

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Нефьодов Леонід Іванович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, зав. каф. АКІТ, м. Харків; тел.: (057) 738-77-92; e-mail: nefedovli@rambler.ru.

Нефедов Леонид Иванович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, зав. каф. АКІТ, г. Харьков; тел.: (057) 738-77-92; e-mail: nefedovli@rambler.ru.

Nefedov Leonid Ivanovich – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 738-77-92; e-mail: nefedovli@rambler.ru.

Шевченко Марія Валеріївна – Кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (057) 738-77-92; e-mail: BECHA_MV@mail.ru.

Шевченко Мария Валерьевна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков; тел.: (057) 738-77-92; e-mail: BECHA_MV@mail.ru.

Shevchenko Mariia Valer'evna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov; tel.: (057) 738-77-92; e-mail: BECHA_MV@mail.ru.

УДК 629.429.3:621.313

О. М. ПЕТРЕНКО, Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ, М. Л. ГЛЄБОВА

АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ОСНОВІ РІШЕННЯ РІВНЯННЯ ГАМІЛЬТОНА-ЯКОБІ-БЕЛЛМАНА

У даній роботі розроблено алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху електрорухомого складу на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Особливостями цього алгоритму є застосування штрафних функцій для опису обмежень, що накладаються графіком руху: досягнення потягом кінцевого пункту за заданий час руху, обмеження швидкості на ділянках шляху.

Ключові слова: експертні системи ведення транспортного засобу, алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана, штрафні функції, опір руху, витрати енергії при русі електрорухомого складу.

Вступ. Для вирішення задачі оптимального руху нами пропонується будівництво експертної системи ведення електрорухомого складу (ЕРС) на ділянці шляху, яка дозволяє визначити оптимальний закон зміни режимів роботи рухомого складу на основі критерію витрати енергії при заданій середній швидкості руху.

На основі експертних систем ведення транспортного засобу на ділянці шляху при різних середніх швидкостях руху вибирається оптимальна середня швидкість руху на основі комплексного критерію ефективності, запропонованого і обґрунтованого в роботах [1 – 4].

Аналіз останніх досліджень. Теорія оптимального управління є в нашій дні галуззю науки, що розвивається не менш інтенсивно, ніж раніше. Оптимальне управління є потужним інструментом, який дає можливість вирішувати складні завдання управління, у тому числі й керування рухом РС на залізничному транспорті.

У роботах [5 – 9] автор стверджує, що хоча задачі у безперервній часовій області можуть бути вирішені за допомогою традиційних методів, таких як *метод Лагранжа* і *нелінійного програмування*, але, якщо проблеми, сформульовані в дискретній формі шляхом ділення часу (чи відстані) на кінцеве число інтервалів, моделі реального часу (чи простору) можливо використати в якості експертної системи управління рухом ЕРС. Для даного завдання, часова область розділена на кінцеве число інтервалів часу.

Загальною проблемою стохастичного управління є складність рішення і експоненціальна залежність зростання потреби у кількості пам'яті і обчислювального часу. Причина в тому, що стан об'єкту дослідження має бути представлений у вигляді дискретної області координат, що і призводить до експоненціального зростання кількості розрахункових точок, що вимагає експоненціально наростаючу кількість обчислень [6]. В цьому випадку *рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана*, а конкретніше – *зворотний підхід Беллмана*, дозволяє отримати рішення при прийнятній кількості обчислень. Зворотний підхід Беллмана є методом, який вирішує дискретне перетворення систем реального часу [8]. Оскільки вирішувана задача у своїй основі представляє завдання оптимального управління у безперервній часовій області, необхідно представити формулювання загальної задачі оптимального управління в реальному часі.

Постановка завдання. Розробити алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі вирішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана.

Основні дані, що використовуються при рішення задачі. Основний принцип алгоритму полягає в побудові матриці, яка міститиме мінімальні витрати на шлях (у кінці шляху і часу) для кожної комбінації пройденого часу, пройденої відстані та поточної швидкості [10].

Після цього матриця ініціалізується і заповнюється у зворотному напрямі, вона стає основним інструментом, за допомогою якого буде отримана оптимальна послідовність управляючих входів і значень оптимальної швидкості. Процес, за допомогою якого це досягається, буде пояснений детально.

