

Д. Босий, к. т. н.,

К. Калашников, аспірант, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

# УПРАВЛІННЯ ГРАФІКОМ РУХУ ПОЇЗДІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Через постійне підвищення вартості електроенергії не втрачає своєї актуальності проблема зменшення витрат електроенергії та власного її споживання електрифікованим залізничним транспортом.**

У 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 всіх 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, які визначаються рухомими навантаженнями. При чому в процесі руху змінюється взаємне розташування поїздів, струм і швидкість кожного окремого поїзду, оскільки поїзд у 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 цієї 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. Проте питан-

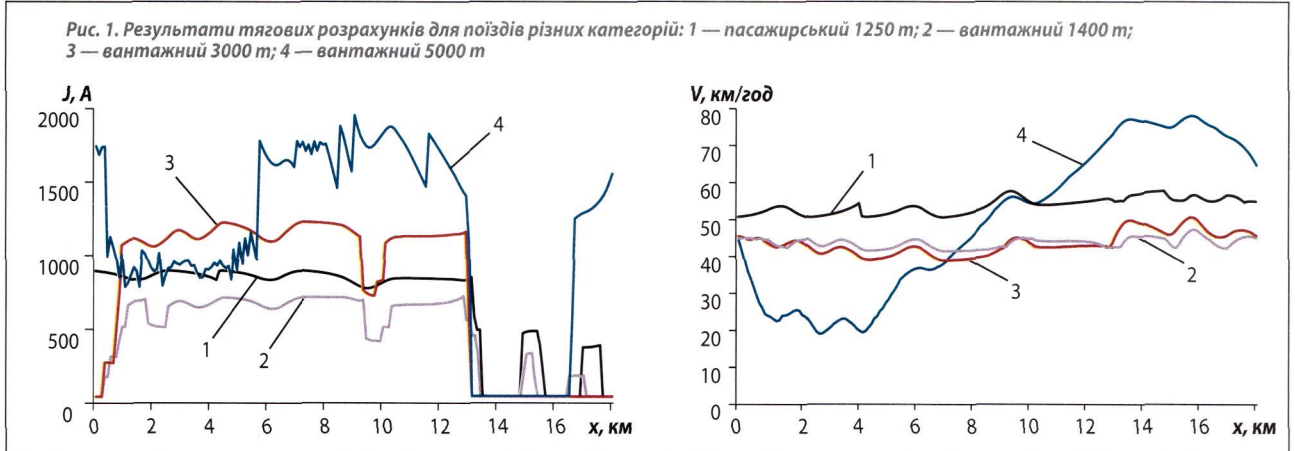
ня зменшення витрат електроенергії в контактній мережі за рахунок управління графіком руху поїздів до сих пір не вирішене.

У роботі [3] проведено дослідження витрат електроенергії в контактній мережі з урахуванням дислокації поїздів. Але 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 завдання усереднення дислокацій поїздів до середнього міжпоїздного інтервалу, який відповідатиме мінімуму витрат електричної енергії. Управляючим параметром у 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 поставленому завданні 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 має бути не менше 1 км і не більше 3 км. Окрім цього, мінімальний міжпоїзний інтервал повинен враховувати:

- обмеження за умовами роботи системи електропостачання [5];
- потужність обладнання тягових підстанцій;
- нагрівання проводів контактної мережі;

Табл. 1. Характеристики поїздів різних категорій

№ категорії поїзда	Характеристика		
	Категорія	Вага бруutto, т	Тип електровоза
1	Пасажи́рський, швидкий	1250	ЧС-7
2	Вантажний	1400	ВЛ-8
3	Вантажний	3000	ДЭ-1
4	Вантажний	5000	ВЛ-8



— рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

### Постановка завдання

Для досягнення поставленої мети проведемо дослідження величини втрат електроенергії на прикладі реальної ділянки електрифікованої залізниці за допомогою імітаційного моделювання. Вихідними даними для моделювання приймемо такі:

- довжина міжпідстанційної зони — 18 км;
- питомий опір контактної мережі  $r_0 = 0,07 \text{ Ом/км}$ ;
- переріз контактної підвіски — 412 мм<sup>2</sup>;
- схема живлення — вузлова;
- кількість категорій поїздів — 4 од.;
- вага поїздів — 1250, 1400, 3000, 5000 т;
- типи електровозів — ЧС7, ВЛ8, ДЭ1;
- тягові розрахунки для заданого профілю, вказаної ваги та типів електровозів.

