



УДК 629.423.1: 629.4.016.3

**ON THE ISSUE OF OPERATIONAL RATIONING OF ENERGY  
RESOURCES FOR TRAIN TRACTION****ДО ПИТАННЯ ОПЕРАТИВНОГО НОРМУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ТЯГУ  
ПОЇЗДІВ****Krasulin O. / Красулін О.С.**

ORCID: 0000-0001-8919-3264

*State higher educational institution "Priazovsky State Technical University"  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 87555, Дніпро, Україна,*

**Анотація:** Завдання ресурсозбереження є актуальною для всіх транспортних компаній, і пошуками шляхів її вирішення займаються багато світових спільнот вчених та інженерів. Світові залізничні компанії і особливо такі великі, як «УЗ», є великими споживачами енергоресурсів, тому економія цих ресурсів – цільова задача при зниженні операційних витрат.

**Метою цієї статті** є застосування системи оптимального нормування енерговитрат на тягу кожного поїзда тобто системи оперативного нормування. Цей спосіб ґрунтується на моделюванні процесу руху за рахунок застосування методу теорії оптимального управління – динамічного програмування. В сучасних умовах розвитку техніки і технологій стала можлива розробка таких систем оперативного нормування, наділених важливими властивостями: висока продуктивність, багатозадачність, точність рішення, простота використання і обслуговування. Отримані результати системи оперативного нормування дозволяють стверджувати, що даний підхід до вирішення проблеми енергозбереження обраний вірно.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, тягові розрахунки, оптимізація тягових розрахунків, нормування витрат енергоресурсів на тягу поїздів, штучні нейронні мережі, автоматичні системи керування транспортними засобами, регулювання сил тяги та гальмування.

**Вступ**

Відповідно до довгострокових планів розвитку промислового залізничного транспорту і «Укрзалізниці» стоїть питання про скорочення питомої витрати енергоресурсів на тягу поїздів і маневрової роботи. Це завдання є актуальним для всіх світових залізничних компаній, і на практиці йде безперервний пошук вирішення проблеми економії енергоресурсів та оптимального ведення поїзда [1-5]. Проблема розглядається на різних рівнях: для одиничного поїзда, для груп поїздів, що прямують один за одним, на рівні управління рухом поїздів великої кількості поїздів. Вітчизняні вчені та інженери також не залишають без уваги зазначену проблему, що відображено в практичному використанні пристроїв і технологій ресурсозбереження і роботах [1-5, 7, 8]. Використання тягових розрахунків для оперативного нормування енергоресурсів на тягу поїздів з метою зниження витрати енергії є одним з практичних застосувань прикладних методів теорії тяги. Але існуючі методики тягових розрахунків і їх реалізації, розроблені на підставі поточних правил тягових розрахунків, не в повній мірі не відповідають вимогам систем оперативного нормування. Тому необхідно шукати нові підходи до вирішення завдання економії енерговитрат на тягу поїздів.

Під оперативним нормуванням енерговитрат треба розуміти визначення мінімальної обґрунтованої витрати енерговитрат на рух поїзда по ділянці.



Основними вимогами до систем оперативного нормування є: висока продуктивність, багатозадачність, точність рішення, простота використання і обслуговування, висока доступність. Також така система повинна виконувати не тільки оцінку витрати енергії на поїздку апріорі, а й робити оцінку поїздки апостеріорі із зазначенням помилок системи автоведення або машиніста.

Для реалізації системи оперативного нормування енерговитрат на тягу поїздів доцільно застосовувати комплекс програм, який дозволить ефективно використовувати обчислювальні потужності комп'ютерів. Це пояснюється тим, що точні оптимальні рішення (обумовлено вимогою точності), отримані чисельним методом динамічного програмування [9], є досить витратними, з точки зору обчислювальної потужності процесора. Існують методи знаходження оптимальної траєкторії руху на основі принципу максимуму Понтрягіна [10], але такі реалізації мають серйозні обмеження на функціональні залежності.

