

Гуленко В.С., Корецький О.В.

Державний університет телекомунікацій, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ РИНКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМИ З МЕТОЮ ЕФЕКТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ

Анотація. В статті представлено сучасне бачення розвитку ринку електричних автомобілів в Україні і світі. Сучасні тенденції вказують на збільшення попиту на електрокари в світі, що пояснюється економічністю і екологічністю даного виду транспорту. Прогнозування попиту на навантаження розглядається як один із серйозних аспектів вартості експлуатації системи живлення. Помилки прогнозування призводять до збільшення експлуатаційних витрат. У підходах до прогнозування вирішальним фактором є уникнення помилок і забезпечення стабільності мережі з прогнозуванням повсякденного навантаження.

Розглянуто три моделі (модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень, штучна нейронна мережа) з метою прогнозування попиту на електричне навантаження для різних етапів планування. Остання використовується для оптимізації планування зарядки електромобілів за рахунок мінімізації витрат. Прогноз попиту на навантаження є важливим чинником вартості експлуатації системи живлення. Штучна нейронна мережа використовується для оптимізації планування зарядки електромобілів за рахунок мінімізації витрат.

Отримані результати дослідження вказують на те, що штучна нейронна мережа дає більш оптимальний результат, ніж решта моделей прогнозування. Прогнозування нейронною мережею вимагає більше часу, оскільки є фаза навчання, але збігається за менший час, ніж модель дерева регресії завдяки статистичному підходу моделі нейронної мережі.

Ключові слова: електромобіль, електрокар, модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень, штучна нейронна мережа, прогнозування, електричне навантаження.

Hulenko V.S., Koretsky O.V.

State University of Telecommunications, Kyiv

RESEARCH OF LOAD FORECASTING METHODS THE ELECTRIC VEHICLE MARKET WITH THE PURPOSE OF EFFECTIVE PLANNING OF CHARGING STATIONS

Abstract. The article presents a modern vision of the development of the electric car market in Ukraine and the world. Modern trends indicate an increase in demand for electric cars in the world, which is explained by the economy and environmental friendliness of this type of transport. Load demand forecasting is considered as one of the major aspects of power system operating cost. Forecasting errors lead to increased operating costs. In forecasting approaches, the reliability factor is the uniqueness of errors and ensuring network stability with full load forecasting.

Three models (linear regression model, decision tree regression model, artificial neural network) with forecasting of demand for electric loads for different stages of planning are considered. The latter is used to optimize the charging schedule of electric vehicles to minimize costs. The load demand forecast is the source of power system cost production. An artificial neural network is used to optimize the planning of electric vehicle charging by minimizing costs.

The obtained research results show that the artificial neural network gives a more optimal result than the rest of the forecasting models. Neural network prediction takes more time, after the

training phase, but converges in less time than the regression tree model using the statistical approach of the neural network model.

Key words: electric car, electric car, linear regression model, decision tree regression model, artificial neural network, forecasting, electric loads.

1. Постановка проблеми.

Електротранспорт набуває все більшого попиту у розвинених країнах світу, як більш економічний та екологічний вид транспорту. Для України також характерним є таке зростання. Зокрема, паливна криза 2022 року зумовлена військовою російською агресією спричинила колосальний попит на електромобілі в Україні. Навіть події української осінньої енергокризи спровокованої ударами держави-терориста не знизили попит на електромобілі.

