УДК 629.4:656.222.073.21:681.3.06

М. Притула, Р. Шпакович
Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я.С.Підстригача НАН України,
ТОВ “Математичний центр”

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ ПОЇЗДА

© Притула М., Шпакович Р., 2010

Описано процес керованого руху, наявні ресурси і технічні обмеження, показники якості процесу управління, критерій оптимальності. Запропоновано математичну модель керованого руху, схему процесу адаптивного управління, а також наближений метод розв’язування задачі адаптивного управління рухом поїзда.

Ключові слова: математична модель, адаптивне управління.

This paper describes a process of controlled movement, available resources and technical limitations, indicators of quality of control process, optimality criterion. A mathematical model of controlled movement, a process of adaptive control, and approximate method of solving the problem of adaptive train control are proposed.

Keywords: adaptive train control.

Вступ

В основу розроблення систем управління рухом поїзда покладено методи моделювання, прогнозування, ідентифікації й оптимізації [1–5]. Сьогодні для організації і технології перевезень першочерговим є розрахунок параметрів тяги. Але апріорна інформація і математичне забезпечення правил тягових розрахунків не відображають реальної картини тяги і тому виявляються недостатніми для оптимізації технології тяги і організації руху поїздів. Відомо [1], що поведінку нелінійних систем в умовах невизначеності передбачають побудовою ідентифікаційних моделей на основі апостеріорної інформації і обчислювального процесу. Для розв’язування практично всіх задач, які належать до тяги поїздів, насамперед, потрібно ідентифікувати параметри моделі. Тоді ці моделі можна використовувати для оптимізації, прогнозування і керування рухом. Параметри моделі умовно можна розбити на класи: параметри моделі, параметри стану локомотива, вагонів, зовнішнього середовища. На точність ідентифікації зазначених параметрів істотно впливають: модель руху поїзда, точність заміряних даних, точність задання траєкторії руху поїзда.

Найскладнішим із перерахованих факторів є фактор оцінювання точності вимірювання електродинамічних і тягових параметрів локомотива. У багатьох випадках система метрології, яка присутня в локомотивах, не є адекватною електродинамічним процесам, які відбуваються в електричних схемах і тягових двигунах локомотивів.

У роботі запропоновано підхід до розрахунку прогнозної траєкторії швидкості руху на основі ідентифікації параметрів моделей і окремих параметрів управління в процесі його переміщення. Це дає можливість постійно адаптуватися до реальних умов експлуатації, постійно уточнювати параметри моделей як локомотивів, так і вагонів, не проводячи великої кількості дорогих досліджень за допомогою динамометричних вагонів. Запропонований алгоритм управління рухом поїзда дає можливість постійно актуалізувати інформацію про наявний реальний ресурс управління і його оптимально розподіляти протягом розрахунку всієї траєкторії швидкості руху поїзда. Розроблено і реалізовано фізичні методи оптимізації руху поїзда, які полягають у зменшенні кількості та мінімізації величини нелінійних перехідних динамічних процесів, максимальному використанні набутої кінетичної енергії, успішно апробовано і вже останні роки використовуються для формування графіків руху поїздів.

Основні поняття

Траєкторія руху поїзда складається з послідовності лінійних і криволінійних елементів. Лінійні елементи визначаються ухилом i_j і довжиною l_{nj}, криволінійні – довжиною $l_{кj}$ і радіусом кривини R_j.

Поїзд – це упорядкований набір $(l_1,..,l_j,b_1,b_2,...,b_k)$, де $l_i(i=1,...,j)$ – набір однотипних локомотивів і $b_i(i=1,...,k)$ вагонів. Порядок розміщення локомотивів в поїзді може бути різним. *Локомотиви* є різних типів**.** Тип локомотиву визначається такими параметрами: масою m_j, довжиною l_j, кількістю тягових осей k_j, силою натиску гальмівних колодок на вісь K_j, конструктивною швидкістю $v_{кj}$, витратою палива в режимі холостого ходу G_{xj} (для тепловозів та дизель-поїздів), витратою електроенергії на внутрішні потреби E_{0j}, коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками дороги ψ_j. Коефіцієнт ψ_j є різним для різних типів локомотивів.

