

## **Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання**

© Рубаненко О.Є., 2007

**Запропоновано нейро-нечіткі моделі РПН трансформаторів, високовольтних вимикачів, силових трансформаторів, які можна використовувати під час оперативного діагностування**

**In this article it is offered to the fuzzy-logic model of RPN transformers, high-voltages switches, power transformers which can be used for the operative diagnosticating**

**Вступ.** Характерною особливістю світової енергетики є зростання частки обладнання, яке відпрацювало свій паспортний ресурс. Наприклад, в Російській Федерації більше 30 % [1] загальної кількості встановлених трансформаторів відпрацювали визначені стандартами мінімальні строки служби 25 років [2, 3]. За даними Інституту електроенергетики США EPRI [1], в 1997 р. близько 65 % силових трансформаторів в мережах США відпрацювали більше 25 років.

Тому останнім часом все більше уваги приділяється контролю та діагностуванню основного електрообладнання електроенергетичних систем, а також оцінці працездатності кожного виду цього обладнання.

Якщо діагностика [1] – це визначення виду та інтенсивності дефектів, ступеня працездатності обладнання, ресурсу за результатами контролю стану і контролю режиму, то діагностування – це операції, виконувані з метою встановлення несправності та виявлення причин її виникнення [4].

Відповідно до [5] завданнями технічного діагностування енергетичного обладнання є: контроль технічного стану; пошук місця та визначення причин відмови; прогнозування технічного стану. Сьогодні до відомих завдань діагностування також можна додати такі [5]: оцінка ступеня зносу устаткування; визначення виду, обсягу та часу проведення ремонту; визначення можливості і умов продовження роботи устаткування, яке має дефекти; оцінка залишкового терміну служби; розробка заходів, які забезпечують реалізацію залишкового ресурсу.

Ефективним напрямком в інтенсифікації енергетичного виробництва та в підвищенні надійності енергетичного обладнання є використання прогнозуючого діагностичного забезпечення, яке ґрунтується на сучасних автоматизованих засобах отримання інформації про фактичний стан обладнання та ефективних засобів його обробки.

**Оперативне діагностування.** Враховуючи швидкість розвитку окремих аварій силового обладнання, перспективним напрямком у діагностиці електричного обладнання є експрес-діагностування і оперативне діагностування. Експрес-діагностування – це діагностування за обмеженою кількістю параметрів за попередньо встановлений час [5]. Оперативне діагностування – це діагностування обладнання під час його роботи [1].

Особливості процесу оперативного діагностування: працююче обладнання знаходиться в цілодобовому оперативному обслуговуванні, здійснюваному оперативним персоналом; персонал розв'язує завдання ведення необхідного режиму роботи, виконання перемикачів, локалізації аварій, відновлення режиму роботи, підготовки до виконання ремонтних робіт.

**Нейро-нечітке моделювання в енергетиці.** У загальному випадку ускладнені умови експлуатації сучасних енергетичних систем призводять до необхідності врахування під час контролю і управління таких видів невизначеності:

1. Низька точність оперативної інформації, яка надходить з об'єктів управління. Вона виникає, зважаючи на значну похибку датчиків вимірювання технологічних параметрів (витрат, тиску тощо), їх невисокої надійності, відмов каналів зв'язку, великого запізнювання у разі передавання інформації за рівнями управління, відсутності можливості вимірювань параметрів в усіх точках технологічного процесу, необхідних для моделей. Наявність такого виду невизначеності зумовлює неточність у завданні змінних величин у моделях, початкових і граничних умов.

2. Неточність моделей об'єктів контролю і управління, зумовлена нееквівалентністю рішень системних багаторівневих ієрархічних моделей і використовуваних на практиці окремих локальних завдань. Неточність моделей може виникати через неправильно проведenu декомпозицію загального завдання управління, зайвої ідеалізації моделі складного процесу, розриву істотних зв'язків в технологічному комплексі, лінеаризації, дискретизації, заміни фактичних характеристик устаткування паспортними, порушення допущень, прийнятих під час виведення рівнянь (стаціонарності, однорідності тощо). Зважаючи на велику складність об'єкта, істотної нелінійності, труднощів формалізації, наявності різних суб'єктивних критеріїв і обмежень, можна застосовувати нечіткі моделі.

3. Нечіткість під час ухвалення рішень в багаторівневих ієрархічних системах, зумовлена тим, що наявність чітких (точних) цілей і координуючих рішень на кожному рівні контролю і управління, і для кожного локального пристрою регулювання ускладнює процес координації і зумовлює тривалий ітеративний характер узгодження рішень.

