

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

### Вступ

У зв'язку з постійним підвищенням вартості електроенергії не втрачає своєї актуальності задача зменшення витрат електроенергії та власного її споживання електрифікованим залізничним транспортом. В загальному електроенергетичному балансі України споживання електроенергії транспортом знаходиться на 4-му місці після промисловості, населення, та комунально-побутових споживачів, таким чином тяговими підстанціями електрифікованого транспорту виконується переробка майже 6 % електричної енергії. Економія навіть незначного відсотка споживання електроенергії викликає відчутну економію коштів. Споживання електроенергії залізницями в першу чергу залежить від організації перевізного процесу та значною мірою визначається узгодженою роботою усіх підрозділів: станцій, локомотивних і вагонних депо, дистанцій колії, сигналізації та зв'язку, дистанцій електропостачання, що забезпечується рухом поїздів за чітко визначеним графіком.

Особливість роботи систем тягового електропостачання обумовлюється характером зміни навантажень від електрорухомого складу. При чому, в процесі руху змінюється взаємне розташування поїздів, струм і швидкість кожного окремого поїзду, оскільки поїзд в кожен момент часу знаходиться на різному елементі поздовжнього профілю, який створює свій вплив на основний опір руху. Все це викликає зміну навантажень тягових підстанцій і впливає на величину витрат електроенергії в контактній мережі.

Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів графіку руху поїздів, який визначає навантаження системи тягового електропостачання, на втрати електроенергії в контактній мережі.

### Огляд літератури

Поставленій проблематиці присвячена досить велика кількість робіт провідних вчених [1, 2], проте задача зменшення витрат електроенергії в контактній мережі за рахунок управління транспортним потоком до цього часу не реалізована.

В роботі [3] проведені дослідження витрат електроенергії в контактній мережі з врахуванням дислокації поїздів. Проте в реальних умовах підтримувати оптимальні відстані між поїздами, які змінюються в кожен момент часу, практично неможливо за умови відсутності інформації у машиністів електровозів про знаходження інших рухомих складів за пристроями супутникової навігації. Тому виникає задача усереднення дислокацій поїздів до середнього міжпоїздного інтервалу, який відповідатиме мінімуму витрат електричної енергії. Управляючим параметром в роботі [4] розглядається міжпоїзний інтервал. Унаслідок нерівномірності руху поїздів, фактичні розміри руху не завжди перевищують наявну пропускну спроможність ділянки. Таким чином, у графіку руху з'являється резерв вільного часу, який надає можливість регулювання міжпоїздного інтервалу в певних межах. Обмеженнями в поставленій задачі мінімізації витрат електроенергії повинні бути найменша величина інтервалу між поїздами за умовами безпеки руху та сумарний час пропуску заданого пакету поїздів. За умовами надійності роботи рейкових кіл довжина блок-ділянки повинна бути не меншою 1,0 км і не більше 3,0 км. Окрім цього, мінімальний міжпоїзний інтервал повинен враховувати обмеження за умовами роботи системи електропостачання [5] і враховувати:

- потужність обладнання тягових підстанцій;
- нагрівання проводів контактної мережі;
- рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

### Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети проведемо дослідження величини витрат електроенергії на прикладі реальної ділянки електрифікованої залізниці за допомогою імітаційного моделювання. Вихідними даними для моделювання задамося наступними:

- довжина міжпідстанційної зони – 18 км;
- питомий опір контактної мережі  $r_0 = 0.07$  Ом/км;
- переріз контактної підвіски – 412 мм<sup>2</sup>;

- схема живлення – вузлова;
- кількість категорій поїздів – 4;
- вага поїздів – 1250, 1400, 3000, 5000 т;
- типи електровозів – ЧС7, ВЛ8, ДЕ1;
- тягові розрахунки для заданого профілю, вказаної ваги та типів електровозів.

Характеристики обраних категорій поїздів приведені в табл. 1. Тягові розрахунки, які представляють собою залежності струму електровозу та швидкості поїзду з урахуванням існуючих обмежень від координати місцезнаходження поїзда, приведені на рис. 1.

Таблиця 1

## Характеристики поїздів різних категорій

№ категорії поїзду	Характеристика		
	Категорія	Вага брутто, т	Тип електровозу
1	Пасажирський, швидкий	1250	ЧС-7
2	Вантажний	1400	ВЛ-8
3	Вантажний	3000	ДЭ-1
4	Вантажний	5000	ВЛ-8

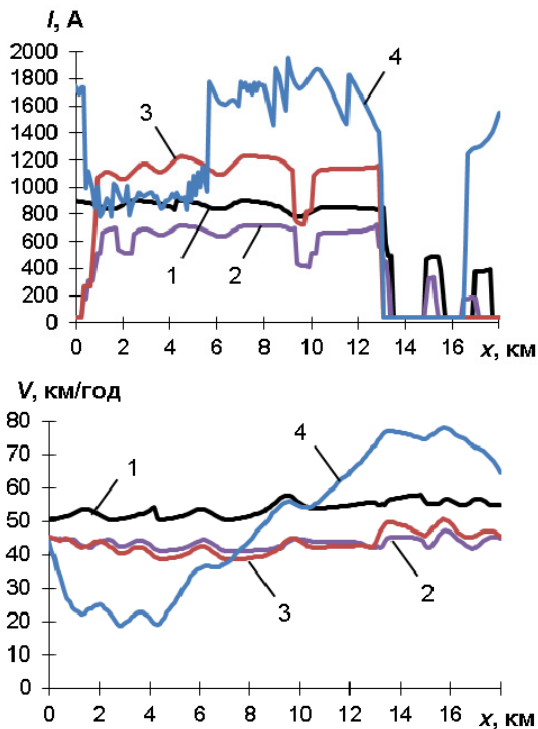


Рис. 1. Результати тягових розрахунків для поїздів різних категорій: 1 – пасажирський 1250 т; 2 – вантажний 1400 т; 3 – вантажний 3000 т; 4 – вантажний 5000 т