Основний опір руху локомотиву у режимі тяги визначається емпіричною формулою:

$$W_0^{'} = m_j\left(a_j + b_j v + c_j v^2\right);$$

опір рухові у режимі холостого ходу:

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

де a_j, b_j, c_j, e_j, f_j, g_j – коефіцієнти, які залежать від типів локомотивів та колії (ланкова або безстикова), v – швидкість руху.

Характеристики тягового режиму електровоза поділяються на електромеханічні, електротягові і тягові. Електромеханічні характеристики тягових двигунів належать до валу якоря:

$$n_\partial = f_1\left(I_\partial\right); M = f_2\left(I_\partial\right); \eta_\partial = f_3\left(I_\partial\right),$$

Вони залежать від числа обертання якоря n_∂, моменту M і к.к.д. η_∂ від струму I_∂ при постійному значенні U_∂ на клемах привода.

Привід кожного локомотива має набір із n_j тягових позицій $\left\{p_{jk},\ k=\overline{1,n_j}\right\}$. Для кожної позиції відомі інтервали її дії за: швидкістю, силою тяги $F_j\left(p_{jk},v\right)$, струмом $E_j\left(p_{jk},v\right)$. Для вказаних позицій є відомими теплові характеристики двигунів: температура перегріву $\tau_{\infty j}(p_{jk},v)$ та теплова постійна $T_j(p_{jk},v)$ (для електровозів, моторних вагонів електропоїздів, тепловозів, моторних вагонів дизель-поїздів), паливні характеристики $G_j\left(p_{jk},v\right)$ (для тепловозів, тепловозів з гідравлічною передачею, моторних вагонів дизель-поїздів, моторних вагонів дизель-поїздів з гідравлічною передачею).

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

Основний опір руху вагонів ланковою і безстиковою коліями визначається емпіричними формулами такого вигляду:

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

де a_j, b_j, c_j, e_j – коефіцієнти для певного типу вагона, v – швидкість руху, q_0 – маса, яка припадає на одну вісь колісної пари.

Сили, які протидіють рухові. Розрізняють основний і додатковий опір. 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 і та за відсутності тяги. До основного опіру входять також опори

внаслідок: тертя між шийками осей і підшипниками, кочення коліс рейками, ударів коліс до стиків рейок, повітряного середовища.

До додаткових належать опори внаслідок: підйому, кривизни траєкторіїї, зміни метеорологічних умов, підвагонних генераторів, рушання з місця.

Сила опору рухові обчислюється за формулою:

$$W = \left(W' + W''\right) K_{нт} K_{в} + W_i + W_r + W_{пг} + W_{руш}, \tag{1}$$

де W' та W'' – основні опори локомотивів та вагонів відповідно, $K_{нт}$ та $K_{в}$ – коефіцієнти опору внаслідок низької температури та наявності вітру (залежать від температури, густини повітря, швидкостей вітру та руху поїзда); W_i – опір від ухилу ($W_i = \pm iM$, де $\pm i$ значення ухилу ділянки руху в промілле ($^0/_{00}$), m – маса вагона (локомотива); W_r – опір, зумовлений кривизною траєкторії ($W_r = \left(\frac{200}{R} + 1.5\tau_к\right)\frac{s_{кр}}{l_п} M$, де $R, s_{кр}$ – радіус та довжина кривої відповідно), $l_п$ – довжина поїзда, $\tau_к$ – непогашене прискорення в кривій, яке обчислюється за формулою $\tau_к = \frac{v^2}{13R} - \frac{h}{s_к} g$, де h – підвищення зовнішньої рейки, $s_к$ – відстань між кругами кочення коліс); $W_{пг}$ – опір від підвагонних генераторів; $W_{пг} = \frac{136P'}{q_0 v} M$, де P' – середня потужність підвагонного генератора; $W_{руш}$ – опір при рушанні з місця. $W_{руш} = k\frac{a}{q_0 + 7} M$, де a – коефіцієнт, який залежить від типу підшипників вагона (локомотива); k – коефіцієнт, який залежить від кількості вагонів у поїзді.

