

ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ РУХОМ З РЕГУЛЬОВАНИМ ТЕРТЯМ

© Шпакович Р., Притула Н., Притула М., Пасічник О., 2005

Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для проведення тягово-енергетичних розрахунків з можливостями ідентифікації окремих параметрів і адаптації моделі поїзда та його складових, а також стратегію оптимального керування рухом.

Algorithmic and software support is developed for conducting of hauling-power calculations with possibilities of identification of separate parameters and adaptation of model of train and its constituents. Furthermore the strategy of optimum traffic control is developed.

Вступ

Для всіх видів транспорту актуальними є задачі керування їх рухом. Для цього передбачено силу тяги із змінною величиною залежно від швидкості переміщення і величини опору руху, а також зміну сили опору руху за допомогою зміни гальмівної сили (рух з регульованим тертям). Ці задачі мають особливе значення і для залізничного транспорту, що підтверджено тим, що цей клас задач виділено в окрему дисципліну – тягові розрахунки. Основні задачі тягових розрахунків такі:

- розрахунок мінімального часу руху між двома станціями;
- розрахунок часу на розгін і зупинку руху;
- розрахунок втрат часу на рух при введенні на певних ділянках дороги обмежень за швидкістю;
- розрахунок затрат палива та електроенергії.

Алгоритми розв'язування вказаних задач повинні бути такими, щоб вони забезпечили переміщення поїзда з мінімальними затратами палива чи електроенергії. Під час руху поїзду впродовж мінімального часу особливих резервів для економії немає. В цьому випадку за формування оптимальної траєкторії руху потрібно максимізувати використання інерційної сили руху. Результати тягових розрахунків є вихідними для побудови графіків руху. В процесі формування графіків руху виявляється, що рух за мінімальний час потрібен не на всіх перегонах. Це пов'язано з тим, що на одних напрямках потрібно максимально ефективно використати пропускну здатність перегонів, на інших перегонах є її надлишок. Найшвидше доставити вантаж не завжди може бути основним критерієм оптимальності руху. Часто на перший план виходить критерій економічний – перемістити поїзд із однієї станції до іншої за мінімальну вартість на заданому інтервалі часу.

У процесі розрахунку параметрів переміщення в просторових координатах поїзда із врахуванням його довжини, розподіленої маси вздовж поїзду виникає клас таких задач: обробка даних вимірювання для задач ідентифікації стану рухомого складу і уточнення адекватності моделей; розрахунок параметрів руху, зокрема затратних величин як функцій часу, швидкості і переміщення; оптимального керування рухом за критерієм мінімальних енергетичних затрат як функцій часу, що перевищує мінімальний час на переміщення; аналізу та інтерпретації результатів розрахунку. При цьому треба враховувати певний рівень невизначеності (невідповідності) параметрів, які входять в моделі процесів тяги, опору руху, стану об'єктів. Крім цього, існує значна кількість випадкових і багатofакторних впливів, які впливають на режим тяги і руху поїздів.

Огляд літератури

Основи теорії тяги поїздів закладено ще в кінці XIX століття. Із розвитком теорії тяги вдосконалювалися спеціальні тягово-енергетичні випробовування локомотивів, вагонів. На основі цього формувалися певні нормативи, які використовували до тягових розрахунків. Перші правила тягових розрахунків опубліковано ще у 1917р. У процесі розвитку теорії тяги, математичних моделей, методів їх розв'язування постійно змінювалися нормативи і правила тягових розрахунків. Результати досліджень викладено у численних монографіях і статтях [1, 2]. У цих роботах робилося суттєве припущення, що механічний рух поїзда можна описати як рух матеріальної точки з одним ступенем вільності. За умови значної довжини поїздів та значних змін плану і профілю дороги таке припущення вносить істотну похибку. Поряд з розробкою проблем тяги виникли проблеми оптимізації руху поїзда. Історія розвитку підходів до цієї проблеми пов'язана зі зміною того, що потрібно оптимізувати. Донедавна основною проблемою було максимальне використання пропускної здатності перегонів, для чого потрібно було за мінімальний час провести поїзд максимальної ваги. У сучасних умовах на перший план висуваються економічні показники – собівартість перевезень. Теорія керування для оптимізації системи (оптимального керування рухом) інтенсивно розвивається, починаючи з 50-х років минулого століття [3–5], але ці розробки не було реалізовано такою мірою, щоб ефективно використовувати їх для практичних потреб. Запропонований в роботі підхід реалізовано та апробовано на реальних вхідних даних. Останні роки є актуальними задачі керування рухом[6].