4. Наявність диспетчера, або чергового підстанції в контурі управління і ведення передавання електроенергії, координації цього процесу в реальній виробничій системі природною мовою, приводить до необхідності обліку труднощів подання знань диспетчера у вигляді алгоритмів і узгодженості одержаного ЕОМ рішення з його оцінкою:

- ненадійність початкової інформації, що одержується від диспетчера в режимі ухвалення рішення, неточність оцінок, недовизначеність понять і термінів, невпевненість диспетчерів у своїх висновках;
- нечіткість (неоднозначність) природної мови (лінгвістична невизначеність і мови подання правил в системах експертного типу);
- процедура ухвалення рішення базується на неповній інформації, тобто нечітких посиланнях;
- невизначеність виявляється під час агрегації правил і моделей, витікаючих від різних джерел знань або від диспетчерів різних рівнів управління (ці правила і моделі можуть бути суперечливими, надмірними тощо).

В енергетиці алгоритми нейро-нечіткого моделювання використовують досить широко, наприклад, для: прогнозування навантаження; оптимізації розподілення енергії; діагностування обладнання енергосистем; стабілізації напруги в енергосистемах; розміщення вимірювальних пристроїв на електростанціях, захисту силових трансформаторів та синхронних генераторів; для управління мережею синхронних генераторів; для управління інверторами, перемикаючими пристроями; для прогнозування температури навколишнього середовища з метою прогнозування навантаження; для забезпечення максимальної потужності; для регулювання напруги; оптимізації розміщення датчиків для контролю безпеки енергосистем; моніторингу безпеки енергосистем; забезпечення стійкості; оцінки динамічного стану і діагностування генераторів; управління турбогенераторами; управління високовольтними вимикачами.

**Розробка нейро-нечітких моделей для оперативного діагностування.** Розглянемо рекурентну нейронну мережу – мережу Елмана для діагностування стану РПН трансформатора. Пропонується використовувати вхідні данні, які безперервно надходять від датчиків: струму ( $I$ ) електричного двигуна приводу, вмісту розчинених газів ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ), тангенсу кута діелектричних втрат ( $tg\delta$ ) вмісту вологи ( $W$ ), ємності масла ( $C$ ) і періодично (один раз на 3 роки) від датчика перехідного опору контактів ( $R$ ). Вихідною величиною є  $K_f$  – коефіцієнт якості функціонування РПН (змінюється від 0 до 1), залежно від якого оперативний персонал прогнозує стан РПН в

потрібний момент ( $K_f = 0$  – аварійний,  $0 < K_f \leq 0,25$  – передаварійний,  $0,25 < K_f \leq 0,5$  – працездатний з технологічними порушеннями,  $0,5 < K_f \leq 1$  – працездатний).

Результати періодичних вимірювань вносять нечіткість у висновок про стан РПН. Таких (нечітких, періодичних) даних зазвичай більше (напруга пробою масла, часові характеристики тощо). Кожен з контрольованих параметрів характеризує стан РПН, а їх сукупності та тенденції зміни визначають характер пошкоджень, порушень у роботі, або розвиток дефекту на початковій стадії. Навчальна вибірка даних сформована як результат обробки даних пошкоджуваності РПН, вимог нормативних документів, заводських інструкцій, порад персоналу служб діагностики, ремонту, диспетчерського та чергового персоналу. Суб'єктивний характер порад експертів вносить нечіткість в пропонований висновок про стан РПН.

Характерною особливістю архітектури рекурентної мережі є наявність блоків динамічної затримки і зворотних зв'язків. Це дозволяє таким мережам обробляти динамічні моделі. Такою мережею є нейронна мережа Елмана.

Мережа Елмана – це мережа, що складається з двох шарів, в якій прихований шар охоплений динамічним зворотним зв'язком. Це дозволяє врахувати передісторію спостережуваних процесів і нагромадити інформацію для вироблення правильної стратегії управління. Мережа Елмана – це, як правило, двохшарова мережа із зворотним зв'язком від виходу до входу першого шару.

Як функції активації в мережі Елмана використовуємо: у прихованому, рекурентному шарі – функцію гіперболічного тангенса  $\tanh$ , в лінійному шарі – функцію  $\text{purelin}$ . Таке поєднання функцій активації дає змогу максимально точно апроксимувати функції з кінцевим числом точок розриву. Прихований шар має достатньо велику кількість нейронів, яка необхідна для успішної апроксимації складних функцій.

Для побудови нейронної мережі було використано toolbox NNT системи MATLAB. Для створення мережі Елмана в цій системі передбачена М-функція `newelm`. Фрагмент даних для навчання мережі наведений в табл. 1. Вся таблиця містить 512 рядків.

