

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-261-5-57-66>

УДК 004.45+629.432:62-593

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ВЕДЕННЯ ПОЇЗДА МЕТРОПОЛІТЕНУ

Сулим А.О., Сіора О.С., Мельник О.О., Хозя П.О., Третяк Е.В.

DEVELOPMENT OF ALGORITHMIC AND SOFTWARE SUPPORT FOR DETERMINATION OF RATIONAL MODE OF THE METRO TRAIN OPERATION

Sulym A.O., Siora O.S., Melnyk O.O., Khozia P.O., Tretiak E.V.

В статті розроблено алгоритмічне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену. В основу створення алгоритмічного забезпечення покладено вирішення багатокритеріальної задачі за методом задоволених вимог (головного критерію), в якості якого обрано мінімальну кількість споживання електроенергії з контактної мережі. Описано математичну модель та основні етапи алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену. На базі створеного алгоритмічного забезпечення розроблено програмне забезпечення в середовищі графічного програмування LabVIEW. Зображено зовнішній вигляд інтерфейсу розробленого програмного забезпечення. Описано послідовність роботи оператора з розробленим програмним забезпеченням. Апробовано розроблене програмне забезпечення шляхом порівняльного аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень для однакових заданих умов експлуатації поїзда метрополітену. Тестування програмного забезпечення та умови його проведення здійснювались за спеціально розробленою методикою оцінки придатності. Підтверджено адекватність та правильність виконання досліджень за допомогою розробленого програмного забезпечення (розбіжність результатів досліджень не перевищує 5 %).

Ключові слова: алгоритмічне забезпечення, енергоефективність, програмне забезпечення, рекуперативне гальмування.

Вступ. Проблема покращення енергозбереження та енергоефективності в метрополітені є однією з найбільш важливих і актуальних через постійне зростання тарифів на енергоресурси. У зв'язку з тим, що комунальні підприємства на балансі яких знаходяться вітчизняні метрополітени, є потужними споживачами електроенергії, порушена проблема залишається досить актуальною та потребує своєчасного вирішення [1].

Одним з основних напрямків підвищення енергоефективності пасажирських перевезень в метрополітені є ефективне використання енергії рекуперативного гальмування [1–5]. Переваги рекуперативного гальмування широко відомі – це і підвищення безпеки руху поїздів і скорочення витрат електроенергії на тягу поїздів. Рекуперативне гальмування є одним із ключових складових енергозберігаючих технологій перевізного процесу та потужним джерелом скорочення споживання електроенергії на тягу поїздів.

За різними оцінками фахівців використання рекуперативного гальмування в метрополітені дозволить заощадити до 40 % електроенергії, витраченої на тягу [1–6]. Однак в реальних умовах експлуатації на ефективність процесу рекуперації впливає ряд факторів організаційного, технічного і технологічного характеру [1–7]. Внаслідок чого, за існуючої системи енергопостачання використовується іншими споживачами, які знаходяться в зоні рекуперації, лише до 10 % електроенергії [8].

Одним з перспективних та дієвих заходів вирішення проблеми щодо зменшення споживання електроенергії на тягу та підвищення ефективності використання енергії рекуперативного гальмування, який не потребує значних фінансових витрат, є удосконалення режимів ведення поїздів [1, 7, 9, 10].

Аналіз останніх досліджень. Дослідженнями щодо визначення раціонального режиму ведення електрорухомого складу, зокрема поїзда метрополітену, шляхом використання чисельних методів оптимізації займалось чимало вчених, серед яких Л.А. Баранов, А.П. Голинський, Є.В. Єрофєєв, Жданович А.Б., Кислий Д.М., Любарський Б.Г., Мелешин І.С., Носков В.І., Петренко О.М., Чинь Л.М. та інші [10–19]. У переважній більшості ці роботи направлено

на вирішення задачі з визначення раціональних режимів ведення поїзда та керуючих впливів для заданих швидкісних обмежень і профілю колії, за яких забезпечується графік руху на ділянці та мінімальне споживання електроенергії з контактної мережі. В цих роботах досить повно та детально розкрито теорію визначення раціонального режиму ведення поїзда за методом динамічного програмування. При цьому теорії пошуку раціонального режиму ведення за іншими методами вирішення багатокритеріальних задач та практичній реалізації забезпечення з пошуку керуючих впливів, за яких буде забезпечуватись вибір раціонального режиму ведення поїзда, приділено недостатньо уваги. До недавнього часу створення такого алгоритмічного забезпечення та його практична реалізація були проблематичними. Однак з розвитком сучасних інформаційних технологій та засобів мікропроцесорної техніки зазначені задачі отримують нові рішення і практична реалізація таких забезпечень цілком вирішувана. Тому, в цій роботі запропоновано алгоритмічне та програмне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену, що дозволить автоматизувати та пришвидшити процес отримання результатів шляхом використання сучасних методів та засобів для вирішення задач раціоналізації та побудови систем керування.

Метою роботи є створення алгоритмічного та програмного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації, за яких забезпечується графік руху на ділянці та споживається мінімальна кількість електроенергії з контактної мережі.

