

УДК 629.4.016.1

*Сергій Матвієнко*

**ВИБІР РЕЖИМІВ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДА  
ПРИ ВИКОНАННІ  
ТЯГОВО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ**

*У статті наведено результати дослідження проблеми вибору режимів керування рухом поїзда, які б забезпечували мінімізацію витрат паливно-енергетичних ресурсів на тягу. Запропоновано використання статистичного моделювання тягово-енергетичних розрахунків на ЕОМ при варіюванні впливу основних експлуатаційних параметрів складу та інфраструктури. Аналізується алгоритм таких розрахунків і результати його програмної реалізації.*

*В статье приводятся результаты исследования проблемы выбора режимов управления движением поезда, которые обеспечивали бы минимизацию расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу. Предложено использование статистического моделирования тягово-энергетических расчетов на ЭВМ при варьировании влияния основных эксплуатационных параметров состава и инфраструктуры. Анализируются алгоритм таких расчетов и результаты его программной реализации.*

*The article presents the results of research on the choice of control modes of the train, which will ensure the minimization of fuel and energy resources in the draft. Proposed use of statistical modeling of traction-energy calculations on a computer at varying influence of the basic operational parameters of the train and infrastructure. Algorithm analyzes the results of such calculations and its software implementation.*

**Ключові слова:** режим керування, поїзд, критерій оптимальності, тягово-енергетичні розрахунки.

**Постановка проблеми та актуальність її дослідження.** Питання, винесене у заголовок статті, становить важливу науково-технічну проблему, яка стоїть наразі перед вітчизняним залізничним транспортом. Викликана вона перш за все необхідністю підвищення ефективності експлуатації існуючого і перспективного тягового рухомого складу в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). Прямим шляхом її практичної реалізації є створення комплексної системи автоматичного керування рухом поїзда («автомашиніста»). Крім того, розв'язок названої проблеми пов'язаний із вирішенням низки важливих питань, таких як складання енергооптимального графіка руху поїздів, створення тренажерних технологій, автоматизованих програм нормування витрат ПЕР тощо.

© Матвієнко С., 2011

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій** свідчить, що задача визначення енергетично оптимального режиму керування рухом поїзда може виникати як у режимі реального часу (у системах автомашиніста), так і при виконанні тягово-енергетичних розрахунків (ТЕР).

У першому випадку ключовим є пошук оптимального керування від будь-якої поточної точки ділянки до кінцевої (контрольної) точки із забезпеченням мінімізації витрат ПЕР і виконанням усіх вимог безпеки руху. Такий пошук повинен мати швидкий алгоритм для забезпечення оперативності прийняття рішень, а також має враховувати фактичні характеристики локомотива поїзда та інфраструктури. При цьому додаткові труднощі викликає необхідність адекватного прогнозу зміни цих характеристик (головним чином, параметрів інфраструктури) на подальшій ділянці.

Дослідити вплив змінних експлуатаційних факторів на енергетичні показники тяги поїздів можливо завдяки моделюванню тягово-енергетичних параметрів поїзда на ЕОМ. Швидкодія оптимізаційного алгоритму в цьому випадку не є суттєвою, але має забезпечувати багатоваріантні розрахунки за практично прийнятний проміжок часу. Основними задачами моделювання може бути оцінка стійкості оптимального керування при варіюванні факторів, які впливають на рух поїзда в експлуатації, а також визначення статистичних закономірностей між цими факторами та витратами енергоносіїв, що необхідно для обґрунтованого нормування витрат тягових ПЕР.

Дослідженням проблем оптимізації режимів водіння поїздів у різні роки займалися такі дослідники, як Л. А. Баранов, Є. П. Блохін, Я. М. Головічер, Є. В. Єрофєєв, А. М. Костромін, В. М. Максимов, О. О. Моїсєєв, Л. Є. Садовський, В. М. Сидельніков, В. В. Скалозуб, Л. Скїва, Б. Г. Постол та ін. Можна зробити висновок, що найбільш продуктивно застосовуються зараз алгоритми на основі принципу максимуму [1], методів динамічного програмування [2], а також із застосуванням ітераційного наближення до оптимального розв'язку [3].

