

Кафедра «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. М. Лукашевича, 19, Київ, Україна, 03049, тел.: +38(093)2696316, ел. пошта: haidenko121@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-8308-3910

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОЇ АДАПТАЦІЇ ГРАФІКА РУХУ ПОТЯГІВ ДО ОПЛАТИ СПОЖИТОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ЗА КОМЕРЦІЙНИМ ТАРИФОМ

Постановка проблеми

Зміна графіка руху потягів незалежно від мети несе за собою великі труднощі, через необхідність урахування великої кількості факторів, які впливають на допустимість перенесення графіка кожного потяга. У випадку оптимізації графіка руху потягів до використання диференційованого тарифу (ДТ) оплати за електроенергію додатково висувуються вимоги до раціональності зміщення графіка, з'являються додаткові фактори, які необхідно враховувати не лише для конкретного потяга, а й для всіх потягів, що рухаються електрифікованою залізницею. Оптимальний графік руху для всіх потягів у одному напрямку не завжди збігається з таким для кожного потяга зокрема [1]. Тому для вирішення завдання адаптації графіка руху потягів до використання комерційних тарифів за електроенергію недостатньо розробити метод оптимізації графіка окремого потяга. Таке завдання є комбінаторним та потребує спільного рішення для всіх потягів за напрямком на електрифікованій ділянці залізниці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зміна графіка руху потягів – ефективний інструмент мінімізації оплати електроенергії за тарифами диференційованими по часу доби [2]. Питанню налаштування графіка потягів до використання комерційних тарифів на електроене-

ргії присвячено роботи [2-6], що доводить актуальність проблеми.

Формування мети

Метою роботи є розробка математичних моделей і методів оптимізації графіка руху потягів до використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії та вдосконалення алгоритму його комп'ютерної адаптації.

Основний матеріал дослідження

Розроблений у роботі [3] алгоритм базується на формулі (1), яка описує тривалість руху потяга через періоди дії тарифних зон, під час яких він здійснює рух:

$$T = \alpha_1 \cdot T_n + \alpha_2 \cdot T_{nn1} + \alpha_3 \cdot T_{n1} + \alpha_4 \cdot T_{nn2} + \alpha_5 \cdot T_{n2} + \alpha_6 \cdot T_{nn3}, \quad (1)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ – коефіцієнти співпадиння часу руху потяга з часом дії відповідної їм тарифної зони.

Потяги рухаються за розкладом із точністю до 1 хв., тому всі обчислення будуть проводитися у хвиликах. Нічну тарифну зону T_n для зручності розіб'ємо на два періоди – після півночі T_{n1} і до півночі T_{n2} . Для визначення меж періодів дії тарифних зон (табл. 1.) як точку відліку обрано початок доби.

Таблиця 1

Межі періодів тарифних зон тризонного ДТ та їхня тривалість (хв.)

січень, лютий, листопад, грудень	Тривалість періоду	березень, квітень, вересень, жовтень	Тривалість періоду	травень, червень, липень, серпень	Тривалість періоду
$T_n \in [0; 360]$	$T_n = 360$	$T_n \in [0; 360]$	$T_n = 360$	$T_n \in [0; 420]$	$T_n = 420$
$T_{nn1} \in [360; 480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [360; 480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [420; 480]$	$T_{nn1} = 60$
$T_{n1} \in [480; 600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480; 600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480; 660]$	$T_{n1} = 180$
$T_{nn2} \in [600; 1020]$	$T_{nn2} = 420$	$T_{nn2} \in [600; 1080]$	$T_{nn2} = 480$	$T_{nn2} \in [660; 1140]$	$T_{nn2} = 540$
$T_{n2} \in [1020; 1260]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1080; 1320]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1140; 1320]$	$T_{n2} = 180$
$T_{nn3} \in [1260; 1380]$	$T_{nn3} = 120$	$T_{nn3} \in [1320; 1380]$	$T_{nn3} = 60$	$T_{nn3} \in [1320; 1380]$	$T_{nn3} = 60$
$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 0$