Окрім матриці витрат на шлях J^* , необхідно згенерувати і використати ще дві матриці того ж розміру. Це матриці *оптимального управління* і *оптимальної швидкості* на наступному часовому кроці. Ці дві матриці використовуються для того, щоб забезпечити аналіз результатів руху електрорухомого складу (ЕРС).

Для першої задачі, навіть якщо алгоритм працює швидко, немає необхідності його запускати кожного разу при рішенні задачі руху ЕРС, імітуючи роботу машиніста. Усі матриці, пов'язані з програмою, можуть бути побудовані заздалегідь, складаючи при цьому базу даних експертної системи. Процес простого зчитування матриць і обчислення оптимальної послідовності швидкостей відбувається набагато швидше і може бути оперативно використаний при моделюванні руху на кожному кроці інтегрування. Це можливо, тому що матриці, пов'язані з програмою, включають усі можливі стани (час, пройдений шлях і поточну швидкість), таким чином результати будуть достовірними для необхідного конкретного стану ЕРС, тоді як база даних експертної системи створена заздалегідь. Створені матриці відносяться до конкретної ділянки шляху між двома послідовними станціями з урахуванням заданого графіку руху.

Відносно другої мети, результати цього алгоритму навряд чи можливо представити у виді, простішому для сприйняття і розуміння, ніж вже наявний. Результатами роботи програми є швидкість, яку повинен мати потяг на кожному часовому кроці, від поточного часу до кінця шляху, а також управляючі дії, за допомогою яких це значення швидкості буде досягнуто.

Саме тому, що розмір матриць є настільки великим, зворотний розрахунок представляється єдиним способом реалізації програми, що забезпечує її виконання і отримання результатів за розумний час.

Як стверджує [11], кількість операцій, що знадобилися б у разі вибору прямого підходу, була б невинновдано великою, близько $T \cdot V^T \cdot X$ (число значень часу T , значень швидкостей V і значень положення X).

При зворотному підході, число необхідних операцій, що є кількістю розрахованих переходів, складе приблизно $T \cdot X \cdot V^2$. Зворотний підхід вимагає набагато меншої обчислювальної потужності, ніж прямий. Значна різниця у витратах обчислювальних ресурсів, необхідних для цих двох підходів, значно впливає на час розрахунків, що виконує програма, при кожному до неї зверненні.

Побудова матриці оптимальних витрат на шлях (J^).* Ця матриця містить дані про мінімальні витрати, з якими потяг може досягти пункту призначення, враховуючи поточний стан, в якому знаходиться потяг (пройдений час, пройдений шлях і поточну швидкість).

Спосіб, по якому ця матриця була побудована, включає штрафи для неможливих або небажаних станів (таких, як ненульова швидкість при кінцевому часі та положенні). При ініціалізації матриці, бажаному кінцевому стану (коли кінцевому часу і положенню відповідає нульова швидкість) привласнюються нульові витрати на шлях, тоді як для усіх інших станів в кінцевому часовому зрізі призначається штраф; це гарантує, що в якості кінцевого стану буде обрано бажане. Таким чином, ініціалізація матриці фактично включає призначення витрат на її кінцевому часовому зрізі. Потім матриця заповнюється у зворотному напрямі згідно з процесом, який буде описаний нижче в цій публікації.

Крім того в цій матриці закладається обмеження швидкості руху на певних ділянках шляхом установки штрафів для усіх значень часу при тих швидкостях, що перевищують допустимі швидкості руху для певної ділянки шляху.

Матриця оптимальної швидкості наступного часового кроку (V_{op}). Ця тривимірна матриця має ту ж розмірність, що і матриця (J^*) оптимальних витрат на шлях. Для кожної комбінації пройденого часу, пройденої відстані та поточної швидкості, ця матриця містить оптимальне значення швидкості, яку повинен мати потяг після одного часового кроку. Матриця значень оптимальної швидкості наступного часового кроку виведена з матриці оптимальних витрат на шлях. Матриця V_{op} тієї ж розмірності, що і матриця J^* .

Матриця оптимальних входів управління (U). Ця тривимірна матриця тієї ж розмірності, що і попередні, містить оптимальні входи управління для кожного елемента. Як і в попередніх матрицях, кожен елемент оптимальних входів управління відповідає конкретному пройденому часу, пройденої відстані і поточному значенню швидкості.