Необхідно розглянути можливі способи управління транспортним потоком через регулювання параметрів графіку руху поїздів та оцінити зниження втрат електроенергії в контактній мережі. Для цього авторами розроблена спеціальна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»,

яка призначена для складання таких графіків руху, що дозволяють досягти рівномірного завантаження тягових підстанцій, зменшення втрат електроенергії в контактній мережі та, в цілому, підвищення ефективності роботи системи тягового електропостачання [10].

Виділимо наступні режими управління транспортним потоком: вирівнювання інтенсивності руху поїздів; впорядковування послідовності відправлення поїздів; регулювання інтервалу попутного слідування; часовий зсув пакету поїздів.

## Вирівнювання інтенсивності руху поїздів

Для оцінки впливу нерівномірності руху поїздів на величину втрат електроенергії, розглянемо два випадки пропуску однакової кількості поїздів з різною погодинною інтенсивністю та однаковою. Нехай у першому випадку графік руху поїздів матиме вигляд, зображений на рис. 2, з якого видно, що за першу годину виконано пропуск 10 поїздів, за другу – 7, за третю – 4. Графік руху у другому випадку матиме вигляд, представлений на рис. 3, де інтенсивність руху рівномірна і складає 7 поїздів на годину. Для цих розрахунків приймається, що графік руху складається з однотипних поїздів.

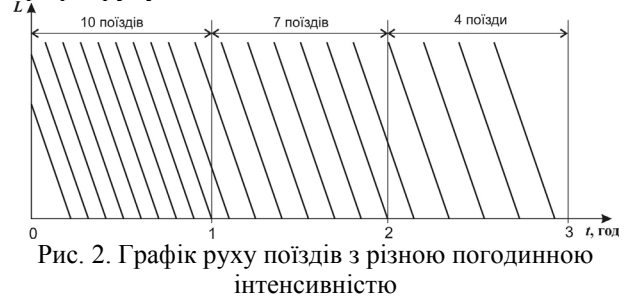


Рис. 2. Графік руху поїздів з різною погодинною інтенсивністю

За допомогою спеціалізованої імітаційної моделі виконані розрахунки показників системи тягового електропостачання та отримані часові залежності втрат електроенергії для виконаних графіків руху. Отримані результати свідчать, що втрати електроенергії в контактній мережі змінюються в межах від 450 до 1340 кВт·год. Інтегральна величина втрат електроенергії на 3-годинному інтервалі складає 2 833,6 кВт·год.

Результати розрахунку рівномірного графіку руху (рис. 3) показують, що втрати електроенергії за кожну годину однакові, за винятком першої, і складають 925,7 кВт·год. Менші значення втрат першої години обумовлені нульовими початковими умовами при виконанні моделювання. Сумарні втрати електроенергії в контактній мережі при пропуску 21-го поїзда ділянкою склали 2 588,1 кВт·год, що на 8,7 % менше попереднього випадку.

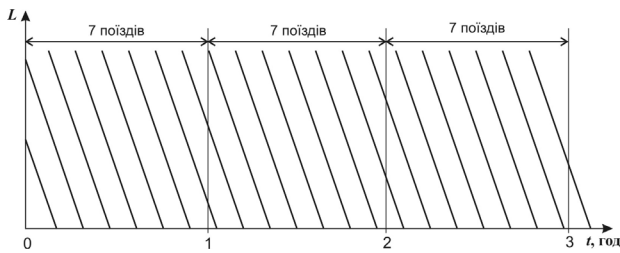


Рис. 3. Рівномірний графік руху поїздів

На рис. 4 приведені залежності миттєвих втрат для розглянутих варіантів пропуску поїздів. Максимальні значення втрат потужності складають 2 814,4 і 1 337,2 кВт відповідно для кожного варіанту.

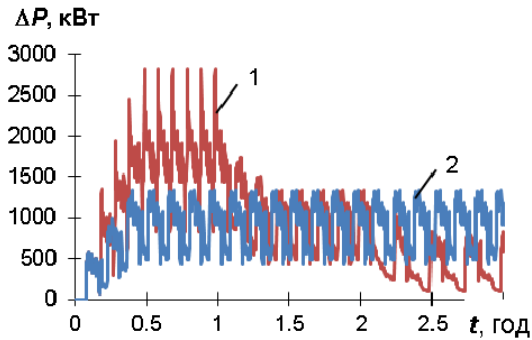


Рис. 4. Миттєві втрати потужності для варіантів графіків руху: 1 – нерівномірний; 2 – рівномірний

Інтегруючи значення миттєвих втрат потужності в часі, отримаємо інтегральну величину втрат електроенергії в контактній мережі (рис. 5), аналіз яких наочно показує зниження втрат у випадку застосування рівномірного графіку руху, а постійний кут нахилу кривої втрат електроенергії вказує на більш рівномірне завантаження системи тягового електропостачання.