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

Необхідно розглянути можливі способи управління графіком руху поїздів та оцінити зниження втрат електроенергії в контактній мережі. Виділимо такі режими управління графіком, як вирівнювання інтенсивності руху поїздів, регулювання інтервалу попутного слідування, впорядкування послідовності відправлення поїздів та часовий зсув пакету поїздів.

### Вирівнювання інтенсивності руху поїздів

З метою оцінювання впливу нерівномірності руху поїздів на величину втрат електроенергії розглянемо два випадки пропуску однакової кількості поїздів з однаковою та різною погодинною інтенсивністю. 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 в другому випадку матиме вигляд, представлений на рис. 3, де інтенсивність руху рівномірна і становить 7 поїздів на годину. Для цих розрахунків приймається, що графік руху складається з однотипних поїздів.

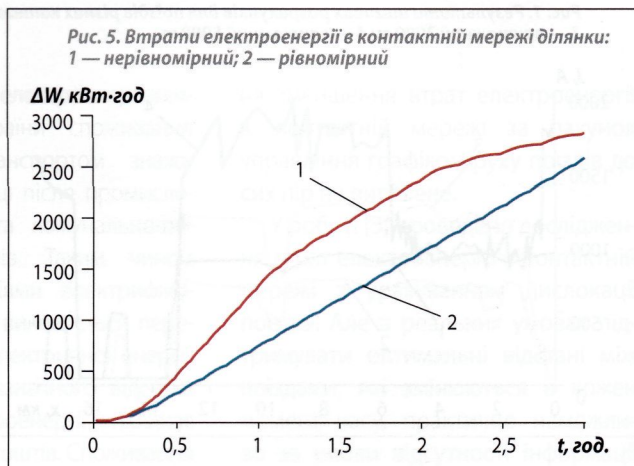
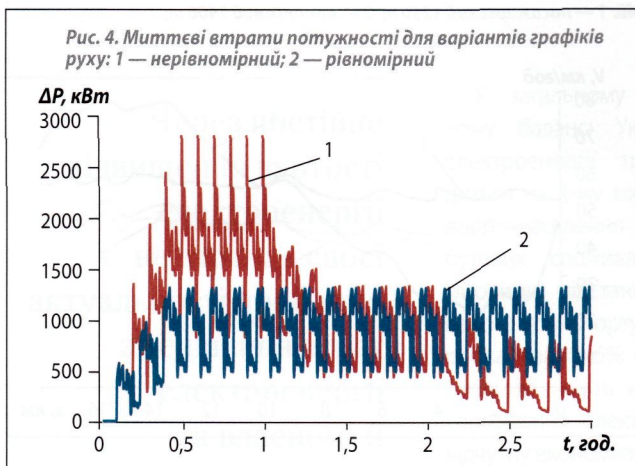
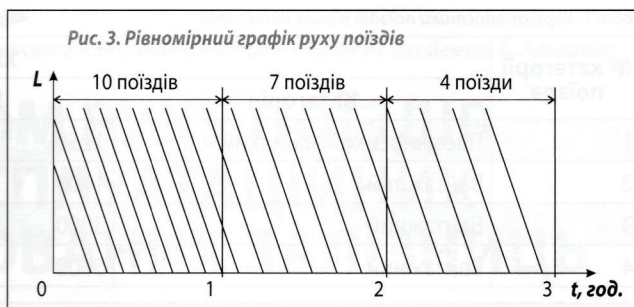
За допомогою спеціалізованої імітаційної моделі проведено розра-

хунки показників системи тягового електропостачання та отримано 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 2833,6 кВт·год.

Результати розрахунку рівномірного графіку руху (рис. 3) показують, що втрати електроенергії за кожен 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 2588,1 кВт·год, що на 8,7% менше попереднього випадку.

На рис. 4 наведено залежності миттєвих втрат для розглянутих варіантів пропуску поїздів. Максимальні значення втрат потужності складають 2814,4 і 1337,2 кВт відповідно для кожного варіанту.

Інтегруючи значення миттєвих втрат потужності в часі, отримуємо 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.