При розрахунку усіх можливих переходів від одного стану ЕРС в просторовій області J^* , для кожного з них розраховується необхідна сила тяги ЕРС. На підставі цієї сили і швидкостей руху на початку й наприкінці переходу визначається режим управління, що дозволяє реалізувати такий перехід. Оскільки результати розраховуються за допомогою деяких наближень, входи управління також визначаються наближено.

Розглянемо простий приклад вибігу.

У ідеальному випадку, коли вчислені усі можливі опори, тягове зусилля і витрата енергії під час вибігу потягу дорівнюватимуть нулю. У реальності, це значення близьке, але не дорівнює нулю. Зважаючи на викорис-

тані наближення і опори, не враховані в розрахунках, припускаємо, що режим вибігу має місце при тяговому зусиллі від 0 до 10 кН. Враховуючи усі прийняті допущення і ґрунтуючись на [10], обираємо режим руху – *вибіг*.

Отже, на підставі усіх вищевикладених фактів можна стверджувати, що матриця управління виводиться на основі матриці оптимальної швидкості для наступного часового кроку. Ця матриця має ту ж розмірність, що і попередні дві. Кожен її елемент містить оптимальну управляючу дію для кожного з можливих станів. Бажаний кінцевий стан (нульова швидкість) містить управляючу дію, що відповідає механічному гальмуванню.

Оптимальна траєкторія швидкості є одним з кінцевих масивів, що його повертає програма, який фактично дає оптимальну послідовність швидкості від поточного часового кроку (як визначено з вхідних значень) до кінцевого кроку часу, коли потяг прибуває до місця призначення з мінімальними витратами.

Цей масив розраховується процедурою в програмі, яка веде пошук по матриці V_{op} . Коли початкова точка зафіксована (задана користувачем), програма переходить до матриці V_{op} і перевіряє оптимальне значення швидкості для наступного часового кроку. Пройдена відстань буде вчислена з урахуванням значень швидкості на поточному часовому кроці. Після цього будуть отримано нове поєднання часу (яке буде наступним часовим кроком), відстані (яка була розрахована) і поточної швидкості (з матриці V_{op}). Використовуючи ті ж кроки до остаточного часу T , розраховуватиметься оптимальна траєкторія швидкості.

Оптимальна траєкторія управління – це масив, який повертає траєкторію управляючих дій (входів) для кожного часового кроку до кінця поїздки, так само, як у разі оптимальної траєкторії швидкості. Він розраховується по тій же підпрограмі, що і оптимальна траєкторія швидкості, але при зчитуванні матриці U , яка містить оптимальні управляючі входи для кожної комбінації поточного часу, положення і швидкості. Точки, які будуть вибрані для остаточної траєкторії, розраховуються як описано вище (для наступного кроку швидкості), але в цьому випадку повертається значення, яке зберігається в матриці U , замість матриці V_{op} .

Установка початкових умов і підготовка початкових даних при рішенні задачі. Оскільки обчислення виконуються в зворотному порядку в часі, матриця ініціюється також у зворотному напрямі. Це означає, що першими мають бути заповнені ті елементи матриці, які належать до кінцевого зрізу часу.

Кінцевий зріз часу є матрицею $X \times V$, що містить усіх можливі комбінації значень швидкості і положення, які описують стан потягу в кінцевий момент часу T . Оскільки бажаний кінцевий стан відповідає триплет $(T, X, 0)$, в цьому стані значенню витрат на шлях буде присвоєний нуль.

Інші елементи, які належать до кінцевого часового зрізу, є або положенням, відмінним від кінцевого в кінцевий момент часу, або ненульовою швидкістю та (або) положенням в кінцевий момент часу.

Для станів, які містять ненульову швидкість для кінцевого часу і місця розташування, призначається великий штраф (на порядки більший значення споживання енергії в порівнянні зі значеннями, отриманими в результаті розрахунків), як і для випадків, коли потяг не зупиняється після закінчення ділянки шляху.

Для станів, що містять будь-які значення положення, відмінні від кінцевого (X) в кінцевий час, також призначається штраф – потяг не досяг кінцевої станції вчасно.

Використання цього методу гарантує, що єдиною точкою, якій алгоритм віддасть перевагу на завершальному часовому відрізу, буде точка бажаного кінцевого стану $(T, X, 0)$. Також гарантується, що зворотний розрахунок буде запущений в потрібній точці. Це дійсно важливий крок в алгоритмі, потрібна багаторазова перевірка введених даних, щоб переконатися, що алгоритм розпочне роботу саме з цієї точки. Якщо буде вибрана інша точка замість бажаної, то увесь алгоритм поверне нездійсненні результати (потяг не зупиниться в кінцевій позиції, або не впишеться в обмеження за часом).