Викладення основного матеріалу дослідження. В основу створення алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда покладено вирішення багатокритеріальної задачі за методом задоволених вимог (головного критерію). При цьому головним критерієм в нашому випадку є мінімальна кількість споживання електроенергії з контактної мережі. На інші критерії (час руху на перегоні, пройдений шлях та швидкість руху в кінці останнього кроку варіації) накладаються певні задані обмеження. Алгоритмічне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену включає наступні етапи:

- завдання технічних характеристик поїзда;
- завдання профілю колії та швидкісних обмежень на ділянці (перегоні);
- завдання керуючих впливів та кроків варіації;
- підпрограма спрямлення профілю колії;
- побудова швидкісних сіток;
- підпрограма розрахунку кроку варіації;
- визначення режимів ведення, за яких забезпечується заданий пройдений шлях та час руху на перегоні, а швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю з урахуванням заданих відхилень;
- визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену за головним критерієм.

Для описання динамічних і енергетичних процесів під час заданих можливих умов ведення поїзда метрополітену з системами рекуперації запропоновано математичну модель, яка представлена у вигляді системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} F &= m \frac{dV}{dt} (1 + \gamma) + W_{\text{осн}} \pm W_i; \\ W_{\text{осн}} &= aV^2 + bV + c; \\ W_i &= mgi; \\ A_{\text{мережі}} &= A_{\text{тяги}} - A_{\text{рек}}; \\ A_{\text{тяги}} &= \frac{U_{\text{кмтяги}} \cdot \int_0^t I_{\text{тяги}} dt}{3600}; \\ A_{\text{гал}} &= \frac{U_{\text{кмгал}} \cdot \int_0^t I_{\text{гал}} dt}{3600}; \\ I_{\text{тяги}} &= \frac{FV}{U_{\text{кмтяги}} \eta_{\text{інв}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{ред}}}; \\ I_{\text{гал}} &= \frac{FV \eta_{\text{інв}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{ред}}}{U_{\text{кмгал}}}; \eta_{\text{ТД}} = f(V), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де F – сила тяги (гальмування) рухомого складу; m – маса рухомого складу; V – швидкість руху; t – поточний час; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас; $W_{\text{осн}}$ – основний опір руху; W_i – додатковий опір руху від приведенного ухилу; g – значення прискорення вільного падіння; a, b, c – коефіцієнти, які залежать від конструкції рухомого складу; i – приведений ухил; $A_{\text{мережі}}$ – кількість спожитої електроенергії з контактної мережі; $A_{\text{тяги}}$ – кількість спожитої електроенергії в режимі тяги; $A_{\text{гал}}$ – кількість електроенергії, що віддається в режимі гальмування; $U_{\text{кмтяги}}$ – напруга контактної мережі в режимі тяги; $U_{\text{кмгал}}$ – напруга контактної мережі в режимі гальмування; $I_{\text{тяги}}$ – струм, що споживається рухомим складом в режимі тяги; $I_{\text{гал}}$ – струм, що генерується рухомим складом в режимі гальмування; $\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора; $\eta_{\text{ТД}}$ – ККД тягового двигуна; $\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора.

В запропонованій математичній моделі (1) прийнято наступні припущення: поїзд розглядається як матеріальна точка з центром тяжіння по середині; напруга контактної мережі для заданих режимів тяги, вибігу, рекуперативного гальмування є величиною незмінною. Слід зазначити, що розроблена математична модель дозволяє враховувати конструктивні та технічні особливості поїзда, зміну ККД тягового двигуна залежно від швидкості руху, а також досліджувати енергетичні процеси в режимі рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

В подальшому з використанням рівнянь математичної моделі (1) розроблено алгоритмічне забез-

печення, яке дозволяє досліджувати динамічні та енергетичні показники під час заданих режимів ведення поїзда метрополітену. В спрощеному вигляді блок-схему алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда зображено на рис. 1.

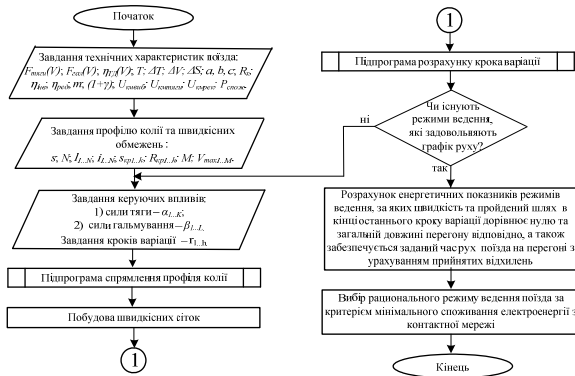


Рис. 1. Блок-схема алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда

Нижче представлено описання кожного з вищезазначених етапів алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену.

Перший етап (завдання характеристик поїзда): тягова характеристика – $F_{\text{тяги}}(V)$; гальмівна характеристика – $F_{\text{гал}}(V)$; характеристика ККД тягового двигуна – $\eta_{\text{ТД}}(V)$. Наведені характеристики поїзда задаються у вигляді масивів даних.

Задаються наступні показники: заданий час руху на ділянці – T ; допустиме відхилення часу руху поїзда на ділянці – ΔT ; допустиме відхилення швидкості в кінці останнього кроку варіації – ΔV ; допустиме відхилення відстані в кінці останнього кроку варіації – ΔS ; коефіцієнти – a, b, c, R_x ; ККД інвертора – $\eta_{\text{інв}}$; ККД редуктора – $\eta_{\text{ред}}$; маса поїзда з урахуванням завантаження – m ; коефіцієнт інерції обертових мас – $(1+\gamma)$; напруга контактної мережі в режимі тяги, вибігу та рекуперативного гальмування – $U_{\text{кмтяги}}, U_{\text{кмвиб}}, U_{\text{кмрек}}$; потужність споживання електроенергії на власні потреби – $P_{\text{спож}}$.

