

Список літератури

1. Hiram Gu and T.V. Nguyen. A mathematical model of lead-acid cell // USA.: Electrochemical Society. 1987. V 134. № 12.
2. Поляков А.М., Разработка методики и технических средств расчетного и экспериментального определения токов короткого замыкания от аккумуляторных батарей с учетом измерения их параметров в процессе эксплуатации // Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., специальность 05.14.02 - электростанции и энергетические системы. Москва 2001.
3. Любиев О.Н., Аналитическое описание аккумулятора как элемента электрической цепи // Изв. вузов. Электромеханика. 1971. № 11.
4. Колесник І.К., Рябко К.О., Аналіз математичних моделей акумуляторних батарей системи пуску тепловозних дизелів // Збірник наукових праць ДонІЗТ, вип. 26 – Донецьк, 2011. – С. 119 – 123.

Анотації:

Рассмотрено применение упрощенной математической модели аккумуляторных батарей системы пуска тепловозных дизелей, с достаточной для практических задач точностью.

Приводится усовершенствованная математическая модель аккумуляторной батареи тепловоза.

Полученное выражение для произвольной функции тока, наиболее точно соответствует режиму пуска дизеля.

Розглянуто застосування спрощеної математичної моделі акумуляторних батарей системи пуску тепловозних дизелів, з достатньою для практичних задач точністю.

Наводиться удосконалена математична модель акумуляторної батареї тепловоза.

Отриманий вираз для довільної функції струму, найбільш точно відповідає режиму пуску дизеля.

The application of a simplified mathematical model of battery starting diesel engines, with sufficient accuracy for practical problems.

We present an improved mathematical model of the locomotive battery.

The expression derived for an arbitrary function of current, which most closely corresponds to the regime start a diesel engine.

УДК 629.4.016.1:629.4.018

МАТВИЄНКО С.А., аспірант (УкрДАЗТ).

Коригування ідеальної моделі поїзда на основі експериментальних даних

Постановка проблеми

Останнім часом значно розширилося коло задач практичної діяльності залізниць, пов'язаних із моделюванням процесів, що протікають на різних рівнях систем поїзду, і перш за все, локомотиву. Головним чином, це задачі прийняття

рішень, причому актуальними на сьогодні є обидві їх постановки: як статична (наприклад, статистичне моделювання для нормування витрат палива), так і динамічна (в режимі реального часу для систем підтримки прийняття рішень, так званих автомашиністів). Очевидно, якість прийнятого рішення та його точність в

обох випадках будуть залежати від адекватності використаної моделі, що обумовлює необхідність обґрунтованого коригування розрахункових параметрів моделі у відповідності із їх фактичними значеннями, характерними для конкретних експлуатаційних умов.

Аналіз попередніх досліджень

Ідеальна модель поїзда як однорідного стрижня із одним ступенем свободи здобула загального поширення у розрахунках широкого призначення, в яких суттєвим є визначення тягово-енергетичних параметрів поїзда. Така модель ґрунтується на класичних положеннях теорії локомотивної тяги, а її основні вихідні параметри (тягові, витратні характеристики локомотивів, характеристики опорів тощо) закріплені у нормативах [1].

Однак багато дослідників відзначають суттєві розбіжності результатів модельних розрахунків та їх дослідної перевірки, особливо у задачах оптимального керування [2,3]. Значний діапазон варіювання фактичних значень параметрів від розрахункових негативно впливає на точність встановлення норм мас поїздів [4], а також норм витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) на тягу [5]. Подвійна природа виникнення таких відхилень (під дією випадкових чинників зовнішнього середовища та в результаті несприятливого збігу допустимих технологічних відхилень при утримання рухомого складу та інфраструктури) потребує дослідження і оцінки їх величини за кожною тяговою ділянкою.

Питання аналізу, оцінки та забезпечення адекватності моделей розглядаються у загальній теорії моделювання [6]. Відомий метод контрольних експериментів із імітаційною моделлю потоку поїздів з визначенням розподілу графікових часів ходу [7], але він не враховує енергетичну складову процесів руху поїзда. В якості фактору оцінки адекват-

ності моделі повинен бути обраний саме енергетичний параметр, як такий, що входить до виразів критеріїв оптимальності, а також визначає важливий показник – норму витрат тягових ПЕР.

Існуючі на сьогодні технічні засоби дозволяють отримувати вичерпну інформацію про тягово-енергетичний стан локомотиву. Так, режими та умови експлуатації фіксуються під час дослідних поїздок із тягово-енергетичними вагонами-лабораторіями [8,9]; крім того, переважна більшість новозбудованих локомотивів обладнуються бортовими системами діагностики [10]. Опосередковано такі системи враховують також вплив параметрів інфраструктури (наприклад, через зміну опору руху, напруги контактної мережі тощо), отже можуть оцінювати вплив усіх складових моделі поїзда на енергетику тяги для конкретної ділянки та серії локомотиву.