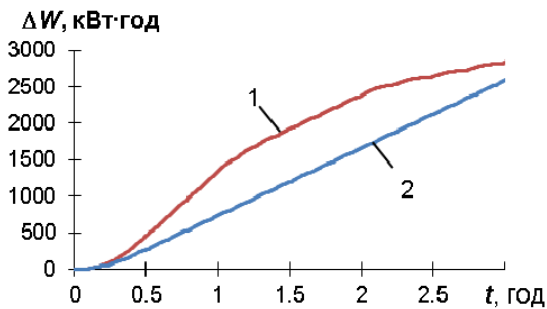


Рис. 5. Втрати електроенергії в контактній мережі ділянки: 1 – нерівномірний графік; 2 – рівномірний

В результаті порівняння отриманих значень приходимо до висновку, що одна і та ж кількість поїздів може бути пропущена ділянкою за один і той же час з різними втратами електроенергії, які залежать від параметрів потоку поїздів. Таким чином, при управлінні потоком поїздів необхідно коригувати його показники з метою створення рівномірного завантаження системи тягового електропостачання та зменшення втрат електроенергії в контактній мережі.

## Впорядкування послідовності відправлення поїздів

Для дослідження впливу послідовності відправлення поїздів на втрати електроенергії в контактній мережі розглянемо варіанти пропуску пакету поїздів 4-х обраних категорій з інтервалами 6, 10 і 20 хв.

Як відомо з комбінаторики, загальна кількість перестановок визначається факторіалом кількості об'єктів, тому для нашого випадку  $4! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$  перестановки. Іншими словами виконати пропуск пакету поїздів 4-х категорій можна виконати 24-ма способами. Для збереження інформації про склад перестановки в різних режимах застосовується поняття лексикографічного порядку. Тобто, перестановці під № 1 відповідає послідовність категорій поїздів 1, 2, 3, 4, перестановці № 2 – 1, 2, 4, 3, перестановці № 3 – 1, 3, 2, 4, і так далі, і для № 24 – 4, 3, 2, 1. Дотримуючись такого лексикографічного порядку можна виконати і зворотне перетворення.

Досліджуючи закономірність зміни втрат електроенергії від схеми живлення та варіантів розташування поїздів для значення інтервалу попутного слідування 10 хв., отримані значення втрат, які приведені на рис. 6. Найменше значення втрат електроенергії при дотриманні однакового рівня напруг на шинах суміжних підстанцій приходиться на паралельну схему живлення і складає 184,7 тис. кВт·год. При цьому розташування мінімуму втрат при різних схемах живлення не змінюється, а змінюється лише його абсолютне значення.

Для міжпоїзних інтервалів 6 і 20 хв. варіанти розташування поїздів, які відповідають мінімуму втрат електроенергії змінюються незначно. Так, наприклад, для інтервалу 6 хв., мінімум приходиться на розстановку № 1 – 246,1 тис. кВт·год, для інтервалу 20 хв. – на № 3 – 246,3 тис. кВт·год.

На рис. 7 представлені втрати електроенергії для різних значень міжпоїзних інтервалів при застосуванні вузлової схеми живлення.

За результатами розрахунків видно, що мінімум втрат потужності припадає на розташування категорій поїздів № 3. Крім того, спостерігається що при зменшенні інтервалу попутного слідування, за інших рівних умов, втрати електроенергії в контактній мережі зростають. В ідеальному випадку найнижчий рівень втрат потужності в контактній мережі буде при міжпоїзному інтервалі, який дорівнює часу ходу поїзда міжпідстанційною зоною, тобто коли на міжпідстанційній зоні знаходиться лише один поїзд. Проте в реальних умовах експлуатації цей критерій сильно обмежить пропускну спроможність ділянки і значно перевищить сумарний час пропуску необхідної кількості поїздів.

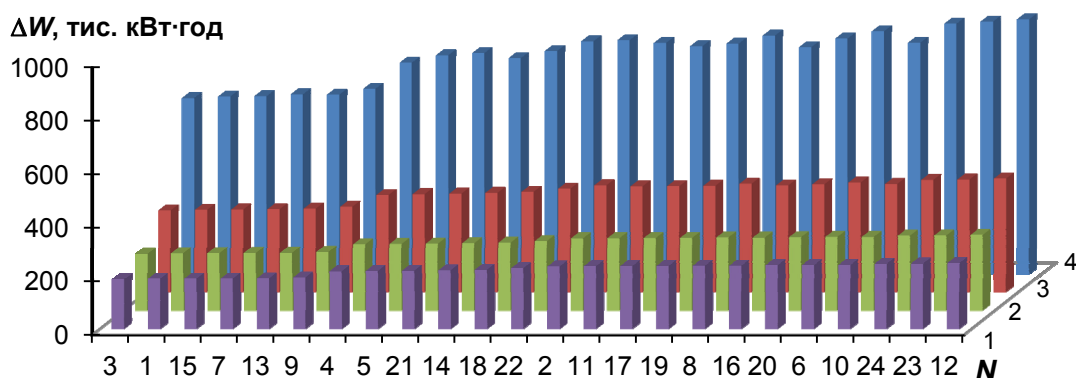


Рис. 6. Втрати електроенергії для різних схем живлення в залежності від варіантів розташування категорій поїздів з інтервалом 10 хв.: 1 – паралельна схема; 2 – вузлова схема; 3 – двостороння схема; 4 – консольна схема