Для практичного використання алгоритму необхідно здійснити опис часу через коефіцієнти α :

для періоду, під час дії якого потяг розпочинає рух

$$\alpha_n = \frac{t_*'' - t_{\epsilon}}{T_*}; \quad (2)$$

для періоду, під час дії якого потяг прибуває на кінцеву станцію

$$\alpha_n = \frac{t_{np}' - t_*'}{T_*}; \quad (3)$$

для періоду, лише під час дії якого потяг здійснює рух

$$\alpha_n = \frac{t_{np}' - t_{\epsilon}}{T_*}; \quad (4)$$

для періоду, під час дії якого потяг відправляється та прибуває, при цьому рухається під час дії усіх інших періодів

$$\alpha_n = \frac{t_*'' - t_*' + t_{np}' - t_{\epsilon}}{T_*}, \quad (5)$$

де t_*' і t_*'' – межі початку і закінчення періоду тарифної зони T_* (табл. 1.);

t_{ϵ} і t_{np} – час відправлення та прибуття потяга, переведені у хвилини наступним чином:

$$t_{\epsilon} = h_{\epsilon} \cdot 60 + m_{\epsilon};$$

$$t_{np} = h_{np} \cdot 60 + m_{np},$$

де h_{ϵ} , m_{ϵ} та h_{np} , m_{np} – години і хвилини відправлення та прибуття потяга.

Алгоритм здатний надати пропозицію раціональної з точки зору застосування тризонного ДТ зміни графіка руху потяга, тривалість руху якого не перевищує однієї доби. Для такого потяга значення коефіцієнтів α лежать у межах від 0 до 1. Якщо тривалість руху потяга перевищує добу, то відповідно коефіцієнти можуть отримувати значення, яке перевищує 1.

У розробці програмного забезпечення важливо, щоб створений продукт працював безвідмовно при будь-яких допустимих вхідних даних, тому для того, аби запропонований у роботі [3] алгоритм працював для випадків $\alpha_{\max} > 1$, перед виконанням алгоритму для всіх змінних, якими позначено коефіцієнти α слід використати формулу:

$$\alpha_n = \alpha_n - \lceil \alpha_{\max} \rceil + 1,$$

а перед виведенням результату його роботи необхідно зробити зворотне перетворення

$$\alpha_n = \alpha_n + \lceil \alpha_{\max} \rceil - 1,$$

де n – порядковий номер коефіцієнта, α_{\max} – найбільше значення, серед коефіцієнтів α за існуючим (старим) графіком. Ці операції додано в алгоритм у вигляді відповідних блоків.

Розглянемо випадок, коли N потягів рухаються від станції відправлення до станції прибуття, між якими немає проміжних станцій, де можуть розпочинати або закінчувати рух інші потяги. Для такого випадку вищезгаданий алгоритм буде справедливим, якщо до його рішень додати міжпоїзний інтервал $M \cdot (p-1)$, де p – порядковий номер потяга за послідовністю відправлення згідно існуючого графіка руху.

При перенесенні часу відправлення потяга, необхідно щоб виконувалася умова

$$N \leq \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} - N_*, \quad \text{де}$$

$\sum(\alpha' \cdot T')$ – частина графіка, яку необхідно змістити; $\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*)$ – доступна частина тарифної зони, до якої буде перенесено графік руху; N_* – кількість поїздів, які здійснюють рух у тарифній зоні T_* . Тоді для кожного потяга N_p час відправлення буде перенесено на $M \cdot (p-1)$.

$$\text{У випадку } N > \frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} - N_*$$

для $\left[\frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right] - N_*$ потягів

справедливим буде попереднє рішення, а для кожного потяга

$$p > \left[\frac{\sum(T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum(\alpha' \cdot T')}{M} \right] - N_* \quad \text{графік}$$

руху змінювати не потрібно.