Згадані роботи спрямовані в першу чергу на створення систем автомашиніста. Результати початкового етапу впровадження таких систем на мережі ВАТ «РЖД», висвітлені в роботі [4], свідчать про необхідність їх доопрацювання.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Разом із тим, проблемам вибору режимів під час статистичного моделювання ТЕР приділяється залишкова увага. З відомих необхідно відзначити роботу [2], де аналізується вплив змінної напруги контактної мережі на стійкість оптимального керування електровозами змінного струму в умовах оптового ринку електроенергії. Оптимізація керування у розрахунках з нормування витрат ПЕР, запропонованих у роботі [5], дозволила б підвищити їхню достовірність; це сприяло б як дотриманню встановлених норм на практиці, так і початку впровадження енергоефективних режимів водіння поїздів.

**Метою статті** є висвітлення проміжних результатів роботи з оптимізації режимів керування поїздом при статистичному моделюванні ТЕР на ЕОМ.

**Викладення основного матеріалу.** Математичне описання моделі поїзда спирається на класичні положення теорії локомотивної тяги, уявлення про поїзд як об'єкт керування, а також основні розрахункові залежності, визначені в нормативній літературі [6].

Питання теоретичного описання руху поїзда докладно розроблені у згаданих джерелах, однак складності виникають при практичній реалізації моделі у

обчислювальних алгоритмах. Основні числові параметри математичної моделі руху поїзда для задач оптимізації визначені в роботі [7], де обґрунтовано вибір скінченнорізницевої схеми для інтегрування диференційного рівняння руху, а також параметрів сітки фазових координат, з міркувань прийнятної точності обчислень; крім того, оцінено підвищення точності розрахунків при врахуванні впливу розподіленої маси складу.

Формалізація задач оптимального керування вимагає також визначення критерія оптимізації, за яким необхідно оцінювати міру оптимальності процесу для прийнятої стратегії керування. Вираз для обчислення такого критерію має бути зручним як для аналізу, так і для алгоритмізації обчислень. Найповніше визначити ефективність процесу перевезень можна за адитивним критерієм – зведеними витратами на перевезення [1]:

$$C_{ен} = H = c_{ен}A_{ен} + c_w A_w + c_b A_b + c_z T_{ходу} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $c_{ен}$  – вартість одиниці витрачених енергоресурсів на тягу;

$c_w, c_b$  – відповідно витрати на ремонт рухомого складу та колії, які припадають на одиницю роботи сил опору руху та гальмування;

$c_z$  – вартість однієї поїздо-години;

$A_{ен}$  – витрати енергоресурсів (палива або електроенергії) на тягу поїзда;

$A_w, A_b$  – відповідно робота сил опору руху та гальмування;

$T_{ходу}$  – час проходження поїздом ділянки.

Для конкретної заданої ділянки час  $T_{ходу}$ , зазвичай, фіксований графіком руху поїздів. Тоді вимога точного витримання встановленого часу  $T_{ходу}$  складатиме зміст інтегрального обмеження на режими керування поїздом (ізопериметрична умова). Крім того, для спрощення розрахунків приймають, що витрати на ремонт  $c_w$  та  $c_b$  пропорційні витратам енергоносіїв на тягу і містяться у витратній ставці одиниці ПЕР на тягу.

У такому випадку, для знаходження екстремуму критерію оптимальності при наявності ізопериметричної умови використовують метод невизначених множників Лагранжа [1], згідно з яким мінімізують функціонал

$$H^* = H + \lambda T_{ходу} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $H$  – сумарні витрати енергії під час руху;

$\lambda$  – множник Лагранжа.

Залежність значення  $\lambda$  від потрібного  $T_{ходу}$  є в першому наближенні оберненопропорційною.

Витрати енергії  $H$  можна підраховувати як за величиною механічної енергії усіх сил опору ( $A_w, A_b$ ) із урахуванням зміни кінетичної енергії, так і за витраченою енергією джерела потужності  $A_{ен}$ . Так, для електровозів витрати електроенергії в кожний момент часу визначаються добутком струму електровоза на напругу в контактній мережі:

$$H = A_{ен}^{ел} = \int_0^{T_{ходу}} (U_{км}^m I_e^m(v, u) - U_{км}^p I_e^p(v, u)) dt, \quad (3)$$

де  $U_{км}^m, U_{км}^p$  – напруга в контактній мережі відповідно в режимі тяги та рекуперативного гальмування;

$I_{км}^m(v,u)$ ,  $P_{км}(v,u)$  – струм електровоза (із урахуванням навантаження допоміжних кіл), заданий режимом  $u$ , відповідно в режимі тяги та рекуперативного гальмування.