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

1. Постановка задачі

1.1. Математична модель руху поїзда

Параметри руху поїзда v, F_m, B – швидкість руху, сила тяги та гальмівна сила задовольняють рівняння [1]

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

тут Q – вага вагонів; P – вага локомотиву; η – коефіцієнт інерції обертових мас поїзду. В рівнянні (1) $W_k = F_{оп} + F_{дод.}(i_k, r, T_p, V_b, n)$, де $F_{дод}$ – додатковий опір, який залежить від ухилу i_k, радіусу кривизни траєкторії переміщення r, температури повітря T_p, швидкості зустрічного вітру V_b, кількості включених підвагонних генераторів n.

1.2. Математична модель обмежень на параметри режиму руху та управляючих дій

Основними обмеженнями на режимні параметри руху є:

а) обмеження на температуру обмоток тягових двигунів

$$\tau_\infty (1 - e^{t/T}) + \tau_0 e^{t/T} \le T_m, \tag{3}$$

де τ_0 – різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря, τ_∞, T – значення теплових параметрів, які залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун, T_m – максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів;

б) обмеження на швидкість руху вздовж траєкторії руху

$$\nu_r(s) \le v \le v_{\max}(s), \tag{4}$$

де $v_{\max}(s)$ – максимально допустима швидкість руху; $v_r(s)$ – розрахункова швидкість, яка певною мірою, забезпечує регулювання частоти зміни управляючих параметрів, а також оптимальність руху. Оптимальне обмеження знизу по швидкості можна встановити тільки в процесі проведення числового експерименту.

в) обмеження на силу тяги

$$F_{\max} \le a\psi(v,R)m\,, \tag{5}$$

де ψ – коефіцієнт зчеплення, m – маса локомотиву;

г) обмеження на частоту зміни тягових позицій;

д) обмеження на тягові характеристики.

Тягові характеристики локомотивів мають обмеження за енергоресурсами і надійністю роботи. Для тепловозів – за потужністю дизеля, тяговою передачею і конструктивною швидкістю. Для електровозів – за тяговим двигуном, зчепленням та конструктивною швидкістю.

1.3. Показники якості процесу управління, критерію оптимальності

На стан поїзда накладені обмеження за зчепленням, за потужністю і надійністю локомотиву, за безпекою руху поїзда. При виборі кроку інтегрування рівняння руху потрібно вибрати такі фазові координати стану поїзда в кінці кроку, які б не виходили за межі гранично допустимих параметрів і забезпечували оптимальний розв'язок згідно з критерієм оптимальності тяги.

У більшості практичних випадків потрібно знайти керування, яке забезпечить:

а) рух поїзда за мінімальний час $t_{\min}$;

б) мінімальне значення енергетичних затрат

$$E(t)\text{, де } E(t)=\int_0^t (I(v,K,S),G(v,K,S))dt\,, \tag{6}$$

де t – час руху за графіком;

в) мінімальне значення $E(t)$ на інтервалі часу $[0,t]$ $(t\in\left[t_{\min},t_g\right])$, де $t_{\min}$ – мінімальний час на переміщення між станціями одного перегону, t_g – час руху згідно з графіком.

г) мінімальне значення $z(v,t)$, де $z(v,t)=E(v)+P(t)$, $P(t)$ – функція експлуатаційних затрат.

1.4. Керівні дії, закони управління

Управління рухом поїзду здійснюється чергуванням режимів тяги, холостого ходу і гальмування. Режим тяги може відбуватися при різних тягових позиціях. Режим гальмування залежить від величини гальмівної сила, яка, своєю чергою, залежить від сумарної сили натиску гальмівних колодок на бандажі коліс або до дисків, встановлених на осях. Гальмівна сила породжується ще в процесі переведення тягових електродвигунів у генератори струму (електричне гальмування). Останній спосіб гальмування використовують у двох варіантах: з рекуперацією (поверненням електроенергії в мережу) і роботою тягових електродвигунів на опір рухові (реостатне гальмування). Повна гальмівна сила поїзда дорівнює

$$B_\Gamma=\sum\varphi_k(K,v)K_k\,,$$

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

Режим тяги повністю характеризується силовою позицією $n_j(v_i,s_i)$, на якій здійснюється рух.