Для гарантованого забезпечення енергією такого виду транспорту необхідна розвинена інфраструктура, зокрема, зарядні станції. Тому надзвичайно важливим є прогнозування електричного навантаження. У центрі уваги прогнозування навантаження є оцінка його майбутнього попиту. Це вимагає точного передбачення величини електричного навантаження для різних етапів планування. Прогнозування попиту на навантаження розглядається як один із серйозних аспектів вартості експлуатації системи живлення. Помилки прогнозування призводять до збільшення експлуатаційних витрат.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблемами автотранспорту та розвитком транспортної інфраструктури в Україні займалися багато вчених, зокрема, О.М. Котлубай, В.В. Лифар, Б.В. Буркінський, Ю.Ф. Гутаревич, В.П. Мікловда, А.М. Редзюк, О.В. Рябова, Д.К. Прейгер, І.Р. Юхновський та ін. В останніх наукових дослідженнях наголошується на можливостях заміни авто на бензинових двигунах на інші, зокрема, М.Л. Белов, О.В. Грицюк, Ф.І. Абрамчук, О.М. Врублевський, К.О. Горова та інші розглядають можливості збільшення автомобілів на дизельних двигунах вказуючи на економічний і екологічний ефект.

Проте, актуальним є на сьогодні використання електромобілів як найбільш екологічного виду транспорту. Даний вид транспорту є не дуже розповсюдженим в Україні, проте незначна кількість вчених звертає увагу на цю проблематику. В працях М.М. Дмитрієва, В.В. Кухтика, І.О. Кухтика наголошується на необхідності розширення українського ринку електромобілів. Це сприятиме вирішенню цілого ряду екологічних проблем не тільки в Україні, а і в Європі. Але разом з тим можуть виникнути проблеми з обслуговуванням даного виду автотранспорту, зокрема пов'язані з ремонтом і зарядкою об'єктів. Крім того, надзвичайно висока вартість електромобілів на ринку знижує їх доступність до рядових споживачів.

3. Мета і задачі дослідження.

Метою статті є визначення методів прогнозування навантаження ринку електромобілями для ефективного планування роботи зарядних станцій. Аналіз останніх досліджень вказує на актуальність застосування електричного автотранспорту різними споживачами як підприємствами так і приватними автокористувачами. Тому в статті зроблено акцент не тільки на вивченні ринку електромобілів в Україні, а і на прогнозуванні навантаження на енергосистему, що однозначно впливає на кількість даного виду транспорту.

4. Результати дослідження.

Широкомасштабна інтеграція електромобілів в транспортну інфраструктуру України створить великий попит на зарядку, що може спричинити проблеми для поточних методологій планування та експлуатації енергосистеми, особливо на рівні розподілу. Однією з головних проблем великої інтеграції електромобілів у систему розподілу є стабільність системи. Досягнення високих показників поширення електромобілів вимагає широкого розгортання зарядних пристроїв і потужності для заряджання в часи пік під час заряджання від мережі. Збільшення рівня проникнення електромобілів на 20% призведе до збільшення навантаження

на 35,8%. Тому, якщо не спланувати раціонально, заряджання електромобілів може легко призвести до перевантаження електромережі та погіршити якість електроенергії, навіть поставити під загрозу безпеку постачання. Актуально при плануванні системи заряджання електромобілів враховувати обмеження розподільної мережі, а також прогнозувати спільне використання розподільної мережі та системи заряджання електромобілів.

Прогнозування навантаження, що базується на тривалості часу можна загалом розподілити на три групи:

1. Короткостроковий прогноз навантаження (від 1 години до 1 тижня).
2. Середньостроковий прогноз навантаження (від 1 місяця до 1 року).
3. Довгостроковий прогноз навантаження (від 1 до 10 років).
4. Значення прогнозування навантаження для електрики.

В найближчій перспективі очікується збільшення кількості електромобілів по всьому світу. Для його ефективності буде необхідний надійний механізм зарядки електромобіля, його інтеграція в енергосистему, що необхідно для стабільності та надійності системи живлення. Неконтрольований спосіб зарядки електромобілів викликає величезні відхилення в електричній мережі, що впливає на якість електроенергії енергосистеми. Як результат відбувається високе енергоспоживання, високі піки навантаження та погіршення якості електроенергії. Планування та прогнозування в основному використовуються для контролю та мінімізації впливу цих факторів.