Другий етап (завдання профілю колії та обмеження швидкості на заданій ділянці): загальна довжина ділянки – s ; кількість елементів зі змінним профілем на ділянці – N ; довжина елемента – $l_{1...N}$; ухил елемента – $i_{1...N}$; наявність кривих на елементі – так/ні; довжина кривої (за наявності кривої на елементі) – $s_{\text{кр}1...k}$; радіус кривої (за наявності кривої на елементі) – $R_{\text{кр}1...k}$; кількість ділянок з обмеженням швидкості – M ; обмеження швидкості – $V_{\text{max}1...M}$.

Третій етап (завдання керуючих впливів та кроків варіації): керування силою тяги – $\alpha_{1...K}$, керування силою гальмування – $\beta_{1...L}$, де K, L – кількість можливих керуючих впливів під час руху поїзда в режимах тяги та гальмування відповідно; кількість кроків варіації – h , довжина кожного кроку варіації – $\tau_{1...h}$. Кроки варіації задаються з урахуванням того,

що на кожному кроці профіль колії та швидкість обмеження не повинні змінюватися.

Четвертий етап (виконання підпрограми спрямлення профілю колії). Принципи спрямлення профілю колії загальновідомі та розкриті в багатьох існуючих роботах [20–22], тому детально зупинятись на них немає необхідності.

П'ятий етап (побудова швидкісної сітки): будується швидкісна сітка у вигляді масивів даних (залежності – $s(V), t(V), a(V), I_{\text{тяги}}(V), I_{\text{рек}}(V), P_{\text{тяги}}(V), P_{\text{рек}}(V), A_{\text{тяги}}(V), A_{\text{рек}}(V), A_{\Sigma}(V)$). Кількість швидкісних сіток залежить від кількості заданих керуючих впливів та кількості спрямлених ділянок колії.

Побудова швидкісної сітки передбачає розрахунки вищезазначених показників за умов зміни швидкості на ΔV в діапазоні від 0 до V_{max} . Швидкісна сітка будується залежно від кроку зміни швидкості ΔV , який задається на першому етапі під час введення характеристик поїзда.

Швидкісна сітка будується наступним чином: спочатку будується масив даних зміни швидкості (крок зміни швидкості), потім розраховуються масиви даних пройденого шляху, часу руху, прискорення, спожитого або рекуперованого струму, спожитої або рекуперованої потужності, спожитої або рекуперованої електроенергії, загальної електроенергії за крок зміни швидкості ΔV . Показники споживання визначаються для швидкісних сіток, за яких поїзд рухається в режимі тяги або вибігу, показники рекуперації – відповідно для режимів рекуперативного гальмування. При цьому пройдений шлях, час руху та прискорення за крок зміни швидкості обчислюється методом інтегрування рівняння руху поїзда. Таким чином, пройдений шлях:

– режим тяги

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(F_{\text{тяги}} - W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV; \quad (2)$$

– режим вибігу

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(-W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV; \quad (3)$$

– режим гальмування

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(F_{\text{гал}} + W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV, \quad (4)$$

де $\zeta' = 12,96$ – коефіцієнт; V_1, V_2 – відповідно початкова та кінцева швидкості рухомого складу.

Час руху:

– режим тяги

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(F_{\text{тяги}} - W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} dV; \quad (5)$$

– режим вибігу

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(-W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} dV = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} dV; \quad (6)$$

– режим гальмування

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(F_{\text{торм}} + W_{\text{осн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} dV, \quad (7)$$

де $\zeta = 3,6$ – коефіцієнт.

Прискорення:

– режим тяги

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(F_{\text{тяги}} - W_{\text{осн}} \pm W_i)}{m(1+\gamma)}; \quad (8)$$

– режим вибігу

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(-W_{\text{осн}} \pm W_i)}{m(1+\gamma)}; \quad (9)$$

– режим гальмування

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(F_{\text{гал}} + W_{\text{осн}} \pm W_i)}{m(1+\gamma)}; \quad (10)$$

Струм:

– режим тяги

$$\Delta I_{\text{тяги}} = \frac{F_{\text{тяги}} \cdot \Delta V}{U_{\text{кмтяги}} \eta_{\text{інв}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{ред}}}; \quad (11)$$

– режим гальмування

$$\Delta I_{\text{гал}} = \frac{\eta_{\text{інв}} \eta_{\text{ТД}} \eta_{\text{ред}} \cdot F_{\text{гал}} \cdot \Delta V}{U_{\text{кмгал}}}. \quad (12)$$

Потужність:

– режим тяги

$$\Delta P_{\text{тяги}} = \frac{F_{\text{тяги}} \cdot \Delta V}{3,6}; \quad (13)$$

– режим гальмування

$$\Delta P_{\text{гал}} = \frac{F_{\text{гал}} \cdot \Delta V}{3,6}; \quad (14)$$

Кількість електроенергії:

– режим тяги

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмтяги}} \cdot \int_0^t I_{\text{тяги}} dt}{3600 \cdot 1000}, \quad (15)$$

– режим вибігу

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмвиб}} \cdot \int_0^t I_{\text{виб}} dt}{3600 \cdot 1000}, \quad (16)$$

– режим гальмування

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмгал}} \cdot \int_0^t I_{\text{гал}} dt}{3600 \cdot 1000}. \quad (17)$$

Шостий етап (підпрограма розрахунку кроку варіації). Розрахунки розпочинаються з першого кроку варіації. Під час розрахунків першого кроку варіації розглядаються задані керуючі впливи для

режиму тяги. В першу чергу, визначається швидкість в кінці першого кроку варіації для різних керуючих впливів. Швидкість в кінці кожного кроку варіації для кожного керуючого впливу визначається за побудованими швидкісними сітками.