1.5. Основні принципи оптимального руху

Запропоновані і реалізовані алгоритми розв'язання задачі управління рухом ґрунтуються на таких основних принципах. Вони полягають у:

– максимальному використанні інерції руху і холостого ходу;

– мінімальному використанні гальмівної сили і частоти зміни режиму руху;

– забезпеченні режиму тяги мінімальною тяговою силою.

Для конкретних цілей задач керування, крім вказаних принципів, сформульовані ще додаткові. Так, мінімізувати час на рух поїзду можна:

– режимом тяги на максимальній силовій позиції, яку дозволяють обмеження із зчеплення;
– режимом гальмуванням за максимально допустимої сили натиску гальмівних колодок;
– формуванням траєкторії руху якомога ближче до верхнього обмеження за швидкістю;
– максимально можливою частотою зміни тягових позицій.

Зменшення енергетичних затрат за час, який є більшим від мінімального, забезпечується:

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

1.6. Модель розрахунку адаптивних параметрів. Ідентифікація опірних та силових характеристик

Функції у виразі (1) $K_{нт}(v)$, $K_в(v)$ і $W_{пг}(v)$ відомі. Опір, зумовлений кривизною траєкторії, приймемо рівним нулеві. Функціональне представлення сил основних опорів мають вигляд

$$W' = m\left(a + bv + cv^2\right).$$

Сумарна сила опору рухові матиме вигляд:

$$W = \left(m_0\left(a_0 + b_0 v + c_0 v^2\right) + \sum_{k=1}^{n} m_k\left(a_k + b_k v + c_k v^2\right)\right) K_{нт}(v) K_в(v) + \sum_{k=0}^{n} i_k m_k g + W_{пг}(v) =$$
$$= \left(A + Bv + Cv^2\right) K_{нт}(v) K_в(v) + \sum_{k=0}^{n} i_k m_k g + W_{пг}(v),$$

де m_0 та m_k – маси локомотива та вагонів, $a_0, b_0, c_0, a_k, b_k, c_k$ – коефіцієнти опору, i_k – ухил ділянки, на якій знаходиться *k*-й вагон чи локомотив (*k*=0).

Невідомі величини A, B, C є розв'язком системи рівнянь

$$\begin{cases} \left(A + Bv_1 + Cv_1^2\right) K_{нт}(v_1) K_в(v_1) + \sum_{k=0}^{n} i_{k,1} m_k g + W_{пг}(v_1) = \sum_{k=0}^{n} m_k a_1 \\ \dots \\ \left(A + Bv_m + Cv_m^2\right) K_{нт}(v_m) K_в(v_m) + \sum_{k=0}^{n} i_{k,m} m_k g + W_{пг}(v_m) = \sum_{k=0}^{n} m_k a_m \end{cases}.$$

Вона вимагає наявності числа замірів, не меншу за кількість невідомих коефіцієнтів (миттєвої швидкості та прискорення в режимі холостого ходу). Цю систему розв'язують методом найменших квадратів. Так знаходять реальні параметри функцій опору рухові.

Силу тяги локомотива $F_m(p, v)$ (*p* – номер позиції тягового двигуна) запишемо у вигляді

$$F_m(p, v) = a_p + b_p v + c_p v^2.$$

Замірявши для кожної позиції тягового двигуна швидкості і прискорення руху, можна коефіцієнти a_p, b_p, c_p для кожного значення *p* знайти із рівняння

$$F_m(p, v) - W(v) = ma.$$

Отже, в процесі переміщення поїзда можна уточнювати параметри тягових і опірних характеристик локомотива і поїзда. Це дасть можливість точніше прогнозувати параметри управління й оптимізувати рух поїзда на основі реальних вхідних даних.