Проте такий потенціал згаданих систем використовується не повно, бо основним їх призначенням є контроль знаходження вимірюваних параметрів у встановлених межах.

Мета роботи

У статті ставиться задача розробки методики коригування параметрів моделі поїзда з метою досягнення адекватності модельних розрахунків для конкретних експлуатаційних умов.

Основний зміст роботи

Найбільш точно оцінити зміну параметрів моделі руху поїзда можна шляхом порівняння їх розрахункових значень із фактичними, отриманими в результаті прямих вимірювань. Однак не всі з цих параметрів підлягають прямому вимірюванню (як, наприклад, сила тяги локомотива та гальмова сила поїзда), а визначення деяких з них (як сил опору руху) вимагає проведення дослідних поїздок на спеціа-

лізованих випробувальних полігонах, отже неможливо в умовах експлуатації.

Узагальнену оцінку зміни основних параметрів моделі руху поїзда можна отримати, розглядаючи енергетичну складову процесів тяги. Для цього запишемо вираз для механічної роботи локомотива в режимі тяги на деякій ділянці Δs , достатньо малій для того, аби припустити на ній рух із постійним прискоренням:

$$A_{\text{мех}} = F_{\kappa} \Delta s = W_{\kappa} \Delta s + \Delta E_{\text{кін}}, \quad (1)$$

де $A_{\text{мех}}$ – механічна робота локомотива зі складом поїзду, Дж;

F_{κ} – сила тяги локомотива, Н;

W_{κ} – повний опір руху поїзда, Н;

Δs – довжина ділянки, м;

$\Delta E_{\text{кін}}$ – приріст кінетичної енергії руху поїзда, Дж.

Аналогічно для режиму вибігу, коли робота сил опору здійснюється за рахунок зменшення кінетичної енергії:

$$W_{\kappa} \Delta s + \Delta E_{\text{кін}} = 0. \quad (2)$$

В режимі гальмування додаткова втрата кінетичної енергії відбувається у гальмах поїзда, тоді

$$W_{\kappa} \Delta s + B_{\text{г}} \Delta s + \Delta E_{\text{кін}} = 0, \quad (3)$$

де $B_{\text{г}}$ – гальмова сила поїзда, Н.

Для загального випадку можна записати

$$A_{\text{мех}} = W_{\kappa} \Delta s + B_{\text{г}} \Delta s + \Delta E_{\text{кін}}. \quad (4)$$

Визначимо складові цього рівняння, розрахункові значення яких є вихідними у модельних розрахунках та можуть зазнавати зміни під впливом експлуатаційних чинників. Очевидно, що такими є роботи сил тяги та гальмування. Робота сил опору руху може змінюватися лише частково. У величину повного опору W_{κ} , яка визначає цю роботу, включають, за [1], основний та

додатковий опори; останній з них в свою чергу має складові, що залежать від конструкції рухомого складу, параметрів навколишнього середовища, плану та профілю колії. Оскільки параметри колії є зовнішніми по відношенню до моделі поїзда та є вихідними параметрами у розрахунках, ця складова не потребує коригування. В такому випадку роботу сил опору подамо з двох частин: роботи сил основного опору W_o , до якої умовно віднесемо також складову додаткового опору, що залежить від конструкції, технічного стану рухомого складу та зміни параметрів середовища (ця частина може варіюватися в експлуатації), а також роботи сил додаткового опору від плану та профілю колії $W_{i,r}$, тобто

$$W_{\kappa} \Delta s = W_o \Delta s + W_{i,r} \Delta s. \quad (5)$$

Приріст кінетичної енергії у виразі (4) визначається лише заданою масою поїзда (яка не змінюється під час поїздки) та швидкістю його руху. Швидкість є похідним параметром моделі і залежить, зокрема, від співвідношення робіт сил тяги, опору та гальмування. Отже, при її визначенні враховуються також зміни цих робіт, тому додаткового коригування додаток $\Delta E_{\text{кін}}$ не потребує.

Зміну кожної зі складових механічної роботи, які зазнають впливу експлуатаційних чинників, оцінимо за допомогою поправочних коефіцієнтів, визначених як відношення фактичної величини роботи до її розрахункової величини. Тоді вираз (4) можна записати в остаточній формі наступним чином:

$$k_f F_{\kappa} \Delta s = k_w W_o \Delta s + W_{i,r} \Delta s + k_b B_{\text{г}} \Delta s + \Delta E_{\text{кін}} \quad (6)$$

де k_f , k_w , k_b – коефіцієнти зміни роботи відповідно сили тяги, сил опору та гальмової сили поїзду.