Для всіх керуючих впливів перевіряється умова: «чи швидкість в кінці кроку варіації більша за 0 та менша за встановлену швидкість обмеження на ділянці?». Перевірка зазначеної умови виконується на кожному кроці варіації. Якщо існують керуючі впливи, за яких зазначена умова не виконується, то такі керуючі впливи виключають з подальших розрахунків. Якщо на етапі розрахунків кроку варіації не буде знайдено жодного керуючого впливу, який задовольняє вищевизначеним умовам, то розрахунки мають завершитись та з'явиться повідомлення відповідного змісту: «Відсутні керуючі впливи. Необхідно змінити початкові умови розрахунків (змінити кроки варіації, керуючі впливи тощо).

Для тих керуючих впливів, які задовольняють вищевизначеним умовам, з швидкісної сітки обирається час руху, кількість спожитої або рекуперованої електроенергії в кінці кроку варіації.

Після розрахунку кожного керуючого впливу на заданому кроці варіації перевіряється умова: «Для всіх керуючих впливів виконані розрахунки?». У випадку виконання умови підпрограма розрахунку виконується для наступного кроку варіації. В іншому випадку здійснюються розрахунки для наступного керуючого впливу для даного кроку варіації.

При зміні кроку варіації виконується перевірка умови «Крок варіації останній?». Якщо умова виконується, тоді здійснюється визначення режимів ведення, за яких швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень. В іншому випадку розрахунки виконуються для наступного кроку варіації.

Сьомий етап (визначення режимів ведення, за яких швидкість та пройдена відстань в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та загальній довжині перегону відповідно, а також забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень).

У разі відсутності режимів ведення, за яких швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та забезпечується заданий час ходу з урахуванням прийнятих відхилень, має з'явиться повідомлення наступного змісту: «Відсутні режими ведення. Необхідно змінити початкові умови розрахунків (змінити кроки варіації, керуючі впливи тощо).

Для обраних режимів ведення яких (швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю, пройдена відстань в кінці останнього кроку варіації дорівнює загальній довжині перегону, а також забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень) розраховується кількість спожитої електроенергії на тягу, кількість рекуперованої електроенергії в мережу, а також загальна

льна кількість спожитої електроенергії з мережі з урахуванням повернення електроенергії рекуперації в мережу. Другий та третій показники розраховуються за умов наявності систем рекуперації на рухомому складі.

Кількість спожитої електроенергії в режимі тяги визначається за формулою:

$$A_{\text{тяги}} = \sum_{i=1}^h A_{\text{тяги}}; \quad (18)$$

Кількість рекуперованої електроенергії поїздом в мережу під час рекуперативного гальмування визначається за формулою:

$$A_{\text{рек}} = \sum_{i=1}^h A_{\text{рек}}; \quad (19)$$

Кількість спожитої електроенергії з мережі визначається за формулою:

$$A_{\text{мережі}} = A_{\text{тяги}} + A_{\text{вп}} - A_{\text{рек}}; \quad (20)$$

де $A_{\text{вп}}$ – кількість електроенергії, яка спожита системою поїзда на власні потреби.

За наявності одночасно декількох режимів ведення з однаковими мінімальними значеннями споживання з мережі обирається значення з мінімальним споживанням електроенергії в режимі тяги.

Восьмий етап (обирається раціональний режим ведення за головним критерієм – керуючий вплив, за якого спостерігається мінімальне значення споживання електроенергії на тягу з контактної мережі).

З використанням запропонованої математичної моделі та алгоритмічного забезпечення розроблено комп'ютерну програму «Rational Trajectory» (далі – КП «RT») для визначення раціонального режиму ведення поїзда при заданих умовах експлуатації. При цьому розроблена КП «RT» дозволяє автоматизувати розрахунки динамічних та енергетичних показників поїзда під час його руху за умов раціонального режиму ведення. Розроблена КП «RT» включає в себе підпрограму «Спрямлення» та «Розрахунок кроку варіації».

Програма розроблена в середовищі графічного програмування LabVIEW, головними перевагами якої є можливість реалізації алгоритмів високого рівня складності, простота реалізації, наявність зручного графічного інтерфейсу.

Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу оператора КП «RT», зображено на рис. 2. Інтерфейс програми умовно поділений на кілька фрагментів за їх функціональним призначенням. Графічний інтерфейс оператора має три вкладки: вхідні параметри, проміжні дані та результат. При запуску КП «RT» завжди відкривається вкладка вхідні параметри, де оператор має змогу ввести всі необхідні для розра-

хунку дані та скористатись підпрограмою «Спрямлення» (етапи 1–4). Функціональне призначення інших двох вкладок – це відображення проміжних (етапи 5–7) та кінцевих результатів розрахунку (етап 8).

Створена КП «RT» під час своєї роботи використовує зовнішні файли даних, які розташовані у спеціальному вкладеному каталозі. Необхідно уникати видалення чи модифікації будь-якого файлу в цій директорії. В каталозі розміщуються наступні зовнішні файли: характеристики поїзда метрополітену, характеристики ділянки перегону, інструкція користувача КП «RT».

Після запуску програми перед оператором з'являється інтерфейс основного модулю програми (рис. 2).

