

ГАЙДЕНКО О. С., аспірант (Державний університет інфраструктури та технологій)

## Експериментальні дослідження комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію

*На основі даних, зібраних у реальних умовах функціонування залізничного вузла, проведено комп'ютерне моделювання математичної моделі оцінювання ефективності тарифної системи плати за спожиту електроенергію, нейромережеве прогнозування споживання електроенергії залізничним транспортом, застосування продукційної моделі оптимізації графіка руху поїздів для тризонного диференційованого тарифу як складових комплексу методів мінімізації плати за спожиту електроенергію залізницею.*

**Ключові слова:** інтелектуалізація, алгоритм, програмні засоби, формалізація, тарифні зони.

### Постановка проблеми

Розвиток електроенергетики у світі спрямований на економію та широке впровадження альтернативних джерел генерації. У технологічному плані реформування мереж електропостачання безпосередньо пов'язане з розвитком технологій інтелектуальних інформаційних систем. Зокрема слід виділити концепцію Smart Grid [1], яка стала загально визнаним терміном інтелектуальної електроенергетики. Необхідність переходу до інтелектуального електропостачання була обумовлена старінням обладнання, різким зростанням енергоресурсів та підвищенням вимог до екологічності їх видобутку, що не обминуло й електроенергетику України та електропостачання залізниці зокрема.

З фінансового плану ПАТ «Українська залізниця» [2] на 2018 р. відомо, що протягом останніх років витрати на електроенергію з кожним роком зростають приблизно на 10 %. У проект 2018 р. закладено 8114,4 млн грн затрат на закупівлю електричної енергії, причому вартість 1 кВт години електроенергії на тягу поїздів планується на рівні, що вищий на 9,3 % порівняно з 2017 р. Тенденція до стрімкого щорічного подорожчання електричної енергії поряд із збільшенням обсягів її використання спонукають шукати шляхи економії витрат, пов'язаних з її закупівлею.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У зв'язку з переходом на інтелектуальну електроенергетику, розвитком обчислювальних можливостей мікропроцесорної техніки та методів інтелектуальної обробки інформації завдання інтелектуалізації систем керування в електроенергетиці привернуло увагу і відобразилось у роботах вітчизняних та зарубіжних вчених [3-6].

### Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

З розвитком мережі тягового електропостачання було інтегровано велику кількість мікропроцесорного обладнання (датчиків, цифрових лічильників тощо), які здатні накопичувати в базах даних інформацію, що може бути використана не лише з прямою метою її збору (здебільшого для діагностики), а поряд з тим і для реалізації інших інтелектуальних функцій. Завдяки технологіям обробки даних data mining, розвиваючи інформаційну систему мережі електропостачання залізничного транспорту в рамках єдиного інформаційного простору, стало можливим упровадження в інтелектуалізованій інформаційній системі керування підсистеми мінімізації плати за спожиту електроенергію, що може заощаджувати у масштабах витрат електроенергії галуззю великі кошти.

### Формування мети

Метою роботи є експериментальні дослідження практичної працездатності розробленого комплексу комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації оплати спожитої електроенергії тягового електропостачання залізничного транспорту.

### Основний матеріал дослідження

У рамках роботи над завданням інтелектуалізації інформаційної системи мережі електропостачання залізничного транспорту було сформовано комплекс комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію на тягу поїздів, що передбачають визначення оптимального тарифу на електроенергію та граничні обсяги споживання електроенергії у заданих періодах, при яких перехід на закупівлю електроенергії за диференційованим тарифом (ДТ) економічно вигідний, прогнозування електроспоживання та оптимізацію графіка руху до ДТ.

Для проведення дослідження за дані взято показники споживання електроенергії режимної доби, зняті з лічильників АСКОВЕ ТП ЕЧЕ-8, та графік руху поїздів через станцію Фастів (табл. 1), де інтенсивність

руху вантажних поїздів формалізовано у вигляді коефіцієнтів, сформованих на основі чинного в день вимірів графіка руху за правилами, описаними в роботі [7].

Таблиця 1

**Інтенсивність руху поїздів та виміри спожитої активної електроенергії 21 червня 2017 р.**

| Час доби, год | Вантажні поїзди | Спожита активна електроенергія, кВт | Час доби, год | Вантажні поїзди | Спожита активна електроенергія, кВт |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------------------|
| 0             | 7               | 7535                                | 12            | 2               | 8745                                |
| 1             | 9,5             | 11055                               | 13            | 6,5             | 10230                               |
| 2             | 5               | 7480                                | 14            | 5,5             | 8745                                |
| 3             | 9               | 11385                               | 15            | 1,5             | 9845                                |
| 4             | 4               | 7810                                | 16            | 5               | 8470                                |
| 5             | 1               | 4675                                | 17            | 3               | 9570                                |
| 6             | 3,5             | 7480                                | 18            | 4               | 12210                               |
| 7             | 2               | 10010                               | 19            | 4               | 14300                               |
| 8             | 5               | 9075                                | 20            | 4               | 10670                               |
| 9             | 4,5             | 9625                                | 21            | 1               | 10945                               |
| 10            | 5,5             | 10835                               | 22            | 1,5             | 10395                               |
| 11            | 2,5             | 7645                                | 23            | 7               | 14905                               |

Для визначення меж тарифних зон тризонного диференційованого тарифу для червня використано табл. 2 [8, 9].