### Основний текст

У роботі запропонована обчислювально ефективна реалізація методу динамічного програмування для однокритеріального або багатокритеріального пошуку оптимуму. Потреби програми в оперативній пам'яті на один тяговий розрахунок можуть бути оцінені за формулою:

$$N_{TC} = 5 \cdot \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{V_{max}}{\Delta_v} \cdot N_U ,$$

де  $S$  – довжина колії, км.;

$\Delta_s$  – величина кроку дискретизації по координаті;

$V_{max}$  – максимальна швидкість руху, км/год.;

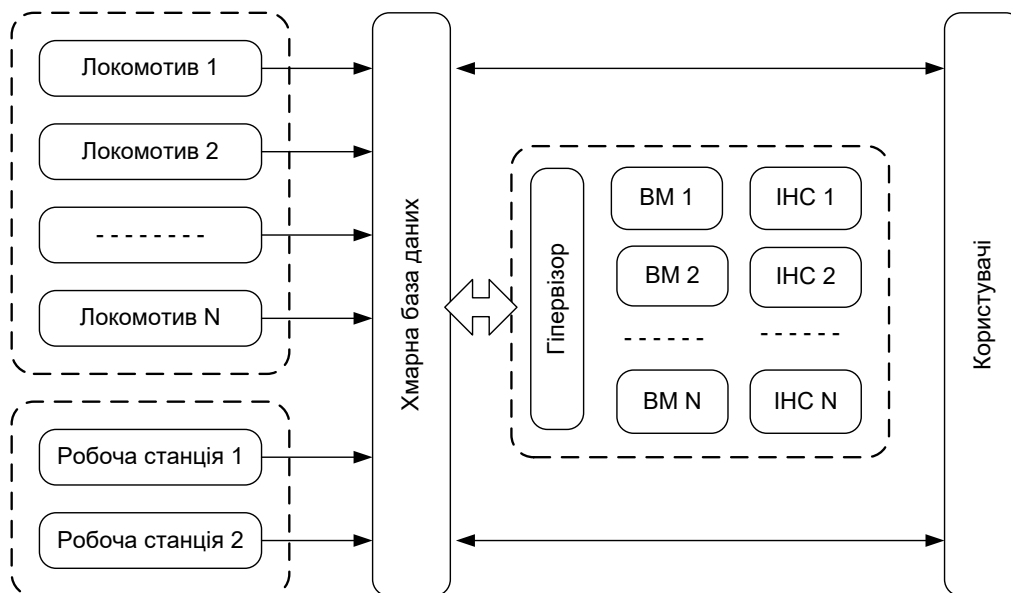
$\Delta_v$  – величина кроку дискретизації по швидкості;

$N_U$  – число управлінь.

Для типового тягового плеча в 200 км на поїздку буде потрібно тільки оперативної пам'яті близько 4 ГБ, що при багатозадачному паралельному розрахунку зажадає серйозних обчислювальних потужностей, наприклад, для 1000 одночасних розрахунків потрібно 4 ПБ оперативної пам'яті. Тому, щоб відповідати вимогам високої продуктивності, багатозадачності, потрібно використовувати підхід поділу завдань.

Програмний комплекс складається з: програм підготовки початкової інформації, розрахункових програм, програм візуалізації (рис. 1).

Поділ завдань дозволяє незалежно виконувати: введення і актуалізацію інформації про умови руху і обмеження, розрахунки, обробку результатів. Ці завдання виконуються паралельно, що вимагає невеликої кількості операторів, які формують завдання на розрахунок і забезпечують введення початкової інформації. Так як передбачається, що споживачем інформації є локомотивне депо, то результати роботи програмного комплексу повинні бути доступні безпосередньо в конкретному депо. Однак кожне локомотивне депо має обмежену кількість ділянок обслуговування, певні серії локомотивів, тому завдання підготовки та актуалізації інформації про поїздку необхідно вирішувати на більш високому рівні, ніж окремо взяте депо.



**Рис. 1 Структура комплексу оперативного нормування енергоресурсів**

Оператори, які вирішують завдання підготовки та актуалізації інформації, повинні спочатку наповнити базу даних необхідної початкової інформацією (тягові і струмові характеристики, профіль і план шляху, погодні умови і т. д.), а потім проводити актуалізацію цієї інформації, наприклад, обмежень по швидкості, погодних умов і т. д.

В якості програми підготовки початкової інформації для розрахунку доцільно використовувати додаток для роботи з електронними таблицями з готових вільних офісних пакетів, наприклад, LibreOffice Calc на операційній системі Linux, яке є відкритим програмним забезпеченням. Так як обмін даними між частинами комплексу проходять через базу даних (рис. 1), то на етапі підготовки даних слід використовувати готове програмне забезпечення, що має версії для всіх поширених операційних систем.