Для введення розрахункових даних оператор повинен виконати наступну послідовність дій:

– за допомогою відповідної кнопки завантажити характеристики поїзда (рис. 2, п.1) або ввести їх вручну;

– натиснути перемикач (рис. 2, п.2), програма виконає розрахунок параметру $W_{\text{осн}}$ та додасть результат до попередньо введеного масиву даних;

– ввести технічні характеристики поїзду (рис. 2, п. 3);

– завантажити характеристики перегону (рис. 2, п. 4) або ввести їх вручну та виконати його спрямлення (рис. 2, п. 5);

– вручну заповнити масив керуючих впливів (рис. 2, п. 6) та кроки варіації разом з обмеженням по швидкості для кожного кроку (рис. 2, п. 7).

На рис. 3 представлено інтерфейс КП «RT» з введеними даними готовими для розрахунку.

Для виконання розрахунку необхідно натиснути кнопку (рис. 2, п. 8) та дочекатися завершення розрахунку.

У разі якщо розрахунок виконується безуспішно (відсутні раціональні режими ведення) перед оператором з'являється повідомлення «Рішення відсутні». При цьому рекомендується змінити вхідні дані та повторити розрахунок.

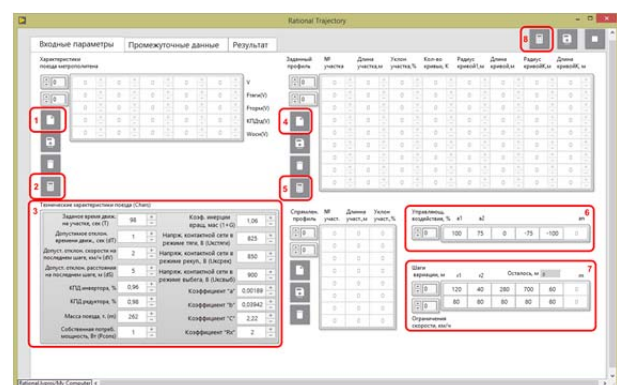


Рис. 2. Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Вхідні параметри»

На вкладці «Проміжні дані» (рис. 4) розміщені всі результати розрахунку, а саме: «Швидкісні сітки» (чотиривимірний масив даних), усі розраховані «Кроки варіації» (двохвимірний масив даних), усі результуючі кроки варіації («Результати»), що задовольняють вхідним обмеженням (двохвимірний масив).

На вкладці «Результат» (рис. 5), в якості одновимірного масиву представлений раціональний результат розрахунку, а також значення кількості електроенергії в режимі тяги, в режимі рекуперативного гальмування та їх різниці. Крім того на даній вкладці розміщений інформативний індикатор часу, що було затрачено на виконання даного розрахунку.

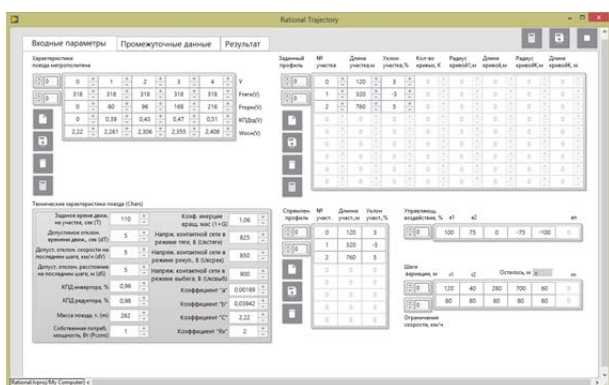


Рис. 3. Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Готовність до розрахунку

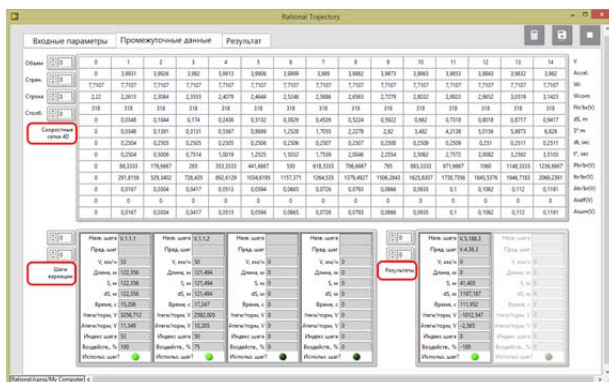


Рис. 4. Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Проміжні дані»

Після виконання розрахунку оператор має змогу зберегти результати у вигляді зовнішнього файлу-звіту (рис. 5, п.1). До цього файлу заносяться всі розраховані швидкісні сітки, вхідні характеристики поїзда, що використовувалися для розрахунку та двохвимірний масив результатів, що задовольняють вхідні обмеження. При цьому раціональний режим ведення розміщується першим елементом масиву.

При кожному завантаженні програми оператор отримує порожній інтерфейс для вводу вхідних даних для розрахунку. Може виникнути ситуація, коли необхідно буде повернутись до якогось розрахунку, виконаного раніше, та змінити значення кількох параметрів. Тому в програмі передбачена можливість

збереження і завантаження значень всіх елементів вкладки «Вхідні параметри» у окремі зовнішні файли. Для цього слід використовувати елементи інтерфейсу з зображенням дискети.

Послідовність роботи з КП «RT»:

- запустити КП «RT» на виконання;
- ввести вхідні дані для розрахунку;
- виконати необхідні розрахунки;
- зберегти звіт з результатами розрахунку за необхідності;

– завершити роботу з програмою, натиснувши відповідну кнопку інтерфейсу програми (рис. 5, п.2).

Оцінку придатності розробленого КП «RT» виконано за точністю визначення основних вихідних динамічних та енергетичних параметрів, раціонального режиму ведення, під час заданих умов експлуатації поїзда метрополітену. Алгоритм тестування та оцінки заснований на принципі порівняння результатів досліджень, виконаних за допомогою КП «RT» та редактору Microsoft Excel, за однакових заданих умов.

