

Список литературы.

1. Бахвалов Ю. А., Зарифьян А. А., Кашников В. Н., Колпахчян П. Г., Плохов Е. М., Янов В. П. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом, М – «Транспорт», 2001, 288с.
2. Любарский Б.Г., Рябов Е.С., Оверьянова Л.В. и др. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода // Електротехніка і електромеханіка, 2009, №5. – С.67-72.
3. Дьяконов, В. П. Simulink 4. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2001. – с. 553.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. ИД Питер. 1-е издание, 2007, 288 стр.
5. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с., ил.
6. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. – М.: МИКАП, 1994. – 382 с: 78 ил.
7. Кетков, Ю. Л. Matlab 7 [Текст] : Численные методы / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. – СПб. : Бхв-Петербург, 2005. – с. 752. : ил.

УДК 629.4.016.1

Матвієнко С.А., аспірант(УкрДАЗТ)

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ
РУХУ ПОЇЗДА ДЛЯ ВИКОНАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ
РОЗРАХУНКІВ**

Пошук енергооптимальних режимів керування рухом поїзда становить важливу науково-практичну задачу, вирішення якої впливає на ефективність функціонування транспорту. Витрати палива та електроенергії на тягу поїздів складають значну частку (відповідно 84% та 83% за даними 2009 р.) в загальних витратах паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на залізницях, а в цілому такі витрати становлять близько 16% від експлуатаційних витрат галузі [1]. Скорочення цих витрат шляхом оптимізації експлуатаційних режимів не потребує значних одночасних капіталовкладень і є одним з пріоритетів наукового пошуку.

Визначення оптимального керування конкретним поїздом повинне спиратися на вичерпні вихідні дані про режими та особливості експлуатації поїздів. Таку інформацію можна отримати за результатами

тягово-енергетичних випробувань (ТЕВ). З іншого боку, серед завдань ТЕВ значне місце посідає визначення раціональних режимів водіння поїздів для скорочення витрат на тягу [2]. Отже, проблема оптимізації режимів водіння поїздів тісно пов'язана із проведенням ТЕВ та може бути вирішена шляхом оптимізаційних розрахунків на математичній моделі, що коригується за результатами натурних випробувань [3].

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. Задача оптимізації режимів керування рухом поїзда може бути поділена на декілька етапів:

визначення фізичного змісту процесів, які характерні для поїзда як об'єкта керування;

- складання математичної моделі, яка відображує сутність цих процесів;
- адаптація математичних співвідношень моделі для можливості виконання розрахунків на ЕОМ;

- визначення методу оптимізації та розробка алгоритму розрахунку оптимальних за прийнятим критерієм програм (стратегій) керування;

- синтез оптимальних траєкторій руху та впровадження результатів у вигляді рекомендацій, алгоритмів автоматизованих або автоматичних систем.

Складанню математичної моделі руху поїзда присвячені класичні праці з теорії локомотивної тяги А.М. Бабічкова, О.П. Новікова, В.Є. Розенфельда, І.П. Ісаєва, С.І. Осипова, М. Нетца (Netz), Є. Йентша (Jentsch) та інших науковців. При цьому слід відмітити, що модель спиралася на ряд суттєвих спрощень, що вимагає перевірки її адекватності для сучасних поїздів.

Дослідженням проблем оптимізації режимів водіння поїздів займалися Баранов Л.А., Головічер Я.М., Єрофєєв Є.В., Максимов В.М., Сидельніков В.М., Моїсєєв О.О., Дувалян С.В., Садовський Л.Є., Постол Б.Г., Костромін А.М., Скалозуб В.В., Сквіва Л. При цьому пошук зосереджувався як в частині непрямих, так і прямих методів оптимізації.

Використання непрямих методів, зокрема принципу максимуму, дозволило визначити основні параметри оптимальних траєкторій руху та отримати характеристики оптимального 3-х та 4-х режимного керування (в цьому напрямку працювали зокрема Баранов, Головічер, Максимов, Костромін). Метод має детально розроблений для практичного використання математичний апарат, однак для дискретних систем він дозволяє отримати лише необхідні, але не достатні, умови оптимальності, отже спричиняє необхідність зайвої перевірки оптимальності визначених керувань, і крім того, вимагає додаткового спрощення моделі руху поїзда.