У підходах до прогнозування вирішальним фактором є уникнення помилок і забезпечення стабільності мережі з прогнозуванням повсякденного навантаження. Створення точної моделі прогнозування підтримуватиме вдосконалення зарядки електромобілів і надихатиме виробництва заохочувати використання електромобілів. Стабільність потужності мережі та гарантування балансу між пропозицією та попитом на електроенергію досягається шляхом відповідного планування зарядки електромобілів.

В процесі прогнозування навантаження використовуються вхідні дані та дані отримані в процесі вимірювання. Набір даних взято з ISO, призначеного для 2017-2021 років. Набір, який використовується в дослідженні складається з історичних даних про навантаження щогодини та інформацію про погодні умови. Існує висока кореляція між погодними умовами та навантаженнями в регіоні. Потреба в електроенергії зростає, коли є зниження температури нижче 10 градусів, щоб задовольнити потреби в опаленні. Тоді як попит на електроенергію зростає, коли температура підвищується на 23 градуси, щоб задовольнити вимоги до охолодження. Історичні дані включають середнє навантаження попереднього дня, навантаження попереднього дня тієї ж години та навантаження попереднього тижня в той самий день і ту саму годину. Інші вхідні дані для прогнозування навантаження – це година такого дня та день цього тижня. Для створення моделі прогнозу навантаження використовуються наступні кроки, які наведені нижче.

1. Створення матриці для прогнозування навантаження на основі історичних даних, таких як погодні умови та електричне навантаження.
2. Створення моделі прогнозування навантаження, такої як лінійна регресія, регресія з пакетним деревом і нейронна мережа.
3. Створення прогнозу навантаження на наступний день, тиждень або місяць на основі історичних даних.

Набір даних розділено на наступні набори:

1. Навчальний комплект (з 2017 по 2020 рр.)
2. Тестовий набір (дані 2021 р.)

Для побудови моделі для апроксимації параметрів використовується навчальний набір системи. Продуктивність моделей перевіряється за даними тестування. Після цього моделі побудовані на даних із навчального набору використовуються для прогнозування навантаження.

Моделі перевіряються за даними тестового набору, що забезпечує продуктивність наступного використання моделі прогнозування навантаження. Після прогнозування

навантаження необхідно порівняти фактичне навантаження з прогнозованим навантаженням, щоб знайти похибку прогнозування моделей.

Для перевірки продуктивності прогнозу використовують середньоквадратичну помилку моделі, середню абсолютну відсоткову помилку і щоденну пікову помилку прогнозованого навантаження. В статті представлені такі методи прогнозування:

1. Модель лінійної регресії.
2. Регресійна модель дерева рішень.
3. Штучна нейронна мережа.

Модель лінійної регресії. Для розуміння алгоритму лінійної регресії використовується підхід моделювання лінійної регресії між безперервною залежною змінною y та однією або кількома незалежними змінними $x_1; x_2; \dots x_n$.

Метою підходу лінійної регресії є розпізнавання функції, яка описує тісну кореляцію між цими змінними так, що значення залежних змінних можна оцінити серією незалежних змінних.

У методі лінійної регресії для прогнозування навантаження незалежна змінна для навантаження визначається як погодні умови, такі як температура з історичними даними навантаження. Ці значення безпосередньо впливають на електричне навантаження. Модель прогнозування навантаження за допомогою підходу лінійної регресії можна представити наступним чином:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e$$

де y – навантаження, x_i – діючі властивості, β_i – параметри регресії відносно x_i , а e – значення помилки в відношенні. Середнє значення помилки дорівнює нулю з постійною дисперсією.