Задача керування рухом поїзда належить до класу задач керування рухом з регульованим тертям. Для її розв'язання часто використовують принцип максимуму Понтрягіна. В нашому випадку застосовувати відомі підходи проблематично, оскільки всі основні параметри системи та велика кількість обмежень є нелінійними функціями і частина з них є залежною від самого розв'язку. Критерії оптимальності є багатопараметричними і взаємозалежними і можуть суттєво змінюватися. Тому алгоритми оптимізації повинні просто адаптуватися до зміни параметрів оптимізації. До керованих параметрів віднесено не тільки систему регулювання швидкості, але й обмеження за частотою зміни стану локомотива.

1. Основні сили, які діють на поїзд

1.1. Сила тяги локомотива. Кожен локомотив можна розглядати як перетворювач підведеної до нього енергії у зовнішню роботу сили тяги. Із врахуванням стадій перетворення енергії для них встановлено такі поняття про силу тяги:

- для електровозів постійного струму: за тяговими електродвигунами, зчепленням рухомих колісних пар з рейками, а для електровозів змінного струму – ще за випрямлювальною установкою;
- для тепловозів: за дизелем, передаванням і зчепленням.

Крім наведеної класифікації, розрізняють ще такі поняття про силу тяги локомотива, які відповідають точкам її прикладення: а) індикаторна F_i (для електровозів – електромагнітна сила тяги F_{ct}); б) сила тяги на ободі колеса (дотична) F_d ; в) корисна, на зчепці локомотива F_k ; г) динамометрична F_{dmt} . Для тягових розрахунків прийнято користуватись тільки дотичною силою тяги.

1.2. Сили опору руху. Розрізняють основний опір і сили опору, які діють тимчасово – додатковий опір. За основний опір приймають опір, який діє на поїзд під час руху прямим горизонтальним шляхом з рівномірною швидкістю за нормальних метеорологічних умов. Розрізняють два види опору локомотива: у режимі тяги та за її відсутності. Існують такі додаткові

опори: від підйому, від кривої, від зміни метеорологічних умов, під час руху з місця, від підвагонних генераторів.

До основного опору входять опори від тертя між шийками осей і підшипниками, опір від кочення коліс по рейках, опір від ударів коліс до стиків рейок, опір від повітряного середовища.

1.3. Гальмівні сили. Гальмівні сили виникають внаслідок: притискання гальмівних колодок до бандажів коліс або до дисків, встановлених на осях; переведення тягових електродвигунів в генератори струму (електричне гальмування).

Останній спосіб використовують у двох варіантах: з рекуперацією і роботою тягових електродвигунів на опір (реостатне гальмування). Повна гальмівна сила поїзда дорівнює

$$B_{\text{г}} = \sum \varphi_k K,$$

де φ_k – коефіцієнт тертя гальмівної колодки; K – сила натиску гальмівної колодки на бандаж.

Приймаючи коефіцієнт тертя середнім для всіх колодок поїзда, отримуємо

$$B_{\text{г}} = \varphi_k \left(\sum K_{\text{лок.}} + \sum K_{\text{ваг.}} \right),$$

де $\sum K_{\text{лок.}}$ – сумарна сила натиску колодок на бандаж в локомотиві; $\sum K_{\text{ваг.}}$ – сумарна сила натиску колодок на бандаж у вагонах.

2. Постановка задач

2.1. Поїзд складається із одного або декількох однотипних локомотивів, однотипних чи різнотипних, пустих чи завантажених вагонів. На поїзд діє багато різних за величиною та напрямком сил. Ми будемо розглядати тільки ті зовнішні сили чи складові, які діють на поїзд в напрямку його руху. Тоді всі діючі на поїзд зовнішні сили можна поділити на три групи: сили, які передаються від локомотива, тобто сила тяги F ; сили, які створюють опір руху рухомому складу W ; гальмівні сили B .

Вказані сили діють на поїзд не одночасно, а в одній із таких комбінацій: сили тяги і сили опору; сили опору; гальмівні сили і сили опору. Рівнодійна сил одночасної дії на поїзд, взята в напрямку його руху, визначає характер і кількісні фактори руху.