2. Задача адаптивного управління рухом поїзда

Будемо вважати, що параметри управління на деякому розрахунковому інтервалі (часу, швидкості чи шляху) є постійними.

Задано:

а) графік руху поїзда $(t_i; t_{i+1}, \Delta_{i+1}; t_{i+2}, \Delta_{i+2}; ...; t_{i+n})$ із станції i до станції $i+n$ із заданим часом зупинок Δ_{i+j} $(j = 1,...,n-1)$ на проміжних станціях і часом прибуття на станцію t_{i+j} $(j = 1,...,n)$;

б) контрольовані параметри (швидкість руху поїзду, температура обмоток тягових двигунів, час прибуття поїзда на станцію, сила тяги, величина струму, сила натиску на гальмо, температура зовнішнього середовища, напрям і швидкість вітру);

в) обмеження на контрольовану швидкість руху (при наближенні до меж зміни швидкості формується зміна управління);

г) постійна напруга в контактних мережах;

д) діапазон швидкостей, в межах яких дозволено використовувати гальма;

е) критерій оптимальності;

є) параметри управління: тягова позиція, коефіцієнт використання гальмівної сили, обмеження знизу на швидкість, швидкісні межі на використання гальм;

ж) критерій зміни управління: наближення до однієї із меж за швидкістю, максимальної температури нагрівання обмоток тягових двигунів.

Знайти:

а) допустиме управління (F_m, B, I);

б) час переходу із фазового простору (v_i, s_i) у фазовий простір (v_{i+1}, s_{i+1});

При виконанні: всіх обмежень за ресурсами, безпекою, надійністю руху і критерієм оптимальності.

У процесі реалізації управління відбувається зміна режиму руху і його параметрів залежно від часу.

3. Загальний алгоритм адаптивного оптимального управління рухом поїзда

Відомі паспортні характеристики локомотивів і вагонів, а також графік руху поїзда [4]. Основні кроки алгоритму розрахунку параметрів руху поїзда з електротягою.

Проводимо:

1. Розрахунок і оцінку ресурсу (часового, тягового, ...) оптимізації руху поїзда на всіх перегонах.

Розраховуємо мінімальний час руху поїзда, оцінюємо коефіцієнт використання наявної тяги за використанням тягових позицій у розрахованому режимі, а також порівнянням маси поїзду з поїздом максимальної маси на всіх перегонах.

2. Розрахунок оптимальної прогнозної траєкторії швидкості $v_0(t)$ (за заданими критеріями оптимальності і ефективного розподілу ресурсів управління).

Розрахунок проводиться за паспортними та встановленими нормативними даними.

3. Формування параметрів управління (F_m, I, K_k, t) для забезпечення руху за прогнозною траєкторією швидкості.

За розрахунками на попередньому кроці формуються параметри управління рухом, які назвемо прогнозними.

4. Оцінка ситуації, планування на прогнозний час. Розрахунок та формування умов переключення, зміни керування.

Можливими умовами зміни керування є досягнення межі існування технологічності режиму за одним чи декількома параметрами, або за швидкістю зміни контрольованого параметра. Деякі з умов керування: параметр y_k знаходиться в області допустимих значень – керування непотрібно; параметр знаходиться в області керування – керування непотрібно, якщо

$$\frac{\partial y_k}{\partial t} \geq 0, \quad y_k \geq y_{\min}; \quad \frac{\partial y_k}{\partial t} \leq 0, \quad y_k \leq y_{\max};$$

параметр знаходиться в області керування, керування потрібно, якщо

$$\frac{\partial y_k}{\partial t} \geq 0, \quad y_k \leq y_{\max}; \quad \frac{\partial y_k}{\partial t} \leq 0, \quad y_k \geq y_{\min}; \quad \left|\frac{\partial y_k}{\partial t}\right| \geq \varepsilon_y.$$

5. Аналіз точності дотримання параметрів управління на основі відхилення реальної від прогнозної траєкторій швидкості.

Рис. 1. Загальна схема планування режиму руху поїзда

6. Розрахунок параметрів ідентифікації.