Для тепловозів витрати палива визначаються за статичною витратною характеристикою дизеля із врахуванням витрат потужності на привод допоміжних машин і механізмів:

$$H = A_{ен}^{мен} = \int_0^{T_{ходу}} G(v,u) dt, \quad (4)$$

де  $G(v,u)$  – питомі витрати палива на одиницю часу.

Умови експлуатації накладають ряд обмежень на область пошуку оптимального керування. Наприклад, часто потребує обмеження кількості перемикачів контролера  $M$ , що характеризує стійкість керування, з точки зору надійної комутації електричних апаратів:

$$M \leq M_{\max}, \quad (5)$$

де  $M_{\max}$  – максимально допустима кількість перемикачів контролера.

Для врахування інтегрального обмеження як нестрокої нерівності (5) у роботі [1] запропоновано застосування адитивного критерію оптимальності з ваговими коефіцієнтами перед відповідними обмеженнями.

Важливим з точки зору надійності експлуатації тягових електричних машин, є обмеження температури перегріву їх обмоток  $\tau$  деякою допустимою величиною  $\tau_{\max}$ :

$$\tau \leq \tau_{\max}. \quad (6)$$

Тоді, застосовуючи запропонований у [1] підхід, можна записати вираз узагальненого критерію оптимальності:

$$H^* = H + \lambda_1 T_{ходу} + \lambda_2 M + \lambda_3 \tau \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – вагові коефіцієнти впливу відповідно часу ходу, кількості перемикачів та перегріву.

Коефіцієнти  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  і  $\lambda_3$  мають також сенс неявних одиничних вартісних ставок тих ресурсів (факторів), які визначаються обмеженнями. Конкретні значення коефіцієнтів залежать від особливих умов задачі і визначаються після попередніх розрахунків: після проведення моделювання із довільним значенням  $\lambda_1$  та  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$  визначається, чи виходять параметри  $M$  та  $\tau$  за встановлені межі; в такому випадку збільшується значення вагового коефіцієнта того фактора, який потребує зменшення, а потім виконується підбір такого значення  $\lambda_1$ , яке відповідає заданому часу ходу.

За пропонуванним узагальненим критерієм можна виконувати оптимізаційні розрахунки з використанням одного з відомих методів, описаних, наприклад, у [8]. Наявність значної кількості обмежень на фазові координати (обмеження швидкості у прив'язці до координат шляху, обмеження множини можливих керувань для певної швидкості), дискретне задання профілю колії, а також необхідність урахування змінного характеру коефіцієнта корисної дії (ККД) локомотива ускладнює застосування методів теорії варіаційного числення та принципу максимуму. Найбільш дієвими можна визначити дискретний варіант методу динамічного програмування, загальна схема якого для оптимізації режимів ведення поїзда детально розроблена у [1, 9]. Обмеження на фазові координати при цьому

методі враховуються шляхом звуження множини конкурентних траєкторій на кожному  $n$ -му кроці за мінімумом критерію

$$H_n^* = \min_{u_n \in U, v_n \in V_{\text{дон}}(s_n)} \left[ H_{n-1}^* + f(A_{en\ n}, t_n, M_n, \tau_n) \right], \quad (8)$$

де  $H_{n-1}^*$  – накопичене значення критерію оптимальності до поточного кроку;

$f(A_{en\ n}, t_n, M_n, \tau_n)$  – вираз для критерію оптимальності на поточному кроці;

$U, V_{\text{дон}}(s_n)$  – відповідно множина допустимих керувань і допустимий діапазон швидкостей на поточному кроці.