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

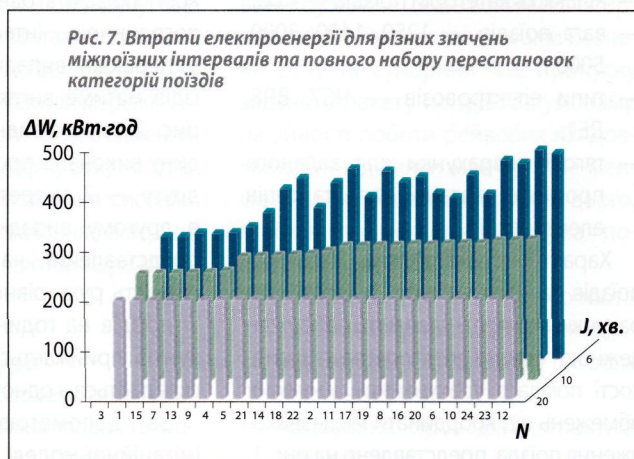
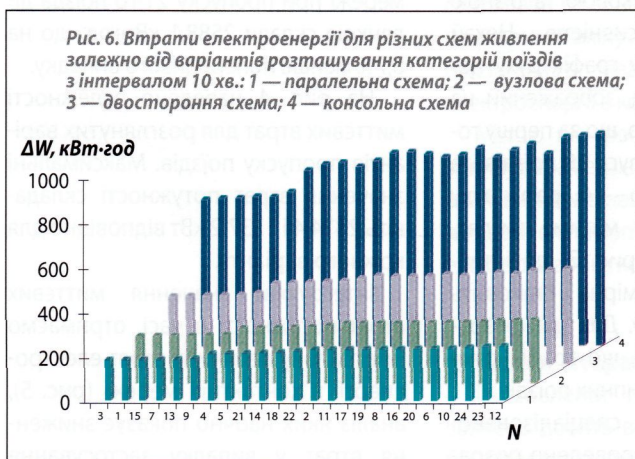
### Впорядкування послідовності відправлення поїздів

Із метою 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, 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; № 2 — 1, 2, 4, 3; № 3 — 1, 3, 2, 4 тощо; № 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., отримано значення втрат, які наведено на рис. 6. Найменше значення втрат електроенергії при дотриманні однакового рівня напруг на шинах суміжних підстан-



цій 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 представлено 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. У 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.

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 невеликим застосування імітаційного моделювання з 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 зазначені припущення, маємо досить цікаві закономірності. Зокрема, встановлено, що варіант розташування категорій поїздів із 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 із мінімально можливим інтервалом 6 хв. картина розподілу витрат електроенергії за номером розстановки має явний розрив мінімальних значень відносно інших (рис. 8).

Найменшу витрату електроенергії мають перші 6 розстановок, які в порядку зростання першої розташовуються таким чином: 3, 9, 15, 7, 1 і 13. Максимальний розкид значень серед цих розстановок складає менше 1% і приймається як шукана множина рішень. Загальною закономірністю зазначених розстановок є слідування останнім поїзду найбільшої ваги, оскільки в інших випадках швидкість більш швидких поїздів буде обмежуватись важковаговим складом, що призведе до збільшен-

ня часу пропуску пакету та 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 цьому 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, в 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). Характерним є те, що 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, розстановки № 24 і є тому підтвердженням.

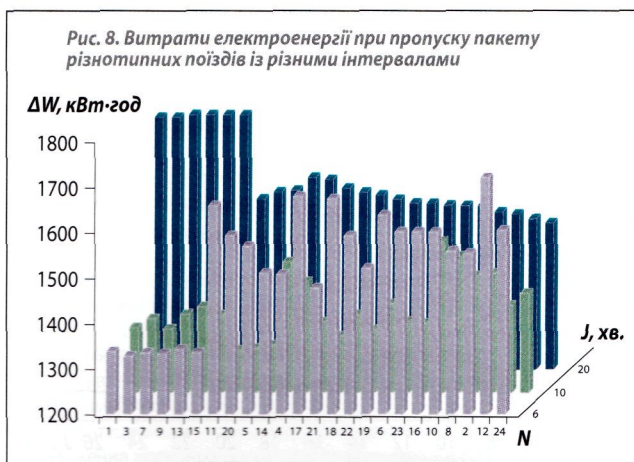
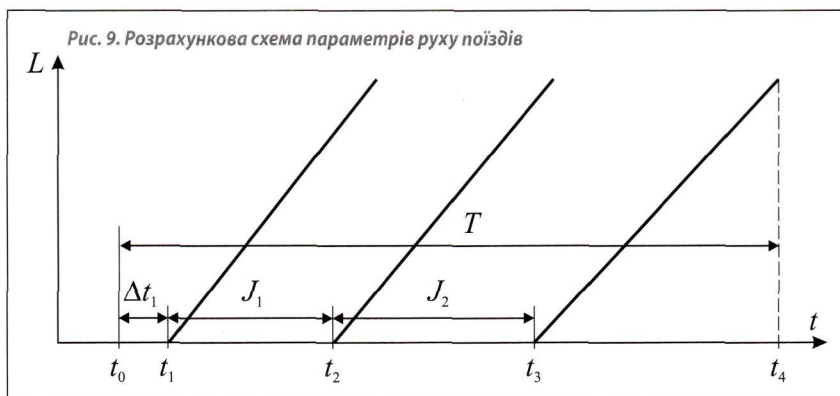