7. Розрахунок прогнозної оптимальної траєкторії швидкості за уточненими моделями локомотивів і вагонів.

8. Якщо рух не завершено, то переходимо на крок 2.

Коментар до алгоритму. Розв'язування задач ідентифікації ускладнюється тим, що не завжди є відомими, з потрібною для практики точністю, коефіцієнти натиску на гальма. Їх завжди можна встановити у випадку попередньо ідентифікованих параметрах опірних характеристик локомотиву і вагонів і відомих змінах швидкості руху в процесі гальмування. Графік руху вимагає високоточного виконання часу прибуття на роздільні пункти. Основний ресурс для формування оптимального управління – час, який отримується як різниця між часом виділеним на графік руху і мінімально можливим на рух. На точність розрахунку прогнозних параметрів управління значно впливає прогноз напруги в контактних мережах. У випадку живлення декількох поїздів з однієї контактної мережі, вказана напруга залежить від координат знаходження цих поїздів на перегоні та їх режимних параметрів.

Приклад розрахунку оптимальних параметрів управління рухом.

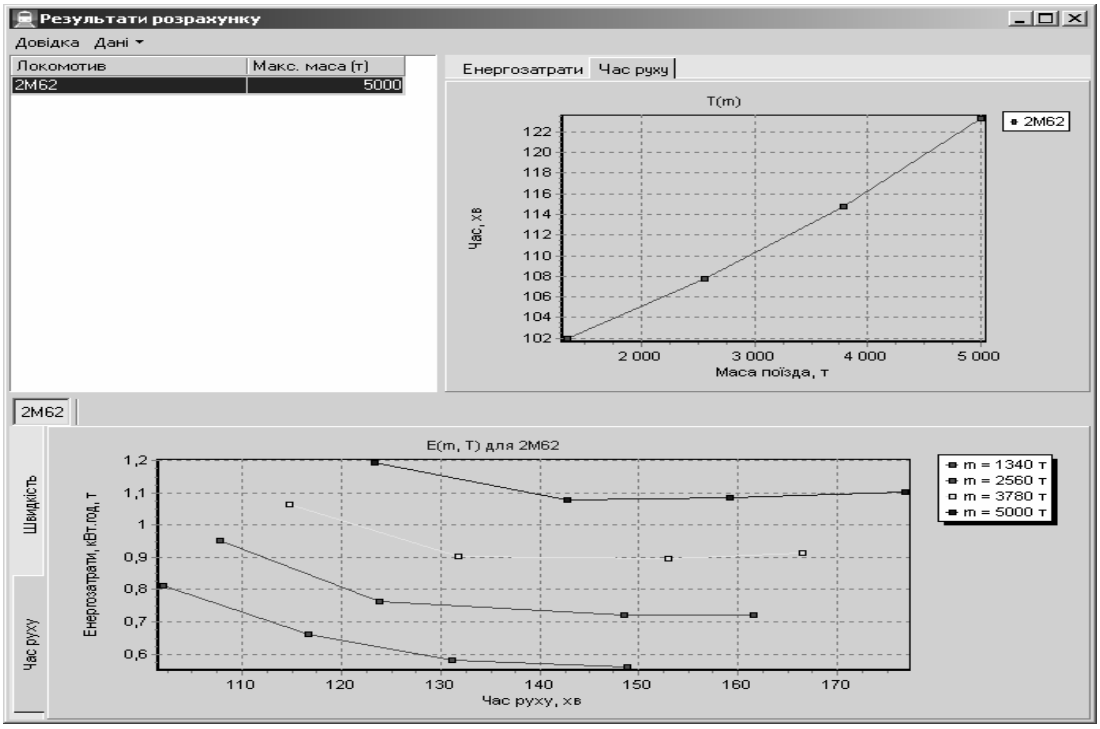


Рис. 2. Зв'язок енерговитрат, часу руху та маси для заданого типу локомотива при оптимальному управлінні рухом поїзда

