руху;
- мінімальне значення $E(v)$ на інтервалі часу t ($t \in [t_{\min}, t_g]$), де t_{\min} — мінімальний час, затрачений на переміщення між станціями одного перегону, t_g — час, який отримується при розв'язуванні задач, пов'язаних із побудовою графіків руху;
- мінімальне значення $z(v, t) = E(v) + P(t)$, де $P(t)$ — монотонно зростаюча функція експлуатаційних затрат від часу.

В основу алгоритмів розв'язування задач управління закладено:

- максимальне використання інерції руху та холостого ходу;
- мінімальне використання гальмівної сили та частоти зміни режимів руху;
- забезпечення режиму тяги мінімальною тяговою силою.

Мінімізація часу руху поїзда досягається:

- режимом тяги на максимальній силовій позиції, яку допускають обмеження на зчеплення;
- режимом гальмування за максимально допустимої сили натиску гальмівних колодок;
- формуванням траєкторії руху якомога ближче до верхнього обмеження за швидкістю.

Зменшення енергетичних затрат за час, який більший від мінімального, забезпечується:

- корегуванням максимального обмеження за швидкістю у напрямку зменшення;
- мінімізацією кількості переходів з одного режиму в інший;
- використанням режиму гальмування при якомога меншій швидкості;
- використанням мінімальних силових позицій у режимі тяги.

4. Вплив режимних параметрів на затрати електроенергії.

Аналіз результатів розрахунків

Для прикладу розглянемо розрахунок режимних параметрів руху вантажного поїзда, локомотив ВЛ-80к якого тягне 57 вагонів загальною масою 1438 т від Здолбунова до Ківерців. Довжина шляху дорівнює 81,130 км. Кількість зупинок на проміжних станціях — 4. Результати розрахунків наведено у таблиці.

Пояснення до таблиці. Зміна частоти тягових позицій пов'язана з величиною інтервалу, в межах якого може мінятися швидкість руху поїзда. Зміна тягової позиції

Зміна частоти тягових позицій

	без зупинок			із зупинками		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Інт. зміни швидкості руху в % від верхнього обмеження на швидкість	5%	10%	15%	5%	10%	15%
час ходу (хв)	73,39	74,48	75,86	76,85	77,89	79,14
E (кВт.год)	2770,5	2768,7	2734,4	3005,0	2991,6	2936,2

Використання гальм при заданій швидкості V

	без зупинок			із зупинками		
	60	40	20	60	40	20
V гальм. (км/год)	60	40	20	60	40	20
час ходу (хв)	75,18	77,02	79,60	78,99	82,92	89,34
E (кВт.год)	2655,7	2594,9	2607,4	2746,1	2603,6	2563,3

Зменшення верхніх обмежень на швидкість

	без зупинок			із зупинками		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
додатковий час ходу	5%	10%	15%	5%	10%	15%
час ходу (хв)	78,20	81,92	85,65	81,78	85,68	89,57
E (кВт.год)	2612,7	2570,6	2540,9	2786,4	2740,0	2693,5

проходить при досягненні швидкості руху однієї з меж. Чим більший вказаний інтервал, тим меншою є частота зміни позицій і більшим є час руху поїзда. Збільшення частоти зміни позицій приводить до пришвидшення зношеності двигунів. У реальних умовах експлуатації локомотивів потрібно вибирати між виграшем у часі, затратах на рух і швидкістю зношення тягових двигунів.

Для ефективнішого використання інерції руху, процес гальмування бажано починати з якомога меншої швидкості. Це дозволяє зменшити енергетичні затрати на рух.

Якщо запас часу достатній, то за необхідності можна дозволену максимальну швидкість руху зменшувати. Зменшення верхніх обмежень на швидкість дозволяє суттєво зменшити кількість перехідних режимів і таким чином зменшити енергетичні затрати на рух.

Розрахунки показали, що:

- зміна режимних параметрів має суттєвіший вплив у випадку руху поїзда із зупинками;
- максимально повне використання інерції поїзда дає значний ефект економії енергії при незначному збільшенні часу руху;
- зміна параметрів усіх розглянутих чинників, які збільшують час руху, однак дають економію енергетичних затрат.

Висновки. Запропоновано алгоритм для розрахунку параметрів руху поїзда та підходи до його оптимізації. Проведено їх апробацію на замірних даних і показано незначну відмінність між обчисленими та реальними режимами руху. Обчислений час руху поїзда та замірний, у більшості випадків, співпадали з точністю до одного відсотка. Незначне неспівпадіння замірних і обчислених величин щодо затрат електроенергії чи палива пояснюється неможливістю з високою точністю відтворити реальний алгоритм керування рухом поїзда, що зумовлене тим, що досить часто за одних і тих же умов може реалізуватися різне керування.

Література

- [1] Деев В. В., Ильин Г. А., Афонин Г. С. Тяга поездов. — М.: Транспорт, 1987. — 264 с.
- [2] Шпакович Р. Р., Пасічник О. А., Притула М. Г. Задачі керування рухом з регульованим тертям // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник НУ «Львівська політехніка». — 2005. — № 543. — С. 189-195.

Modelling and Calculating Train's Safe Motion Parameters

Myroslav Prytula, Roman Shpakovych

A model, calculation method and principles, which calculation algorithms for optimum parameters of train motion are built on, are presented in the work. The calculations of train motion parameters are realized with taking into account the distributed mass along train length. The results of numerical experiments are presented. The comparative analysis of influence of train motion regime parameters on its power expenses is performed.

Моделирование и расчет оптимальных параметров движения поездов

Мирослав Притула, Роман Шпакович

В работе предложена модель, метод расчета и принципы, на которых построены алгоритмы расчета оптимальных параметров движения поезда. Расчеты параметров движения поезда проведены с учетом распределенной массы вдоль ее длины. Приведены результаты численных экспериментов. Проведен сравнительный анализ влияния режимных параметров движения поезда на его энергетические затраты.

Отримано 05.10.06