Параметр β_i невідомий, спостерігаючи за y і x_i , його слід спрогнозувати. Нехай b_i ($i=0, 1, 2, \dots k$) взято у формі i ($i=0, 1, 2, \dots k$). Тоді прогнозоване значення y наведено нижче:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (1)$$

У середньому різниця між прогнозованими значеннями навантаження y знайденим за формулою (1) і реальним значенням навантаження y буде прямувати до нуля. Отже, передбачається, що значення похибки у рівнянні (1) має очікуване або середнє значення нуль, якщо функція щільності ймовірності для залежної змінної y на різних рівнях незалежної змінної має нормальний розподіл. Тому необхідно виключити значення помилки в розрахунок прогнозованих параметрів. Після цього, щоб мінімізувати суму квадратів залишкових значень оцінюється значення за методом найменших квадратів, щоб отримати заданий параметр b_i за наступною формулою:

$$\underline{B} = [b_0 \ b_1 \ b_2 \dots b_k]^T = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{Y} \quad (2)$$

У наведеному вище виразі X і Y є вектором-стовпцем і матрицею:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \text{ AND } \underline{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Модель готова до використання для прогнозування значень навантаження та розрахунку параметрів. Згодом, вважаючи, що всі значення незалежної змінної оцінюються правильно,

тому стандартна помилка буде меншою. Для отримання стандартної помилки рівняння знаходиться за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{SSE}{n - (k + 1)}} \quad (4)$$

$$SSE = \sum (y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2$$

де $y_i(t)$ — реальне значення, а $\hat{y}_i(t)$ — визначене значення.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i(t) - \hat{y}_i(t))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i(t) - \bar{y}_i(t))^2} \quad (5)$$

де $\bar{y}_i(t)$ — середнє значення $y(t)$.

Модель дерева регресії. Дерево регресії — це непараметрична статистична класифікація та регресійний підхід, який також відомий як автоматичний класифікатор. Ця техніка використовується для покращення стабільності та точності алгоритмів машинного навчання. Цей підхід використовується для підвищення ефективності прогнозування базової моделі, наприклад дерева рішень або ті підходи, які роблять гнучкий вибір і налаштування в лінійній моделі.

Деревоподібна модель пакетної регресії є свого роду агрегованою завантажувальною системою, в якій вихід з останнього кроку подається на вхід до поточного кроку. У звичайних нейронних мережах, кожен вхід і вихід незалежні один від одного, але в сценаріях коли, наприклад, потрібно оцінити наступне слово речення потрібно запам'ятати попередні слова.

Для фази навчання вибірка складається з n кількості історичних випадків $(x_1; y_1); (x_2; y_2); \dots; (x_n; y_n)$, де x є незалежна змінна з m -вимірним вектором, і y є залежною змінною відгуку, що має числове значення, отже дерево регресії є структурою дерева.

Дерево складається шляхом повторюваних поділів підмножин ще на дві наступні підмножини на основі вибіркової вхідної змінної. Кожен спліт є оглядом про вхідну змінну, яка вказує на ліву та праву наступні підмножини на основі «так» або «ні» відповідно. Оскільки підхід деревоподібної регресії має справу лише з дискретними значеннями, функція дискретизується на вектори входу та виходу змінна в домені.

У той же час для функції виводу використовується пакетна регресійна модель дерева. На основі цього дерева регресії будується модель, кожна з яких має набір дерев регресії з різних наборів інструкцій для виконання нелінійної регресії. Механізм починається зі структури з 20 таких дерев із найменшим розміром листа 40. Більший розмір листа дає менший розмір дерева.

Модель також визначає відносну ознаку значущості, яка дає найбільшу прогностичну силу для предикторів. Робочий день і температура термометра — функції, які мають найбільше значення серед усіх функцій.

Штучна нейронна мережа. Штучні нейронні мережі мають дуже велику кількість застосувань завдяки своїй здатності до навчання. Нейронна мережа дає можливість подолати залежність від функціональної форми моделі прогнозування навантаження. Існує кілька типів нейронних мереж: багаторівневий перцептрон, самоорганізаційні мережі тощо. В нейронній мережі є вхідний, прихований і вихідний рівень. Існують різні функції введення у вхідному шарі. Вхідні дані множаться на вагові коефіцієнти, які додаються до порогового значення, щоб отримати внутрішній номер продукту. Ключова перевага полягає в тому, що більшість підходів до прогнозування щодо нейронної мережі не потребують моделі навантаження, хоча на етапі навчання нейронних мереж зазвичай йде багато часу. Штучна нейронна мережа — це повна зв'язана нейронна мережа пересилання каналів, де вхідні та приховані шари підключені

до вихідного блоку, який є лінійними функціями через ваги. Після цього розв'язуються лінійні рівняння для цих вихідних ваг. Для оптимізації вихідних ваг метод зворотного розповсюдження використовується для кожної ітерації зразків навчальних даних. У запропонованій архітектурі штучної нейронної мережі сигмоїдна функція активації використовується для обчислення виводу прихованого шару, тоді як лінійна функція використовується для обчислення виводу вхідного рівня.

