

БАРИБІН М. А., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту),
ФАЛЕНДИШ А. П., д.т.н. (ДВНЗ Приазовський державний технічний університет),
ГАТЧЕНКО В. О., к.т.н. (Державний університет інфраструктури і технологій),
КЛЕЦЬКА О. В., к.т.н. (ДВНЗ Приазовський державний технічний університет),
КІРІЦЕВА О. В., асистент (ДВНЗ Приазовський державний технічний університет)

Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу

У статті розглянуто питання визначення основних параметрів тягових розрахунків і формул математичного апарату їх пошуку. Економічно доведено необхідність застосування алгоритмізації на базі паливної економічності тягового рухомого складу. Подано програмний продукт «Тягові розрахунки» мовою програмування «С#». Наведено алгоритм і його опис з логічно відповідними прикладами суті роботи автоматизованої системи. Графічно інтерпретовано параметри руху вантажного поїзда та конвертування у формат «Microsoft Office Excel» як основи інженерного оптимізаційного розрахунку.

Ключові слова: програмний комплекс, тягові розрахунки, паливна економічність, математичне моделювання, локомотив.

Вступ

Розвиток науково-технічного прогресу в службі тяги локомотивного господарства залізничного транспорту України базується на впровадженні засобів електронно-обчислювальної техніки та автоматизованих систем у роботу фахівців керівних і робочих посад. Основним напрямом є нормування витрат ресурсів на тягу, зменшення часу обчислень і психо-емоційного навантаження на персонал. Найважливішим напрямом комп'ютерного моделювання є реалізація принципів і методів тягових розрахунків у вигляді програмного коду. Суттю їх є математична оптимізація паливно-енергетичних витрат, моделювання проходження поїзда по заданій дільниці обслуговування як основа пошуку прихованих резервів збільшення провізної здатності залізниць, раціонального та технічного використання рухомого складу. Вказані методи знайшли своє відображення в розробленні режимних карт руху поїзда, оптимізації технічної експлуатації та настанов з економічного використання енергоресурсів. Наступним кроком має стати впровадження автоматизованих систем ведення поїзда з гнучкою системою адаптивного механізму роботи локомотива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оптимізація режимів руху поїзда та ефективного використання потужності локомотива – основне економічне завдання транспортної інфраструктури залізничних перевезень. Багато фахівців присвятили

своїй праці цьому напрямку досліджень. У своїх роботах Осипов визначив методи обчислень і вимоги до вхідних даних, розглянув основні сили, що діють на поїзд, і встановив формули для їх визначення [1]. Оцінку економічності роботи дизельного рухомого складу навів Михеев [2, 3]. Методику розрахунку гальмівних задач і обчислення величини впливу гальмівної ефективності окремо взятого вагона на загальну величину гальмівного рівняння поїзда наведено в роботі [4]. Вагомий внесок в автоматизовані системні комплекси з розрахунку характеристик рухомого складу зроблено в Українському державному університеті залізничного транспорту під керівництвом Е. Д. Тартаковського. Так, у роботах [5-8] наведено методики та складові інформаційно-розрахункових програм визначення характеристик рухомого складу та пошуку раціональної системи їх технічної експлуатації і вимоги до неї. Важлива роль в інформатизації локомотивного господарства, як методу підвищення надійності, відображена в роботі [9]. Головним документом на пострадянському просторі є «Правила тягових розрахунків» (ПТР) у різних редакціях, серед останніх – документ [10]. Аналіз праць авторів західної півкулі [11-13] відкриває суть нейронних мереж і важливості застосування мікропроцесорних систем у локомотивному господарстві, а також важливість алгоритмізації та вимоги до неї перевізного процесу. У роботах східної півкулі [14-18] наведено

© М. А. Барібін, А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко, О. В. Клецька, О. В. Кіріцева, 2020

доцільність використання систем безперервного моніторингу технічних параметрів рухомого складу на базі бортових систем діагностування та управління. Автори європейських країн [19, 20] наводять принципи взаємозв'язку технічної експлуатації та її впливу на ремонтні процеси рухомого складу.

На базі цих праць і ряду інших були створені програмні комплекси розрахунку тягових параметрів, найбільшого поширення з яких набули спеціалізовані комплекси «ИСКРА-ПТР», «ЭРА», «ВЕКТРУМ» і «MoveRW». У них можна розрахувати основні тягові параметри та побудувати моделі ведення поїзда, адаптувати режими ведення при зміні графіка руху. Проте вони мають ряд недоліків: висока вартість і технічні вимоги до електронно-обчислювальної техніки, недостатня точність впливу колії [21] на рухомий склад і неможливість гнучкого реагування на мінливі технічні характеристики рухомого складу. Важливим недоліком робіт перерахованих програмних комплексів є функціонування на базі аналітичного розрахунку рівняння руху поїзда. Головною вимогою до автоматизованої системи є використання принципів всеосяжного впливу всіх без винятку факторів (зовнішніх і внутрішніх) на поїзд протягом руху. Єдиним виразом, який може врахувати всі вимоги, є закон збереження механічної енергії. Автори праці [22] прекрасно розуміють важливість даного твердження. Тому ними було запропоновано програмний комплекс «Тягові розрахунки», алгоритм якого оптимізується протягом великого часу досліджень у сфері ефективного використання енергоресурсів і потужності локомотива.

Визначення мети та задач дослідження

Метою роботи є розроблення інформаційно-розрахункового комплексу «Тягові розрахунки», алгоритму його функціонування та виразів обчислення основних параметрів руху поїзда. Для цього необхідно було вирішити такі завдання:

- проаналізувати методику тягових розрахунків і навести оптимальні вирази для обчислення основних величин;
- навести графічне зображення роботи комп'ютерного коду у вигляді блок-схеми з наступним його описанням;
- відобразити логічно сформовані проміжні принципи роботи функціонування автоматизованої системи у вигляді табличної та графічної інтерпретації;
- відобразити результати розрахунку обраного плеча обслуговування та їх конвертування у формат програмного комплексу *Microsoft Office Excel*;
- довести важливість застосування засобів комп'ютерного моделювання та автоматизації на базі економічної ефективності витрат паливно-енергетичних ресурсів у процесі переміщення поїзда.

Основна частина дослідження

Робота будь-якого програмного комплексу базується на алгоритмізації процесів і методів розрахунку. Алгоритм роботи «Тягових розрахунків», як концепт комп'ютерного коду, у своїй частині може бути поданий як блок-схема, зображена на рис. 1.