Визначені таким чином основні параметри математичної моделі та прийняті методи оптимізаційних розрахунків були покладені в основу програми ТЕР, загальна схема алгоритму якої наведена на рис.1. Складовими частинами програми є блоки підпрограм 3 та 4, в яких виконується спрямлення ухилів (з урахуванням опору від кривих) для кожного кроку інтегрування рівняння руху (динамічне спрямлення профілю під поїздом), а також розрахунок екстремалей – кривих зупинного гальмування та гальмування перед обмеженнями швидкостей (з урахуванням витримки обмеження за всією довжиною складу). Оскільки виконання проби гальм на шляху прямування є важливою вимогою безпеки руху, у блоці 4 також задається координата шляху та швидкість початку гальмування, встановлені наказом за залізницею. Залежно від мети конкретного моделювання (дослідження впливу коливань напруги, зміни коефіцієнта зчеплення тощо) у блоці 5 формуються закони зміни випадкових складових моделей; статистичні характеристики законів розподілу можуть бути отримані, наприклад, за результатами експлуатаційних тягово-експлуатаційних випробувань. У блоці 6 задаються початковий (існуючий) розподіл перегінних часів ходу, а також коефіцієнти  $\lambda_2$  та  $\lambda_3$  критерію (7), які є сталими для даної ділянки. Оптимізаційні розрахунки для різних часів ходу за окремими перегонами забезпечують блоки 7–10. Встановлено, що для отримання режиму із зміненням часу ходу на 0,5...1,0 хв коефіцієнт  $\lambda_1$  доцільно задавати окремо для ділянки перед пробою гальм та після неї. Отриманий набір режимів керування для деякого діапазону часів ходу за кожним перегонем зберігається у постійній пам'яті ЕОМ. За допомогою блоків 12–13 ці розрахунки повторюються для всіх можливих комбінацій значень заданих випадкових факторів. За отриманими в результаті таких розрахунків залежностями виду  $A_{en} = f(T_{\text{ходу}})$  виконується оптимальний розподіл графікового часу за окремими перегонами (блок 14). У блоці 15 визначається режим, який забезпечує стійке раціональне керування поїздом при розрахованих перегінних часах руху, а також розраховується відповідна йому норма витрат тягових ПЕР.

Описаний алгоритм було реалізовано у програмі ТЕР, яка складена засобами пакету MATLAB. Інтерфейс програми дозволяє зручно вводити всю необхідну інформацію для розрахунків (характеристики локомотивів і складу поїзда, профілю колії, обмеження швидкості) як у режимі введення оператором, так і шляхом імпорту з відповідних баз даних.

Найважливішою оцінкою обчислювальної здатності програми з використанням алгоритмів динамічного програмування є її швидкодія, яка залежить від кількості режимів, що порівнюються на одному кроці інтегрування рівняння руху. Для випадку електричної тяги постійного струму, а також тепловозної тяги, на кожному кроці виконується варіювання 16 режимів (15 ходових позицій керування та режим вибігу); для електровозів, обладнаних системою рекуперативного гальмування, на

встановлених ділянках застосування рекуперації у розрахунок додатково вводяться до 15 гальмових позицій. Швидкість розрахунків із такою кількістю режимів склала ~0,7 с на кілометр шляху (при тактовій частоті процесора 3x3,31 ГГц), що є прийнятним для проведення багатоваріантних розрахунків. Варто зазначити, що цей показник на порядок менший, ніж у програми із використанням методів варіаційного числення [10], при досягненні аналогічних результатів із розрахунку режимів керування.