Оскільки величина Δs в даному виразі є незалежною змінною моделі і не за-

знає впливу відхилень її характеристик, то очевидно, що поправочні коефіцієнти будуть оцінювати зміну величин силових параметрів (сил тяги, опору та гальмування).

Вказані сили можна визначати опосередковано за параметрами, доступними для прямого спостереження в експлуатації (наприклад, швидкість руху, напруга та струми у ланках силових кіл). Це дозволяє значно скоротити перелік необхідних для вимірювання параметрів і спростити склад та розташування вимірювального обладнання.

Виміряні параметри є вихідними для розрахунку величин сил за співвідношеннями з [1], що використовуються також і при моделюванні руху поїзда. Тоді введені коефіцієнти і будуть шуканими оцінками зміни розрахункових співвідношень сили тяги, опору руху та гальмування. Таким чином досягається можливість контролю цих розрахункових параметрів моделі.

Для кількісного визначення величин поправочних коефіцієнтів для конкретної поїздки один з двох доданків формули (6), які не зазнали коригування, необхідно обрати в якості фактору приведення параметрів моделі у відповідність до експериментальних даних.

Використання доданку, який визначає зміну кінетичної енергії, ускладнене тим, що він містить швидкість у квадраті, отже при порівнянні розрахункової траєкторії швидкості із дослідною складно буде встановити вплив незначних варіацій коефіцієнтів.

Розглянемо інший доданок формули (6), який враховує сили додаткового опору від плану та профілю колії, визначені за формулою

$$W_{i,r} = i_c (P + Q) g, \quad (7)$$

де i_c – крутість ухилу спрямленого (з урахуванням кривих) профілю колії, ‰;

P, Q – маса відповідно локомотиву та складу, т;

g – прискорення сили тяжіння, м/с².

Звідси з урахуванням формули (6) знайдемо вираз для крутості ухилу ділянки спрямленого профілю довжиною Δs :

$$i_c = \frac{k_f F_k \Delta s - k_w W_o \Delta s - k_b B_c \Delta s - \Delta E_{kin}}{(P + Q) g \Delta s}. \quad (8)$$

Якщо задатися висотою профілю h_n у початковій точці ділянки Δs , то умовна висота кінцевої точки цієї ділянки за спрямленим профілем дорівнює

$$h_k = h_n + \frac{i_c}{1000} \Delta s. \quad (9)$$

Порівнюючи отримане перевищення профілю $\Delta h = |h_k - h_n|$ із фактичною його величиною Δh_ϕ , можна визначити такі значення поправочних коефіцієнтів, які б мінімізували відхилення $\delta h = |\Delta h - \Delta h_\phi|$.

Отже, в якості фактору приведення моделі використано зовнішній по відношенню до системи поїзда чинник – спрямлений профіль колії. Такий профіль, у відповідності до [1], враховує ухили фактичного профілю, а також фіктивні ухили від кривих у плані. Відомості для розрахунку такого профілю можна отримати заздалегідь за даними трасування ділянки, або безпосередньо під час руху поїзда за даними систем глобального позиціонування.

З практичної точки зору зручніше знаходити єдині значення коефіцієнтів для тягової ділянки в цілому, що потребує побудови кривої профілю для такої ділянки. При цьому слід відзначити, що проблеми невизначеності при підборі коефіцієнтів не виникає, оскільки рівняння (8) записане для загального випадку. Дійсно, в кожний момент часу разом можуть бути задіяні щонайбільше два доданки (наприклад, доданки, які визначають роботу сил тяги та опору руху, сил опору та гальмування), а один з них (робота сил опору руху) присутній у рівнянні (8) протягом всієї ділян-

ки. Тоді, визначивши коефіцієнт k_w на деякій частині ділянки, на якій поїзд рухається в режимі вибігу, для будь-якого його положення в середині ділянки можна визначити обидва інші коефіцієнти.

Пропонований метод дозволяє оцінювати зміни тягово-енергетичних параметрів поїзда в цілому або за окремими позиціями керування локомотивом в режимах тяги та електричного гальмування (в такому випадку поправочний коефіцієнт k_f визначається для кожної позиції окремо). Перевагою такого методу є також можливість контролю параметрів в режимі реального часу на протяжності поїздки.

Для реалізації пропонованого методу складено алгоритм обробки даних дослідної експлуатації; на його основі створено програмний комплекс у середовищі MATLAB. Відповідно до принципу, викладеному в [11], комплекс містить програми обробки результатів вимірювань, коригування моделі та розрахунків із скоригованою моделлю.

В якості вихідної інформації про режими та умови експлуатації використано дані дослідних поїздок тягово-енергетичного вагона-лабораторії Донецької залізниці, однак принциповим є лише перелік необхідних вимірних параметрів, а не джерело їх отримання.