Висновки

1. У результаті досліджень запропоновано математичну модель для опису тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон диференційованого тарифу, під час яких він здійснює рух.

2. Розроблено математичні методи, які дозволяють застосовувати алгоритм комп'ютерної адаптації графіка руху потяга [3] для N потягів на одній ділянці без обмежень по часу в дорозі кожного з них.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Притула М.Г. Алгоритм побудови графіка руху потягів / М.Г. Притула, Р.П. Шпакович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, № 629, 2008. – С.146-152.
2. Гайдено О.С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею / О.С. Гайдено // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 4, 2016 – С. 10-14.
3. Гайдено О.С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії / О.С. Гайдено // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 5, 2016 – С. 46-50 .
4. Щербакова І.А. Математические модели компьютерного анализа и оптимизации стоимости электроэнергии по коммерческим тарифам с учетом затрат для изменения графика движения поездов / И.А. Щербакова, А.И. Стасюк // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 4, 2014 – С.7-12.
5. Бурдюк Т.А. Определение затрат изменения графика движения поездов на основе дифференцированных коммерческих тарифов на электроэнергию./ Т.А. Бурдюк, И.А. Щербакова // Электронное моделирование – 2004. - 26, №6 – С. 101-111.
6. Бурдюк Т.А. Математические модели и методы минимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии на основе тарифов, дифференцированных по зонам суток / Т.А. Бурдюк, И.А. Щербакова // Электрон. моделирование – 2004. - 26, № 2. – С. 79-88.

Надійшла до друку 01.12.2016.

1. M. Prytula, R. Shpakovych *Algorithm pobudovi grafika ruhu potyagiv* [Algorithm of a train schedule development]. Bulletin Nat. Univ "Lviv Polytechnic". Computer science and information technology. – Lviv, № 629, 2008. – P. 146-152 .
2. . Haidenko *Komp'yuterno-orientovana matematichna model otsinki effektivnosti tarifnoi sistemy oplaty za spozhиту elektroenergiyu zaliznitseyu* [Mathematical model assess the effectiveness of the payment tariff system for electricity consumed by railways for use on a computer]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 4, 2016 – P. 10-14.
3. O. Haidenko *Optimizatsiya grafika ruhu potyaga dlya vikoristannya trizonnogo diferentsiyovanogo taryfu oplaty spozhitoi elektroenergi* [Optimization of the train's schedule to use three-zone differentiated tariff for consumed electricity payment]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 5, 2016 – P.46-50.
4. I. Shcherbakova, A. Stasiuk *Matematycheskye modeli komp'yuternoho analiza i optimizatsii stoimosti elektroenergi* [Mathematical models of computer analysis and optimization of electricity cost according to commercial tariffs, taking into account the costs for changing train schedules]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 4, 2014 – P. 7-12.
5. T. Burdyuk, I. Shcherbakova *Opreделение zatrat izmeneniya grafika dvizheniya poezdov na osnove differentsirovannykh kommercheskikh tarifov na elektroenergiyu* [Definition of train schedule changes based on cost differentiated commercial electricity tariffs]. Electronic modeling– 2004. - 26, №6 – P. 101-111.
6. T. Burdyuk, I. Shcherbakova *Matematycheskye modeli i metody minimizatsii kommercheskoy stoimosti potrebyaemoy na osnovetarifov, differentsirovannykh po zonam sutok* [Mathematical models and methods of minimizing the commercial cost of consumed electricity based on tariffs, differentiated by time zones]. Electronic modeling– 2004. - 26, №2 – P. 79-88.

Внутрішній рецензент Кузнецов В.Г.

Зовнішній рецензент Мараховський Л.Ф.