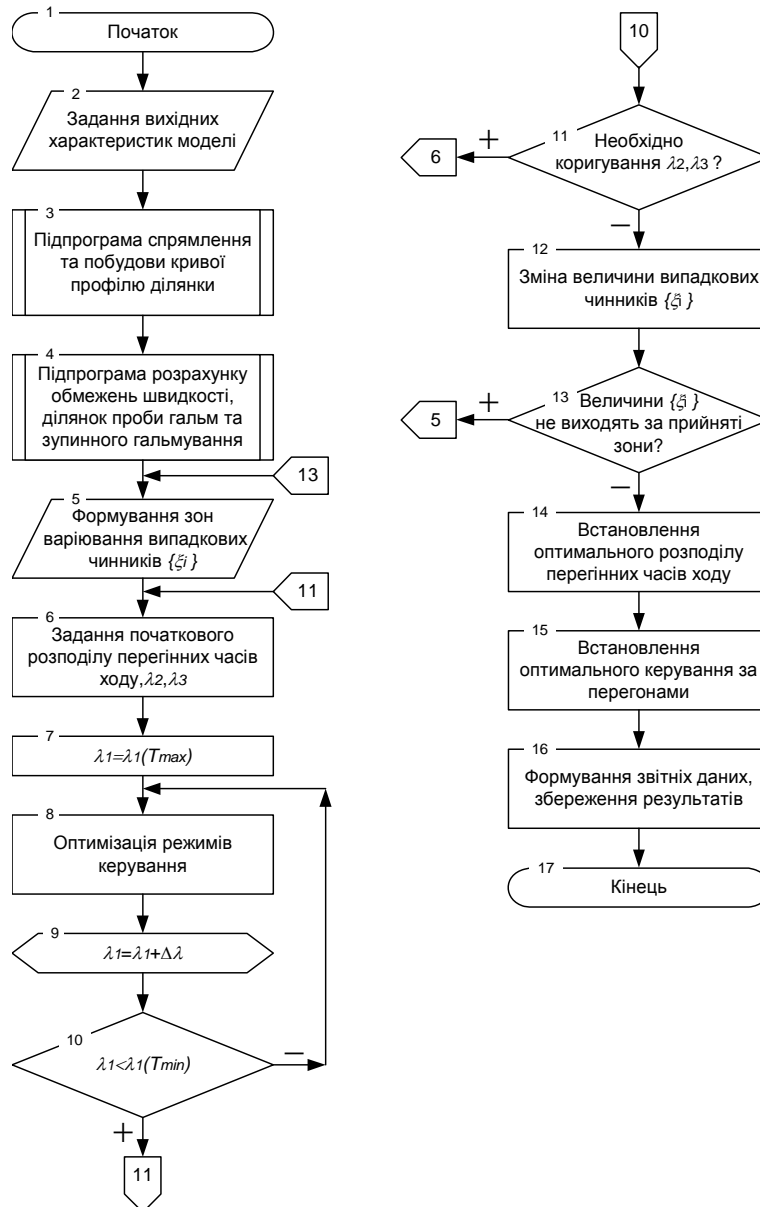
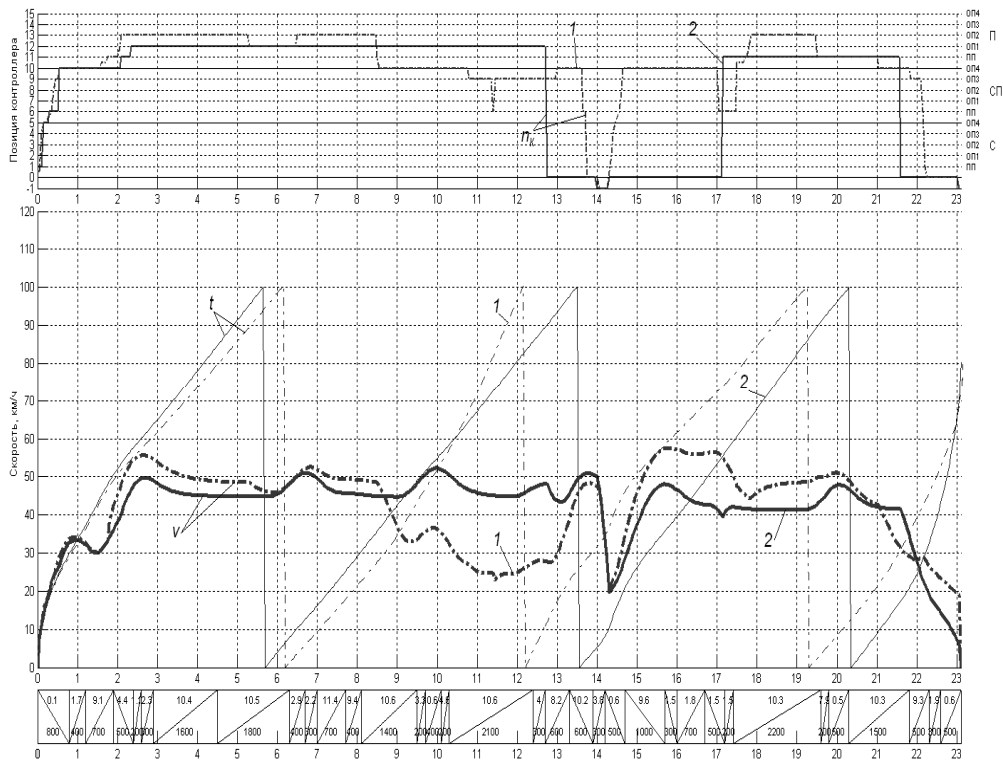