В ході обробки дослідних даних відбувається розрахунок тягово-енергетичних параметрів руху поїзда за кожним заміром, а також інтегральні показники поїздки [12]. Вимірні параметри локомотива, характеристики яких безпосередньо

використовуються при моделюванні, порівнюються зі своїми розрахунковими значеннями. Наприклад, для кожної позиції керування визначається середній поправочний коефіцієнт зміни струму

$$k_I = \frac{I_o^{факт}}{I_o^P},$$

де $I_o^{факт}$, I_o^P – відповідно фактичне та розрахункове значення струму тягового двигуна при даній швидкості.

Сили опору руху та гальмування визначаються за відповідними питомими силами, розрахованим в залежності від швидкості руху за формулами з [1]:

$$W_o = Pw'_o g + Qw''_o g, B_z = b_z(P + Q)g, \quad (10)$$

де w'_o , w''_o – питомі сили опору відповідно локомотиву та складу, Н/кН;

b_z – питома гальмова сила, Н/кН.

Приріст кінетичної енергії руху при зміні швидкості від v_n до v_k визначається за формулою

$$E_{кін} = \frac{(P + Q)1000^3(1 + \gamma)(v_k^2 - v_n^2)}{2 \cdot 3600^2}, \quad (11)$$

де γ – коефіцієнт інерції обертових частин поїзда, приймається за [1];

v_n , v_k – відповідно початкова та кінцева швидкість на ділянці Δs , км/год.

Для визначення середнього ухилу між замірами (в %) в програмних розрахунках використано вираз, отриманий з (8) із урахуванням (10), (11)

$$i_c = \frac{k_f k_{км} F_k R - (k_{км} P w'_o + k_w'' Q w''_o)g - k_b b_z (k_{км} P + Q)Tg}{(k_{км} P + Q)g} + \frac{4,17(v_n^2 - v_k^2)}{\Delta s}, \quad (12)$$

де $k_{км}$ та $k_{км}$ – коефіцієнти відповідно кратної тяги та маси, які враховують збільшення сумарної сили тяги та маси усіх локомотивів поїзду порівняно із дослідним локомотивом для ділянок кратної тяги та підштовхування;

R – ознака режиму роботи локомотива: визначає знак сили тяги для тягового ($R=1$) та гальмового режимів ($R=-1$); в режимі вибігу $R=0$;

T – ознака пневматичного гальмування: $T=1$ коли гальма задіяні, $T=0$ в інших випадках.

Після коригування положення початкової точки профілю, що визначається розташуванням поїзда на станції відправлення, виконується розрахунок поправочних коефіцієнтів: спочатку k_b , а потім k_f та k_w . Програма дозволяє виконати введення коефіцієнтів оператором, або визначити їх за мінімумом середньоквадратичного відхилення траєкторії розрахункового профілю від дійсного.

Результати роботи програми розглянемо на прикладі обробки даних дослід-

них поїздок №№296-301, які відбувалися під час експлуатаційних випробувань 11-13.08.2010 на ділянці Дебальцеве-Луганськ Донецької залізниці. Досліди проводилися із електровозом ВЛ8-1487 та поїздами, маси яких були близькі до уніфікованої на даній ділянці в межах 200 т.

Коефіцієнти визначалися для окремих ділянок між сусідніми зупинками поїздів. На рисунку 1 наведено приклад діалогового вікна визначення коефіцієнтів та графіки профілів колії ділянки Родакове-Комунарськ для поїздки №301 (13.08.2011, маса складу 3130 т, 156 осей).