Як видно з рис. 1, «початок роботи» має можливість відхилення від стандартизованих рівнянь, даних і виразів розрахунку згідно з основними положеннями комплексу методів тягових розрахунків і методів коригованих значень. До цих методів належать модифіковані вирази рівнянь питомого опору, гальмівних і сил тяги, а також коригованих значень впливу профілю шляху (у своїй частині це обмеження швидкості) і часові (експлуатаційні) обмеження (час, режими роботи рухомого складу). Модифікуючи розрахунок, передбачається:

- використання інтерпретованої інформації з систем глобального позиціонування GPS/ГЛОНАСС в частині встановлення зменшення відсотка величини сил тяги та визначення рівняння кривої реального основного питомого опору рухомого складу у вигляді рівняння другого степеню, яке має вигляд

$$\varpi_0(\varpi'_0, \varpi''_0) = a \cdot V^2 + b \cdot V + c, \quad (1)$$

де a , b , c – коефіцієнти, отримані при обробленні інформації з систем глобального позиціонування GPS/ГЛОНАСС;

V – швидкість руху, км/год чи м/с;

- використання скоригованої інформації рухомого складу в тому випадку, коли відсутні дані в режимі реального часу, але при попередніх розрахунках отримано дані, які належать до достовірного інтервалу. Другим важливим моментом вказаного блока є обмеження профілю шляху – в основному це швидкісні чи вагові обмеження, врахування яких є обов'язковим;

- врахування вимог відповідних служб: прибуття чи проходження певної ділянки профілю у визначений час, обмеження експлуатаційних можливостей локомотива, обмеження швидкості вагонів чи врахування особливостей експлуатації, швидкісні обмеження при несправностях пристроїв сигналізації чи автоблокування та ін.

У будь-якому випадку (з модифікаторами розрахунків чи згідно з ПТР) наступним етапом є «задавання вхідних даних і режиму розрахунку», яке включає загальну інформацію про дільницю експлуатації, тяговий рухомий склад і вагони і їх завантаженість у поїзді. Особливу увагу слід приділити «режиму розрахунку», оскільки від вибору цього параметра залежить подальше направлення обчислень. Як видно з рис. 1, подано чотири режими

ведення поїзда: «за режимними картами», «ручне коригування», «раціональний» та «енергоефективний режим».

Розглядаючи перший режим, нескладно зрозуміти, що він має на увазі використання режимних карт

ведення поїзда, складених на базі багаторічного експлуатаційного досвіду, і подається у вигляді табличного виразу кілометро-пикету початку і кінця дії відповідної позиції контролера машиніста в тязі чи величини зниження швидкості при гальмуванні.

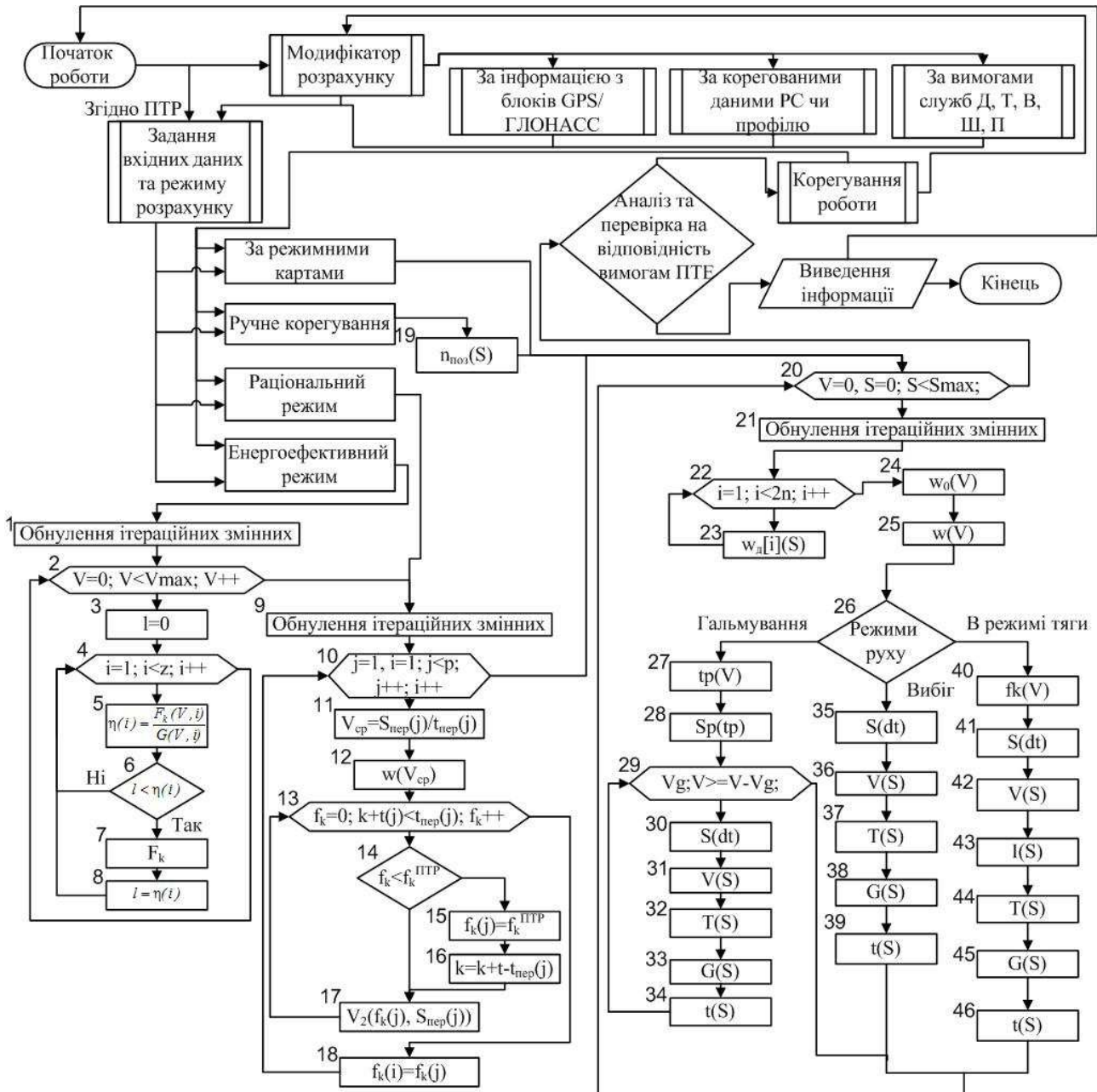


Рис. 1. Загальний алгоритм роботи програмного комплексу «Тягові розрахунки»

Другий режим обчислень за своїм характером схожий з першим, проте має суттєву відмінність – введення величин сил тяги та часу їх дії відбувається у ручному режимі та потребує хороших знань у сфері тягових розрахунків, адже неправильне введення значень може призвести до зацикловання програмного

комплексу з виданням помилки. Будь-який програмний комплекс у своєму широкому розумінні має вбудовані помилки, які на етапі компіляції та тестування неможливо викрити і попередити їх виникнення.

Розгляд 3-го та 4-го режимів обчислень, як видно з рис. 1, має деяку закономірність: четвертий режим у собі містить третій, проте має суттєву відмінність – енергоефективний розрахунок використання тягового рухомого складу. Для повного охоплення та відсутності дублювання опису алгоритму виконаємо пояснення роботи «енергоефективного режиму».