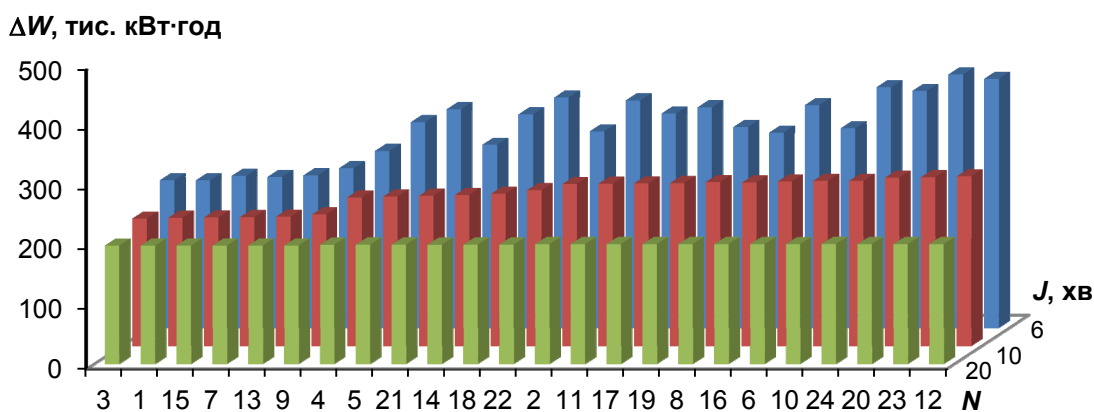


Рис. 7. Втрати електроенергії для різних значень міжпоїзних інтервалів та повного набору перестановок категорій поїздів

Окремо виконувались дослідження величини власного споживання електроенергії на тягу поїздів. Аналізуючи отримані результати підтверджено відомий факт, що витрата електроенергії безпосередньо електровозами не залежить від схеми живлення контактної мережі. Таке явище є недоліком застосування імітаційного моделювання із припущенням, що режим напруги не впливає на тягово-енергетичні характеристики рухомого складу і не враховується взаємний вплив потужних тягових навантажень, які пов'язані між собою через систему тягового електропостачання.

Незважаючи на вказані припущення, отримані досить цікаві закономірності. Зокрема, встановлено, що варіант розташування категорій поїздів з мінімальними втратами електроенергії не завжди співпадає з варіантом, який забезпечує мінімальні втрати електроенергії. Проаналізуємо детальніше закономірності зміни витрат електроенергії відносно трьох інтервалів попутного слідування 6, 10 і 20 хв. на прикладі двосторонньої схеми живлення.

У випадку пропуску пакету поїздів з мінімально можливим інтервалом 6 хв., картина розподілу витрат електроенергії за номером роз-

тановки має явний розрив мінімальних значень відносно інших (рис. 8).

Найменшу витрату електроенергії мають перші 6 розстановок, які в порядку зростання першої, розташовуються наступним чином: 3, 9, 15, 7, 1 і 13. Максимальний розкид значень серед цих розстановок складає менше 1 % і приймається у якості шуканої множини рішень. Загальною закономірністю вказаних розстановок є слідування останнім поїзду найбільшої ваги, оскільки в інших випадках швидкість більш швидких поїздів буде обмежуватись важковаговим складом, що призведе до збільшення часу пропуску пакету та відповідно витрати електроенергії.

У випадку середнього інтервалу руху 10 хв., картина розподілу витрат електроенергії виглядає більш розмазаною і не має явних розривів максимальних і мінімальних значень (рис. 8). Найкращими з точки зору витрати електроенергії у даному випадку можна виділити 3 розстановки: 11, 20 і 5. Вони характеризуються послідовним чергуванням ваги поїздів, а саме легкий – важкий – легкий – важкий або важкий – легкий – важкий – легкий. При цьому, найбільш важковаговий склад має слідувати спочатку



першим або другим. Більш високі значення витрат електроенергії мають розстановки, у яких співпадають категорії, тобто легкий – легкий або важкий – важкий. Максимум витрат електроенергії припадає на комбінації різнотипних поїздів за вагою, в яких важковаговий поїзд слідує останнім.

Картина розподілу витрати електроенергії у випадку максимального інтервалу при пакетному пропуску поїздів має вигляд, протилежний випадку з мінімальним інтервалом (рис. 8). Що характерно тепер ті розстановки, в яких за

мінімального інтервалу спостерігались низькі значення витрати електроенергії, відповідають найбільш високим значенням витрати. Пояснюється це тим, що більш швидкому поїзду достатньо міжпоїзного інтервалу, щоб не обмежувати свою швидкість через наявність попереду більш повільного. Саме в цьому випадку для досягнення мінімуму витрат електроенергії необхідно відправляти поїзди в порядку зменшення ваги, розстановка № 24 і є тому підтвердженням.