Таблиця 2

**Тарифні коефіцієнти і тривалість тарифних зон тризонного диференційованого тарифу**

| Періоди часу  | Межі тарифних зон, год           |                                      |                                   | Тривалість періоду, год | Тарифні коефіцієнти |
|---------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|
|               | січень, лютий, листопад, грудень | березень, квітень, вересень, жовтень | травень, червень, липень, серпень |                         |                     |
| Нічний        | з 23 до 6                        | з 23 до 6                            | з 24 до 7                         | 7                       | 0,25                |
| Напів-піковий | з 6 до 8                         | з 6 до 8                             | з 7 до 8                          | 11                      | 1,02                |
|               | з 10 до 17                       | з 10 до 18                           | з 11 до 20                        |                         |                     |
|               | з 21 до 23                       | з 22 до 23                           | з 23 до 24                        |                         |                     |
| Піковий       | з 8 до 10                        | з 8 до 10                            | з 8 до 11                         | 6                       | 1,80                |
|               | з 17 до 21                       | з 18 до 22                           | з 20 до 23                        |                         |                     |

На основі математичної моделі [10] проведено комп'ютерне моделювання визначення ефективності однозонного і тризонного тарифів у даних умовах, у результаті яких однозонний тариф виявився вигіднішим за тризонний на 0,014 %. На графіку (рис. 1) наведено динаміку зміни плати за використану електроенергію відповідно до однозонного і тризонного тарифів.

У цьому випадку доцільно змінити графік руху, адже при незначному зміщенні розкладу із ДТ можна отримати суттєву економію коштів. З рис. 1 видно, що зміна графіка руху поїздів для вигідного використання ДТ насамперед необхідна з 8 до 11 год і з 20 по 23 год під час дії пікових тарифних зон.

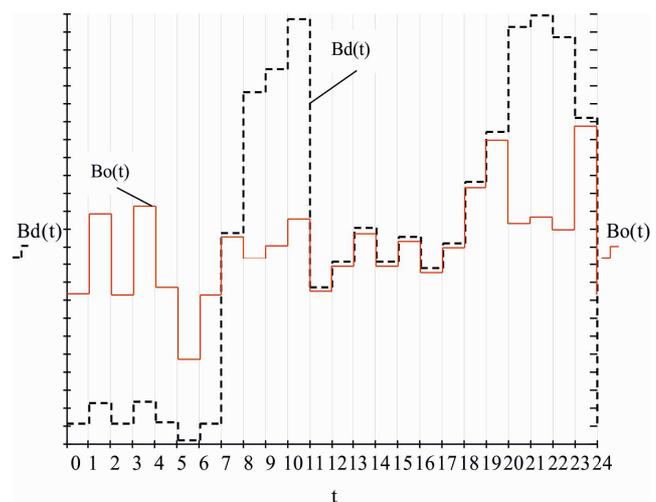


Рис. 1. Погодинна плата за використану електроенергію протягом доби за однозонним тарифом  $B_o(t)$  і тризонним диференційованим тарифом  $B_d(t)$

Графік пасажирських поїздів у дослідженні залишився без змін, оскільки пасажирські перевезення апріорі мають здійснюватися у різний час доби [11], тому це питання потребує додаткових урегулювань, які неможливі без втручання людини-експерта.

Для вантажних поїздів застосовано математичні

методи комп'ютерної адаптації графіка руху поїздів до оплати спожитої електроенергії на тягу за тризонним ДТ, висвітлені у роботах [12, 13]. Результати роботи алгоритму підготовлено для прогнозування електроспоживання за правилами, описаними в роботі [7], та зведено в табл. 3.

Таблиця 3

**Адапована інтенсивність руху вантажних поїздів за літнім розкладом руху**

|                 |    |     |     |     |    |    |     |    |    |     |     |     |
|-----------------|----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|
| Час доби, год   | 0  | 1   | 2   | 3   | 4  | 5  | 6   | 7  | 8  | 9   | 10  | 11  |
| Вантажні поїзди | 7  | 9,5 | 5   | 9   | 4  | 1  | 3,5 | 3  | 2  | 1,5 | 4,5 | 7,5 |
| Час доби, год   | 12 | 13  | 14  | 15  | 16 | 17 | 18  | 19 | 20 | 21  | 22  | 23  |
| Вантажні поїзди | 3  | 6,5 | 5,5 | 1,5 | 5  | 3  | 4   | 4  | 3  | 1   | 1,5 | 8   |

У результаті прогнозування з використанням неймережевої моделі, дослідженої та навченої у роботі [7], отримано прогнозні значення електроспоживання в години, де відбулися зміни навантаження (табл. 4).