Блоки під номером 1, 9 та 21 не мають загального інтересу, оскільки у своєму розумінні це є присвоєнням початковим та ітераційним змінним параметра «0» чи «вхідного значення». Виконання останнього обумовлене запобіганням неправильних обчислень при коригуванні роботи і повторному розрахунку. Наступним кроком роботи є блок алгоритму 2, математичною сутністю якого є перебирання швидкісного діапазону роботи тягового рухомого складу від 0 до конструкційної, при цьому крок ітерацій може бути як цілочисельним, так і дробовим. Збільшення кроку швидкості призводить до погіршення точності розрахунку та збільшення витрат ресурсів на тягу, проте зменшення підвищує час обчислень. Дослідним шляхом було встановлено оптимальний крок в 0,01 км/год. Блок алгоритму 3 за своєю суттю є типовою змінною, обнулення якої має на меті максимізаційний пошук ненульового позитивного коефіцієнта тягових витрат. Своє відображення пошук знаходить у перебірці всіх позицій (у разі можливості їх використання з урахуванням обмеження за зчіпною силою коліс з рейками) блоком алгоритму 4. Обчислення величини

коефіцієнта тягових витрат виконується блоком алгоритму 5 за виразом

$$\eta(i) = \frac{F_k(V,i)}{G(V,i)}, \quad (2)$$

де $F_k(V,i), G(V,i)$ – відповідно функції залежності сили тяги та витрати палива від швидкості і позиції контролера машиніста.

Наступна робота в блоках 6, 8 є суттю максимізації коефіцієнта корисної дії локомотива. Блок 7 є функцією запису оптимальних значень сил тяги та позицій на швидкісному діапазоні роботи тягового рухомого складу.

Табличне відображення суті коефіцієнта тягових витрат і роботи енергоефективного розрахунку використання тягового рухомого складу направлено на мінімізацію витрат палива при переміщенні поїзда, наведене в табл. 1. Для кращого розуміння проводився розрахунок при затвердженні $V=24 \text{ км/год}$, $V=const$ та виконанні 5000 МДж механічної роботи, а також визначенні витрат палива на холостому ході сталої різниці максимального шляху на першій позиції та поточній. Суттю затвердження $V=const$ є незначне ітераційне зростання швидкості в блоках 31, 36 і 42. Вхідними даними стали значення тягово-енергетичного паспорта локомотива 2ТЕ116 на непарних позиціях контролера машиніста [10].

Таблиця 1

Порівняльні витрати палива як результат виконання 5000 МДж механічної роботи тепловозом 2ТЕ116 на непарних позиціях контролера машиніста при швидкості 24 км/год

Параметр	Позиція контролера машиніста							
	1	3	5	7	9	11	13	15
S, км	333,33	95,79	51,55	32,05	21,31	14,85	11,26	9,80
G _T , кг	1333,3	790,2	618,6	544,9	479,5	404,8	380,1	416,7
G _{ХХ} , кг	0,0	392,0	464,9	497,1	514,8	525,5	531,4	533,8
ΣG, кг	1333,3	1182,2	1083,5	1042,0	994,4	930,3	911,5	950,5

Як видно з табл. 1, оптимальною непарною позицією контролера машиніста при швидкості $V=24 \text{ км/год}$ є 13, оскільки витрати палива на ній є мінімальними, а коефіцієнт корисної дії локомотива максимальним.

Після виконання енергоефективного розрахунку використання тягового рухомого складу алгоритм передбачає пошук оптимальних значень величин сил тяги на вхідному полігоні заданих обчислень профілю шляху, який починається з типового блока «обнулення ітераційних змінних» 9. Робота циклоїда під номером 10 за своєю суттю є почерговим пошуком значень питомих сил тяги при вказаній протяжності елемента

профілю шляху та виконанні часу елементного/перегінного ходу згідно з «Графіком руху поїздів дільниці». Для встановлення теоретичних величин питомих сил опору на елементі профілю шляху, як функцій швидкості, необхідно визначити середню швидкість за виразом у блоці 11. Робота блока 12 характеризується сумою питомих сил основного та додаткового опору руху. Сумарне значення основних питомих сил згідно з ПТР чи модифікатором розрахунку залежно від типу (стиковий чи безстиковий) верхньої будови колії та відсоткового впливу (за масою) відповідного типу рухомого складу має вигляд

$$\varpi_0(V_{cp}) = \sum_{l=1}^x [r_l \cdot (a_l \cdot V_{cp}^2 + b_l \cdot V_{cp} + c_l)], \quad (3)$$

де a_l, b_l, c_l – коефіцієнти квадратичного рівняння питомого основного опору руху відповідного типу рухомого складу;

r_l – коефіцієнт відсоткового впливу (за масою)

відповідного типу рухомого складу;

V_{cp} – середня швидкість руху, км/год.

Величина додаткового опору без крутості профілю визначається рівнянням

$$\varpi_d(V_{cp}) = \sum_{l=1}^x [r_l \cdot \frac{k_2}{q_0 + 70}] + \varpi_0(V_{cp}) \cdot [k_{HT} + k_{KB} - 2], \quad (4)$$

де k_1 – коефіцієнт впливу кривої, що по суті є відношенням довжини поїзда до довжини кривої та належить інтервалу (0; 1) (при значеннях більших «1» приймається рівним «1»);

r_l – коефіцієнт відсоткового впливу (за масою)

відповідного типу рухомого складу;

k_2 – коефіцієнт типу рушання рухомого складу,

для підшипників ковзання $k_2 = 1420$, для підшипників кочення $k_2 = 280$;

k_{HT} – коефіцієнт впливу низьких температур [2];

k_{KB} – коефіцієнт впливу повітряних мас (вітру) [2].

Циклічний пошук величин сил тяги блоком 13 базується на пошуку величини питомої сили тяги для проходження перегону поелементно, при цьому на «шкідливих» (з можливим перевищенням допустимої швидкості) спусках рішення йде з кінця профілю за умови, що сумарна крутість профілю впливу на вагони (за масою) не перевищує питомого опору руху. Пошук перевищення виконується при нульовому значенні сил тяги та отриманому позитивному прирості швидкості в кінці розглянутого елемента. Загальна питома величина сил тяги на підйомі, рівній площадці чи незначному спуску, визначається з рівняння збереження механічної енергії та має вигляд

$$f_k = \varpi(V_{cp}) + \frac{(2 \cdot V_{cp} - V_1)^2 - V_1^2 + 2 \cdot g \cdot (h_2 - h_1)}{2\xi S}, \quad (5)$$

де V_1 – швидкість на початку руху, м/с;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці елемента профілю (вираз урахування крутості розглянутого елемента профілю та кривої), м;

ξ – коефіцієнт питомого прискорення,

$$\xi = 0.00926 \frac{m/c^2}{H/kH};$$

S – довжина ділянки переміщення, м.