Табл. 2

№ з/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	443,0
2	1, 5, 3	647,9	2, 6, 4	441,2
3	3, 1, 5	522,5	4, 2, 6	447,8
4	3, 5, 1	608,5	4, 6, 2	458,5
5	5, 1, 3	712,4	6, 2, 4	437,0
6	5, 3, 1	749,5	6, 4, 2	445,9



### Регулювання інтервалу попутного слідування

У наведених раніше дослідженнях міжпоїзний інтервал у пакеті поїздів приймався постійним. Виконаємо дослідження впливу зміни міжпоїзного інтервалу для поїздів у пакеті за інших рівних умов. Як 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 трьох типів поїздів вагою 1400, 3000 і 5000 т у парному і непарному напрямках. За схему живлення приймемо вузлову. Розглянемо по черзі кожен із режимів оптимізації, вважаючи інші параметри незмінними.

У режимі пошуку послідовності відправлення поїздів кількість варіантів визначається факторіалом і в цій задачі дорівнює 6. Результати розрахунків для однієї колії за рівних умов на іншій колії з інтервалом 10 хв. наведено в табл. 2.

Як видно з табл. 2, оптимальною 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, вводючи позначення на графіку руху поїздів у загальному вигляді (рис. 9).

З рис. 9 видно, що час пропуску пакету поїздів у загальному вигляді визначається виразом

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

де  $\Delta t_1$  — затримка часу відправлення першого поїзда в пакеті, хв.;  $J_1, J_2$  — міжпоїзні інтервали, хв.;  $(t_4 - t_3)$  — час ходу останнього поїзда в пакеті, хв.

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

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

У загальному випадку рівняння (2) має нескінченну множину розв'язань, якщо обмежити область розв'язань цілими числами, матимемо діафантове рівняння з кількістю змінних, що дорівнює кількості поїздів у пакеті, тобто в нашому випадку — 3.

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

Приймаючи обмеження часу пропуску пакету, яке дорівнює 1 год., і вважаючи за мінімальний інтервал руху 6 хв., для розрахункової ділянки матимемо 276 комбінацій, що задовольняють рівняння (2). Для кожного з них виконаємо моделювання та визначимо втрати електроенергії в контактній мережі (рис. 10).

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

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

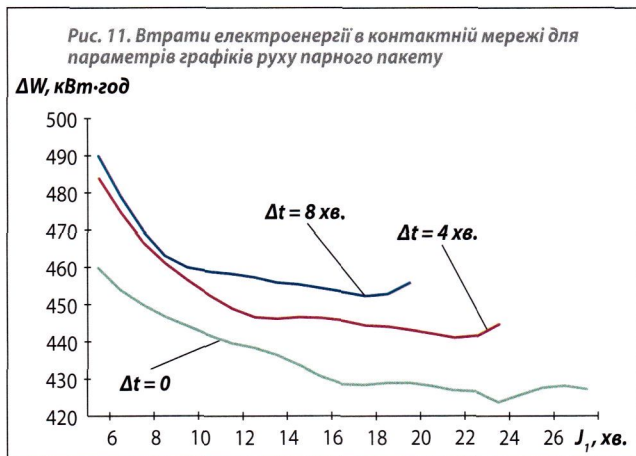
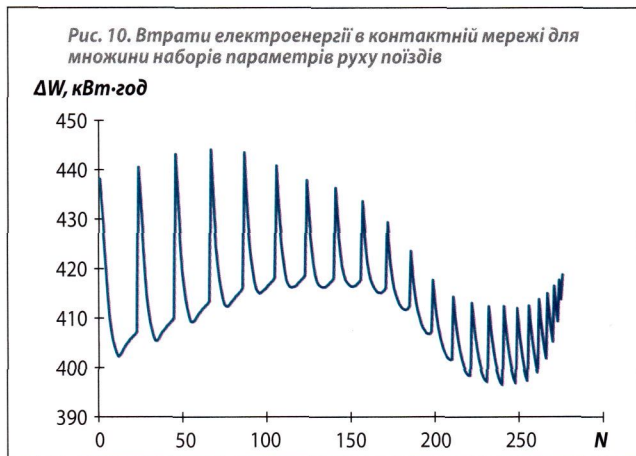


