

# ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА

Бардик Є.І., к.т.н., доц., Коваль Я.С., аспірант

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** У сучасних умовах експлуатації електроенергетичних систем надійність роботи силових трансформаторів [1] є критично важливим фактором забезпечення безперебійного електропостачання споживачів. Враховуючи, що значна частина трансформаторного парку в багатьох країнах світу експлуатується понад нормативний термін служби, питання прогнозування залишкового ресурсу цього обладнання набуває особливої актуальності. За статистичними даними, близько 45% всіх аварійних відключень в електричних мережах пов'язані саме з відмовами силових трансформаторів.

**Мета** – дослідити прогнозування технічного ресурсу силового трансформатора за допомогою нейромережі Колмогорова-Арнольда.

**Матеріали та результати досліджень.** Сучасні дослідження в галузі діагностики та прогнозування технічного стану трансформаторів демонструють значний прогрес у розробці математичних моделей та методів оцінки залишкового ресурсу. Особливу увагу привертають методи, засновані на застосуванні штучних нейронних мереж, зокрема нейромереж Колмогорова-Арнольда [2], які дозволяють враховувати складні нелінійні залежності [3] між параметрами технічного стану трансформатора та його залишковим ресурсом.

Однак, незважаючи на значні досягнення, залишається ряд невирішених питань [4], серед яких: недостатня точність прогнозування в умовах обмеженої вибірки даних, складність врахування впливу зовнішніх факторів на процес старіння ізоляції [5], відсутність універсальних підходів до формування навчальної вибірки даних для тренування нейронних мереж з урахуванням специфіки різних типів силових трансформаторів та умов їх експлуатації.

Нейромережа Колмогорова-Арнольда базується на теоремі Колмогорова про представлення неперервних функцій багатьох змінних у вигляді суперпозиції неперервних функцій одної змінної. Математично це можна представити наступним чином:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^{2n+1} g_j \left( \sum_{i=1}^n \phi_{ij}(x_i) \right)$$

Де  $f(x_1, \dots, x_n)$  прогнозований ресурс трансформатора,  $x_i$  – діагностичні параметри,  $\phi_{ij}(x_i)$  внутрішні функції першого шару,  $g_j$  зовнішні функції другого шару.

Для практичного застосування використовується модифікована архітектура мережі, де функції апроксимуються за допомогою поліномів Чебишева:

$$\phi_{ij}(x) = \sum_{k=0}^m a_{ijk} T_k(x)$$

Де  $T_k(x)$  – поліном Чебишева першого роду,  $a_{ijk}$  – коефіцієнти що визначають процес навчання,  $m$  – порядок апроксимації.

Процес навчання нейромережі здійснюється шляхом мінімізації функціоналу похибки:

$$E = \sum_{p=1}^P (y_p - \hat{y}_p)^2 + \lambda \sum_{i,j,k} a_{ijk}^2$$

Де  $y_p$  – фактичне значення ресурсу,  $\hat{y}_p$  – прогнозне значення ресурсу,  $\lambda$  – коефіцієнт регуляризації,  $P$  – розмір навчальної вибірки.

Приклад прогнозування ресурсу трансформатора ТДН-16000/110 представлено на рисунку 1.