Значення висот може бути поданий у вигляді виразу

$$h_2 - h_1 = \left[i + \frac{700}{S_C} \sum_{i=1}^n \frac{S_{KP_i}}{R_i} \right] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (6)$$

де i – крутість розглянутого елемента дільниці, ‰;

S_C – довжина розглянутого елемента дільниці, м;

S_{KP_i} – довжина i -ої кривої розглянутого елемента дільниці, м;

R_i – радіус i -ої кривої розглянутого елемента дільниці, м;

n – кількість кривих на розглянутому елементі дільниці.

Перевірку порівняльним блоком 14 необхідно виконувати для попередження ситуацій перевищення необхідної сили тяги значенням максимальної потужності локомотива, обчислення яких здійснюється за виразом

$$f_k^{ПТР} = \frac{F_k(V_{cp})}{P + Q}, \quad (7)$$

де $F_k(V_{cp})$ – величина сили тяги (згідно з ПТР) при вказаній швидкості, кН;

P, Q – відповідно маса локомотива та поїзда, т.

У разі перевищення йде порівняння блоком 15 і врахування часу нагону на наступній ітерації. Встановлення кінцевого значення швидкості блоком 17 відбувається за виразом

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 + 2 \cdot \xi \cdot S \cdot (f_k - b_T - \varpi)}, \quad (8)$$

де b_T – питомі гальмівні сили, Н/кН.

Отриманий розрахунок записується в масив значень величин сил тяги та шляху їх дії блоком 18 в циклоїді 10. Табличну інтерпретацію вказаних затверджень розглянемо на прикладі вантажного поїзда вагою 4372,5 т у складі 53 чотиривісних завантажених напіввагонів з роликівими підшипниками кочення, у голові поїзда знаходиться вантажний локомотив ВЛ11. Рух відбувається на безстиківій дільниці тягового плеча «Харків-Сортувальний – Белгород» з відправленням рухомого складу з третьої колії гіркового парку. Для зменшення

величини таблиці використаємо лише типову ситуацію «розгону, вибігу та гальмування» на дільниці «Харків-Сортувальний – Дергачі». Зведені розрахунки наведено в табл. 2.

Графічний результат пошуку питомих сил тяги та гальмування в табл. 2 наведено на рис. 2.

Таблиця 2

Пошук розподілу величин сил тяги на дільниці «Харків-Сортувальний – Дергачі» для вантажного поїзда загальною масою 4556,5 т

Протяжність дільниці $S, м$	1000	1500	2900	600	1500	900
Обмеження швидкості $S_{об}, м$ ($V \leq 15$)	970,56	1770,56				8000 ($V_{пт}=50$)
Профільний підйом $i_n, \%$	0	+2,1	+5,8	-2,5	+4,8	-0,8
Фіктивний підйом $i_{ф}, \%$	+0,03	+0,17	+0,52	0	+0,07	0
Сумарна висота від підйому $h, м$	0,03	3,405	18,328	-1,5	7,305	-0,72
Середня швидкість $V_{ср}, км/год$	12,5	22,5	37,5			
Значення питомої сили тяги $f_k, Н/кН$	1,79783 при $S=0.97056 км$	4,183879 при $S=0.8 км$	6,212059 при $S=6,22944 км$			
Паспортне значення питомої сили тяги $f_k^{ПТР}, Н/кН$	123,93	106,77	62,83			
Дисипація кінетичної енергії при гальмуванні $b_T, Н·м/кН$						937,425

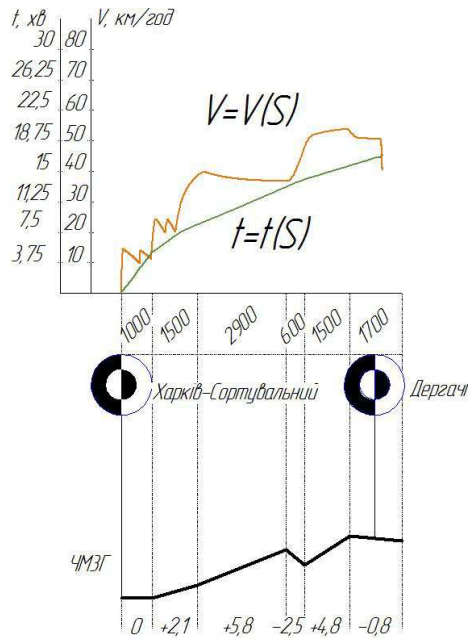


Рис. 2. Графічне відображення швидко-часової характеристики результату впливу питомих сил тяги та гальмування з табл. 2

Отримані результати розрахунку за своєю суттю є асимптотичним наближенням до даних параметра блока 19 чи режиму роботи «за режимними картами».

Останнім важливим кроком є перевірка вказаних затверджень на полігоні обраного тягового плеча при мінімізованому ітераційному інтервалі часу. Для цього

циклічний блок 20 починає перебирати при початкових значеннях швидкості та часу (дорівнюють нулю) значення тягових розрахунків до виконання вимоги $S < S_{max}$. S_{max} як параметр обмеження шляху обраної дільниці отримано в результаті вхідних даних. Робота циклоїда починається з типового блока «обнулення ітераційних змінних» 21 з наступним етапом пошуку впливу питомого додаткового опору.

$$w_D(i) = \frac{\sum_{i=1, j=2}^{i=n-1, j=n} [m_i \cdot w_i \cdot \cos \frac{|w_i|}{1000} + m_j \cdot w_j \cdot (2 - \cos \frac{|w_j|}{1000})]}{P + Q} + \frac{700}{S_C} \sum_{k=1}^m \frac{S_{KP_k}}{R_k}, \quad (9)$$

де m_i, m_j – маса, що припадає на візок, т;
 w_i, w_j – величина еквівалентного схилу елемента, %о;

i, j – відповідно порядковий номер непарних і парних візків (у випадку руху на підйом порядкові номери мають вказаний порядок, при русі на спуску – міняються місцями).

На першому кроці ітерації (при $V=0$) до виразу (9) додається складова впливу рушання поїзда з місця, яка має вигляд

$$\varpi_D = w_D(i) + \sum_{l=1}^x [r_l \cdot \frac{k_2}{q_0 + 70}]. \quad (10)$$

Розгляд роботи блока 24 має на меті визначення питомого основного опору руху поїзда за виразом

$$\varpi_0 = [k_{HT} + k_{KB} - 1] \cdot \sum_{l=1}^x [r_l \cdot (a_l \cdot V^2 + b_l \cdot V + c_l)]. \quad (11)$$

Наступним етапом є блочний розрахунок загального опору поїзда за виразом

$$\varpi = \varpi_0 + \varpi_D. \quad (12)$$

Визначення безпосередньо значень параметрів руху поїзда (часу, швидкості, шляху, нагріву, струму тягового обладнання та витрат ресурсів) отримуємо в результаті роботи блока 26, фізична суть якого закладена на етапі блоків 19, «за режимними картами» та 9-18. Розподіл йде лише на режимами роботи: тяги, вибігу та гальмування. Розглянемо послідовно класичний приклад прискорення поїзда, руху на базі запасу кінетичної енергії, а потім вже дисипації енергії пристроями гальмування. Отже розгляд пришвидшення – це математична суть тяги при заданому інтервалі часу dt , тобто роботи блока 40, що за своїми гіперболічними характеристиками тяги

Тобто робота в блоці 22 є нічим іншим як елементним перебиранням повізкового впливу (блок 23) питомого додаткового опору від крутості профілю шляху та фіктивного підйому на кроці $S(dt)$. У результаті аналізу дії сил при підйомі чи спуску на рухомий склад встановлено нерівномірне навантаження на візки, яке пропонується визначати за виразом

обраного тягового рухомого складу може бути поданий як

$$F_K(V) = a + \frac{b}{V}, \quad (13)$$

$$F_K(V) = a \cdot V^2 + b \cdot V + c, \quad (14)$$

де a, b, c – коефіцієнти гіперболічного чи квадратичного рівняння сил тяги відповідного типу тягового рухомого складу.