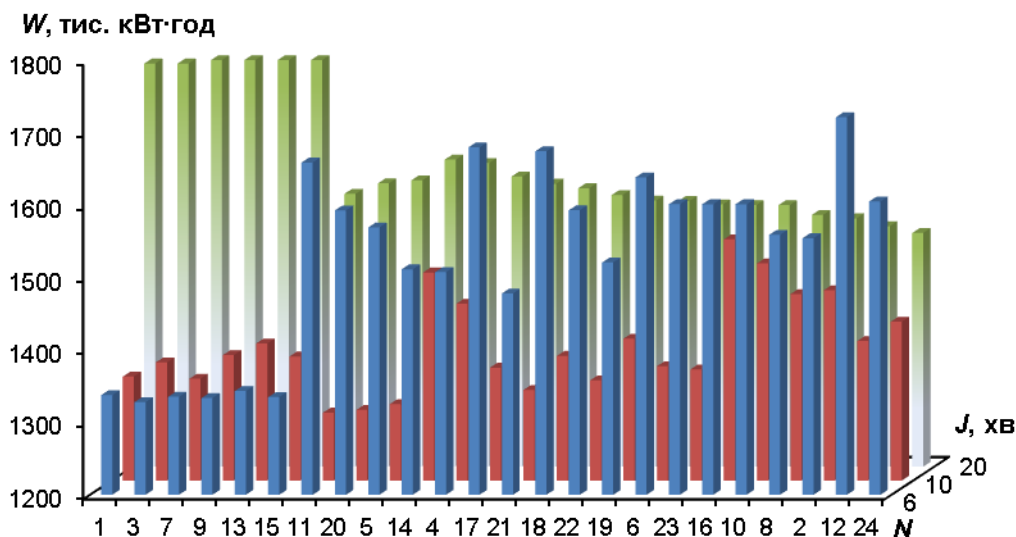


Рис. 8. Витрати електроенергії при пропуску пакету різнотипних поїздів з різними інтервалами

### Регулювання інтервалу попутного слідування

В приведених раніше дослідженнях міжпоїзний інтервал у пакеті поїздів приймався постійним. Виконаємо дослідження впливу зміни міжпоїзного інтервалу для поїздів у пакеті за інших рівних умов. У якості обмеження задамо фіксований час пропуску заданої кількості поїздів ділянкою. За відсутності такого обмеження оптимізація міжпоїзних інтервалів призводить до їх збільшення до величини часу ходу кожного поїзда ділянкою, і, як наслідок, до незрівнянних варіантів.

Розглянемо варіанти пропуску 3-х типів поїздів вагою 1400, 3000 і 5000 т у парному і непарному напрямках. В якості схеми живлення приймемо вузлову. Розглянемо по-черзі кожен з режимів оптимізації, вважаючи інші параметри незмінними.

В режимі пошуку послідовності відправлення поїздів кількість варіантів визначається факторіалом і в даній задачі дорівнює 6. Результати розрахунків для однієї колії при рівних умовах на іншій колії з інтервалом 10 хв. приведені в табл. 2.

Як видно з табл. 2, оптимальним буде послідовність відправлення 3, 1, 5 непарною колією і 6, 2, 4 парною. Прийнята нумерація поїздів відповідає розподілу їх ваги у порядку збільшення.

Визначимо оптимальні інтервали між кожним поїздом у пакеті парної і непарної колії з обмеженням сумарного часу пропуску пакету. Формалізуємо задачу, уводячи позначення на графіку руху поїздів в загальному виді (рис. 9).

Таблиця 2

### Втрати в контактній мережі двоколійної ділянки

№ п/п	Послідовність відправлення поїздів, 1-а колія	Втрати, тис. кВт-год	Послідовність відправлення поїздів, 2-а колія	Втрати, тис. кВт-год
1	1 3 5	538.3	2 4 6	443
2	1 5 3	647.9	2 6 4	441.2
3	<b>3 1 5</b>	<b>522.5</b>	4 2 6	447.8
4	3 5 1	608.5	4 6 2	458.5
5	5 1 3	712.4	<b>6 2 4</b>	<b>437</b>
6	5 3 1	749.5	6 4 2	445.9

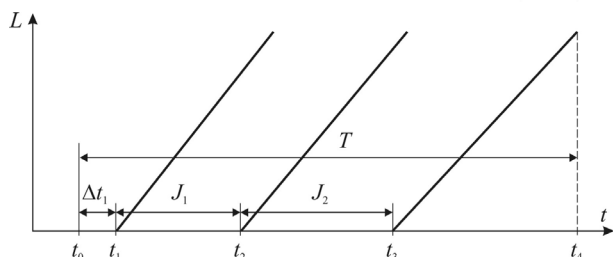


Рис. 9. Розрахункова схема параметрів руху поїздів

З рис. 9 видно, що час пропуску пакету поїздів  $T$  в загальному виді визначається виразом

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \quad (1)$$

де  $\Delta t_1$  – затримка часу відправлення першого поїзду в пакеті, хв;

$J_1, J_2$  – міжпоїзні інтервали, хв;

$(t_4 - t_3)$  – час ходу останнього поїзду в пакеті, хв.