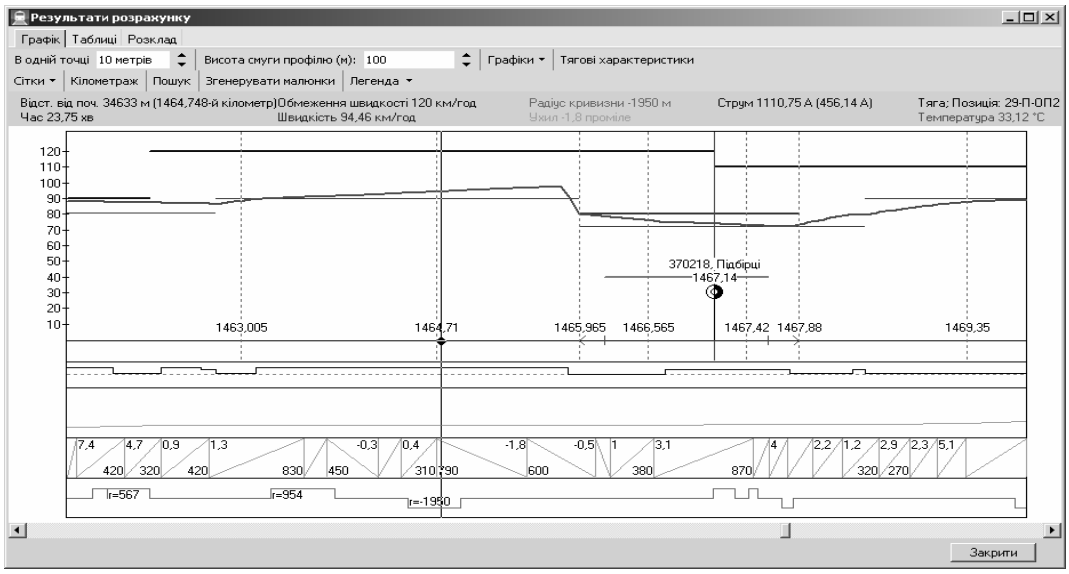
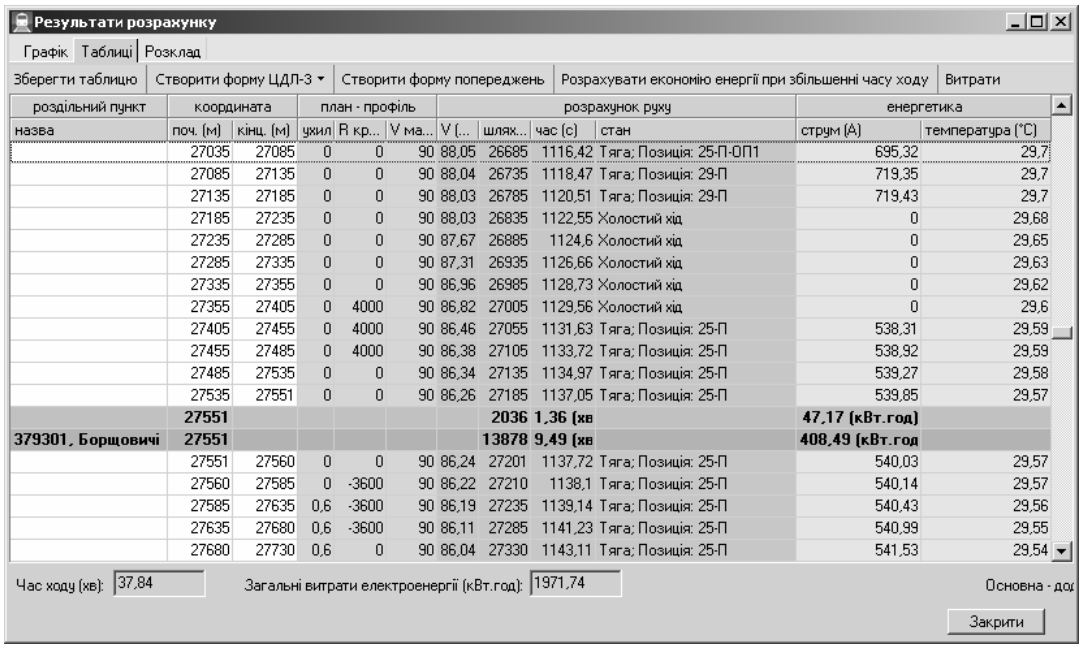