Повний опір руху поїзду W_k є сумою основного опору локомотива (W_0') і вагонів (W_0''), а також додаткового опору (який діє не постійно). Додатковий опір руху локомотива ($W_i' + W_r' + W_t'$) і руху вагона для заданої маси вантажу $W_i' + W_r' + W_t'$, де індекси i, r, t вказують на приналежність опору від ухилу, кривої і температури зовнішнього повітря, відповідно. Основний опір руху локомотива є різним в умовах тяги і неробочого ходу і залежить від типу R' , його маси m_i і швидкості руху v . Основний опір вагона залежить від тих же параметрів, тільки додається такий параметр, як маса вантажу.

Кожен тип p вагона і локомотива має довжину l . Кожен вагон ще має масу m вантажу. Опірна характеристика руху – відома функція f , тобто $W_0' (W_0'') = f(v, m, p)$, де v – швидкість руху поїзда. Кожна ділянка дороги між станціями задається в просторових координатах (x, y, z) . На всій ділянці дороги задається обмеження за швидкістю зверху, яка має вигляд кусково-лінійної функції. Модель тяги(локомотива) задається трьома дискретно-неперервними функціями:

$F_m(v, k, p)$ – силова характеристика (сила тяги), яка залежить від положення контролера k . Функції $I(v, k, p)$ або $G(v, k, p)$ – затрати енергії чи палива, пов'язані з попередньою функцією. Крім цього, розраховують температуру перегрівання (T_p) тягових двигунів і генераторів на основі значення $I(v, k, p)$ і температури зовнішнього середовища, а також значень теплових коефіцієнтів конкретних двигунів і генераторів.

Потрібно знайти такі $v = g(s), I = f(s)$, які б задовольняли рівняння руху

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \eta(F_m \pm W_k - B),$$

При цьому повинна виконуватися умова $\int_0^t (I(v, k, p), G(v, k, p)) dt \rightarrow \min$, де t – час руху.

Основні обмеження

Розв'язуючи рівняння руху, враховують обмеження на:

- швидкість руху (за станом колійного полотна, під час проведення ремонтних робіт тощо);
- величину перегрівання обмоток тягових електродвигунів; за комутацією струму;
- довжину і масу поїзда;
- міцність автотзчепок;
- тягові характеристики за ресурсами і надійністю роботи: у тепловозів – за дизелем, за тяговою передачею, за зчепленням і конструктивною швидкістю; у електровозів – за тяговими двигунами, зчепленням та конструктивною швидкістю.

Крім вказаних обмежень, ще враховують обмеження сили тяги за зчепленням. Миттєве значення сили тяги, яке розвиває рухоме колесо, не повинно перевищувати силу зчеплення з рейками чи силу тертя спокою, тобто

$$F_k \leq 1000 \psi_k P_{зч.},$$

де ψ_k – розрахунковий коефіцієнт зчеплення, який, як правило, за емпіричною формулою залежить від швидкості руху локомотива; а також на ділянках шляху з радіусом кривизни R меншим за 500 м, коефіцієнт зчеплення залежить ще і від R .

2.2. Задача керування рухом полягає в тому, щоб знайти такий варіант керування, за якого ефективність є найбільшою. До цільової функції включають, як правило, час доставки, витрату палива, приведені затрати, ступінь надійності. Керування підпорядковано цільовій функції, технології перевезення, організації руху за графіком. Ступінь досяжності цілі є мірою оптимальності керованого руху поїзда. Алгоритм оптимізації руху (з мінімальною затратою палива чи електроенергії) за час, більший за мінімальний, полягає у використанні повною мірою інерційності руху; мінімізації використання гальмівних сил (гальмувати за мінімально можливою швидкістю). Керування рухом поїзда відбувається:

- зміною режиму руху (розрізняють режими тяги, неробочого ходу, гальмування);
- зміною силової характеристики тяги (набір дискретно-неперервних функцій, які пов'язують швидкості і силові параметри);
- зміною гальмівної сили;
- використанням електричного гальмування (рекуперативного і реостатного).

Оптимальність руху поїзду виражається критерієм ефективності (цільовою функцією). Досягнення критерію ефективності обмежується умовами (ресурсом поїзда, безпекою руху, надійністю роботи локомотива і вагонів). Ефективність оцінюють за ступенем досяжності цілі.

- мінімізацією змін швидкості руху (на перехідних режимах істотно більші затрати енергії);
- корегуванням у бік зменшення обмежень за швидкістю та зменшення частоти її зміни.
- регулюванням частоти зміни силової характеристики тяги.

