

УДК 621.314.25:004.89

*Богдановський М.В., ст. викладач**Корнійчук С.М., здобувач**Державний університет «Житомирська політехніка»*

ІНВЕРСНА НЕЙРОНЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

Сучасні трансформатори напруги (ТН) є складними пристроями енергетичного комплексу, надійність роботи яких залежить від багатьох факторів. Фактори можливо поділити на окремі групи: параметри ізоляції, параметри конденсаторного дільника, теплові параметри, параметри трансформаторної частини, механічні та конструктивні параметри. В роботі [1] визначено поняття залишкового ресурсу трансформаторів. На підставі проаналізованих методик оцінки залишкового ресурсу за станом оливи, що широко використовується у світовій практиці діагностування, була запропонована нелінійна модель, що включає в себе основні фактори:

$$k_{\text{зар.рес}} = k_{\text{КТ}}^{p_{\text{КТ}}} \cdot k_{\text{Темб}}^{p_{\text{Темб}}} \cdot k_{\text{ебнт}g(\delta)}^{p_{\text{ебнт}g(\delta)}} \cdot k_{\text{Росн}}^{p_{\text{Росн}}} \cdot k_{\text{1Тнад}}^{p_{\text{1Тнад}}} \cdot k_{\text{2Тнад}}^{p_{\text{2Тнад}}} \cdot k_{\text{3Тнад}}^{p_{\text{3Тнад}}} \cdot k_{\text{1} \Delta \text{CX}}^{p_{\text{1} \Delta \text{CX}}} \cdot k_{\text{2} \Delta \text{CX}}^{p_{\text{2} \Delta \text{CX}}} \cdot k_{\text{3} \Delta \text{CX}}^{p_{\text{3} \Delta \text{CX}}} \cdot k_{\text{1Ctg}(\delta)}^{p_{\text{1Ctg}(\delta)}} \cdot k_{\text{2Ctg}(\delta)}^{p_{\text{2Ctg}(\delta)}} \cdot k_{\text{3Ctg}(\delta)}^{p_{\text{3Ctg}(\delta)}} \cdot k_{\text{1Рел}}^{p_{\text{1Рел}}} \cdot k_{\text{2Рел}}^{p_{\text{2Рел}}} \cdot k_{\text{3Рел}}^{p_{\text{3Рел}}} \cdot k_{\text{Тс}}^{p_{\text{Тс}}} \cdot k_{\text{Кон}}^{p_{\text{Кон}}} \cdot k_{\text{ХАРГ}}^{p_{\text{ХАРГ}}},$$

де $T_{\text{емб}}$ - температура верхньої частини баку, $K_{\text{т}}$ - коефіцієнт трансформації між виводами елементів, $R_{\text{осн}}$ - активний опір ізоляції ТН, $tg(\delta)$ - тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції в навантаженому режимі, $K_{\text{он}}$ - кислотне число, $T_{\text{с}}$ - температура займання оливи °С, $X_{\text{АРГ}}$ - узагальнений імпаکت-фактор розчинених в трансформаторному маслі газів, $T_{\text{над}}$ - надлишкова температура апаратного виводу дільника напруги, ΔCX - дрейф ємності паперово-масляної ізоляції, $tg(\delta)$ тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції в розвантаженому режимі, $R_{\text{ел}}$ - активний опір ізоляції ємнісного елементу. В результаті дослідження було запропоновано нейронечітку модель (ANFIS), яка після навчання на експериментальних даних роботи трансформаторів дозволяє прогнозувати вплив факторів на коефіцієнт залишкового ресурсу. Основну проблему являє широка варіативність комбінації факторів, що можуть давати однаковий коефіцієнт залишкового ресурсу, тому розв'язання оберненої задачі є важливим. Для вирішення даної задачі можливо використати функцію помилки, яка обчислює різницю між бажаним виходом і виходом моделі ANFIS для заданих входів та

оптимізаційні алгоритми (наприклад, `fmincon`, `ga`, `particleswarm`) для знаходження таких входних значень, які мінімізують цю помилку. Основна процедура розрахунку в середовищі MATLAB наступна:

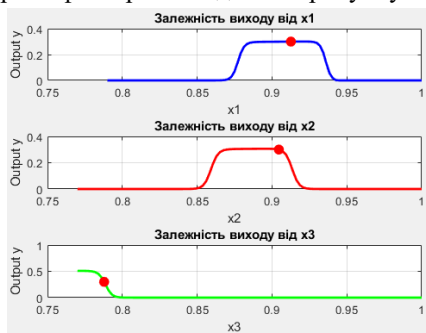
```
% 2. Створення початкової FIS-структури
numMFs = 5;
mfType = 'gaussmf';
fis = genfis1(data, numMFs, mfType);

% 3. Навчання ANFIS-моделі
numEpochs = 100;
[trainedFIS, ~] = anfis(data, fis, numEpochs);

% 4. Оптимізація для заданого виходу
error_func = @(x) abs(evalfis(x,:), trainedFIS) - desired_y;
x0 = [(min(x1)+max(x1))/2 (min(x2)+max(x2))/2
(min(x3)+max(x3))/2];
lb = [min(x1) min(x2) min(x3)];
ub = [max(x1) max(x2) max(x3)];
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'none', 'Algorithm',
'sqp');
```

```
[x_opt, ~] = fmincon(error_func, x0, [], [], [], [], lb, ub, [], options);
```

Результат роботи програми на обмеженій до 10 значень виборки даних та залежність залишкового ресурсу на рівні 30% по кожному з трьох факторів наведено на рисунку 1.



Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 100.

Minimal training RMSE = 0.000000

? Оптимальні входи для $y = 0.300$:

$x_1 = 0.9126$ $x_2 = 0.9046$
 $x_3 = 0.7878$

? Отриманий вихід: 0.3000

Рис.1.Залежність залишкового ресурсу.

Список використаних джерел:

1. Богдановський М.В., Гуменюк А.А., Добржанський О.О., Ткачук А.Г., Ковальчук І. В. Використання нечітких нейронних мереж для діагностування ємнісних високовольних трансформаторів напруги // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2 (33) 2025. – С. 73–81. Режим доступу: <https://elen.donntu.edu.ua/2074-2630-2025-2-73-81.pdf>