Найбільш повно врахувати усі можливі обмеження на керування та фазові координати задачі можливо за допомогою методів прямого пошуку (метод градієнтного спуску, динамічне програмування), які дозволяють знайти глобальний екстремум критерію оптимальності. Із використанням

дискретного варіанту динамічного програмування у 1970-х рр. Єрофєєвим та Сидельніковим склалися програми розрахунку енергооптимальних програм руху лише для поїздів метрополітену та пасажирських поїздів (із врахуванням мінімальної кількості можливих режимів). Використання методів динамічного програмування довгий час стримувалося низьким рівнем обчислювальної техніки (зокрема, малою оперативною пам'яттю), але застосовуючи широкі можливості сучасних ЕОМ можна сподіватися в повній мірі скористатися всіма перевагами цих методів.

Загальною проблемою при оптимізаційних розрахунках за обома підходами є визначення такого ступеня деталізації математичної моделі та таких її параметрів, які б дозволяли отримати результати прийнятної для практичних потреб точності із мінімальними витратами машинного часу для обчислень.

Метою статті є визначення оптимальних параметрів чисельної реалізації розрахунків на ЕОМ за математичною моделлю руху поїзда, а також оцінка точності та адекватності отриманих результатів.

Якщо, згідно із [4], враховувати тільки зовнішні впливи на поїзд, і його поступальний рух розглядати як рух матеріальної точки, вся маса якої зосереджена у центрі мас поїзда, то рівняння руху можна записати наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \zeta [f_k(v, u) - w_o(v) - i(s)], \\ \frac{ds}{dt} &= v, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де v – швидкість руху, км/год;

s – шлях, який пройшов поїзд, км;

t – час, год;

$u \in U$ – керуюча дія на локомотив як на об'єкт керування (режим руху), обмежена множиною допустимих керувань U ;

$f_k(v, u)$ – питома (на одиницю ваги поїзда) керуюча сила на ободі колеса, Н/кН, яка задана режимом u та визначається за тяговими та гальмовими характеристиками локомотиву [5];

$w_o(v)$ – питома сила основного опору руху, Н/кН;

$i(s)$ – ухил приведенного профілю колії (із врахуванням опору від кривих), виражений в ‰, в залежності від координати s поїзда;

ζ – коефіцієнт пропорційності, що має сенс прискорення, в км/год², яке викликається дією одиничної питомої прискорюючої сили 1 Н/кН; для загальних розрахунків рекомендоване значення $\zeta = 120$ (км/год²)/(Н/кН) [5].

Визначення фазових координат поїзда s , v , t в довільній точці траєкторії руху $s(t)$ потребує розв'язку системи рівнянь (1) одним з відомих методів теорії диференціальних рівнянь. Методи безпосереднього аналітичного інтегрування рівняння руху поїзда майже не використовуються через складність аналітичного описання нелінійних складових в правій частині першого рівняння системи, натомість найчастіше використовують одну з форм дискретизації задачі, замінюючи диференційні співвідношення скінченнорізнцевими (такий підхід доцільно використовувати також і тому, що сама постановка задачі вимагає її дискретизації, оскільки процес керування локомотивом має дискретний характер, отже рух поїзда не може бути описаний континуально). При цьому вихідна задача вирішується в формі задачі спостережувальності [6], коли визначення фазових координат стану системи виконується за тими координатами, які доступні для спостереження на початку кожного кроку інтегрування рівняння руху.

При дискретизації моделі (1) в якості незалежної змінної можна прийняти будь-яку з трьох фазових координат. Дискретизація за швидкістю дозволяє точніше врахувати обмеження швидкості вздовж траєкторії, але ускладнює прив'язку до профілю колії [4]. Для розрахунків в режимі реального часу (в системах автомашиністів та тренажерів) в якості незалежної змінної доцільніше використовувати час ходу (в найбільш ранній з відомих робіт [7] описувався принцип ітеративного наближення при інтегруванні рівняння (1) за часом). Найбільш ефективно організувати обчислювальний алгоритм із прив'язкою до елементів профілю $i(s)$ можна в разі дискретизації моделі за шляхом, розбиваючи тягову ділянку на елементарні кроки інтегрування довжиною Δs . При цьому більшість авторів використовували отримані методом Ейлера [8] наступні вирази, які пов'язують значення фазових координат на поточному n та наступному $n+1$ кроках [9, 10]:

$$s_{n+1} = s_n + \Delta s, \quad (2)$$

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta s \zeta}{v_n} (f_k(v_n, u_n) - w_o(v_n) - i(s_n)), \quad (3)$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t = t_n + \frac{2 \cdot 60 \Delta s}{v_{n+1} + v_n}, \quad (4)$$