Бажаний кінцевий стан, якому зіставлені оптимальні витрати на шлях, прирівняні нулю. Усім іншим елементам кінцевого зрізу часу і кінцевого зрізу положення, були призначені штрафні значення. У кінцевий момент часу *або* в кінцевому положенні є тільки одна точка, яка повинна розглядатися, а саме та, в якій на кінцевий момент часу і в кінцевому положенні значення швидкості дорівнюватиме нулю.

Слід також відмітити, що штраф на ненульову швидкість у кінці шляху, призначається усім часовим сегментам і пов'язаний тільки з позицією, але не з часом. Обумовлена така вимога тим, що навіть якщо кінцева станція буде досягнута раніше, ніж передбачалося, в кінцевому положенні (X) потяг *повинен* мати нульову швидкість, інакше він не зупиниться на станції. Навпаки, штраф за не досягнення місця призначення на кінцевий момент часу пов'язаний тільки з кінцевим станом, тому цей конкретний штраф ($P2$) призначається тільки на кінцевому часовому зрізі тривимірної матриці.

Сенс введення штрафів полягає в потребі уникнути небажаних станів. Одним з небажаних станів є простоювання. Термін *простоювання* відповідає стану зупинки потягу посеред ділянки шляху. Цей стан може бути викликаний лише випадковими подіями, які не можуть бути розглянуті за допомогою алгоритму. Загалом, простоювання означає по-перше – марну трату часу, а по-друге – додаткові витрати енергії на повторний розгін з нульової швидкості. Що, як згадувалося в усіх подібних дослідженнях, є енерговитратною процедурою, якої слід уникати.

З причин, вказаних вище, на цьому етапі ініціалізації призначається штраф ($P3$) для станів, які відповідають нульовій швидкості, за винятком станів початкового і кінцевого положення, в яких швидкість має бути нульовою, а також штрафи, що відповідають перевищенню швидкості, визначеної згідно графіку руху ЕРС.

Синтез матриці оптимальних швидкостей і витрат енергії при русі ЕРС. Для початкової точки переходу (t_s, x_s, v_s) (початковий час, положення і значення швидкості) і відповідно, кінцевої точки (t_f, x_f, v_f) переходу (кінцевий час, положення і значення швидкості) алгоритм розраховує ті переходи, які починаються в часовому зрізі $T-1$ (один часовий крок до кінця) і приводять до кінцевого часового зрізу T .

Бажаний кінцевий стан настає при $(t, x, v) = (T, X, 0)$. Цей стан відповідає нульовим витратам на рух, так що алгоритм перших переходів розглядатиме цей стан, як оптимальну мету. Перевірка усіх елементів матриці відбувається з використанням трьох вкладених циклів. Оскільки алгоритм перевірки точок працює у зворотному напрямі по осі часу, а витрати остаточного часового зрізу вже задані, перший цикл пройде фіксований відрізок часу, починаючи з $T-1$ і закінчуючи $t=0$.

Процес, який перевіряє усі переходи, починаючи з часового зрізу $T-1$, полягає в наступному.

Для розрахунку витрат на перехід необхідно обрати дві *унікальні точки* – початкову і кінцеву. Унікальна точка представлена унікальним набором (t, x, v) . Для першого кроку, де обчислюються переходи, що ведуть до кінцевого часу, початкові точки належать часовому зрізу $T-1$, а кінцеві точки відносяться до часового зрізу T . Для того, щоб перевірити усі елементи матриці, після циклу часу, описаного вище, додається другий цикл, що стосується значень положення. Цей другий цикл також працює у зворотному напрямі, цього разу по осі відстані, починаючи з кінцевої позиції $x=X$ і закінчуючи початковою позицією $x=0$. Відразу після цього циклу запускається інший цикл, що цього разу стосується значень швидкості. Таким чином, будуть розглянуті усі можливі початкові точки для кожного t, x і v .

Що стосується переходів, що ведуть до кінцевого часу, безліч їх можливих вихідних точок описуються триплетом $(T-1, x_s, v_s)$ для $\forall x_s \in X, \forall v_s \in V$. Після того, як вибрана початкова точка, розраховуємо переходи в усі можливі кінцеві точки. Після закінчення трьох циклів, які дають початкову точку, перевіряємо усі можливі кінцеві точки, просто додавши ще один цикл, який визначає усі можливі значення швидкостей в кінцевих точках, що дає можливість визначити усі можливі переходи з кожного елементу матриці.