Тоді значення питомої сили тяги буде визначатись за виразом

$$f_K(V) = \frac{F_K(V)}{P + Q}. \quad (15)$$

Робота блоків 41 і 35 має загальний принцип та обчислюється за виразом

$$S(dt) = S(dt) + \frac{dt \cdot [2 \cdot V_1 + dt \cdot \xi \cdot (f_K - \varpi)]}{2}, \quad (16)$$

де V_1 – швидкість на початку руху, км/год.

Визначення швидкості в кінці розглянутого елемента ітерації блоками 36 і 42 визначається за виразом

$$V(S) = V + dt \cdot \xi \cdot (f_K - \varpi). \quad (17)$$

Робота блока 43 направлена на визначення струму тягових електродвигунів чи головного генератора тягового рухомого складу з електричною передачею потужності та має вигляд гіперболічних чи квадратичних рівнянь

$$I(V) = a + \frac{b}{V}, \quad (18)$$

$$I(V) = a \cdot V^2 + b \cdot V + c, \quad (19)$$

$$I(S) = \frac{I(V)}{n_{ПАР}}, \quad (20)$$

де $n_{ПАР}$ – коефіцієнт групування тягових електродвигунів.

Встановлення ступеня нагріву тягового електрообладнання базується на роботі блоків 32, 37 та 44, заснованих на законі нагріву однорідного твердого тіла, математичні вирази для обчислення яких мають вигляд

$$T_{тяги}(S) = \tau_{\infty} \cdot (1 - e^{-dt/T}) + \tau_0 \cdot e^{-dt/T}, \quad (21)$$

$$T_{гальмування}^{вибігу}(S) = \tau_0 \cdot e^{-dt/T}, \quad (22)$$

де τ_{∞} – перевищення температури обмотки при тривалому виділенні тепла, °C;

dt – інтервал часу ітераційного обчислення, хв;

τ_0 – початкове перевищення температури для обраного інтервалу часу ітераційного обчислення, °C;

T – теплова постійна часу, хв;

e – основа натурального логарифма, $e=2,718$ (у програмі *Math.Exp(x, y)*).

Визначення витрат ресурсів тяговим рухомих складом блоками 33, 38 та 45 залежно від обраного режиму руху і типу рухомого складу визначається за виразами

$$G_{тепловоз}(S) = G(S) + G_i \cdot dt, \quad (23)$$

$$G_{електровоз}(S) = G(S) + U_i \cdot I_i \cdot dt, \quad (24)$$

де G_i – витрати палива на відповідній позиції контролера машиніста, кг/хв;

U_i – напруга на струмоприймачі, В;

I_i – струм на струмоприймачі, А.

Типове обчислення приросту ітераційного кроку за блоками 39 та 46 має вигляд

$$t(S) = t(S) + dt. \quad (25)$$

Режим гальмування за своєю суттю має відмінність. Так, першим кроком обчислень має бути врахування часу підготовки гальм до дії (фізична суть якого полягає в інтервалі часу від переведення ручки крана машиніста в гальмівне положення до спрацьовування гальм поїзда) і визначене блоком 27 і виразом

$$tp(V) = a - \frac{b \cdot i}{1000 \cdot v_p \cdot k_1 \cdot \frac{V + k_2}{k_3 \cdot V + k_2}}, \quad (26)$$

де a, b – коефіцієнти типу рухомого складу та кількості осей у поїзді;

i – крутість гальмівного елемента дільниці, %;

v_p – розрахунковий гальмівний коефіцієнт поїзда;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти типу гальмівних колодок у поїзді.

Тоді підготовчий гальмівний шлях визначене блоком 28 складе

$$Sp(V) = \frac{tp(V) \cdot V}{3,6}. \quad (27)$$

Робота циклоїда 29 базується на двох принципах:

- зменшення швидкості на вказаний інтервал швидкості (при пробі автогальм поїзда) чи до вказаного значення (при зупинці);

- зменшення швидкості на вказану величину добутку питомої сили гальмування на шлях $S \cdot b_T$, Н·м/кН.

Визначення дійсного гальмівного шляху поїзда блоком 30 визначається за формулою

$$S(dt) = S(dt) + \frac{500 \cdot (V^2 - [V - k_T]^2)}{\xi \cdot (1000 \cdot v_p \cdot k_1 \cdot \frac{V + k_2}{k_3 \cdot V + k_2} + \varpi_0 + i)}, \quad (28)$$

де k_T – ітераційний крок зниження швидкості, км/год.

Тоді швидкість у блоці 31 визначиться за виразом

$$V(S) = V(S) - k_T. \quad (29)$$

Інтервал часу зниження швидкості, обчислений у блоці 34, визначаємо за формулою

$$T(S) = T(S) + \frac{2 \cdot S_T}{V + V - k_T}, \quad (30)$$

де S_T – протяжність гальмівного ітераційного кроку, км.

Отримані дані під час розрахунку програмного комплексу зводяться до табличного вигляду методом «*dataGridView.Rows.Add()*» для роботи в блоці «Аналіз та перевірка на відповідність вимогам ПТЕ» для наступного коригування чи виведення інформації в графічному вигляді або табличному форматі

програмного комплексу *Microsoft Office Excel* (з метою передачі та обробки відповідними операторами). Як приклад роботи програмного комплексу «Тягові розрахунки» наведемо обчислення основних параметрів руху вантажного поїзда вагою 609 т у складі семи чотирирівневих напіввагонів з підшипниками кочення на стиковому типі колії тягового плеча локомотивного депо «Харків-Сортувальний» «Основа – Індустріальна» з відправленням зі станції «Основа» та проходженням через шосту колію «Біженського парку» станції «Харків-Балашовський» при виконанні диспетчерського графіка руху. Розрахунок ведеться за значеннями тягово-енергетичного паспорта рухомого складу та згідно з правилами тягових розрахунків (тобто без використання модифікаторів). Загальна інформація про вхідні дані і вікно обчислення наведена на рис. 3.

Таблична інтерпретація тягових розрахунків у форматі програмного комплексу *Microsoft Office Excel* «.exe1» наведена на рис. 4.