Розглянуто алгоритм комерційної оптимізації графіка руху потяга для економії коштів при сплаті за спожиту електричну енергію згідно тризонного диференційованого тарифу. Знайдено та реалізовано шляхи його вдосконалення. Внаслідок проведених досліджень запропоновано математичну модель для опису часу руху потяга зі станції відправлення до станції прибуття через періоди дії тарифних зон диференційованого за часом доби комерційного тарифу, під час яких він здійснює рух. Розроблено математичні методи, які дають змогу використовувати алгоритм комп'ютерної адаптації графіка руху потяга для усіх потягів за напрямком на одній електрифікованій ділянці без обмежень по тривалості руху кожного з них, за умови що між кінцевою станцією та станцією відправлення немає проміжних станцій, де можуть здійснювати відправлення чи зупинку інші потяги. Як результат вдосконалений алгоритм при зміні графіка потягів здатен враховувати наступні фактори: періоди дії тарифних коефіцієнтів тризонного диференційованого тарифу, міжпоїзні інтервали, тривалість руху кожного потяга та мінімальне зміщення існуючого графіка.

Ключові слова: мінімізація; електроспоживання; алгоритм; диференційований тариф; тарифні зони; модель.

УДК 681.325

О.С. ГАЙДЕНКО (ГЭТУТ)

Кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии транспорта», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. Н. Лукашевича, 19, Киев, Украина, 03049, тел.: +38(093)2696316, эл. почта: haidenko121@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-8308-3910

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АДАПТАЦИИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ К ОПЛАТЕ ПОТРЕБЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПО КОММЕРЧЕСКОМУ ТАРИФУ

Рассмотрено алгоритм оптимизации графика движения поезда для экономии средств при оплате за электрическую энергию согласно трехзонного дифференцированного тарифа. Найдено и реализовано пути его совершенствования. Вследствие проведенных исследований предложена математическая модель описания времени движения поезда со станции отправления до прибытия через периоды действия дифференцированного по времени суток тарифа, при которых он осуществляет движение. Разработаны математические методы, которые позволяют использовать алгоритм компьютерной адаптации графика движения поезда для всех поездов по направлению на одном электрифицированном участке без ограничений по времени движения каждого из них, если между конечной станцией и станцией отправления нет промежуточных станций, где могут осуществлять отправления или остановку другие поезда. Как результат усовершенствованный алгоритм при изменении графика поездов способен учитывать следующие факторы: периоды действия тарифных коэффициентов, межпоездные интервалы, продолжительность движения каждого поезда и минимальное смещение существующего графика.

Ключевые слова: минимизация; электропотребления; алгоритм; дифференцированный тариф; тарифные зоны; модель.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Мараховский Л.Ф.*

UDC 681.325

O.S. HAIDENKO (SUTET)

Department «Automation and Computer-Integrated Technologies of Transport department», State University for Transport Economy and Technologies, Lukashyevych Str., 19, 03049, Kyiv, Ukraine, tel.: +38(093)2696316, e-mail: haidenko121@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-8308-3910

MATHEMATICAL METHODS OF COMPUTER ADAPTATION TRAIN SCHEDULE FOR ELECTRICITY PAYMENT CONSUMED OF TRACTION IN ACCORDANCE WITH COMMERCIAL TARIFF

The algorithm of the commercial optimization train schedule to save costs for the consumed electricity payment by three-zone differentiated tariffs is reviewed. Ways to improve it are found and implemented. As a result of researches the mathematical model to describe the time of the train from the station of departure to the station arrival by periods of tariff zones differentiated by time of day commercial tariff, in which it performs the movement is offered. The mathematical methods that allow the use of a computer algorithm adaptation train schedule for all trains on electrified direction without limits of time on the road each provided between the end station and the station of departure no intermediate stations, which can carry departure or stop other trains, are developed. As a result, an improved algorithm by changing the schedule of trains able to consider the following factors: the periods of the tariff coefficients of three-zone differential tariff, intervals between trains, the duration of each train movement and minimal displacement of current schedule.

Keywords: minimization; electric power consumption; algorithm; differentiated tariff; tariff zones; model.

Internal reviewer *Kuznetsov V.G.*

External reviewer *Marahovsky L.F.*