де s_n – шлях, який пройшов поїзд до початку n -го елемента, км;

v_n – швидкість руху на початку n -го елемента, км/год;

u_n – керуюча дія, приймається постійною протягом n -го елемента;

t_n – час, накопичений до початку n -го елемента, хв;

$f_k(v_n, u_n)$, $w_o(v_n)$ – питомі сили згідно із означеннями (1), Н/кН, визначаються для швидкості v_n та приймаються постійними протягом n -го елемента;

$i(s_n)$ – величина ухилу, в ‰, постійна протягом n -го елемента.

При використанні такої скінченнорізницевої схеми виникає ряд складностей для обчислювальних процедур: в момент рушання з місця початкову швидкість необхідно завищувати (до 0,5...2 км/год), а при малих швидкостях виконувати дроблення кроку інтегрування до тих пір, поки приріст швидкості $\Delta v = v_{n+1} - v_n$ не стане меншим за певне задане значення [8].

Альтернативну скінченнорізницеву схему можна отримати, розклавши перше з рівнянь системи (1) в ряд Тейлора із збереженням двох перших складових [4]. Тоді, записавши вираз для приросту швидкості за n -й крок

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta t}{60} \left(\frac{dv}{dt} \right)_n = v_n + \frac{\Delta t}{60} \zeta (f_k(v_n, u_n) - w_o(v_n) - i(s_n)),$$

з урахуванням (4) отримуємо наступний вираз для швидкості

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta t}{60} \left(\frac{dv}{dt} \right)_n = v_n + \frac{2\Delta s}{v_{n+1} + v_n} \zeta (f_k(v_n, u_n) - w_o(v_n) - i(s_n)),$$

або

$$v_{n+1} = \sqrt{v_n^2 + 2\Delta s \zeta [f_k(v_n, u_n) - w_o(v_n) - i(s_n)]}. \quad (5)$$

Використання отриманої формули також вимагає припущення про постійність параметрів керування (сили тяги) та опору руху протягом кроку. Тому при розрахунках за формулою (5), позбавлених вказаних вище недоліків використання формули (3), також виникає проблема вибору довжини кроку інтегрування Δs . Очевидно, що зі зменшенням кроку точність скінченнорізницевої схеми підвищується, але збільшується машинний час розрахунків. Тому у ранніх програмах, лімітованих останнім фактором, обмежувалися величиною кроку інтегрування, рівною довжині елемента постійної крутості, але не більше ніж 1 км [11].

Аналітично оцінити необхідну величину кроку Δs для досягнення заданої точності складно через відсутність аналітичного виразу для керуючих сил (тяги та гальмування), які входять до правої частини першого рівняння (1). Тому для визначення впливу величини Δs на адекватність модельних розрахунків було проведено обчислювальний експеримент із визначенням швидкості за різними формулами. Встановлено, що в зоні малих швидкостей для отримання прийнятної точності ($\Delta v \leq 5$ км/год [5]) при використанні формули (3) крок Δs необхідно змінювати в широких межах (від 0,02 м в моменти пуску до 2 м при швидкостях 10...25 км/год). При розрахунках за формулою (5) крок

інтегрування можна приймати постійним протягом усієї ділянки в межах до 100 м із збереженням дозволеної точності. Крім того, при рівній довжині кроку Δs ця формула дає більш точні результати, ніж формула (3) на всьому діапазоні швидкостей, тому саме формулу (5) можна прийняти основною для подальших модельних розрахунків.

Для дослідження впливу величини Δs на розрахунок витрат тягових ПЕР було проведено обчислювальні експерименти для ділянок із електричною (постійного стуму) та тепловозною тягою на двох типах профілів: профіль 1 типу спуск-площадка-підйом та профіль 2 – підйом-площадка-спуск (таблиця 1). При моделюванні режими керування приймалися постійним для кожного виду тяги та профілю.