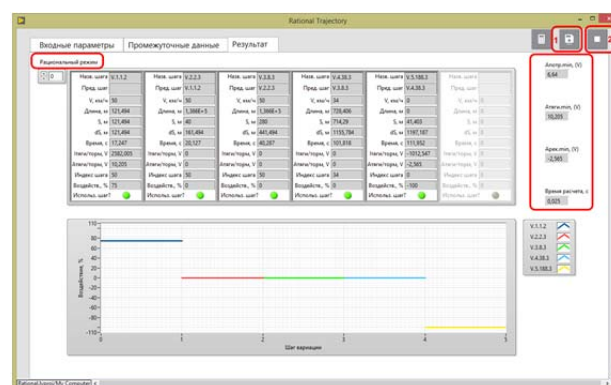


Рис. 5. Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Результат»

Оцінка проводилась наступним чином:

- виконувались теоретичні розрахунки основних проміжних та кінцевих параметрів за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «RT» для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену;
- придатність КП «RT» визначалась шляхом порівняння результатів досліджень, виконаних в редакторі Microsoft Excel та КП «RT».

Послідовність операцій, що виконуються при оцінці придатності КП «RT» наступна:

- введення вхідних даних для виконання теоретичних розрахунків в редакторі Microsoft Excel;
- розрахунок динамічних та енергетичних параметрів руху поїзда, визначення раціонального режиму ведення в редакторі Microsoft Excel;
- збереження результатів теоретичних розрахунків в редакторі Microsoft Excel;
- введення вхідних даних для виконання теоретичних розрахунків в КП «RT»;
- розрахунок параметрів руху поїзда, визначення раціонального режиму ведення в КП «RT»;

– збереження результатів теоретичних розрахунків, виконаних КП «РТ» в формі звітів;

– оцінка та порівняння результатів, виконаних за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «РТ».

Методика тестування та оцінки КП «РТ» складалась з трьох окремих експериментів. При цьому для кожного експерименту тягово-енергетичні характеристики поїзда однакові; керуючі впливи, кроки варіації, профіль колії – різні. В якості дослідного поїзда обрано модернізований поїзд з системами рекуперації (вагони моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01). В якості дослідної ділянки обрано Святошинсько-Броварську лінію КП «Київський метрополітен».

Умови проведення експериментів наступні:

1) досліджувана ділянка «Політехнічний університет–Шулявська» (довжина 1200 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 3 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$; $\alpha_3=50\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 6 ($r_1=60$ м; $r_2=60$ м; $r_3=320$ м; $r_4=660$ м; $r_5=40$ м; $r_6=60$ м).

2) досліджувана ділянка «Театральна–Університет» (довжина 882,3 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 2 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 5 ($r_1=120$ м; $r_2=40$ м; $r_3=280$ м; $r_4=700$ м; $r_5=60$ м).

3) досліджувана ділянка «Політехнічний університет–Шулявська» (довжина 1200 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 3 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$; $\alpha_3=50\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 5 ($r_1=120,7$ м; $r_2=255$ м; $r_3=146$ м; $r_4=280$ м; $r_5=80,6$ м).

За результатами проведення експериментів визначались наступні параметри: швидкісні сітки для кожного кроку варіації та профілю колії; час руху на дослідній ділянці, пройдена відстань, струм споживання, струм рекуперації, витрати електроенергії на тягу, кількість електроенергії, що повернуто до мережі.

При визначенні одного або декількох вихідних параметрів похибка оцінювалась в такий спосіб:

– абсолютна похибка між даними, що отримані в результаті досліджень за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «РТ»:

$$\Delta = |X_{ME} - X_{RT}|, \quad (21)$$

де X_{ME} – значення параметру, отриманого в редакторі Microsoft Excel; X_{RT} – значення параметру, отриманого в КП «РТ»;

– відносна похибка:

$$\delta = \frac{|X_{ME} - X_{RT}|}{X_{RT}} \cdot 100, \quad (22)$$

Порівняльний аналіз результатів досліджень дозволив встановити, що для заданих однакових вхідних даних (профіль колії, керуючі впливи та кроки варіації) розбіжність значень основних вихідних параметрів не перевищує 5 %. Отже, в цілому збіжність результатів задовільна, що свідчить про правильність та достовірність розробленої комп'ютерної програми для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації.

Висновки. 1. Розроблено алгоритмічне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації поїзда метрополітену, в основу якого покладено вирішення багатокритеріальної задачі за методом задоволених вимог (головного критерію). При цьому головним критерієм є мінімальна кількість споживання електроенергії з контактної мережі. На інші критерії (час руху на перегоні, пройдений шлях та швидкість руху в кінці останнього кроку варіації) накладаються певні задані обмеження. Розроблене алгоритмічне забезпечення стало передумовою для створення програмного забезпечення.

2. Розроблено КП «РТ», яка дозволяє автоматизувати процес визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену при заданих умовах його експлуатації та досліджувати при цьому динамічні та енергетичні показники. Це програмне забезпечення дозволить зменшити час і вартість виконання досліджень, а також підвищить точність отримання результатів.

3. Результати досліджень, отримані за допомогою редактора Microsoft Excel та КП «РТ», відрізняються не більше ніж на 5 %. Порівняльний аналіз показав задовільну збіжність результатів, що свідчить про правильність та достовірність виконання досліджень розробленим програмним забезпеченням. Тому, КП «РТ» можливо використовувати для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації, за яких забезпечується графік руху на ділянці та споживається мінімальна кількість електроенергії з контактної мережі.