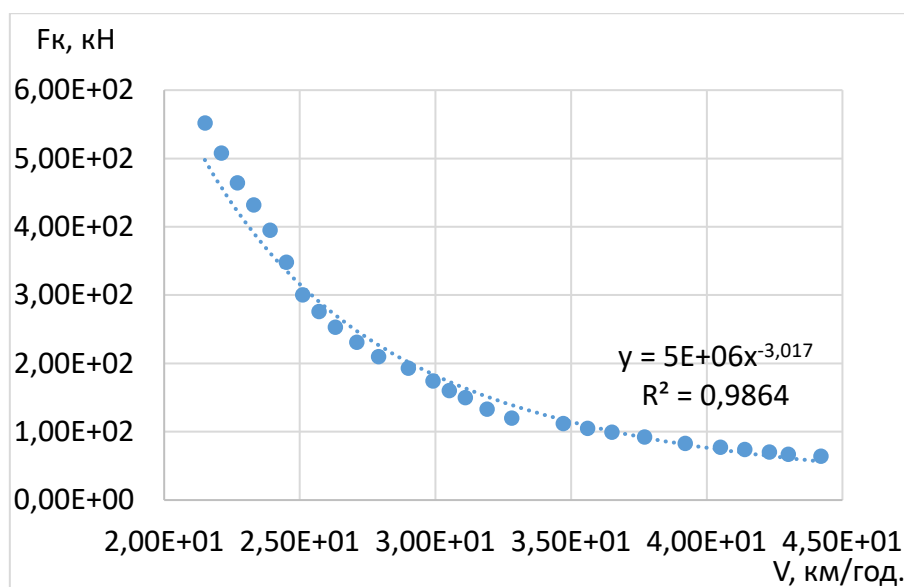
Профіль і план шляху може бути введений в електронну таблицю з використанням можливостей імпорту, наприклад, в базі даних MySQL існує оператор «Load Data Infile», який може безпосередньо завантажувати дані з файлу в форматі тексту з роздільниками.

Введення функціональних залежностей, виражених у табличних даних з [10], також можна реалізувати в LibreOffice Calc або Microsoft Excel. Розглянемо приклад отримання функціональної залежності тягової характеристики вантажного електровозу, заданої в таблиці 1.

Дані вносяться в електронну таблицю, потім по ним будують діаграму, додають лінію тренда, яка є регресійною. Для кращого наближення вибираємо поліноміальну залежність не менше сьомого порядку. Результат виконання процедури представлений на рис. 2. Значення коефіцієнта детермінації показує досить гарне наближення. Параметри апроксимуючої функції можуть підбиратися для даних індивідуально. Коефіцієнти рівняння з рис. 2 можуть бути перенесені в базу даних шляхом вставки в заздалегідь обумовленому форматі в таблицю бази даних. Таким же чином вводяться і інші функціональні залежності локомотива і поїзда.


**Таблиця 1 - Тягова характеристика вантажного електровоза**

Швидкість, км/год.	Сила тяги, кН	Швидкість, км/год.	Сила тяги, кН	Швидкість, км/год.	Сила тяги, кН
21,5	552	27,1	231	35,6	105
22,1	508	27,9	210	36,5	99
22,7	464	29,0	193	37,7	92
23,3	432	29,9	174	39,2	83
23,9	395	30,5	160	40,5	77
24,5	348	31,1	150	41,4	74
25,1	300	31,9	133	42,3	70
25,7	276	32,8	120	43,0	67
26,3	253	34,7	112	44,2	64


**Рис. 2 Діаграма обчисленої тягової характеристики вантажного локомотива з лінією тренда, яка є регресійною**

Програми в складі комплексу повинні взаємодіяти один з одним за допомогою бази даних. Це обумовлено тим, що є готові інструменти для перегляду і правки даних, для ефективного багатокористувацького доступу до даних. База даних дозволяє ефективно маніпулювати даними в рамках реляційної алгебри або користувальницьких скриптів і забезпечує надійне структуроване зберігання даних, в тому числі в режимі кластеризації або шардинга. В якості такої бази даних використані MySQL (або аналоги MariaDB, Percona Server) і PostgreSQL. Це вільні системи управління базами даних, які використовуються в режимі спільного доступу по мережі. Для локального тестування програми використовується локальна база даних SQLite, яка також забезпечує багатокористувацький доступ на локальному рівні. У разі реального використання системи з великою кількістю віддалених користувачів доцільно використовувати одну з мережових реляційних баз даних з розміщенням на виділеному сервері в хмарі. Хмара може бути приватним у вигляді власного сервера або кластера серверів з програмним забезпеченням на основі операційної системи Linux (OpenStack, Apache Cloudstack) або загальнодоступним



(платформа хмарних сервісів від Mail. Ru Group, платформа Microsoft Azure, платформа Amazon Web Services і т. д.).