Таким чином, враховуючи прийняте обмеження, отримаємо рівняння, яке визначає незалежні параметри графіку руху

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = const. \quad (2)$$

В загальному випадку рівняння (2) має нескінченну множину рішень, якщо обмежити область рішень цілими числами, матимемо діафантове рівняння з кількістю змінних, що дорівнює кількості поїздів у пакеті, тобто в нашому випадку – 3.

Достатньо швидко рівняння (2) можна вирішити, реалізуючи перебір можливих значень за допомогою трьох вкладених циклів. Проте для більшої універсальності, тобто для будь-якої кількості поїздів, необхідно застосувати рекурсивний підхід з глибиною рекурсії, що дорівнює кількості змінних у рівнянні.

Приймаючи обмеження часу пропуску пакету рівне 1 год і вважаючи мінімальний інтервал руху 6 хв, для розрахункової ділянки матимемо 276 комбінацій, що задовольняють рівняння (2), для кожного з яких виконаємо моделювання та визначимо втрати електроенергії в контактній мережі.

З рис. 10 видно, що мінімальне значення втрат електроенергії відповідає порядковому номеру 240, набір параметрів непарного пакету якого виглядає наступним чином: 10; 12; 12. Для парного пакету, використовуючи аналогічний підхід, отриманий набір параметрів 0; 24; 10. Результати розрахунку можуть бути також інтерпретовані у вигляді ліній рівня тривимірної функції, який приведено на рис. 11 для парного пакету.

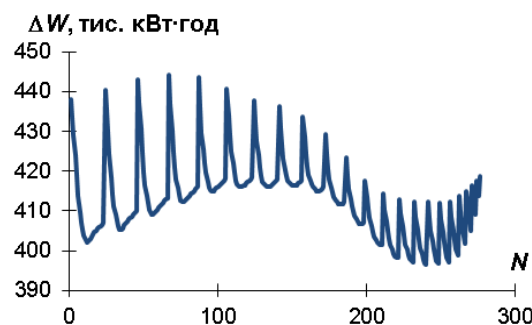


Рис. 10. Втрати електроенергії в контактній мережі для множини наборів параметрів руху поїздів

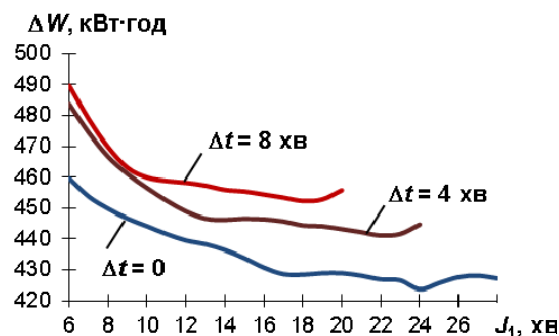


Рис. 11. Втрати електроенергії в контактній мережі для параметрів графіків руху парного пакету

З рис. 11 наочно видно, що мінімум приходить при нульовому часовому зсуві і першому інтервалі  $J_1 = 24$  хв. Другий інтервал визначається з рівняння (2) шляхом віднімання від обмеження  $T$  необхідних доданків, і в результаті, отримуємо  $J_2 = 10$  хв.

Отримані параметри графіку руху означають, що для досягнення мінімуму втрат електроенергії перший поїзд непарного пакету необхідно відправити із затримкою 10 хв, далі через кожні 12 хв відправляти наступні поїзди. Для парного пакету перший поїзд треба відправити одразу, а наступні через 24 і 10 хв відповідно.

### Часовий зсув пакету поїздів

Приведені результати оптимізації графіку руху неявно враховують часовий зсув парного і непарного пакетів, при цьому дотримується прийняте обмеження часу пропуску. Призначення часового зсуву полягає у знаходженні можливого мінімуму втрати при подальших часових зсувах без обмеження часу пропуску.

Отримані результати (рис. 12) показують, що при часовому зсуві непарного пакету можливо ще знизити втрати електроенергії, при цьому час пропуску збільшиться лише на 2 хв і складе 1 год 02 хв.

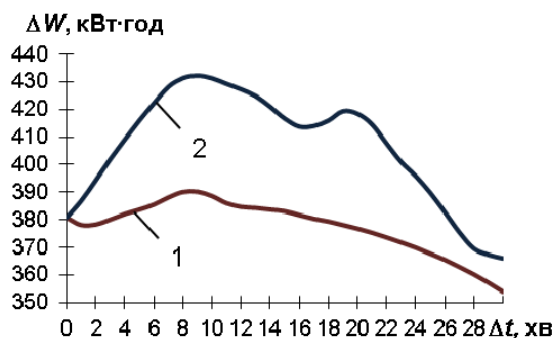


Рис. 12. Втрати електроенергії при часовому зсуві пакетів поїздів: 1 – непарного; 2 – парного

Для подальших часових зсувів до 10-12 хв парного і непарного пакетів спостерігається збільшення втрат електроенергії. Істотного зниження втрат можна також досягти при порівняно більших часових зсувах, що відповідно збільшить і час пропуску пакету поїздів ділянкою.