Рис. 1. Блок-схема алгоритму тягово-енергетичних розрахунків з оптимізацією керування поїздом

Результати роботи програми можна прослідкувати за рис. 2, на якому наведено графіки залежності основних фазових координат (швидкості, часу руху та позиції керування) від шляху на ділянці Родакове-Комунарськ (Донецька зал.). Вихідні режими, реалізовані під час дослідної поїздки, позначені на верхньому полі графіка лінією 1. Відповідно до них були отримані залежності швидкості та часу ходу від шляху, а також характеристики споживання електроенергії; розрахунок цих параметрів за ідеальною моделлю забезпечує коректність порівняння діючих режимів та результатів ТЕР. Оптимізовані режими та відповідні їм залежності швидкості та часу позначені кривими 2. З порівняння графіків видно, що раціональний режим, отриманий в результаті статистичного моделювання, має тенденцію до стабілізації керування при незначній зміні профілю під поїздом. Це позначається також на підтриманні швидкості руху більш рівномірною, за рахунок чого виконання розрахованого режиму може надати економію витрат електроенергії на тягу в межах 1,6...2,3 % залежно від збігу чинників зовнішнього середовища. Крім того, розрахований режим забезпечує виконання випробування гальм і витримку обмежень швидкості на ділянці, отже відповідає вимогам безпеки руху.



**Рис. 2. Залежності основних фазових координат, отримані в результаті моделювання тягово-енергетичних розрахунків:**

- 1 – режими керування за даними тягово-енергетичних випробувань;
- 2 – результат оптимізації режимів керування
- $v$  – швидкість, км/год;  $t$  – час руху,  $10^{-1}$  хв;
- $n_k$  – узагальнена позиція керування

Оскільки отримані режими керування на деяких ділянках шляху мають істотні відмінності від існуючих, їх впровадження може досягатися без дообладнання існуючих локомотивів системами підтримки прийняття рішень. Разом із тим, запропоновані алгоритми мають швидкодію, достатню для роботи таких систем, отже можуть бути покладені в основу перспективних систем автомашиністів.

Перевірка розрахованих раціональних режимів у ході тягово-енергетичних випробувань може підвищити дієвість їх впровадження шляхом коригування ідеальної моделі виходячи з місцевих експлуатаційних умов.

**Висновки.** Запропоновано вираз узагальненого критерію оптимальності керування поїздом з урахуванням мінімізації витрат енергії, кількості перемикачів контролера машиніста, перегріву тягових електричних машин і витримки графікового часу ходу. Запропоновано алгоритм ТЕР з використанням статистичного моделювання впливу випадкових експлуатаційних чинників на тягово-енергетичні показники руху поїзда. Викладені результати тестування програми ТЕР з оптимізацією режимів керування дозволяють зробити висновок про можливість та економічну доцільність їх впровадження.

### ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Блохин Е. П. Проблемы вождения поездов в условиях оптового рынка электроэнергии / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, В. В. Скалзуб // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 6. – С.10–15.
3. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. Я. Ябло // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 2. – С. 24–29.
4. Игин В. Н. Сбережению электроэнергии – повышенное внимание! / В. Н. Игин // Локомотив. – 2011. – № 3. – С.4–5.
5. Калабухін Ю. Є. До питання визначення середньоексплуатаційної питомої витрати палива тепловозом на основі тягових розрахунків / Ю. Є. Калабухін, Д. О. Горбунова // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 123. – С. 184–195.
6. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
7. Матвієнко С. А. Визначення параметрів математичної моделі руху поїзда для виконання оптимізаційних розрахунків / С.А. Матвієнко // Зб. наук. пр. Дон. ін-т. залізнич. трансп. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 24. – С. 98–107.
8. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем – М.: Наука, 1971. – 424 с.
9. Костромин А. М. Оптимизация управления локомотивом – М.: Транспорт, 1979.–119 с.
10. Черняк Ю. В. Оптимизация режимных карт вождения поездов на основании выполнения графика движения / Ю. В. Черняк, С. А. Матвиенко // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 96. – С. 40–44.