Література

1. Донченко А.В., Сулим А.О., Сіора О.С., Мельник О.О., Федоров В.В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп. 2016. № 3(63). С. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>
2. Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric

- rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2018. № 20. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
3. Шевлюгин М. В., Желтов К. С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. *НТГ – Наука и техника транспорта*. 2008. № 1. С. 15–20.
 4. Кузнецов В.Г., Саблин О.И., Губский П.В., Колыхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена. *Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту*. 2015. № 95. С. 68–73.
 5. Сулим А.О., Третьак Е.В., Хозя П.О., Мельник О.О., Мужичук С.О. Оцінка резервів енергозбереження під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперативу. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2019. № 3(47). С. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.66-77>
 6. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперативу електроенергії в умовах метрополітену. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Вып. 8 (72) / том 6/. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
 7. Енергетика тягових мереж: монографія / В.Г. Сиченко, В.Г. Кузнецов, Д.О. Босий, О.І. Саблін: за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.
 8. Саблин О.И. Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом энергопотреблении. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. № 6/1(20). С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
 9. Палант О.Ю., Стаматін В.В. Огляд наявних і перспективних систем автоведення поїздів метрополітену. *Проблеми економіки*. 2019. № 2(40). С. 119–125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>
 10. Мелешин И.С. Как сэкономить на тягу. *Энергоэффективность и энергосбережение*. 2013. № 7-8. С. 65–67.
 11. Голынский А. П., Жданович А.Б. Автоведение поездов метрополитена – базовая функция системы «Движение». *Транспорт Российской Федерации*. 2011. 3 (34). С. 44–45.
 12. Носков В. И. Задача синтеза системы управления движением транспортного средства. *Коммунальное хозяйство городов*. 2002. № 55. С. 166–171.
 13. Оптимизация управления движением поездов: под ред. доктора техн. наук Л. А. Баранова / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь. Москва: МИИТ, 2011. 164 с.
 14. Li X., Lo H. K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. *Transportation Research*. 2014. Part B (64). P. 73–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.006>
 15. Кислий Д.М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп.* 2016. № 1(61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
 16. Petrenko O., Liubarskiy B., Plugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. No 6. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>
 17. Любарський Б.Г. Рациональні швидкісні режими руху приміського електропоїзду з асинхронними тяговими двигунами. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 18(1127). С. 86–92.
 18. Карачева К.Е. Расчет энергооптимальной траектории движения поезда метрополитена. *Материалы 53-й Международной студенческой конференции МНСК-2015: Транспорт / Новосиб. гос. ун-т, Новосибирск*, 2015, С. 14.
 19. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko A., Sidorenko Y., Liubarskiy B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Issue 1 (97). P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
 20. Байрыева Л. С., Прокопович А.В. Теория электрической тяги. *Методическое пособие*. Москва: Изд-во МЭИ, 2004. 40 с.
 21. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И. Теория электрической тяги: под ред. И.П. Исаева. Москва: Транспорт, 1995. 294 с.
 22. Слепцов М.А., Долаберидзе Г.П., Прокопович А.В. и др. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия». 2006. 464 с.

References

1. A.V. Donchenko, A.O. Sulym, A.S. Siora, A.A. Melnyk, V.V. Fedorov. Analysis of energy saving and energy efficiency issues during operation of the metro rolling stock. *Scientific and technical library Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2016. № 3(63). P. 108–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/74732>
2. Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2018. № 20. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
3. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. On reduction of electric power consumption in Moscow underground by application of capacitive energy storage devices. *Science and Technology in Transport*. 2008. № 1. P. 15–20.
4. Kuznecov V.G., Sablyn O.Y., Gubskiy P.V., Kolyhaev E.G. Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii systemy rekuperatsii energiy na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk.-tehn. zb. Nac. girnychoho un-tu*. 2015. № 95. С. 68–73.
5. A. Sulim, E. Tretiak, P. Hozia, O. Melnyk, S. Muzychuk. Estimation of energy saving reserves under normal operating conditions of metro rolling stock with regenerative energy systems. *Scientific production journal «Electromechanical and energy saving systems»*. 2019. № 3(47). P. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.66-77>
6. Sablin, O. Study of the efficiency of the electric energy recovery process in the subway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. No 8 (72) /vol 6/. P. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
7. Energetyka tjavovyh mrezh: monografija / V.G. Sychenko, V.G. Kuznecov, D.O. Bosyj, O.I. Sablin: za zag. red. d-ra tehn. nauk, prof. V. G. Sychenka. Dnipro: Vyd-vo PF «Standart-Servis», 2017. 210 s.
8. Sablyn O.Y. Povyshenye effektivnosti rekuperatsii energiy v systeme elektrottransporta pri ogranichenom tjavog-