Для прогнозування навантаження використовується рівняння (6).

$$Output = \sum_{j=1}^m \left(\frac{2v_j}{1 + e^{-2(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i) - T_j}} - T_{out} \right) \quad (6)$$

де v_j ($j=1, 2, m$) і T_{out} представляють значення вагів та зміщення нейрона вихідного рівня відповідно. Ваги та зміщення кожного нейрона модифікуються через ітераційне навчання вхідних даних з метою виявлення меншої помилки прогнозу. Модель прогнозування навантаження ініціалізується 20 нейронами в прихованому шарі з 8 вхідними функціями. Термін навчання скоротився за рахунок використання функції Левенбурга-Марквардта. Весь набір даних розділено на 3 набори – 70% навчального набору, 15% перевірного набору та 15% тестових зразків, що залишилися.

На Рис.1 представлена нейронна мережа, яка використовується для прогнозування навантаження з 8 вхідними функціями, 20 нейронами та вихідним шаром у прихованому шарі.

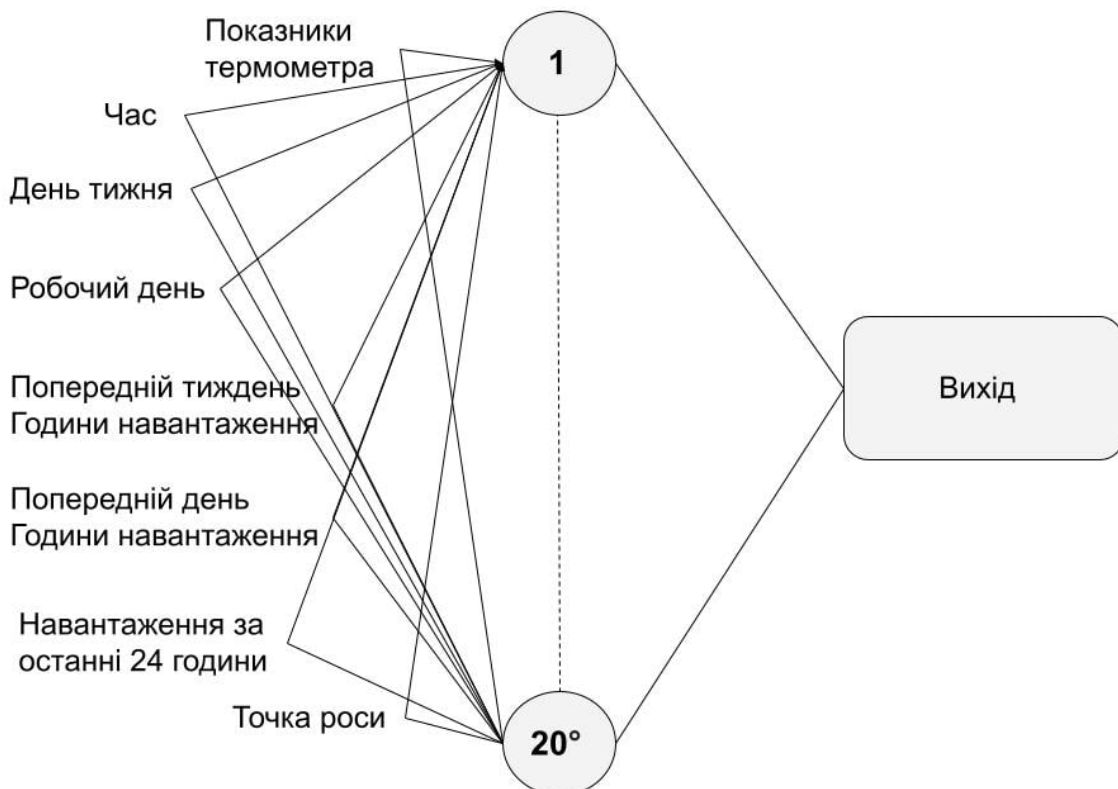


Рис. 1. Нейронна мережа

Штучна нейронна мережа є найкращою технікою для прогнозування навантаження через здатність до самонавчання. Впровадження нейронної мережі є складним процесом і потребує

великих історичних даних для навчання та визначення найменшої середньоквадратичної помилки.

Результати прогнозування навантаження поділяються на три частини, а саме:

1. Прогноз навантаження на добу вперед.
2. Прогноз навантаження на наступний тиждень.
3. Прогноз навантаження на наступний місяць.

Використовують три параметри для перевірки ефективності моделей прогнозування і для підтвердження точності прогнозу. Параметри – середня помилка, середня відсоткова помилка і добовий пік.

Проведено порівняння прогнозованого навантаження з фактичним базовим навантаженням на добу. Результати представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Прогнозоване навантаження на добу

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	16,09	1,24	1,55
Модель дерева регресій	45,55	3,2	5,12
Лінійна регресія	51,88	5,14	7,23

Результати помилок для прогнозу навантаження на добу представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Прогнозоване навантаження на тиждень

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	7,82	1,04	1,18
Модель дерева регресій	33,14	3	3,78
Лінійна регресія	49,08	5,02	5,38

Результати помилок прогнозу навантаження на наступний тиждень представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Прогнозоване навантаження на наступний тиждень

Моделі прогнозування	Середня помилка (кВт)	Середня помилка у відсотках (%)	Щоденний пік (%)
Нейронна мережа	5,03	0,94	1,09
Модель дерева регресій	21,6	2,01	2,34
Лінійна регресія	47,13	4,53	3,33

Розподіли прогнозованих похибок представлені на рис. 2. для прогнозування за допомогою штучної нейронної мережі.