Таблиця 1 – Результати обчислювального експерименту з визначення оптимального кроку інтегрування рівняння руху

| Величина кроку Δs , м | Витрати електроенергії, кВт·год / похибка, % | | Витрати палива, кг / похибка, % | |
|-------------------------------|--|---------------|---------------------------------|---------------|
| | за профілем 1 | за профілем 2 | за профілем 1 | за профілем 2 |
| 0,5 | 991 / 0,0 | 2032 / 0,0 | 233 / 0,0 | 415 / 0,0 |
| 1,0 | 990 / 0,1 | 2031 / 0,0 | 232 / 0,4 | 414 / 0,2 |
| 2,0 | 989 / 0,2 | 2029 / 0,1 | 232 / 0,4 | 414 / 0,2 |
| 5,0 | 987 / 0,4 | 2028 / 0,2 | 231 / 0,9 | 414 / 0,2 |
| 10,0 | 984 / 0,7 | 2021 / 0,5 | 231 / 0,9 | 413 / 0,5 |
| 20,0 | 977 / 1,4 | 2005 / 1,3 | 229 / 1,7 | 412 / 0,7 |
| 50,0 | 966 / 2,5 | 1986 / 2,3 | 227 / 2,6 | 409 / 1,4 |
| 100,0 | 875 / 11,7 | 1853 / 8,8 | 221 / 5,2 | 408 / 1,7 |

З аналізу результатів моделювання видно, що при збільшенні кроку Δs витрати ПЕР, визначені за моделюю, зменшуються, що пояснюється збільшенням середньої швидкості та зменшенням часу ходу в межах сусідніх ділянок постійного керування. Для Δs межах від 0,5 до 50 м похибка визначення витрат не перевищує 2,5% (при порівнянні зі значенням для кроку $\Delta s=0,5$ м), що знаходиться в межах допустимої похибки практичного визначення витрат. За межами цього інтервалу похибка у визначенні витрати різко збільшується (до 12%). Отже, практично прийнятною може бути визначена скінченнорізницева схема (2), (5), (4) із постійною величиною кроку інтегрування з діапазону $\Delta s=2\dots 50$ м (при цьому необхідно прагнути до менших значень). Такий вибір кроку підтверджено також доброю збіжністю із результатами натурних ТЕВ, розходження із якими по витратах ПЕР лежить в межах 3%.

При складанні алгоритмів динамічного програмування для оптимізаційних розрахунків також виникає проблема вибору кроку

інтегрування рівняння руху. Але тут крок Δs необхідно приймати таким, аби траєкторії руху, побудовані з кожної точки кінця оптимальної траєкторії на початку даного кроку потрапляли в різні комірки сітки за швидкістю в кінці кроку [9], тобто є тенденція до збільшення величини кроку Δs , що вступає в протилежність із прийнятим раніше висновком. Розв'язати суперечність можливо, якщо збільшити крок, на якому керування залишається постійним (крок варіювання режимів), не змінюючи при цьому кроку інтегрування рівняння руху. Так, в роботі [10] для розрахунку оптимальних програм руху пасажирських поїздів крок інтегрування прийнятий 10 м, а крок варіювання режимів – 200 м. Однак це веде до ускладнення програми і не завжди сприяє зменшенню кількості перемикань режимів між сусідніми кроками.

Єдиної методики визначення кроків за сіткою в алгоритмах динамічного програмування не існує, і кожна прикладна задача вимагає підбору власних параметрів із врахуванням необхідної точності результатів [12]. При фіксованому кроці за швидкісною сіткою 1 км/год, що забезпечує простоту програмної реалізації, розгалуження траєкторій руху поїзда залежатиме лише від кроку сітки за шляхом. Оптимальний з точки зору точності та ефективності алгоритму крок Δs може бути визначений в результаті обчислювального експерименту, в якості прикладу якого на рисунку 1 наведено результати розрахунку оптимальних режимів руху для реального профілю ділянки Родакове – Коммунарськ Донецької залізниці (таблиця профілю показана внизу рисунку) при різних значеннях кроку інтегрування Δs .

На рисунку 1 окремими лініями позначені ті траєкторії руху, отримані в результаті розгалуження алгоритму динамічного програмування, які відповідають перспективним варіантам керування та зберігаються в пам'яті ЕОМ. Очевидно, що єдиний крок інтегрування та варіювання режимів в межах $\Delta s=5\dots 10$ м (рисунок 1, а, б) дає недостатній приріст швидкості для розгалуження алгоритму, тому траєкторії руху не можуть покрити максимальну частину поля дозволених швидкостей. Натомість, при кроці $\Delta s=100$ м (рисунок 1, д) і більше діапазон перспективних траєкторій майже не змінюється. Тому для нормального розгалуження алгоритму можна рекомендувати величину кроку Δs на рівні 40...50 м (рисунок 1, г), при якому похибка визначення витрат ПЕР буде зберігатися в допустимих межах, як це встановлено раніше. Із такими значеннями кроку були проведені оптимізаційні розрахунки для вантажних поїздів електричної та тепловозної тяги; отримані результати дозволяють зробити висновок про адекватність модельних розрахунків.