Блок автоматичного тягового розрахунку також повинен бути розміщений в хмарному середовищі. Для такої вимоги є кілька причин:

- **висока продуктивність.** В якості універсального методу оптимізації вибрано динамічне програмування, так як дозволяє реалізувати детальну модель поїзда без обмежень на залежності між змінними. Динамічне програмування передбачає кілька етапів: розбиття завдання на більш прості-матриця можливих станів поїзда, отримання і аналіз можливих траєкторій руху поїзда, зміна умов, перерахунок матриці можливих станів або пересбірка траєкторій і т.д. Етапи алгоритму вимагають частого інтегрування рівняння руху поїзда з урахуванням багатьох обмежень (в залежності від складності моделі), які можуть бути задані у вигляді диференціальних рівнянь або навіть у вигляді систем диференціальних рівнянь (в разі обліку динамічних сил в поїзді). Для скорочення часу розрахунку повинні застосовуватися сервери з декількома багатоядерними процесорами, їх число повинно дозволяти витримувати навантаження від споживачів у разі зростання запитів на розрахунок. З урахуванням парку вантажних локомотивів (близько 2250) можна оцінити максимальну кількість поїздів і відповідно кількість запитів на розрахунок, кратне кількості поїздів. Тому потрібно максимально масштабована система, що забезпечується хмарними рішеннями;

- **вимоги до обсягу оперативної пам'яті.** Динамічне програмування є пошуковим алгоритмом спрямованого перебору, який для визначення рішення здійснює неповний перебір варіантних траєкторій, кількість яких обмежується алгоритмічно за цілою низкою умов. Неможливі варіанти перебору відсіваються на кожному кроці, тому не здійснюється повний перебір. Але навіть в цьому випадку при малій величині кроку по координаті і великій довжині тягового плеча кількість можливих траєкторій становить число 1022 і більше. Використання хмарного середовища дозволяє запустити процес вирішення всередині віртуальної машини, ресурсами якої можна гнучко управляти;

**Таблиця 2 - Результати розрахунку витрат енергії на тягу поїздів**

Розрахунок	Витрата енергії (метод Белмана), кВт*год	Витрата енергії (Метод ІНМ), кВт*год	Час ходу (метод Белмана), хв.	Час ходу (метод ІНМ), хв.
1	2690	2741	69,79	60,6
2	2780	2822	60,95	61,07
3	2830	2852	61,06	61,48
4	2415	2457	60,69	60,92
5	2572	2412	61,07	61,43

- **мережевий доступ.** Високі вимоги до апаратного забезпечення накладають обмеження на сценарії використання обчислювальної програми для великої кількості споживачів. При наявності швидких каналів зв'язку немає необхідності розміщувати обладнання поруч з кінцевим користувачем. Тому хмарне застосування програми дозволить заощадити фінансові ресурси замовника і консолідувати обчислювальну навантаження.



Проривним рішенням в порівнянні з класичними методами є метод, що дозволяє розділити процеси реалізації та отримання рішення. Сучасний технічний рівень і математичний апарат дозволяють повною мірою використовувати методи нелінійної апроксимації багатовимірних функцій-штучні нейронні мережі (ІНС). Також Актуалізація потрібна лише для класичних методів оптимізації, таких як принцип максимуму Понтрягіна або принцип оптимальності Беллмана, які не передбачають навчання (підвищення адекватності) моделі. Такі методи чутливі до точності початкової інформації. У разі якщо змінюються характеристики рухомого складу, наприклад, через знос обладнання, отримане оптимальне рішення не претендує на точність. На відміну від класичних методів застосування «чорного ящика» – ІНС – дозволяє забезпечити безперервне навчання і підвищення точності норм в залежності від кількості навчальної інформації. Збігом часу обсяг навчальної інформації буде тільки зростати, що дозволить забезпечити безперервне поліпшення результату без застосування окремих додаткових методик або технологій.