Графічне відображення тягових розрахунків наведено на рис. 5 та 6.

У результаті розрахунку встановлено зниження витрат палива на 8,11 % порівняно з роботою [23]. Тобто використання інформаційно-розрахункового комплексу «Тягові розрахунки» для пошуку основних параметрів тягових розрахунків дозволить зменшити витрати ресурсів на тягу, часу обчислень і знайти приховані резерви підвищення провізної здатності дільниць експлуатації. З метою масової практичної апробації, інформатизації служби локомотивного господарства та диспетчерського апарату вважаємо доцільним впровадження вказаного програмного

комплексу і методів математичного моделювання до перевізного і навчального процесу.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямі

У роботі запропоновано інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки». Графічно відображено блок-схему його роботи і наведено загальний опис алгоритму його функціонування. Зроблений аналіз праць у напрямі проведення тягових розрахунків показав, що хоч робіт у цьому напрямі проводиться багато, але вони мають певні недоліки. Для усунення деяких з них пропонується використовувати раціональні вирази обчислення основних параметрів руху поїзда. Для цього запропоновано відповідні моделі. У вигляді табличної та графічної інтерпретації наведено приклади оптимізаційних процесів кожного режиму роботи. Графічно відображено результати розрахунку обраного плеча обслуговування та їх конвертування у формат програмного комплексу *Microsoft Office Excel* як основного табличного редактора інженерного та управлінського апарату залізниць України. Підтверджено важливість застосування засобів комп'ютерного моделювання та автоматизації на базі економічної ефективності витрат паливно-енергетичних ресурсів у процесі переміщення поїзда. У подальшому необхідно провести пошук «нерациональних частин» алгоритму та «помилки» роботи існуючого програмного коду з метою їх оптимізації та усунення і впровадити його в роботу у локомотивному господарстві.

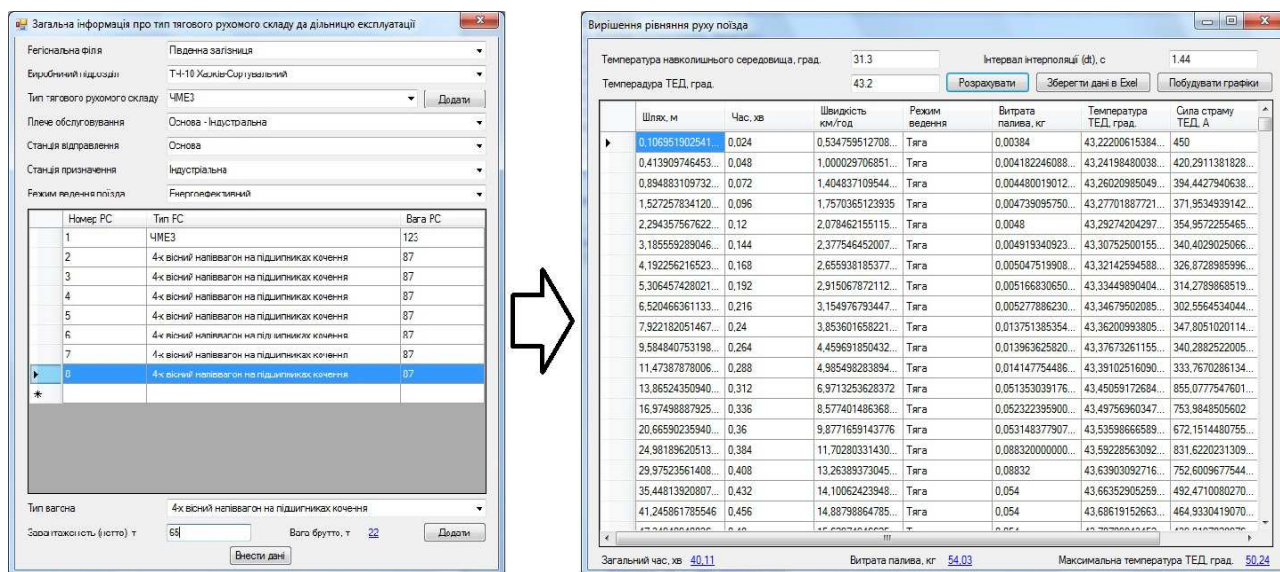


Рис. 3. Вхідні дані розрахунку та вікно обчислення програмного комплексу «Тягові розрахунки» без модифікаторів