Таблиця 4

**Значення спожитої активної електроенергії з урахуванням прогнозованих відповідно до зміни графіка руху**

| Час доби, год | Спожита активна електроенергія, кВт | Час доби, год | Спожита активна електроенергія, кВт |
|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| 0             | 7535                                | 12            | 9670                                |
| 1             | 11055                               | 13            | 10230                               |
| 2             | 7480                                | 14            | 8745                                |
| 3             | 11385                               | 15            | 9845                                |
| 4             | 7810                                | 16            | 8470                                |
| 5             | 4675                                | 17            | 9570                                |
| 6             | 7480                                | 18            | 12210                               |
| 7             | 11005                               | 19            | 14300                               |
| 8             | 8775                                | 20            | 9960                                |
| 9             | 6850                                | 21            | 10945                               |
| 10            | 9840                                | 22            | 10395                               |
| 11            | 10795                               | 23            | 15615                               |

Повторне моделювання отриманих результатів у моделі оцінки ефективності тарифної системи показало, що в результаті адаптації графіка руху тризонний ДТ став вигіднішим за однозонний на 4,606 %, що зекономить кошти при сплаті за електроенергію на тягу в розмірі 4,592 %. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при цьому набуде вигляду (рис. 2).

Рис. 3 дає змогу наочно порівняти динаміку плати за електроенергію при зміщеному навантаженні з тією, що була до оптимізації.

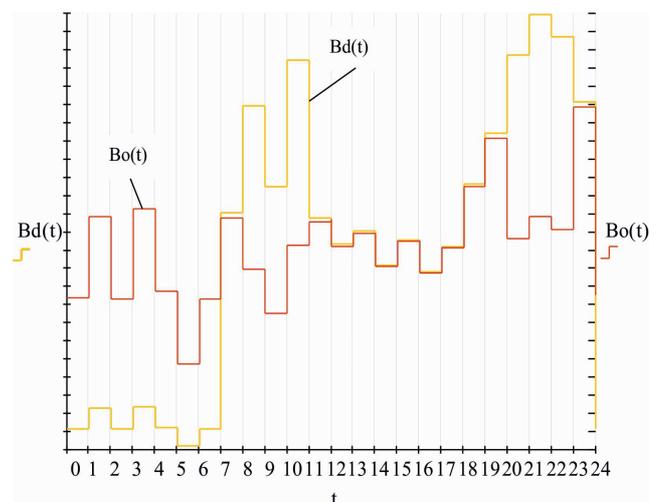


Рис. 2. Динаміка погодинної плати за спожиту електроенергію при адаптованому графіку руху

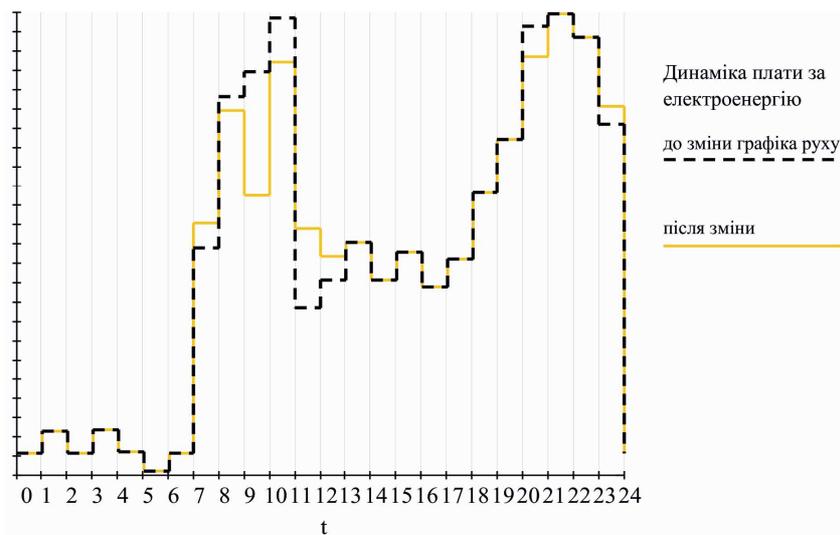


Рис. 3. Порівняння погодинної плати за спожиту електроенергію залізницею до і після оптимізації графіка руху поїздів

Зміщення енергозатратних виробничих процесів, таких як залізничні перевезення, із зон пікового навантаження збалансовує енергосистему країни в цілому, а для ПАТ «Українська залізниця» є інструментом заощадження коштів.