В результаті енергоефективний графік з точки зору мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі, що враховує впорядкування відправлення різнотипних категорій поїздів, оптимальні інтервали слідування та часовий зсув парного і непарного пакетів матиме вигляд, представлений на рис. 13.

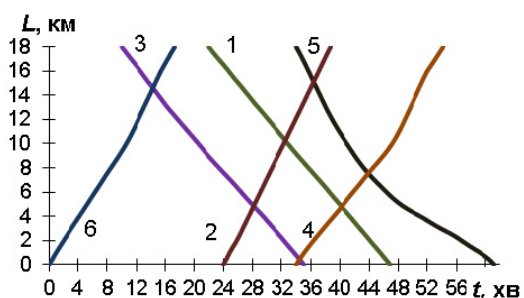


Рис. 13. Енергоефективний графік руху поїздів

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доманская, Г. А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.22.09 / Г. А. Доманская. – Д., 2007. – 25 с.
2. Землянов, В. Б. Энергооптимальные технологии анализа и регулирования электропотребления на тягу поездов: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.22.09 / В. Б. Землянов. – Д., 2000. – 23 с.
3. Кузнецов, В. Г. Исследование факторов, определяющих величину потерь мощности в тяговой сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – 2012. – № 18. – С. 62-67.
4. Митрофанов, А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов / А. Н. Митрофанов; Самарская гос. акад. путей сообщения. - Самара. - 2005, -168 с.
5. Эксплуатационные требования к параметрам устройств энергоснабжения железных дорог, электр.

© Кузнецов В. Г. та ін., 2013

#### Висновки

1. Для електрифікованих залізниць України характерна нерівномірність руху поїздів, при чому фактичні розміри не завжди перевищують наявних пропускних спроможностей ділянок. Графіки руху поїздів мають резерв вільного часу, який надає можливість виконувати регулювання міжпоїзного інтервалу в певних межах.

2. При вирішенні задачі оптимізації графіків руху поїздів слід дотримуватись обмежень інтервалу попутного слідування. Мінімальний інтервал повинен враховувати обмеження за умовами безпеки руху та умов роботи систем тягового електропостачання. Також слід обмежувати сумарний час пропуску пакету поїздів за умовами техніко-економічних міркувань.

3. Зменшити експлуатаційні витрати залізниць можна шляхом економії витрат електроенергії на тягу поїздів та зниження втрат електроенергії в контактній мережі. Для зменшення втрат електроенергії в залежності від умов експлуатації та резервів у графіках руху доцільно застосовувати вирівнювання інтенсивності руху поїздів, впорядкування послідовності відправлення поїздів, регулювання інтервалу попутного слідування та часовий зсув пакету поїздів.

4. Кількісно величина зміни втрат електроенергії в залежності від послідовності відправлення поїздів складає 20..23 %, від регулювання інтервалів між поїздами 23..27 %. Таким чином, оптимізація режимів системи тягового електропостачання за рахунок складання енергоефективних графіків руху дозволить зменшити втрати електроенергії на 2-3 % від загальної витрати електроенергії на тягу поїздів.

#### REFERENCES

1. Domanskaya G. A. *Energosberegayushchie tekhnologii tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog s uchetom rezhimov raboty pitayushchikh ikh energosistem* Reference. Authoref. Kand, Diss. [Traction power energy saving technologies railways considering modes of feeding their power systems. Authoref. Cand. Sci. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2007. 25 p.
2. Zemlyanov V. B. *Energooptimal'nye tekhnologii analiza i regulirovaniya elektropotrebleniya na tyagu poezdov*. Authoref. Kand, Diss. [Energy optimal technology analysis and regulation of electricity for traction. Authoref. Cand. Sci. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2000. 23 p.
3. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A. *Issledovanie faktorov, opredelyayushchikh velichinu poter' moshchnosti v tyagovoy seti* [Study of the factors determining the magnitude of the power loss in traction network]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI»* [Bulletin of National Technical University "KhPI"], 2012, no.18, pp. 62-67.
4. Mitrofanov A. N. *Modelirovanie protsessov*

трифицированных на постоянном токе [Текст]: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ – Москва: Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.

6. Гульден, Я. Перечислительная комбинаторика / Я. Гульден, Д. Джексон. – М.: Наука, 1990. – 504 с.

7. Кузнецов, В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босий // Праці інституту електродинаміки. – 2012. – № 33. – С.18-21.

8. Кузнецов, В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счёт регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босий // Технічна електродинаміка. Темат. випуск: силова електроніка та енергоефективність. Ч.3.-2012.-С.107-110.

9. Логвінова, Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 110-113.

10. Комп'ютерна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»: А.с. 48202. Україна / Калашников К.О., Кузнецов В.Г., Босий Д.О. Зареєстровано 05.03.2013 р. К.: ДСІВУ, 2013.

Надійшла до друку 30.09.2013.

*prognozirovaniya i upravleniya elektropotrebleniyem tyagi poezdov* [Modeling processes forecasting and energy management traction trains]. Samara, 2005. 168 p.

5. *Ekspluatatsionnye trebovaniya k parametram ustroystv energosnabzheniya zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na postoyannom toke* [Performance requirements for device parameters supply railways, electrified DC]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959. 234 p.

6. Gul'den Ya., Dzhekson D. *Perechislitel'naya kombinatorika* [Enumerative combinatorics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 504 p.

7. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A., Bosiy D. A. *Optimizatsiya poter' elektroenergii v kontaktnoy seti zheleznodorozhnogo transporta* [Optimization of energy losses in catenary of rail transport]. *Pratsi institutu elektrodinamiki* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics], 2012, no.33, pp.18-21.

8. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A., Bosiy D. A. *Umen'shenie poter' elektroenergii v kontaktnoy seti za schet regulirovaniya grafika dvizheniya poezdov* [Reduction of electricity losses in the contact system by adjusting train schedule]. *Tekhnichna elektrodinamika. Temat. vipusk: silova elektronika ta energoefektivnist'. Chast 3* [Technical electrodynamics. Theme Issue: power electronics and energy efficiency. Part 3], 2012, pp. 107-110.

9. Logvinova N. O., Bosiy D. A., Polyakh A. N. *Zmshennya ekspluatatsiyних vitrat za dopomogoyu energooptimal'nogo rukhu poїzdів* [Reduce operating costs by using energy optimal trains]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nats. un-tu zalіzn. transp. im. akad. V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named. acad. V. Lazaryan], 2012, no.42, pp. 110-113.

10. Kalashnikov K. A., Kuznetsov V. G., Bosiy D. A. *Komp'yuterna programa «Avtomatizovana sistema skladannya energoefektivnogo grafiku rukhu poїzdів «Potok»* [Computer program "Automated system for folding energy efficient train schedule "Flow"]. Patent, no. 48202, 2013.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

Режим роботи систем тягового електропостачання обумовлюється характером зміни навантажень від електрорухомого складу. В процесі руху поїздів змінюється їх взаємне розташування, струм і швидкість кожного окремого поїзду, оскільки поїзд в кожен момент часу знаходиться на різному елементі поздовжнього профілю, який створює свій вплив на основний опір руху. Все це викликає зміну навантажень тягових підстанцій і впливає на величину втрат електроенергії в контактній мережі.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів графіку руху поїздів, який визначає навантаження системи тягового електропостачання, на втрати електроенергії в контактній мережі.

В статті розглядається питання можливості зниження витрат електроенергії на тягу поїздів та зниження втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць шляхом управління графіком руху поїздів. Вказано що існуючі розміри руху мають резерв для постановки та вирішення задачі оптимізації параметрів графіку руху. Виконано розрахунки на прикладі реальної ділянки, які показують можливу величину економії електричної енергії. Досліджено вплив вирівнювання інтенсивності руху поїздів, впорядкування послідовності відправлення поїздів, регулювання інтервалу попутного слідування та часового зсуву пакету поїздів на втрати електричної енергії в контактній мережі.

**Ключові слова:** електроенергія, втрати, контактна мережа, графік руху, міжпоїзний інтервал, оптимізація, моделювання.



УДК 621.331.3

В. Г. КУЗНЕЦОВ, Д. А. БОСЫЙ, К. А. КАЛАШНИКОВ (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Режим работы систем тягового электроснабжения обусловлен характером изменения нагрузок от электроподвижного состава. В процессе движения поездов изменяется их взаимное расположение, токи и скорости каждого отдельного поезда, поскольку поезд в каждый момент времени находится на разном элементе продольного профиля, который создает свое влияние на основное сопротивление движению.

Целью данной работы является исследование влияния параметров графика движения поездов, который определяет основную нагрузку системы тягового электроснабжения, на потери электроэнергии в контактной сети.

В статье рассматривается вопрос возможности снижения расхода электроэнергии на тягу поездов и снижения потерь электроэнергии в контактной сети электрифицированных железных дорог путем управления графиком движения поездов. Отмечается, что существующие размеры движения имеют резерв для постановки и решения задачи оптимизации параметров графиков движения. Выполнены расчеты на примере реального участка, которые показывают возможную величину экономии электрической энергии. Исследовано влияние выравнивания интенсивности движения поездов, упорядочивания последовательности отправления поездов, регулирования интервала попутного следования и временного сдвига пакета поездов на потери электроэнергии в контактной сети.

**Ключевые слова:** электроэнергия, потери, контактная сеть, график движения, межпоездной интервал, оптимизация, моделирование.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.331.3

V. G. KUZNETSOV, D. O. BOSIY, K. O. KALASHNIKOV (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua)

## TRAFFIC MANAGEMENT TO REDUCE OPERATING COSTS OF ELECTRIFIED RAILWAYS

Mode of operation systems due to the nature of the traction power supply load changes from electric rolling. During the movement of the trains varies the positional relationship currents and speed of each train as the train at each time is at a different longitudinal profile element, which produces its effect on the motion of the main resistance.

The aim of this work is to study the influence of parameters of train schedule, which defines the main load of the traction power supply, on loss of electricity in the contact network.

The article describes a possibility of power consumption and power losses decreasing in contact lines of electrified railways by controlling of time train schedule. Existing railway traffic has a reserve for further time train schedule optimization. The results that were obtained by real railway sector calculation shows electric power economy potential. The influence of traffic intensity aligning, interval regulating and time shifting in train schedule on power losses in contact lines are researched.

**Keywords:** electric power, losses, contact line, train schedule, interval, optimization, simulating.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Panasenko N. V.*