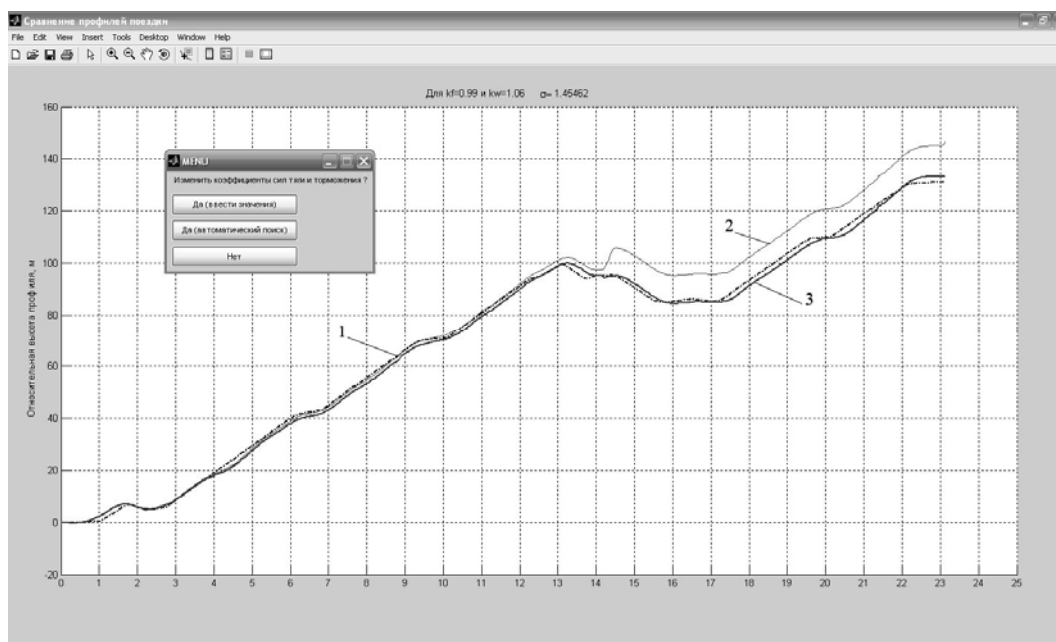


Рисунок 1. – Відображення на екрані результату розрахунку поправочних коефіцієнтів

1 – фактичний спрямлений профіль ; 2 – нескоригований профіль;
3 – скоригований профіль

Зведені дані по всім поправочним коефіцієнтам моделі для даної поїздки відображуються у відповідному діалоговому вікні (рисунок 2). Коефіцієнти зміни струму визначені з урахуванням зміни фактичного рівня напруги контактної мережі від розрахункового та наведені

окремо за кожним видом з'єднання тягових двигунів та ступенем ослаблення поля їх збудження. Приклад суміщення фактичних швидкісних характеристик двигунів із розрахунковими залежностями наведено на рисунку 3.

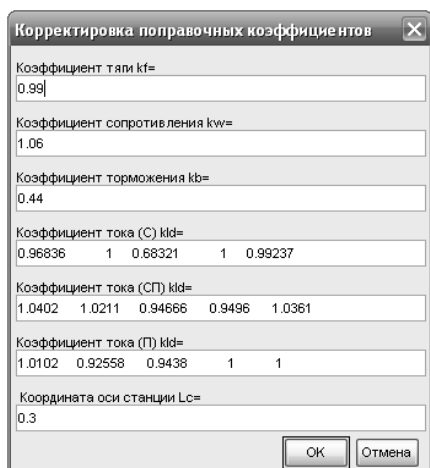


Рисунок 2. – Відображення на екрані діалогового вікна остаточного вибору поправочних коефіцієнтів

Результати дослідної поїздки (або її фрагмента) виводяться у вигляді звітної таблиці, де зазначено зміну усіх вимірних та обчислених параметрів, а також у графічному виді із відображенням необхідних фазових координат поїздки (при-

клад такого графіку залежності режимів керування, швидкості та струму локомотива від шляху наведено на рисунку 4).

Оцінити вплив введених поправочних коефіцієнтів на точність модельних розрахунків найбільш повно можливо за двома найсуттєвішими характеристиками поїздки: витратами ПЕР на тягу та часом ходу; також необхідно звернути увагу на співпадіння якісного характеру розрахованих та дослідних траєкторій зміни фазових координат.

Результат тягово-енергетичного розрахунку із скоригованою моделлю для ділянки Родакове-Комунарськ надано на рисунку 5; для порівняння на рис. 6 наведено результати розрахунку для цієї ж ділянки із ідеальною моделлю (додатково показане вікно задання коефіцієнтів ідеальної моделі). В обох розрахунках режими керування приймалися такими ж, як і під час дослідної поїздки.