#### Висновки

Проведено експериментальні дослідження комплексу комп'ютерно-орієнтованих методів мінімізації плати за спожиту електроенергію залізницею на реальних даних. У результаті застосування комплексу методів досягнуто оптимізації перевізного процесу, що відповідно до розрахунків дало змогу економити витрати на електроенергію в конкретному випадку при застосуванні тризонного диференційованого тарифу, що свідчить про праяздатність розроблених методів.

#### Список використаних джерел

1. Гайденко, О. С. Особливості комп'ютерного моніторингу, аналізу та управління технологічними процесами енергопостачання залізниць [Текст] / О. С. Гайденко // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – К. : ІПМЕ ім. Г. С. Пухова НАН України, 2016. – Вип. 76. – С. 82-88.
2. Пояснювальна записка до консолідованого проекту фінансового плану ПАТ «Українська залізниця» на 2017 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/%D0%9F%D0%97%202018.docx>.
3. Стасюк, О. І. Математичні моделі і методи комп'ютерної інтелектуалізації швидкоплинних технологічних процесів електропостачання залізниць [Текст] / О. І. Стасюк, А. Л. Железняк, Л. Л. Гончарова. – К. : ДЕУТ, 2015. – 192 с.
4. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid [Текст] / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М. : ИАЦ нергия, 2010. – 208 с.
5. Zhang, P. Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center [Text] / Zhang P., Li F., Bhatt N. // IEEE Trans. Smart Grid, vol.1. 2010. №2. – P. 186-192.
6. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – №5 – С. 52-67.
7. Гайденко, О. С. Прогнозування спожитої електроенергії методами неймережевого моделювання [Текст] / О. С. Гайденко, Г. М. Голуб // 36. наук. праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України. Сер. Транспортні системи і технології. – К. : ДУІТ, 2018. – Вип. 31. – С. 196-201.
8. Тарифи на електроенергію для юридичних споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energo.uz.ua/index.php?id=27>.
9. Постанова НКРЕ від 22.01.2015 № 37 «Про внесення зміни до постанови НКРЕ від 20 грудня 2001 року № 1241» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/?id=13510>.
10. Гайденко, О. С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею [Текст] / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: наук.-техн. журнал. – 2016. – № 4. – С. 10-14.

11. Притула, М. Г. Алгоритм побудови графіка руху потягів [Текст] / М. Г. Притула, Р. Р. Шпакович // Комп'ютерні науки та інформаційні технології: Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – № 629. – С.146-152.
12. Гайденко, О. С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії [Текст] / О. С. Гайденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: наук.-техн. журнал. – 2016. – № 5. – С. 46-50.
13. Гайденко, О. С. Математичні моделі та методи адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за комерційним тарифом [Текст] / О. С. Гайденко // Електрифікація транспорту: наук. журнал. – 2016. – № 12. – С. 8–11.

**Гайденко О. С. Экспериментальные исследования компьютерно-ориентированных методов минимизации платы за потребленную электроэнергию.** На основе данных, собранных в реальных условиях функционирования железнодорожного узла, проведено компьютерное моделирование математической модели оценки эффективности тарифной системы оплаты за потребленную электроэнергию, нейросетевое прогнозирование потребления электроэнергии железнодорожным транспортом, применение продукционной модели оптимизации графика движения поездов для трехзонного дифференцированного тарифа как составляющих комплекса методов минимизации платы за потребленную электроэнергию железной дорогой.

**Ключевые слова:** интеллектуализация, алгоритм, программные средства, формализация, тарифные зоны.

electricity before and after optimization is conducted. The efficiency of computer-oriented methods electricity consumed payment minimization is investigated. As application result of the methods set, optimization of the transport process was achieved, which allowed to save of the electricity costs in this case, which indicates the performance of the developed methods.

**Key words:** intellectualization, algorithm, software tools, formalization, tariff zones.

*Надійшла 29.05.2018 р.*

*Гайденко Олександр Сергійович, аспірант кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна. E-mail: haidenko121@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8308-3910>*

*Oles Haidenko, postgraduate of department «Automation and Computer-Integrated Technologies of Transport department», State University for Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine. E-mail: haidenko121@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8308-3910>*

**O. Haidenko. Experimental researches of computer-oriented methods of consumed electricity payment minimization.** The purpose of the work is the experimental research of practical efficiency of the developed complex of computer-oriented methods of payment minimization for electricity consumption of railway transport traction electric power supply. Experimental research is carried out on the basis of data collected in real conditions of the railway node operation. A computer simulation of mathematical model for evaluating the efficiency of the tariff system consumed electricity payment is conducted. The production model of the transportation process optimization for the differentiated tariff is applied. Neural network forecasting of electric energy consumption by railroad is conducted. A comparison of the payment dynamics for