Після знаходження початкової і кінцевої точок настає час для розрахунку витрат (енергії) для цього конкретного переходу.

Використовуючи значення початкового і кінцевого положення, початкової і кінцевої швидкості та значення часу для кроку, можна розрахувати силу тяги, яку повинен забезпечити потяг, щоб здійснити конкретний перехід. Необхідна сила тяги можливо визначити за методикою, наведеною в [1 – 4].

У алгоритм вводиться ще один одновимірний масив. Оскільки точка призначення кожного переходу визначається його координатою швидкості, можливі точки призначення з кожної точки матриці складуть таку ж множину, як і безліч різних значень швидкості. Оскільки $\in V+1$ можливе значення швидкості у будь-який час, для кожної точки матриці витрат на рух існує $V+1$ можливий перехід, і усі ці переходи мають бути розраховані. Новий масив, який вводиться тут, використовується тільки усередині циклів (локально) та пов'язаний з тією вихідною точкою матриці витрат на рух, яка кожного разу розглядається в даний момент. Він складається з 81 елементу. Кожен з цих елементів масиву містить суму енергії, необхідної для кожного з можливих переходів плюс витрати на рух до точки призначення, пов'язані із кожним з можливих переходів. Після того, як масив для цієї вихідної точки буде заповнений, оптимізація відбувається шляхом простого пошуку мінімального значення цього масиву. Це значення є оптимальними витратами енергії на рух з цієї точки до кінця лінії. Якщо витрата енергії, пов'язана з кожним з цих переходів, позначена як $e(v_f)$, тоді згаданий масив витрат визначається як

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f) + e(v_f), \quad v_f = 0, 1, 2, \dots, V. \quad (1)$$

У тому випадку, якщо перехід між двома точками не потрапляє всередину допустимого діапазону сил тяги, цьому конкретному переходу привласнюється істотно більше значення штрафних витрат енергії (штраф $P4$) для сили тяги, що не реалізовується. В цьому випадку має місце:

$$e(v_f) = P4, \quad (2)$$

якщо v_f неможливо реалізувати. Тоді

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f) + P4. \quad (3)$$

Якщо даний перехід можливо здійснити на наступному кроці, слід перевірити режим, в якому знаходиться потяг у разі виникнення цього конкретного переходу. Режим визначається силою тяги, необхідної для переходу, а також початковим і кінцевим значенням швидкості на цьому переході. Потім, визначивши режим, пов'язаний з кожним переходом, можна вичислити витрати енергії на рух від початкової точки шляхом збільшення витрат переходу до значення витрат на рух до точки призначення.

Спосіб ідентифікації режиму і розрахунку витрат енергії засновано на положеннях, приведених в [9 – 11]. Розглянемо ці режими.

Згідно до роботи [9], оптимальна траєкторією руху може бути реалізована лише при застосуванні тільки одного з режимів роботи тягового приводу. Як відзначається в цій роботі, ґрунтуючись на досвіді ведення потягів, автори роблять висновки, що в якості основних режимів руху можна вибрати наступні:

- рух потягу з максимальною силою тяги (режим розгону);
- рух потягу з максимальною силою рекуперативного гальмування;
- режим вибігу;
- режим механічного гальмування;
- режим підтримки заданої швидкості руху.

Перший режим забезпечують найкращу підтримку заданого графіку руху потягу, проте характеризуються великими енергетичними витратами. Режим рекуперативного гальмування найбільш вигідний з точки зору економії енергії, проте, характеризується найбільшою інтенсивністю зниження швидкості. Крім того, застосування цього режиму неможливе на малих швидкостях руху через енергетичні обмеження ТД (неможливість створення необхідного рівня електрорушійної сили). Тому цей режим доповнюється на малих швидкостях механічним гальмуванням. Режим вибігу дозволяє здійснювати рух при відносно малих зниженнях швидкості без додаткових витрат енергії. Режим підтримки заданої швидкості здійснюється роботою тягового приводу в режимі тяги або гальмування з силою, що реалізується, рівній силі опору руху.