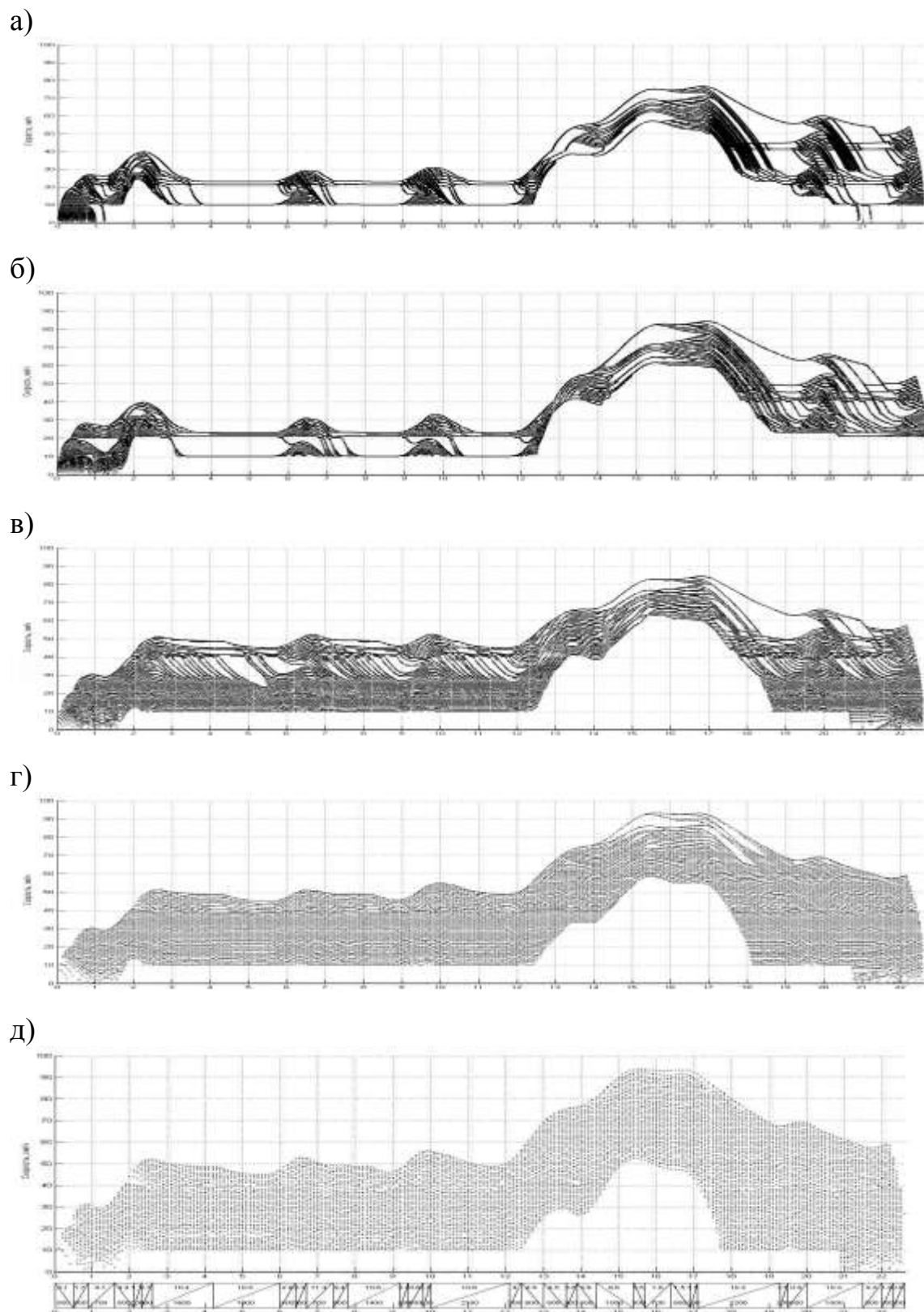


Рисунок 1 – Вплив величини кроку Δs на розгалуження траєкторій руху, розрахованих за алгоритмом динамічного програмування
а) $\Delta s=5$ м; б) $\Delta s=10$ м; в) $\Delta s=20$ м; г) $\Delta s=50$ м; д) $\Delta s=100$ м