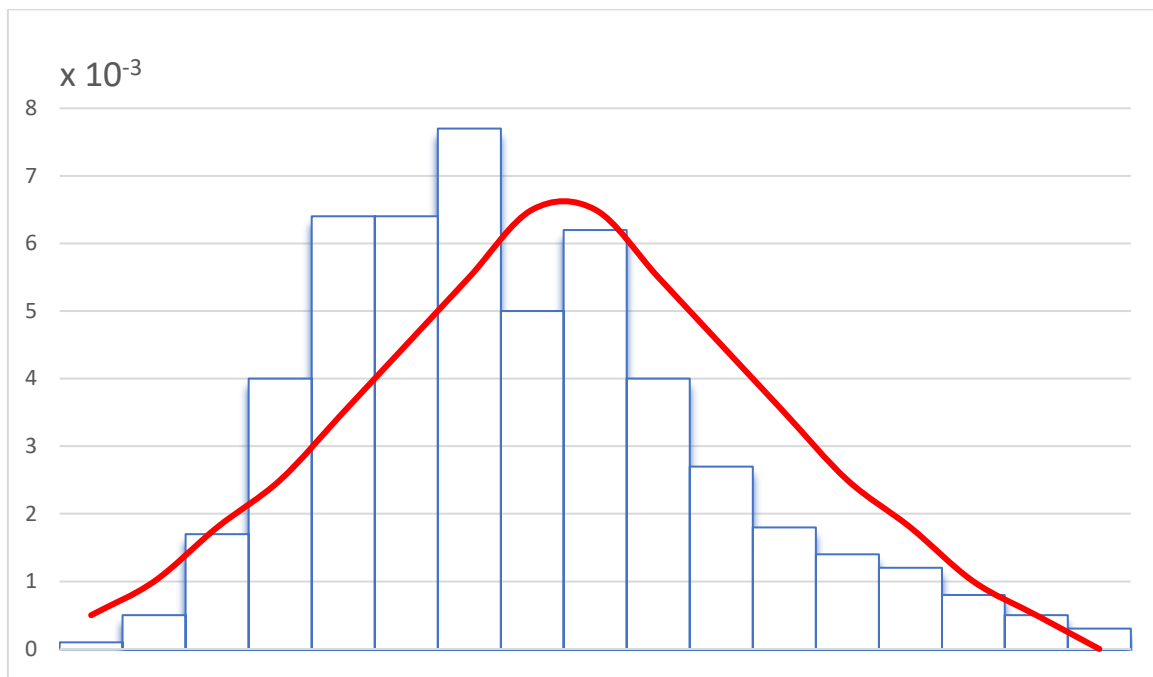


Рис. 2. Розподіл помилок за допомогою штучної нейронної мережі

Найбільш задовільний розподіл помилок спостерігається для штучної нейронної мережі порівняно з рештою двох моделей прогнозування.

5. Висновки та перспективи подальших досліджень.

Таким чином для прогнозування навантаження використовуються такі три моделі як модель лінійної регресії, регресійна модель дерева рішень та штучна нейронна мережа. Остання використовується для оптимізації планування зарядки електромобілів за рахунок мінімізації витрат. Аналізуючи результати, отримані за допомогою цих моделей прогнозування можна припустити, що штучна нейронна мережа дає кращий результат, ніж решта двох моделей прогнозування. Прогнозування нейронною мережею вимагає більше часу, оскільки є фаза навчання, але збігається за менший час, ніж модель дерева регресій завдяки статистичному підходу моделі нейронної мережі.

Список використаних джерел:

1. Global EV Outlook 2019. IEA webstore: [Electronic resource]. Access mode: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
2. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. Міністерство інфраструктури України: веб-сайт. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mtu.gov.ua/content/statistichnidani-po-galuzi-avtomobilnogo-transportu.html>.
3. Структура продажів виробників електромобілів в Україні. Офіційний сайт «Укравтопрому»: [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ukrautoprom.com.ua>.
4. Сколько электромобилей в Украине и в какой области их больше всего. Журнал «Фокус»: [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://businessviews.com.ua/ru/business/id/elektromobili-v-ukraine-1851/>.