Рис. 12. Втрати електроенергії при часовому зсуві пакетів поїздів: 1 — непарного; 2 — парного

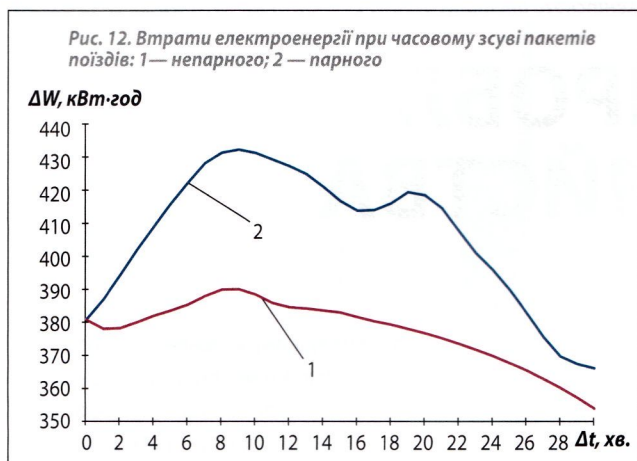
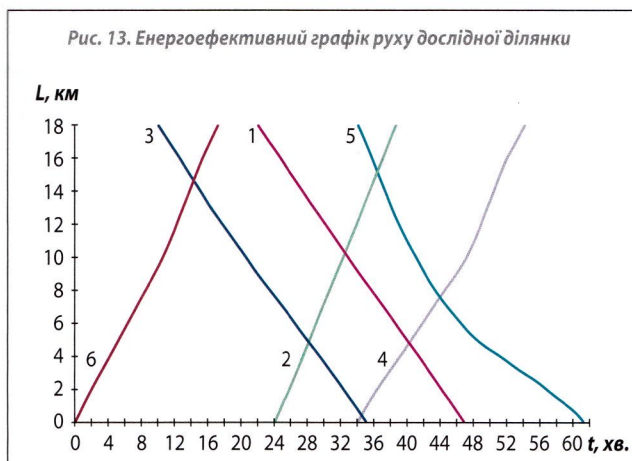


Рис. 13. Енергоефективний графік руху дослідної ділянки



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. — наступні поїзди. Для парного пакету перший поїзд треба відправити одразу, а наступні — через 24 і 10 хв. відповідно.

#### ► Часовий зсув пакету поїздів

Наведені результати оптимізації графіку руху неявно враховують часовий зсув парного і непарного пакетів, при якому дотримується прийняте обмеження часу пропуску. Призначення часового зсуву полягає в 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.


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.

У результаті енергоефективний графік із 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.

#### ► Висновки

1. Для електрифікованих залізниць України характерна нерівномірність руху поїздів, при чому фактичні розміри не завжди перевищують наявних пропускових спроможностей ділянок. Графіки руху поїздів мають резерв вільного часу, який надає

можливість виконувати регулювання міжпоїзного інтервалу в певних межах.

2. При вирішенні завдання оптимізації графіків руху поїздів слід дотримуватись обмежень інтервалу попутного слідування. Мінімальний інтервал повинен враховувати обмеження за умов безпеки руху та 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 залежно 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. 

#### ► Бібліографічний список

1. Г. А. Доманская. Энергосберегающие технологии тягового электро-снабжения 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. В. Б. Землянов. 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. В. Г. Кузнецов. 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. А. Н. Митрофанов. 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 энерго-снабжения железных дорог, электрифицированных на постоянном

токе [Текст]: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. — Москва: Трансжелдориздат, 1959. — 234 с.

6. Я. Гульден. Перечислительная комбинаторика. / Я. Гульден, Д. Джексон. — М.: Наука, 1990. — 504 с.
7. В. Г. Кузнецов. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта. / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Праці інституту електродинаміки, 2012. — № 33. — С. 18–21.
8. В. Г. Кузнецов. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов. / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Технічна електродинаміка. Темат. випуск: Силова електроніка та енергоефективність, 2012. — Ч. 3. — С. 107–110.
9. Н. О. Логвінова. 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.