Одним з шляхів уточнення моделі поїзда як матеріальної точки є врахування поздовжнього розподілу маси складу, що важливо при розрахунках із великоваговими та довгосоставними поїздами. Для забезпечення таких розрахунків було складено підпрограму, яка виконує розрахунок тягового профілю ділянки. Принцип розрахунку ґрунтується на тому, що при пересуванні поїзда змінюються частини його довжини, які розташовані на різних елементах профілю, отже змінюється і ухил під поїздом. Тоді для кожного положення центру мас поїзда при його просуванні ділянкою можна визначити величини ухилів спрямованого профілю $i_c(s)$, замінивши ним вихідний профіль $i(s)$ в модельних розрахунках за формулою (1).

Розрахунки для поїздів різних категорій із використанням моделей матеріальної точки та однорідного стрижня дозволили оцінити вплив довжини поїзда на точність визначення витрат ПЕР. Зокрема, для поїздів встановлених норм маси та довжини спрощені розрахунки з моделлю матеріальної точки при однакових витратах машинного часу дають витрати ПЕР, завищені на 1...3% (в залежності від профілю, більша похибка для тепловозної тяги) в порівнянні із моделлю, яка враховує їх довжину (через більш різку зміну додаткового опору руху при їзді на підйоми). Для довгоскладових поїздів (понад 1500 м) така похибка може збільшуватися до 7%, що робить непринятною спрощену модель.

Висновки.

1. Визначено скінченнорізницеву схему чисельного інтегрування рівняння руху поїзда, прийнятну як для обробки даних ТЕВ, так і для оптимізаційних розрахунків.

2. Отримано оцінку впливу кроку інтегрування рівняння руху на точність модельних розрахунків та розгалуження алгоритму динамічного програмування для проведення оптимізаційних розрахунків; величина кроку повинна знаходитися в межах 40...50 м для допустимої похибки розрахунків в межах 3%.

3. Отримано оцінку впливу спрощення моделі руху поїзда як матеріальної точки, що спричиняє похибку в межах 2,5% для поїздів існуючих норм маси та довжини.

Список літератури

1. Сергієнко М.І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М.І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. – №4. – С.24-26.
2. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / Под ред. С.И. Осипова. – М.: Транспорт, 1984. – 280 с.

3. Крашенінін О.С. Удосконалення експлуатаційних випробувань / О.С. Крашенінін, Ю.В. Черняк, С.А. Матвієнко // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 117. – С.22-27.
4. Бабичков А.М. Тяга поездов и тяговые расчеты / А.М. Бабичков, П.А. Гурский, А.П. Новиков. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Деев В.В. Тяга поездов: Учебное пособие для вузов / В.В. Деев, Г.А. Ильин, Г.С. Афонин. – М.: Транспорт, 1987. – 264 с.
7. Бабичков А.М. Численные методы решения уравнения движения поезда, управляемого автомашинистом / А.М. Бабичков, А.П. Новиков // Вопросы эксплуатации железных дорог: Труды МИИТ. – 1963. – Вып. 161. – С. 80-91.
8. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2003. – 632 с.
9. Ерофеев Е.В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования / Е.В. Ерофеев // Вычислительная техника и управление: Сб. науч. трудов МИИТ. – 1967. – Вып. 228. – С. 16-28.
10. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; Под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
11. Ерофеев Е.В. Определение оптимального режима движения поезда при заданном времени хода / Е.В. Ерофеев // Вестник ВНИИЖТ. – 1969. – №1. – С. 54-57.
12. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 460 с.

УДК 629.4.014

*Крашенінін О.С., к. т. н. (УкрДАЗТ)
Шапатіна О.О., асистент (УкрДАЗТ)*

РЕЗЕРВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ

Постановка проблеми. У сучасних умовах тяговий і не тяговий рухомий склад залізниць потребує оновлення. Разом з цим галузь працює в умовах дефіциту енергоресурсів, їх великої вартості, старіння основних фондів. В цих умовах необхідні певні зусилля в справі пошуку чинників щодо резервів підвищення рівня ефективного використання рухомого складу залізниць і, зокрема, маневрового.

Аналіз досліджень. Досвід експлуатації рухомого складу показує, що на перехідний період можливо задіяти ряд заходів щодо підвищення ефективного його використання навіть для сучасних обставин. В керівних документах