Проте останній режим може здійснюватися тяговим приводом ЕРС в умовах, що відрізняються від оптимальних для поточної швидкості руху. Тому в роботі в якості раціональних режимів роботи тягового приводу замість режиму підтримки заданої швидкості руху розглядається робота тягового приводу в режимі тяги і в режимі гальмування з максимальними значеннями ККД. Почергова робота приводу в цих режимах дозволить понизити витрати енергії при реалізації режиму підтримки заданої швидкості.

Для даного алгоритму рішення задачі Гамільтона-Якобі-Беллмана для руху ЕРС розглянемо реалізацію визначення витрат енергії та режимів руху.

Режим вибігу. Режим руху потягу впродовж переходу називається *вибігом* або *накатом*, коли тягова сила, необхідна для подолання переходу, складає від 0 до 10 кН. Це прийняте допущення описане вище. У ідеальному випадку накат здійснюється при силі тяги, необхідній для переходу, рівній нулю. Враховуючи прийняті припущення, в представленому алгоритмі сила тяги практично ніколи не дорівнюватиме нулю.

Коли потяг знаходиться в режимі вибігу, споживана енергія дорівнює нулю. Це означає, що всякий раз, коли перехід пройдений в режимі вибігу, витрати енергії на шлях, які мають бути присвоєні відповідному елементу локального масиву, є оптимальними витратами енергії на досягнення кінцевої точки цього конкретного переходу. Отже, коли режим переходу – вибіг, витрати, пов'язані з вихідною точкою обчислюються таким чином:

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f), \quad (4)$$

оскільки в цьому випадку

$$e(v_f) = 0. \quad (5)$$

Режим розгону. Потяг знаходиться в режимі прискорення, коли тягова сила, необхідна для переходу, складає від 10 кН до максимальної сили тяги, що реалізується двигунами.

Коли потяг знаходиться в режимі прискорення, то витратами енергії на рух, зіставленими з пов'язаним із ним елементом локального масиву, є витрати енергії в кінцевій точці плюс витрати на перехід. Таким чином, в цьому випадку витрати, пов'язані з вихідною точкою, отримують так:

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f) + e(v_f), \quad (6)$$

де, з $e(v_f)$

$$e(v_f) = \frac{\text{sign}}{(\eta)^{\text{sign}}} \left(\frac{(1+\gamma)F_A + a_{rr} + b \cdot v_{avg} +}{+c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000}} \right) \cdot \frac{v_f + v_s}{2} \cdot tstep. \quad (7)$$

Постійна швидкість. Режим руху потягу з постійною швидкістю характеризується тим, що координата швидкості початкової точки дорівнює координаті швидкості точки кінцевої ($v_s = v_f$).

Коли потяг знаходиться в режимі постійної швидкості, енергія розраховується точно так, як і в режимі прискорення, але оскільки швидкість постійна, сила прискорення дорівнює нулю, отже енергія витрачається тільки на подолання опору коченню – у випадку, що розглядається нами.

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f) + e(v_f), \quad (8)$$

де, в даному випадку

$$e(v_f) = \frac{\text{sign}}{(\eta)^{\text{sign}}} \left(\frac{a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 +}{+ \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000}} \right) * \frac{v_f + v_s}{2} * tstep \stackrel{v_f=v_s}{\Rightarrow}$$

$$e(v_f) = \frac{\text{sign}}{(\eta)^{\text{sign}}} \left(\frac{a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 +}{+ \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000}} \right) * v_f * tstep. \quad (9)$$

Значення $sign$ визначається величиною сумарного опору руху

$$sign = \begin{cases} 1; & \text{якщо } a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} \geq 1; \\ -1; & \text{якщо } a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} < 1, \end{cases} \quad (10)$$

а значення ККД визначається максимальною для даного режиму руху величиною

$$\eta = MAX \eta(v_{avg}, F = a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000}). \quad (11)$$

Режим гальмування. ЕРС знаходиться в режимі гальмування, коли сила тяги, необхідна для переходу, є від'ємною. Більшість сучасних потягів мають можливість при певних обставинах рекуперувати енергію гальмування з поверненням її в мережу. Нами розглядаються два типи гальмування: рекуперативне і механічне.

Рекуперативне гальмування. Сучасний ЕРС з асинхронними ТД може рекуперувати енергію під час гальмування, поки швидкість перевищує 7 км/год. Це означає, що в представленому алгоритмі є дві умови для того, щоб прийняти режим рекуперативного гальмування на будь-якому переході:

- по-перше, тягове зусилля має бути від $-F_k'$ до 0;
- по-друге, початкова та кінцева швидкість переходу мають бути не нижчі за 6 км/год.