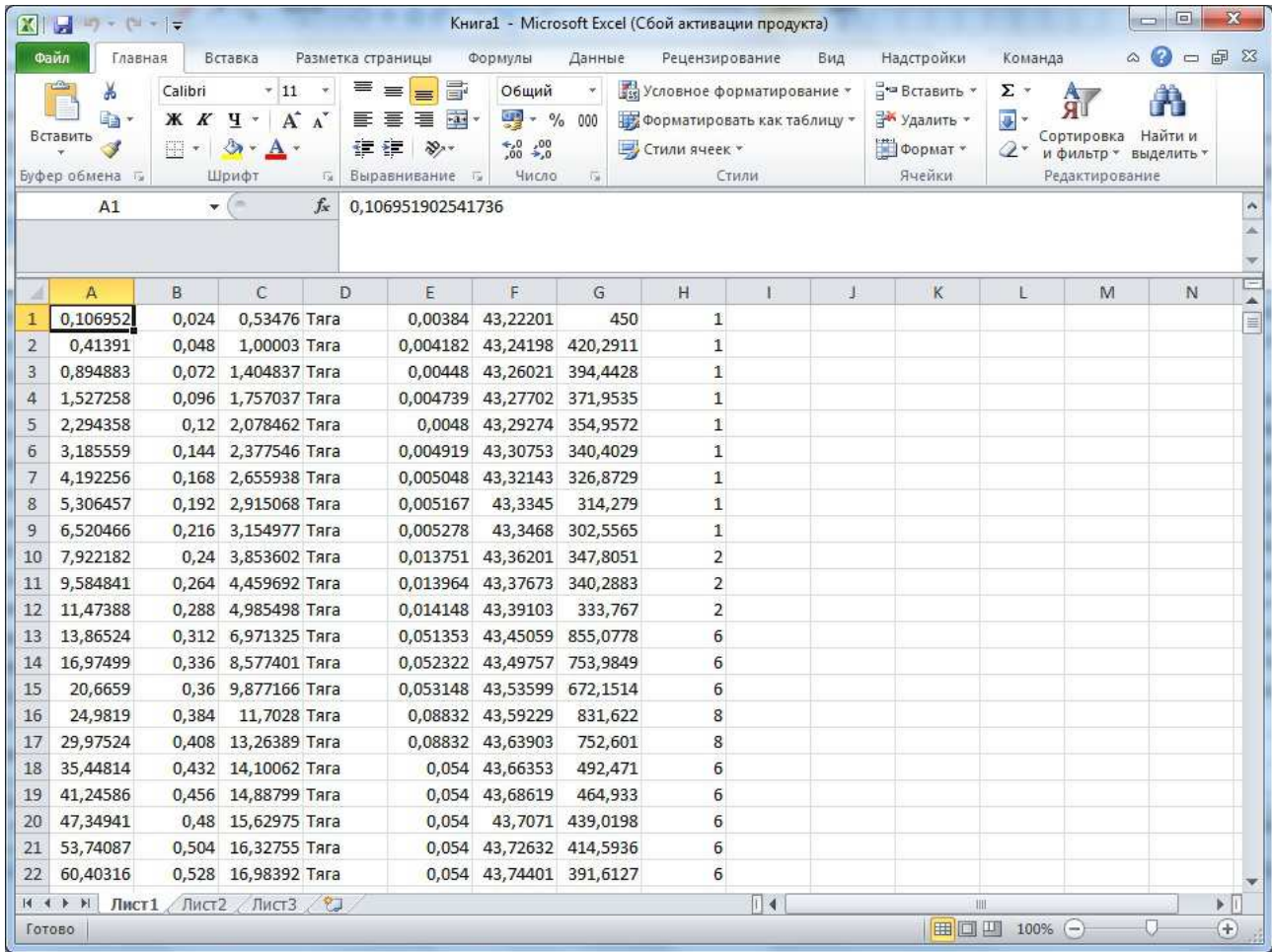


Рис. 4. Вихідні дані тягових розрахунків, конвертовані у формат «.exeI»

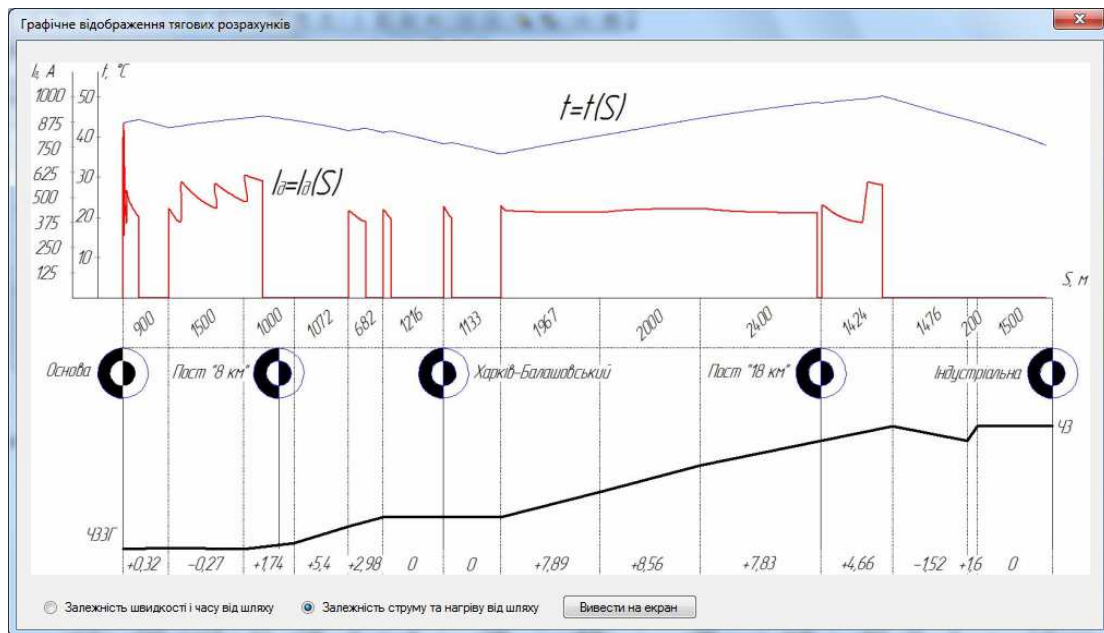


Рис. 5. Графічне відображення кривих струму і температури тягових електродвигунів з тягових розрахунків