5. Статистика PlugShare: в Україні на 7 електромобілів одна зарядна станція. HEVCars: [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hev cars.com.ua/skolko-zaryadnyhstantsij-v-ukraine/>.

6. Кількість зарядних пунктів у Києві та Кривому Розі. Google Maps: [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hevcars.com.ua/skolko-zaryadnyh-stantsij-v-ukraine/>

References:

1. Global EV Outlook 2019. IEA webstore: [Electronic resource]. Access mode: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
2. Statistical data on the field of road transport. Ministry of Infrastructure of Ukraine: website. [Electronic resource] – Mode of access to the resource: <https://mtu.gov.ua/content/statisticnidani-pogaluzi-avtomobilnogo-transportu.html>.
3. Sales structure of electric car manufacturers in Ukraine. Official website of "Ukrautoprom": [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://ukrautoprom.com.ua>.
4. How many electric cars are there in Ukraine and in which region are there most of them. "Focus" magazine: [Electronic resource] - Resource access mode: <https://businessviews.com.ua/ru/business/id/elektromobili-v-ukraine-1851/>.
5. PlugShare statistics: in Ukraine, there is one charging station for every 7 electric cars. HEvCars: [Electronic resource] – Resource access mode: <https://hevcars.com.ua/skolko-zaryadnyhstantsij-v-ukraine/>.
6. Number of charging points in Kyiv and Kryvyi Rih. Google Maps: [Electronic resource] - Resource access mode: <https://hevcars.com.ua/skolko-zaryadnyh-stantsij-v-ukraine/>