Повернення енергії в мережу переводиться у від'ємне енергоспоживання, яке визначається за виразом (8) при $v_{avg} > 6$ км/год.

Механічне гальмування. ЕРС перебуває в режимі механічного гальмування за умови, що сила тяги лежить в межах від $-F_k'$ до 0 а середня швидкість переходу менша за 6 км/год.

При механічному гальмуванні потяг не економить, але і не споживає енергії. Тому під час механічного гальмування:

$$C(v_f) = J \cdot (t_f, x_f, v_f). \quad (12)$$

Після розрахунку усіх можливих переходів від одного елементу матриці, на наступному кроці алгоритму визначаємо оптимальний за критерієм мінімуму витрат енергії перехід, знаходячи мінімум в масиві $C(v)$:

$$C_{min} = MIN(C), \quad (13)$$

а також що відповідні цьому мінімуму швидкість у кінці переходу V_{op} і витрати енергії J^* , та режим роботи тягового приводу, необхідний для реалізації переходу U_{op} . Для формалізації задачі значення режиму роботи кодується згідно з виразом

$$U_{op} = \begin{cases} 1, & \text{режим розгону;} \\ 2, & a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} \geq 1, \text{ режим постійної швидкості;} \\ 3, & a_{rr} + b \cdot v_{avg} + c \cdot v_{avg}^2 + \frac{c_{r0}}{R - c_{r1}} \cdot m + mg \frac{i}{1000} < 1, \text{ режим постійної швидкості;} \\ 4, & \text{вибіг;} \\ 5, & \text{рекуперативне гальмування;} \\ 6, & \text{механічне гальмування.} \end{cases} \quad (14)$$

Таким чином створюється експертна система, що включає базу даних – масиви оптимальних швидкостей руху V_{op} , режимів роботи ЕРС U_{op} .

Використовуючи розроблену експертну систему, рішення *тягової задачі* – отримання кривих руху реалізується шляхом інтегрування диференціальних рівнянь руху ЕРС, що наведені в [1]. Проте для їх вирішення потрібне визначення оптимальних значень ККД ЕРС, які, у свою чергу, залежать і від теплового стану ТД і його елементів.

Перспективи подальших досліджень. На основі розробленого алгоритму в подальшому планується розробити експертні системи для управління руху ЕРС на приміських, міжрегіональних та швидкісних ділянках шляху, а також провести аналіз роботи та теплового стану тягових асинхронних двигунів при різних системах охолодження та вентиляції.

Висновки. Таким чином, у даній роботі розроблено алгоритм рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана для задачі руху ЕРС на ділянці шляху із заданим профілем і графіком руху, що дозволяє створити експертну систему управління рухом. Особливостями цього алгоритму є застосування штрафних функцій для опи-

су обмежень, що накладаються графіком руху, задля досягнення потягом кінцевого пункту за заданий час руху, обмеження швидкості на ділянках шляху, а також відсутності простоїв потягу в процесі руху. Єдиний підхід штрафних функцій застосований також для введення обмежень по зчепленню. Такий підхід дозволяє значно понизити витрати розрахункового часу і стандартизувати (спростити) процедури розрахунку витрат енергії.

Список літератури: 1. *Любарський Б. Г.* Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електро-транспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, – 2014. – 368с. 2. *Любарський Б. Г.* Выбор типа тягового электромеханического преобразователя энергии для пригородного электропоезда // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова – Белгород: РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – № 3– С. 184 – 188 3. *Lyubarskiy B. G.* Selezionare il tipo di convertitore di energia di trazione elettrica per i treni elettrici interregionali // Italian Science Review, 2014. – 3 (12). – pp. 273 – 276. 4. *Любарський Б. Г.* Определение рационального угла наклона кузова скоростного электропоезда с тяговым приводом на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – № 6 (1049). – С. 118 – 123. 5. *Todorov, Emanuel.* Optimal control theory. Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding (2006): pp. 269 – 298. 6. *Kappen, Hilbert J.* "Optimal control theory and the linear bellman equation." Inference and Learning in Dynamic Models (2011): – pp. 363 – 387. 7. *Kanemoto, Yoshitsugu.* Appendix IV: Optimal Control Theory. In: Kanemoto, Yoshitsugu. Theories of urban externalities. Vol. 6. North-Holland, (1980), p. 189. 8. *Papageorgiou, M.* Dynamic Programming (in Greek). Lecture Notes, Department of Production Engineering and Mangement, Technical University of Crete, Greece. (2010). 9. *Мугиншеїн Л. А., Ілютович А. У., Ябко І. А.* Энергооптимальные методы управления движением поездов. – М. : Интекст, 2012. – 80с. Интекст, 2012. – 80с. 10. *Panagiotis, Gkortzas* Study on optimal trainmovement for minimum energy consumption. – Mälargalen University, School of Innovation, Design and Engineering, 2013. – 82 p. 11. *Ma, Yi.* Dynamic programming and the HJB equation. In *Optimal Control Lecture Notes*. Department of Electrical and Computer Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign Publ., 2008. pp. 121 – 150.