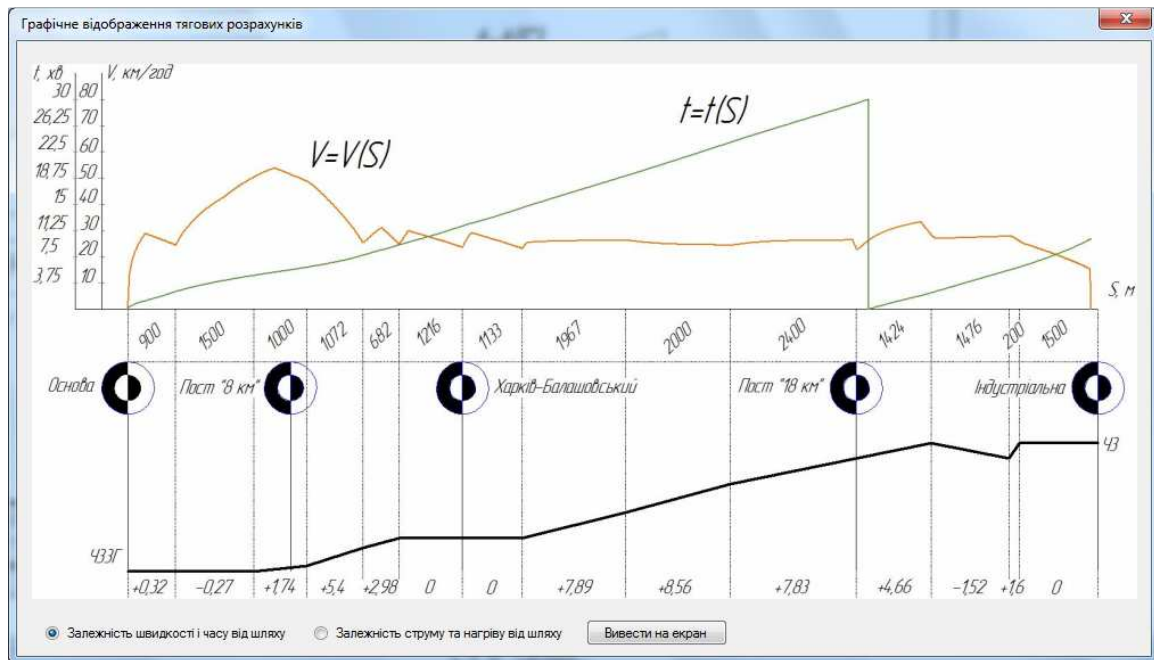


Рис. 6. Графічне відображення кривих часу та швидкості з тягових розрахунків

Список використаних джерел

- Осипов С. И., Осипов С. С. Основы тяги поездов: учеб. для студ. техникумов и колледжей ж.-д. трансп. Москва: УМК МПС России, 2010. 592 с.
- Михеев В. А. Оценка эксплуатационной экономичности дизельных локомотивов на заданном участке обслуживания. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2015. № 1(41). С. 91-96.
- Михеев В. А., Сопижук А. Н. Оценка тяговой характеристики тепловозов по результатам стационарных испытаний. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016. № 2(2). С. 46-48.
- Водяников Ю. Я., Свистун С. М., Макеева Е. Г. Методология пересчета тормозной эффективности одиночного вагона на тормозную эффективность поезда. *Залізничний транспорт*. 2014. № 2. С. 27-37.
- Тартаковский Е. Д., Фалендиш А. П. Інформаційна система оцінки технічного рівня маневрових тепловозів. *Зб. наук. праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Технічні науки*. Луганськ: Вид-цтво СХУ ім. В. Даля, 2004. С. 129-132.
- Фалендиш А. П., Брагін М. І. Інформаційно-розрахункова система оцінки технічного рівня дизель-поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля: науковий журнал*. Луганськ: Вид. СХУ, 2011. № 1 (155). Ч. 2. С. 234-237.
- Фалендиш А. П., Сумцов А. Л., Артеменко О. В. Програмний комплекс вибору системи технічної експлуатації маневрового тепловозу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. № 1. С. 54-61.
- Розрахунковий комплекс оцінки ефективності використання ресурсозберігаючих технологій очищення систем дизеля та тепловоза / Д. О. Аулін, А. О. Каграманян, А. П. Фалендиш, О. В. Рудковський. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. № 6. С. 9-15.
- Черемисин В. Т. Роль інформаційних технологій в забезпеченні надійності локомотива. *Локомотив*. 2017. № 9. С. 2-4.
- Приказ № 867р. Правила тягових расчетов для поездной работы: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 р. Москва, 2016. 510 с.
- Safna F., Sunny R. Artificial Neural Network Based Data Mining. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. Vol. 5(4). June 2015. P. 240-245.
- Pecháč P., Sága M. Controlling of local search methods' parameters in memetic algorithms using the principles of simulated annealing. *Proc. Eng.* Vol. 136. April 2016. P. 70-76.
- Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*. Vol. 26(1). April 2018. P. 36-48.
- Ding J., Zhang P., Li J. Fatigue life prediction of IGBT module for metro vehicle traction converter based on traction calculation. *IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*,

- Sydney NSW. 2015. P. 1116-1121.
15. Yuan L., Zhao H., Chen H., Ren B. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints. *Mechatronics*. Vol. 38. December 2016. P. 1-15.
 16. Gao R.Z., Wang Y.J., Lai J.F., Gao H. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*. Vol. 367. May 2016. P. 449-462.
 17. Cole C., Spiriyagin M., Wu Q., Sun Y. Q. Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics. *Vehicle System Dynamics*. 2017. 55(10). P. 1498–1571.
 18. Fu Q., Zhu J., Mao Z., Zhang G., Chen T. Online Condition Monitoring of Onboard Traction Transformer Core Based on Core-Loss Calculation Model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. 65(4). P. 3499-3508.
 19. Navas M. A., Sancho C., Carpio J. Reliability analysis in railway repairable systems. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 2017. № 34(8). P. 1373-1398.
 20. Song H., Schnieder E. Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability. *Safety Science*. Vol. 110. December 2018. P. 313-323.
 21. ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування. Введ. 26.01.2008. Київ: МінРеґіонБуд України, 2008. 12 с.
 22. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках / А. П. Фалендиш, В. О. Гатченко, С. В. Возненко та ін. 36. наук. праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. № 35. С. 102-112.
 23. Наказ №204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці. Введ. 16.05.2014. Київ, 2014. 10 с.

Барыбин Н. А., Фалендыш А. П., Гатченко В. А., Клецкая О. В., Кирицева Е. В. Информационно-расчетный комплекс «Тяговые расчеты» и математические методы поиска основных параметров движения поезда как основы оптимизации затрат ресурсов на тягу.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения основных параметров тяговых расчетов и формул математического аппарата их поиска. Экономически доказана необходимость применения алгоритмизации на базе топливной экономичности тягового подвижного состава. Представлено программный продукт «Тяговые расчеты» на языке программирования «С#». Приведен алгоритм и его описание с логически соответствующими примерами

сути работы автоматизированной системы. Графически интерпретированы параметры движения грузового поезда и конвертирования в формат Microsoft Office Excel как основы инженерного оптимизационного расчета.

Ключевые слова: программный комплекс, тяговые расчеты, топливная экономичность, математическое моделирование, локомотив.

M. A. Barybin, A. P. Falendysh, V. O. Hatchenko, O. V. Kletska, E. V. Kiritseva. Information and calculation complex «Traction calculations» and mathematical methods for finding the main parameters of train movement as the basis for optimizing the cost of traction resources.

Abstract. The article deals with the issues of determining the main parameters of traction calculations and presents formulas for the mathematical apparatus of their search. A method for finding the distribution of specific traction forces and intervals of their action at selected calculation polygons and rationalizing the application of the driver's controller position relative to the locomotive speed is presented. The necessity of applying algorithmization based on the fuel efficiency of traction rolling stock is economically proved by comparative characteristics of rationing fuel consumption by a diesel locomotive, on a selected shoulder with a train of the appropriate weight, with values obtained as a result of the operation of the software package. The software product "traction calculations" in the programming language "C#" is presented. The calculation algorithm and its description are given with logically corresponding examples of the essence of the automated system. The basis of this software product is the law of conservation of mechanical energy, as an expression that takes into account all the factors of influence of external and internal circumstances on the train and its equations of motion. Graphically, the parameters of the movement of a freight train are interpreted in the form of curves of the dependence of time, speed, current of traction electric motors on the distance traveled and the conversion of calculations to the Microsoft Office Excel format as the basis for the optimization calculation of engineering and management apparatus.

Keywords: software package, traction calculations, fuel efficiency, mathematical modeling, locomotive.

Надійшла 02.11.2020 р.

Барыбин Микола Анатолійович, аспірант кафедри «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-7852>. E-mail: kanifoli4.92@gmail.com

Фалендиш Анатолій Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7945>. E-mail: fap_hiit@ukr.net

Гатченко Вікторія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного університету інфраструктури і технологій. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-3852>. E-mail: vogatchenko@gmail.com

Клецька Ольга Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4682-860X>. E-mail: gurao@ukr.net

Кірицева Олена Вікторівна, асистент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-5883>. E-mail: evkiritseva@gmail.com

Barybin Nikolay, post-graduate student of the Department of heat engineering, heat engines and energy management, Ukrainian state University of railway transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1397-7852>. E-mail: kanifoli4.92@gmail.com

Falendysh Anatoliy, Dr. Sc. (Tech), Professor of the Department of transport technologies of enterprises of the Pryazovsky state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7945>. E-mail: fap_hiit@ukr.net

Hatchenko Victoria, PhD (Tech), associate Professor of the Department of traction rolling stock of Railways of the State University of infrastructure and technology. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9868-3852>. E-mail: vogatchenko@gmail.com

Kletska Olha, PhD (Tech), associate Professor of the Department of transport technologies of enterprises of the Azov state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4682-860X>. E-mail: gurao@ukr.net

Kiritseva Elena, assistant Professor of transport technologies of the enterprises of state University Pryazovskyi state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-5883>. E-mail: evkiritseva@gmail.com