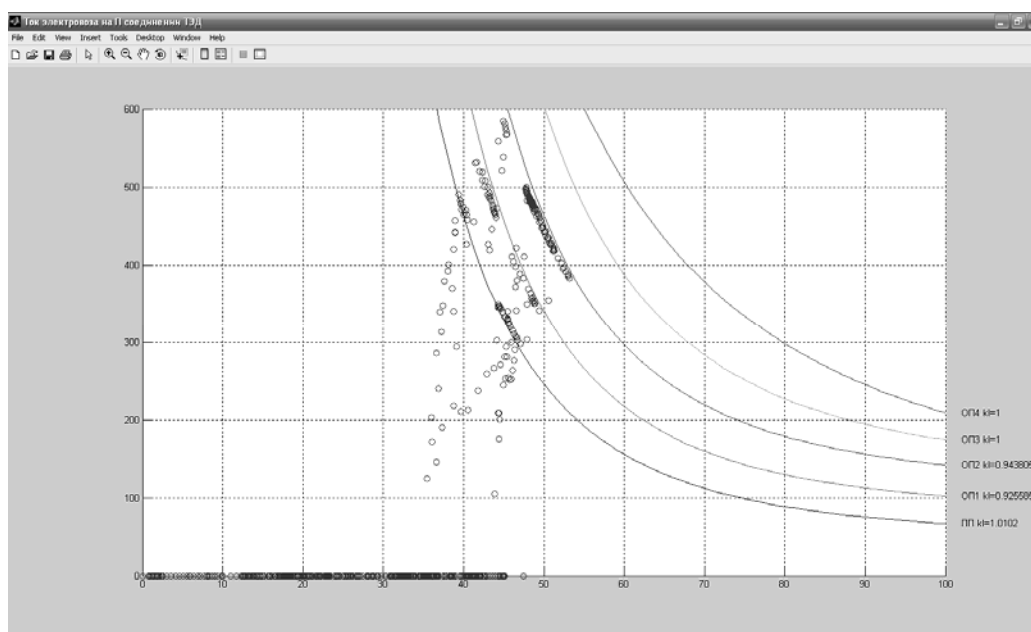


Рисунок 3. – Відображення на екрані залежності вимірних значень струму тягового двигуна від швидкості та суміщення їх із швидкісними характеристиками