- vom energopotreblenyy. Tehnologicheskij audyt i rezervy proizvodstva. 2014. № 6/1(20). P. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>.
9. Palant O.Y., Stamatina V.V. Overview of the Existing and Promising Automatic Train Operation Systems for Underground. The Problems of Economy. 2019. № 2(40). P. 119–125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>.
 10. Meleshyn Y.S. Kak sekonomyt' na tjagu. Energoeffektivnost' i energosberezhenye. 2013. № 7-8. P. 65–67.
 11. Golynskiy A.P., Zhdanovych A.B. Avtovedenye poezdov metropolitena – bazovaya funkciya systemy «Dvyzhenye». Transport Rossyjskoj Federacii. 2011. 3 (34). P. 44–45.
 12. Noskov V.Y. Zadacha synteza systemy upravleniya dvyzheniem transportnogo sredstva. Kommunal'noe hozjajstvo gorodov. 2002. № 55. P. 166–171.
 13. Optymizatsiya upravleniya dvyzheniem poezdov: pod red. doktora tehn. nauk L.A. Baranova / L.A. Baranov, E.V. Erofeev, Y.S. Meleshyn, L.M. Chyn'. Moskva : MIIT, 2011. 164 p.
 14. Li X., Lo H. K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. Transportation Research. 2014. Part B (64). P. 73–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.006>
 15. D.M. Kyslyi. Energy saving modes definition of trains handling. Scientific and technical library Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. 2016. № 1(61). P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
 16. Petrenko O., Liubarskiy B., Plugin V. Determination of railway rolling stock optimal movement modes. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. No 6. P. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.04>.
 17. Liubarskiy B. Rational speeds of movement of suburban electric trains with asynchronous traction motors. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2015. № 18(1127). P. 86–92.
 18. Karacheva K.E. Raschet energoosymal'noj traektorii dvyzheniya poezda metropolitena. Materialy 53-j Mezhdunarodnoj studencheskoj konferencii MNSK-2015: Transport / Novosyb. gos. un-t, Novosybyrsk, 2015, P. 14.
 19. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko A., Sidorenko Y., Liubarskiy B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Issue 1 (97). P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>.
 20. Bajrieva L.S., Prokopovych A.V. Teoriya elektrycheskoj tyagi. Metodicheskoe posobie. Moskva: Yzd-vo MEY, 2004. 40 p.
 21. Rozenfel'd V.E., Ysaev Y.P., Sydorov N.N., Ozerov M.Y. Teoriya elektrycheskoj tyagi: pod red. Y.P. Isaeva. Moskva: Transport, 1995. 294 p.
 22. Slepcev M.A., Dolaberydze G.P., Prokopovych A.V. i dr. Osnovy elektrycheskogo transporta: uchebnyk dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij. Moskva: Izdatel'skiy centr «Akademya». 2006. 464 p.

Сулим А.А., Сиора А.С., Мельник А.А., Хозя П.А., Третьяк Э.В. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для определения рационального режима ведения поезда метрополитена

В статье разработано алгоритмическое обеспечение для определения рационального режима ведения поез-

да метрополитена. В основу создания алгоритмического обеспечения возложено решение многокритериальной задачи методом удовлетворенных требований (главного критерия), в качестве которого выбрано минимальное количество потребления электроэнергии из контактной сети. Описана математическая модель и основные этапы алгоритмического обеспечения для определения оптимального режима ведения поезда метрополитена. На базе созданного алгоритмического обеспечения разработано программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW. Изображен внешний вид интерфейса разработанного программного обеспечения. Описаны последовательность работы оператора с разработанным программным обеспечением. Апробировано разработанное программное обеспечение путем сравнительного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований для одинаковых заданных условий эксплуатации поезда метрополитена. Тестирование программного обеспечения и условия его проведения осуществлялись по специально разработанной методике оценки пригодности. Подтверждена адекватность и правильность выполнения исследований с помощью разработанного программного обеспечения (расхождение результатов исследований не превышает 5%).

Ключевые слова: алгоритмическое обеспечение, энергоэффективность, программное обеспечение, рекуперативное торможение.

Sulym A.O., Siora O.S., Melnyk O.O., Khozia P.O., Tretiak E.V. Development of algorithmic and software support for determination of rational mode of the metro train operation

The article deals with the algorithm support to determine the rational mode of a metro train driving. The solution of a multicriteria problem by the method of satisfied requirements (the main criterion), which is chosen as the minimum amount of electricity consumption from the catenary is underlying the creation of the algorithm. The algorithmic support for determining the rational mode of operation of the metro train is based on finding of such a control effect for the given speed limits on the section, which assures a schedule and consumes the minimum amount of electricity from the catenary.

The paper describes the mathematical model and the basic stages of algorithmic support for definition of a rational mode of the metro train operation. The algorithm for determining the rational mode of metro train operation includes the following stages: setup of the technical characteristics of the train; setup of the track profile and speed limits on the section; tasks of control effects and steps of variation; track profile routing subprocedure; construction of a high-speed net grid; subroutine for calculating the variation step; determination of driving modes, which provides a given time of movement on the track running section and zero speed at the end of the last step of the variation; determination of the rational mode of metro train driving.

On the basis of the created algorithmic support the software is developed under graphic programming LabVIEW. The appearance of the interface of the developed software is shown. The paper describes the sequence of operation of the operator with the developed software. The developed software is tested on the example of three separate experiments by the comparative analysis of results of theoretical (using the Microsoft Excel editor) and experimental (using the developed software) researches for identical set conditions of operation of the metro train. Software testing and conditions of its implementation were carried out according to a specially devel-

oped validity procedure. The faithfulness and correctness of research is confirmed by the use of the developed software.

Keywords: *algorithmic support, energy efficiency, software, regenerative braking.*

Сулим Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», sulim1.ua@gmail.com

Сіора Олександр Сергійович – менеджер ввіділу кваліфікації і калібрування обладнання, Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Радікс», alexandrsiora@gmail.com

Мельник Олександр Олександрович – завідувач науково-дослідної групи науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне

підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», om.oleksandrmelnik@gmail.com

Хозя Павло Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий дослідник, завідувач науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», pavlo.khozia@gmail.com

Третяк Едуард В'ячеславович – провідний інженер науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування», edgarkremenchug@ukr.net

Стаття подана 30. 08.2020