References: 1. *Lyubarskiy, B. G.* *Teoretichni osnovy dlya vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnogo peretvorenniya energiyi elektrorukhomogo skladu: dis. d-ra tekhn. nauk 05.22.09.* [The theoretical basis for the selection and evaluation of advanced systems of electromechanical energy conversion of electric rolling stock. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2014. 368 p. 2. *Lyubarskiy, B. G.* *Vybor tipa tyagovogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya energiyi dlya prigorodnogo elektropoezda* [Selecting the type of traction electromechanical energy converter for a suburban electric train]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. V. G. Shuhova* [Bulletin of the V. G. Shukhov Belgorod State Technological University]. Belgorod, RITS BGTU im. V. G. Shuhova Publ., 2014, no. 3, pp. 184–188. 3. *Lyubarskiy, B. G.* *Selezionare il tipo di convertitore di energia di trazione elettrica per i treni elettrici interregionali.* *Italian Science Review.* 2014, no. 3 (12), pp. 273–276. 4. *Lyubarskiy, B. G.* *Opređenje racional'nogo ugla naklona kuzova skorostnogo elektropoezda s tyagovym privodom na osnovе reaktivnogo induktorного dvigatelya s aksial'nym magnitnym potokom* [Determination of the rational angle of the body of a speed train with an electric traction drive based on the inductor jet engine with axial magnetic flux]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"]. 2014, no. 6 (1049). pp. 118–123. 5. *Todorov, Emanuel.* *Optimal control theory. Bayesian brain: probabilistic approaches to neural coding.* 2006, pp. 269–298. 6. *Kappen, Hilbert J.* *Optimal control theory and the linear bellman equation.* *Inference and Learning in Dynamic Models.* 2011, pp. 363–387. 7. *Kanemoto, Yoshitsugu.* Appendix IV: Optimal Control Theory. In: *Kanemoto, Yoshitsugu.* *Theories of urban externalities.* North-Holland Publ., 1980, vol. 6, 189 p. 8. *Papageorgiou, M.* *Dynamic Programming (in Greek).* Lecture Notes. *Department of Production Engineering and Mangement.* Technical University of Crete, Greece. 2010. 9. *Muginsheyn, L. A., Ilyutovich, A. U. and Yabko, I. A.* *Energooptimal'nyie metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Methods of optimal energy for managing train traffic]. Moscow, Intekst Publ., 2012. 80 p. 10. *Panagiotis, Gkortzas.* *Study on optimal trainmovement for minimum energy consumption.* Mälargalen University, School of Innovation, Design and Engineering, 2013. 82 p. 11. *Ma, Yi.* *Dynamic programming and the HJB equation.* In *Optimal Control Lecture Notes.* Department of Electrical and Computer Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign Publ., 2008. pp. 121–150.

Надійшла (received) 15.03.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Петренко Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Петренко Олександр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, г. Харьков; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Petrenko Oleksandr Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, A. N. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Kharkov; тел.: +30956882716; e-mail: petersanya2007@mail.ru.

Любарський Борис Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.:+38679937569, e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Любарський Борис Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: +38679937569, e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Lyubarsky Boris Hryhorovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov; тел.: +38679937569. lboris19111972@mail.ru.

Глебова Марина Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків; тел.: +30678635034; e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Глебова Марина Леонидовна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, г. Харьков; тел.: +30678635034; e-mail: lboris19111972@mail.ru.

Glebova Marina Leonidivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, A. N. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Kharkov; тел.: +30678635034; e-mail: lboris19111972@mail.ru.