Ці принципи закладено в розроблений алгоритм. Виникає клас задач прийняття рішень в умовах невизначеності. Розглядають два шляхи їх розв'язання:

- ідентифікаційний, коли процес керування суміщають з добуванням недостатньої інформації для прогнозу руху і параметрів стану, зокрема обмежувальних;
- адаптивний, коли алгоритм керування формують на основі інформації про стан процесу, яка надходить каналом оберненого зв'язку.

Основні результати

Розроблено алгоритми і програмне забезпечення розрахунку прямих і обернених задач із врахуванням часу перехідних режимів. Запропонований підхід можна використати для розрахунку потоків поїздів, коли одночасно потрібно врахувати поїзну ситуацію, план і профіль дороги, сигналізацію і способи керування нею, тягові характеристики, параметри складу поїзда, стан елементів і об'єктів, які впливають на рух та переробку вагонопотоків.

Розрахункова підсистема дає змогу формувати, переглядати та редагувати базу завдань на розрахунок; проводити тягові розрахунки для вибраного завдання; аналізувати проведені розрахунки. Для формування завдання на розрахунок система дає змогу внести початкову та кінцеву координату фрагмента ділянки, для якої буде проводитись розрахунок. Крім цього, треба вказати:

- значення температури повітря та атмосферного тиску;
- кількість секцій та процент використання потужності локомотива;
- параметри поїзда – кількість та тип вагонів, загальну масу, тип підшипників та гальмівних колодок, осність вагонів;
- додаткові обмеження за швидкістю та попередженнями.

У разі використання додаткової тяги необхідно вказати тип та кількість секцій допоміжного локомотива, а також координати початку та кінця використання додаткової тяги. Для збільшення точності розрахунків до системи можна вносити повагонну модель поїзда, проводити розрахунки для поїздів, які складаються з різних типів вагонів. Потрібно ще вказати перелік станцій, на яких поїзд буде зупинятись, для кожної станції вказати проходження головною чи боковою колією.

Після формування завдання на розрахунок або зчитування його з бази даних система готова до проведення тягових розрахунків. У системі реалізовано два критерії проведення розрахунків:

- вибір такого режиму ведення поїзда, за якого досягають мінімуму часу руху поїзда;
- вибір режиму ведення поїзда, за якого мінімуму часу не досягають, але забезпечують економніше використання енергоресурсів.

Крім вибору режиму руху, система дає змогу проводити розрахунок з врахуванням чи без врахування довжини поїзда. Не враховуючи довжину поїзда, поїзд розглядають як матеріальну точку, яка рухається за вибраним планом і профілем. Враховуючи довжину поїзда, вважають, що в довільний момент часу різні частини поїзда можуть знаходитись на різних елементах профілю.

У процесі розрахунку система визначає критичні місця, де значення сили тяги не перевершує силу опору руху. Якщо такі точки на профілі існують, то користувач має змогу переглянути перелік координат, де зупинка поїзда є недопустимою.

Розроблена також система візуалізації даних і результатів розрахунку. В графічній підсистемі реалізовано розрахункові функції, за допомогою яких можна провести додаткові розрахунки та відобразити їх результати разом з основним графіком руху поїзда; розрахувати новий графік руху за умови внесення додаткових тимчасових обмежень за швидкістю. Після розрахунку система інформує про втрати часу через введене обмеження за швидкістю. Розраховуючи новий графік руху, у разі внесення додаткових зупинок в одному чи декількох роздільних пунктах, можна визначити витрати часу на розгін та гальмування. Після закінчення розрахунків крім основного графіка відображається додатковий графік руху з врахуванням додаткових зупинок. Графічна підсистема дає змогу також аналізувати та порівнювати результати двох різних розрахунків (графіків руху поїзда), тобто проаналізувати рух кількох поїздів на одній і тій самій ділянці.

Висновки

Розроблений оптимізуючий алгоритм і комплекс програм дав можливість в оперативному режимі формувати режимні карти руху поїздів, розраховувати основні параметри руху, які необхідні для формування графіків руху, розраховувати й аналізувати режими руху, зокрема й оптимальні за кількома критеріями.

1. Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П. Тяга поездов и тяговые расчеты. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с. 2. Деев В.В., Ильин Г.А., Афонин Г.С. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1987. – 264с. 3. Тяжек Д., Пешель М. Анализ и расчет нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1964. – 488с. 4. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.: Наука, 1968. – 475с. 5. Болтанский В.Г. Математические методы оптимального управления. – М.: Наука, 1966. – 307с. 6. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 2003. – 614 с.