Рис. 3. Вікно візуалізації результатів управління рухом поїзду – зміна швидкості руху від шляху



Результати розрахунку

Графік | Таблиці | Розклад

Зберегти таблицю | Створити форму ЦДП-3 | Створити форму попереджень | Розрахувати економію енергії при збільшенні часу ходу | Витрати

роздільний пункт	координата		план - профіль			розрахунок руху					енергетика	
назва	поч. (м)	кінц. (м)	ухил	R кр...	V ма...	V (...	шлях...	час (с)	стан		струм (А)	температура (°С)
	27035	27085	0	0	90	88,05	26685	1116,42	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1		695,32	29,7
	27085	27135	0	0	90	88,04	26735	1118,47	Тяга; Позиція: 29-П		719,35	29,7
	27135	27185	0	0	90	88,03	26785	1120,51	Тяга; Позиція: 29-П		719,43	29,7
	27185	27235	0	0	90	88,03	26835	1122,55	Холостий хід		0	29,68
	27235	27285	0	0	90	87,67	26885	1124,6	Холостий хід		0	29,65
	27285	27335	0	0	90	87,31	26935	1126,66	Холостий хід		0	29,63
	27335	27355	0	0	90	86,96	26985	1128,73	Холостий хід		0	29,62
	27355	27405	0	4000	90	86,82	27005	1129,56	Холостий хід		0	29,6
	27405	27455	0	4000	90	86,46	27055	1131,63	Тяга; Позиція: 25-П		538,31	29,59
	27455	27485	0	4000	90	86,38	27105	1133,72	Тяга; Позиція: 25-П		538,92	29,59
	27485	27535	0	0	90	86,34	27135	1134,97	Тяга; Позиція: 25-П		539,27	29,58
	27535	27551	0	0	90	86,26	27185	1137,05	Тяга; Позиція: 25-П		539,85	29,57
	27551						**2036**	**1,36 (хв**			**47,17 (кВт.год)**	
379301, Борщовичі	**27551**						**13878**	**9,49 (хв**			**408,49 (кВт.год**	
	27551	27560	0	0	90	86,24	27201	1137,72	Тяга; Позиція: 25-П		540,03	29,57
	27560	27585	0	-3600	90	86,22	27210	1138,1	Тяга; Позиція: 25-П		540,14	29,57
	27585	27635	0,6	-3600	90	86,19	27235	1139,14	Тяга; Позиція: 25-П		540,43	29,56
	27635	27680	0,6	-3600	90	86,11	27285	1141,23	Тяга; Позиція: 25-П		540,99	29,55
	27680	27730	0,6	0	90	86,04	27330	1143,11	Тяга; Позиція: 25-П		541,53	29,54

Час ходу (хв): 37,84 Загальні витрати електроенергії (кВт.год): 1971,74 Основна - до

Закрити

Рис. 4. Результати розрахунку параметрів оптимального управління рухом поїзда

Висновки

Запропонований в роботі алгоритм формування оптимальних параметрів управління, частково (без розв'язування задач адаптації), реалізований і пройшов апробацію на дорогах Укрзалізниці. Запропоновані підходи до формування параметрів управління рухом підтвердили свою ефективність і дали можливість оцінити потенціал оптимізації системи перевезень вантажів і пасажирів.

1. Деев В.В., Ильин Г.А., Афонин Г.С. Тяга поездов. – М.: Транспорт, 1989. – 264 с. 2. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высш. шк., 2003. – 614 с. 3. Притула М.Г., Шпакович Р.Р. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2007. – Вип. 5. – С. 139–145. 4. Притула М.Г., Шпакович Р.Р. Алгоритм побудови графіка руху поїздів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2008. – № 629. – С. 146–152. 5. Притула М.Г., Шпакович Р.Р.Ідентифікація параметрів моделі руху поїзда // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2008. – № 629. – С. 146–152.