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ

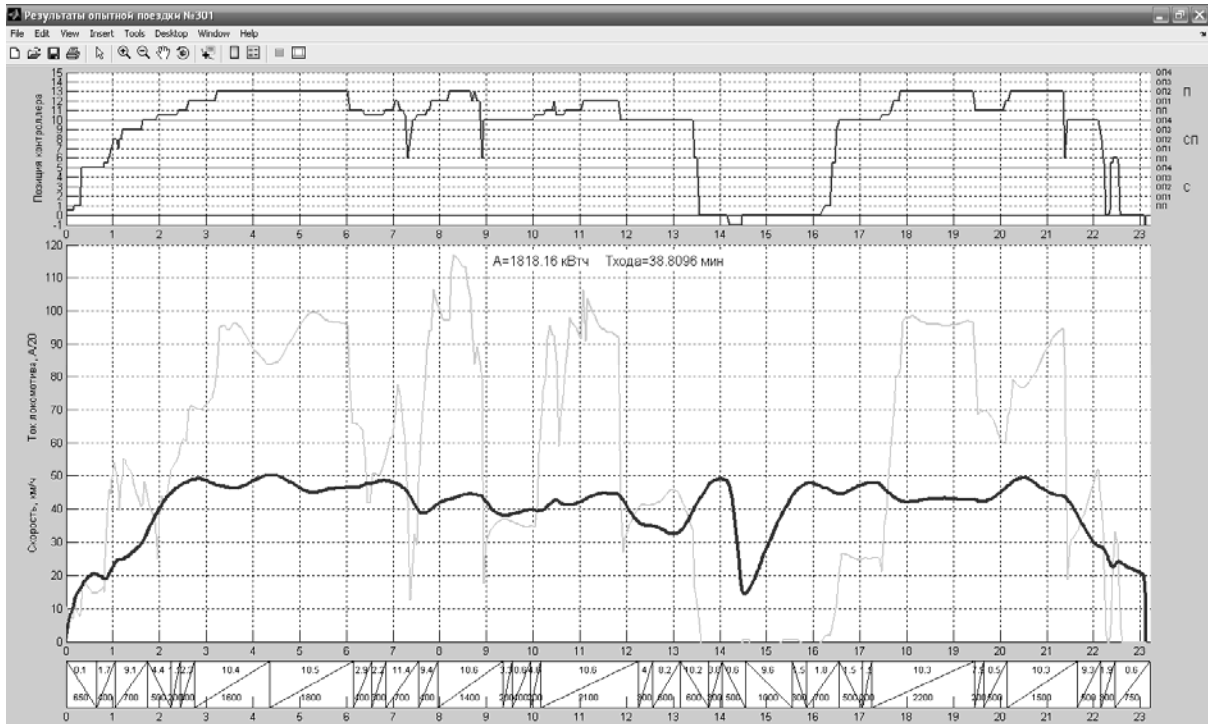


Рисунок 4. – Відображення на екрані результатів дослідної поїздки

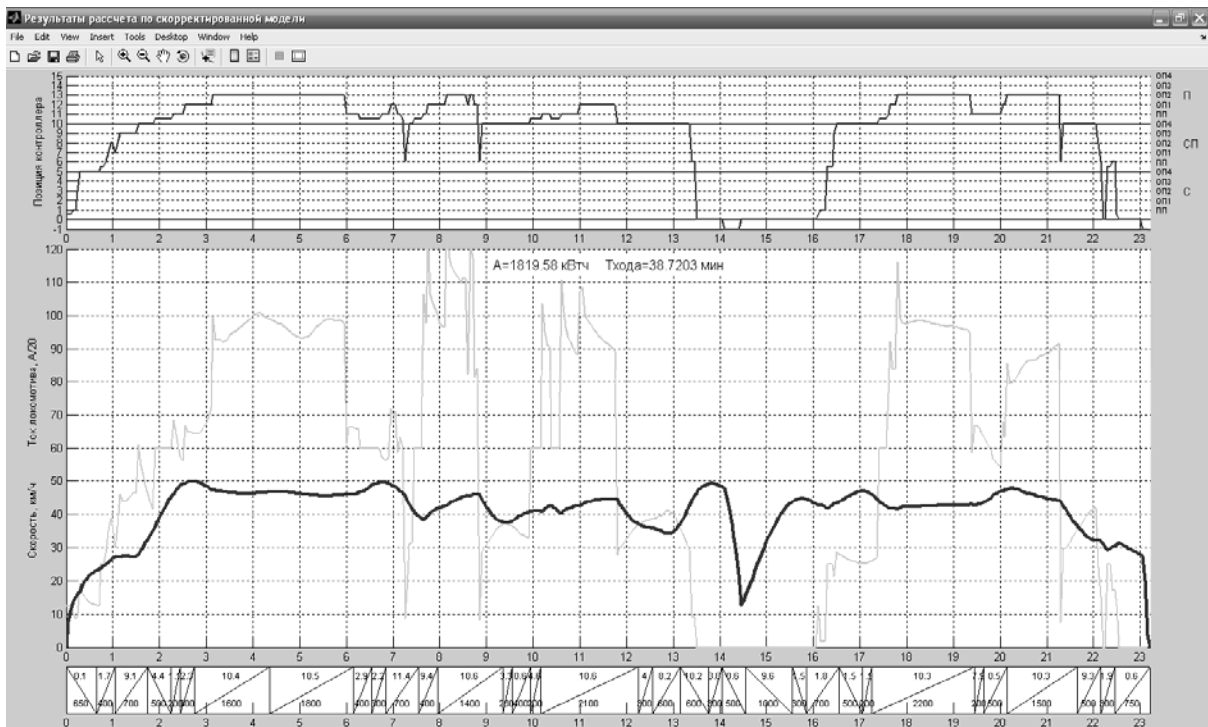


Рисунок 5. – Відображення на екрані результатів тягово-енергетичних розрахунків за скоригованою моделлю

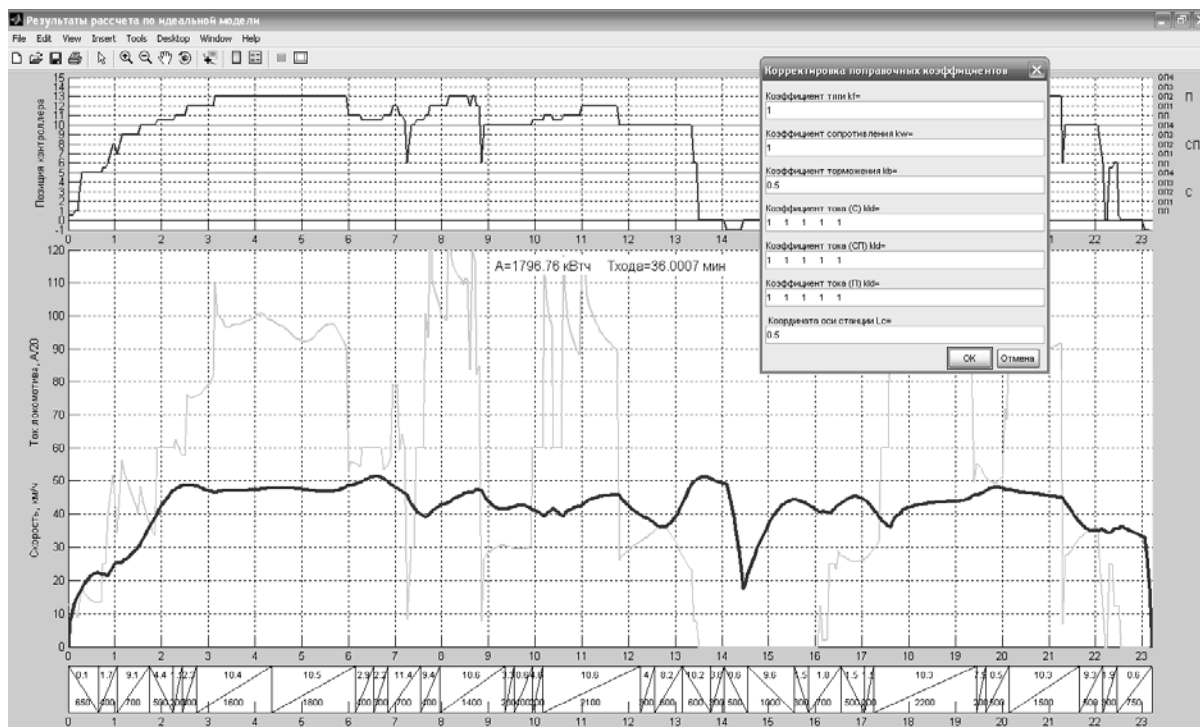


Рисунок 6. – Відображення на екрані вікна вибору поправочних коефіцієнтів для випадку тягово-енергетичних розрахунків за ідеальною моделлю та їх результатів