Необхідність в застосуванні таких структур виникла через основні недоліки класичних методів: тривале отримання оптимального рішення, потреба в спеціальному підвищенні адекватності початкових даних, апріорна модель поїзда, що не враховує конкретні особливості рухомого складу. Для методу штучних нейронних мереж потреби в пам'яті роблять істотне обмеження тільки в режимі навчання, яке може проводитися паралельно з роботою нейромережі і розділене в часі і просторі (наприклад, іншим центром обробки даних), залежать від структури мережі і розміру вибірок.

В якості універсального кроссплатформенного засобу візуалізації результатів розрахунків виступає інтерфейс веб-додатки, альтернативним варіантом може бути використання окремого десктопного додатки. Для роботи з розробленим комплексом необхідно використання програми з підключенням до бази даних.

Додаток за допомогою прямого підключення до бази даних витягує результати розрахунків і відображає на дисплеї користувача (машиніста). У прототипированной версії, виконується тільки пошук по унікальному ідентифікатору поїздки для того, щоб показати реалізованість пропонованого в роботі рішення. Якщо використовується Мережева база даних, то підтримується багатокористувацький доступ до норм в сервері бази даних.

Для перевірки роботи комплексу виконувалися нормувальні варіантні розрахунки для різних ділянок колії з різними умовами руху та параметрами поїзда на обмеженій кількості модельних поїздок.

Для базового розрахунку вибирався довільний ділянку профілю довжиною близько 50 кілометрів, а поїзд складався з локомотива ВЛ11 і 50 піввагонів, повністю і неповністю завантажених. Проводилося кілька варіантних розрахунків (табл. 2), що імітують різні ситуації з пропуском поїзда на окремих ділянках колії за зміни часових обмежень швидкості, які виконані з різними умовами руху. З метою зниження споживання пам'яті і прискорення розрахунків не наводяться криві руху в графічному вигляді.



## Висновки

Результати розрахунків показують, що час ходу поїзда витримується досить точно і розкид цього параметра менше хвилини. Цифри, отримані одним і іншим методом, є досить близькими, що підтверджує еквівалентність рішень. Результати розрахунків передаються машиністу поїзда для виконання мотиваційної функції. Після закінчення поїздки за фактичними умовами руху відбувається коригування оперативної норми і проводиться аналіз поїздки на відповідність оптимальному плану руху. У разі сильного відхилення норми і фактичного результату поїздки додається в навчальну вибірку для перенавчання ІНМ.

Такий підхід є лише першим етапом для створення сучасної безпілотної єдиної системи управління перспективними локомотивами [8]. На другому етапі навчена ІНМ може формувати норми і проводити аналіз руху на борту локомотива безперервно з постійним навчанням в режимі підкріплення, тобто без необхідності в вчителя (не потрібно потужний стаціонарний комп'ютер). На третьому етапі слід переходити до управління поїздом на основі ІНС при збереженні контролюючого персоналу.

## Література

1. Парунакян В.Э., Красулин А.С., Гусев Ю.В. Оценка энергозатратного механизма транспортных технологий промышленных предприятий // Захист металургійних машин від поломок: Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Мариуполь, 2006. – Вип. 9. – С. 184-192.
2. Парунакян В.Э., Красулин А.С., Примаков А.Ф., Агарков В.Я. Применение энергосберегающей транспортной технологии для повышения эффективности обслуживания предприятий // Металлургическая и горнодобывающая промышленность. – 2010. – № 4. – С. 138-140.
3. Маслак А. В. Анализ эксплуатационных показателей работы локомотивного парка при транспортном обслуживании прокатных цехов металлургических предприятий [Электронный ресурс] / А. В. Маслак, А. С. Красулин // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2017. – Вип. 32. – С. 201-209. – Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/13820>
4. Красулин А. С. Транспортное обслуживание цехов промышленных предприятий с применением логистических энергосберегающих технологий [Текст] / Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – Дніпро: Вид-во Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. – Вип. 18. – С. 42-51.
5. Красулін О.С. Транспортна технологія для зниження витрат на залізничних перевезеннях промислових підприємств [Текст] / Modern engineering and innovative technologies Issue 12 / Part 2, - June 2020. – P. 81-88. <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit12-02-035>
6. Правила тяговых расчётов для тепловозов на промышленном транспорте (выпуск 4324). – М.: ПромТрансНИИПроект, 1987.