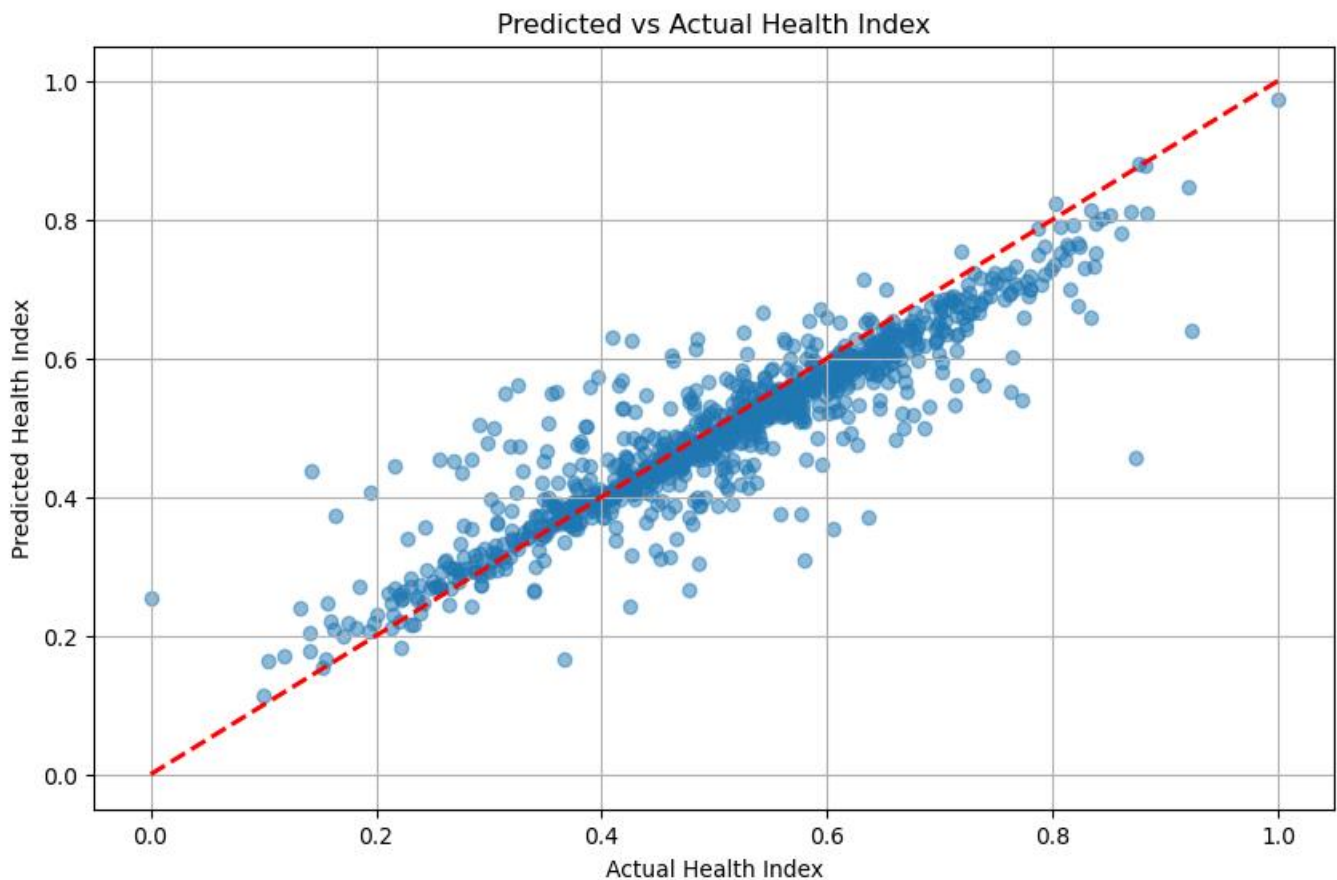


Рисунок 1 – Приклад прогнозування ресурсу трансформатора ТДН-16000/110

**Висновки.** Для прогнозування ресурсу силового трансформатора за допомогою нейромережі Колмогорова-Арнольда використовуються наступні діагностичні параметри [6]:

- електричні характеристики (Опір ізоляції  $R$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\tan \delta$ , ємність ізоляції),
- фізико-хімічні показники масла (вміст вологи, кислотне число, вміст розчинених газів),
- експлуатаційні параметри (температура найбільш нагрітої точки, коефіцієнт завантаження, кількість перевантажень).

Застосування нейромереж Колмогорова-Арнольда для прогнозування ресурсу силових трансформаторів демонструє високу ефективність за рахунок можливості врахування складних нелінійних залежностей між діагностичними параметрами та залишковим ресурсом обладнання. Експериментальні дослідження показують, що точність прогнозування досягає 85-90% при правильному підборі архітектури мережі та параметрів навчання.

#### Перелік посилань

1. Hajek, M., & Saha, T. (2018). "Life estimation of power transformers based on condition monitoring and statistical models." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(3), 1125-1134
2. Kumar, R., & Wang, Q. (2019). "Nonlinear modeling of transformer aging based on Kolmogorov-Arnold neural networks." *Neural Computing and Applications*, 31(4), 1233-1245.
3. Arnold, V.I. (1957) 'On functions of three variables', *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 114(4), pp. 679-681.
4. Sun, Z., & Yu, W. (2020). "Kolmogorov-Arnold representation for nonlinear function approximation in predictive maintenance." *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(5), 1627-1635
5. Kundu, R., & Chen, W. (2019). "Dissolved gas analysis for fault detection in power transformers: A review." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(6), 1973-1987
6. IEEE (2021) 'IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers', *IEEE Std C57.91-2021*, pp. 1-172.