З порівняння рисунків 4-6 видно, що в даному випадку тягово-енергетичних розрахунки за скоригованою моделлю дають результати із похибкою менше 1% в порівнянні із результатами дослідів, в той час як розрахунки за ідеальною моделлю (навіть при врахуванні фактичного рівня напруги контактної мережі) призвели б до заниження основних показників поїздки: за витратами електроенергії похибка збільшилася до 1,2%, а за часом ходу до 7,2%, тобто сягнула б за допустимі межі. Порівняння результатів розрахунків за іншими проаналізованими поїздками підтверджує переваги скоригованої моделі (точність розрахунків в середньому на порядок вища в порівнянні із ідеалізованою моделлю).

Таким чином, використання дослідних даних для уточнення тягово-енергетичної моделі поїзда та підвищення точності розрахунків на її основі покращує результати її використання у великому колі практичних задач. Зокрема, це створює умови для уточнення нормування

витрат ПЕР для конкретних ділянок, моделювання процесів ТЕВ та розрахунку оптимальних режимів керування в реальному часі у бортових локомотивних системах підтримки прийняття рішень.

Висновки

1. Запропоновано метод коригування ідеальної тягово-енергетичної моделі руху поїзда на основі даних дослідної експлуатації.
2. Обґрунтовано, що в якості фактору приведення моделі у відповідність до експериментальних даних доцільно обрати профіль колії.
3. Викладено алгоритм обробки дослідних даних для коригування моделі, а також результати перевірки її адекватності, які свідчать про значне підвищення точності розрахунків за скоригованою моделлю.

Список літератури

4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

5. Мугинштейн Л.А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л.А. Мугинштейн, С.А. Виноградов, И.Я. Ябло // Железнодорожный транспорт. – 2010. – №2. – С.24-29.

6. Галиев И.И. Оптимизация ведения поезда / И.И. Галиев, В.А. Нехаев // Железнодорожный транспорт. – 2000. – №10. – С.41-42.

7. Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициент сцепления / И.П. Исаев. – М.: Транспорт, 1970. – 184 с.

8. Медлин Р.Я. Удельный расход электроэнергии за поездку с грузовым поездом / Р.Я. Медлин, Е.А. Сидорова // Электрическая и тепловозная тяга. – 1989. – №2. – С.37-40.

9. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.

10. Быков В.П. Исследование вопросов надежности автоматизированных систем управления технологическими процессами на сортировочных горках: Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Л.: ЛПИЗТ, 1982.

11. Щербаков О.О. Дослідження тягових властивостей електровозів 2ЕЛ5 на базі вагону-лабораторії / О.О. Щербаков // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2009. – Вип. 108. – С.194-197.

12. Бортовая автоматизированная система компьютеризированного динамометрического и тормозоиспытательного вагона-лаборатории БАС КВЛ-ДТ [Электронный ресурс]: описание продукции

НПЦ ИНФОТРАНС. – Режим доступа: <http://62.213.30.22/product.html?prodid=61>.

13. Системы автоведения, регистрации параметров движения и работы тягового подвижного состава: Обзорное пособие. – М.: ООО «АВП-Технология», 2009. – 98 с.

14. Крашенінін О.С. Удосконалення експлуатаційних випробувань / О.С. Крашенінін, Ю.В. Черняк, С.А. Матвієнко // Зб. наук. пр. / Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х.: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 117. – С.22-27.

15. Черняк Ю.В. Определение силы тяги локомотива при производстве тягово-энергетических испытаний / Ю.В. Черняк, С.А. Матвієнко // Зб. наук. пр. / Дон. н-т. залізнич. трансп. – Донецьк: ДонІЗТ, 2007. – Вип. 12. – С.116-126.

Анотації:

У статті розглядається метод коригування ідеальної тягово-енергетичної моделі поїзда на основі даних експлуатаційних випробувань. Запропоновано фактор приведення моделі та викладено принцип її коригування. Описано алгоритм обробки дослідних даних, наведено порівняння результатів програмних розрахунків із даними вимірювань.

В статье рассматривается метод корректировки идеальной тягово-энергетической модели поезда на основании данных эксплуатационных испытаний. Предложен фактор приведения модели и изложен принцип ее корректировки. Описан алгоритм обработки опытных данных, приводятся сравнение результатов программных расчетов и данных измерений.

In article stated the method of updating of ideal train traction-power model, which basis is the data of operational tests. The factor of model specification is offered also a principle of its updating is stated. The processing of the skilled data is described, and also comparison of results of program calculations and the given measurements.