Таблиця 1

Фрагмент даних для навчання системи нечіткого висновку

CO, мкл/л	CO <sub>2</sub> , мкл/л	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мкл/л	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , мкл/л	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , мкл/л	tgδ, %	I, А	W, г/м	R, мкОм	C, пФ	K <sub>f</sub> , в.о.
590	2000	50	50	10,0	2,00	1,00	16,0	16,0	10,0	1,00
595	2100	59	55	11,8	2,16	1,10	16,3	16,3	10,2	0,98
600	2200	68	60	13,6	2,32	1,20	16,6	16,6	10,4	0,96
605	2300	77	65	15,4	2,48	1,30	16,9	16,9	10,6	0,94
610	2400	86	70	17,2	2,64	1,40	17,2	16,1	10,8	0,92
615	2500	95	75	19,0	2,80	1,50	17,6	16,1	11,0	0,90
620	2600	104	80	20,8	2,96	1,60	17,9	16,1	11,2	0,88
625	2700	113	85	22,6	3,12	1,70	18,2	16,2	11,4	0,86
630	2800	122	90	24,4	3,28	1,80	18,5	16,2	11,6	0,84
635	2900	131	95	26,2	3,44	1,90	18,8	16,2	11,8	0,82
640	3000	140	100	28,0	3,60	2,00	19,2	16,3	12,0	0,80
645	3100	149	105	29,8	3,76	2,10	19,5	16,3	12,2	0,78
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Навчання мережі здійснювали за алгоритмом зворотного поширення помилки.

Підсумовували по всіх нейронах вихідного шару і по всіх оброблюваних мережею образах. Мінімізацію здійснювали методом градієнтного спуску. Мінімальна похибка навчання досягла 0,0099 в.о.

Розглянемо модель нечіткого висновку для оперативного діагностування високовольтних повітряних вимикачів.

Діапазон зміни контрольованого параметра під час експлуатації поданий у вигляді функцій приналежності лінгвістичної змінної, наприклад “параметр вжиму контактів” :

$$Gi = \langle T^i_{R}, T^i_{LRb}, T^i_{LR2}, T^i_{L} \rangle, \quad (1.1)$$

де  $i$  – номер параметра: 1 –  $l_{\text{вжим}}$  контактів, 2 –  $T_{\text{увімкн}}$  час увімкнення, мс, 3 –  $\text{tg } \delta$  епоксидних ввідів, %, 4 –  $T_{\text{різночасності}}$  час різночасності увімкнення, мс, 5 –  $R_{\text{перех}}$  перехідний опір контактів, мкОм, 6 –  $R_{\text{ел.магн.}}$  опір електромагнітів, Ом;  $T = \mu(x)$  – терм-множина, яка визначається кількістю функцій приналежності ( залежності  $\mu$  від значення контрольованого параметра  $x$ );  $R = f(\beta)$ ,  $L = f(\alpha)$ ,  $LR = f(\alpha, \beta)$  – види нечітких чисел відповідно з правою і лівою спадаючими частинами (коефіцієнтами нечіткості  $\alpha$  і  $\beta$ ), а також з двома спадаючими частинами.

Під час розрахунків використовували різні види функцій приналежності для лінгвістичної змінної, які характеризують значення контрольованих параметрів.

Терм-множинам  $T_i$  надані лінгвістичні значення, які ідентифікують значення контрольованого параметра:  $T_R$  – маловпливовий параметр;  $T_{LR1}$  – зона ризику;  $T_{LR2}$  – граничне значення;  $T_L$  – сильновпливовий параметр. Відповідність значень контрольованих параметрів видам дефектів наведена в табл. 2, яка створена на основі нормативно-технічної літератури, досвіду експлуатації і ремонтів вимикачів.

Таблиця 2

### Залежність пошкодження вимикачів від сукупності вимірних параметрів

Втискання контактів, Мм	Власний час спрацювання, мс	Різночасність спрацювання контактів, мкс	Перехідний опір контактів, мкОм	Опір котушок електромагнітів управління, Ом	Терм – множина дефектів, D
Пошкодження струмоведучих частин вимикача ( $D^{(1)}_j$ )					
$T^1_L$	$T^2_R$	$T^3_L$	$T^4_L$	-	$D^{(1)}_1$
$T^1_{LR2}$	$T^2_{LR1}$	$T^3_R$	$T^4_{LR2}$	-	$D^{(1)}_2$
$T^1_{LR1}$	$T^2_R$	$T^3_R$	$T^4_{LR1}$	-	$D^{(1)}_3$
Механічні пошкодження вимикача					
$T^1_R$	$T^2_L$	$T^3_{LR2}$	$T^4_{LR2}$	$T^5_L$	$D^{(2)}_1$
$T^1_L$	$T^2_L$	$T^3_{LR2}$	$T^4_L$	$T^5_L$	$D^{(2)}_2$
$T^1_L$	$T^2_L$	$T^3_{LR2}$	$T^4_L$	-	$D^{(2)}_3$
$T^1_R$	$T^2_L$	$T^3_L$	-	-	$D^{(2)}_4$

Математична модель вимикача ґрунтується на даних табл. 2 і має вигляд системи логічних рівнянь

$$\begin{cases} \text{IF}(T^1 = T^1_R) \text{ and } (T^2 = T^2_R) \text{ and } (T^3 = T^3_L) \text{ and } (T^4 = T^4_L) \text{ and } (T^5 = \text{not}) \text{ then } D = D^{(1)}_1 \\ \dots \\ \text{IF}(T^1 = T^1_R) \text{ and } (T^2 = T^2_L) \text{ and } (T^3 = T^3_{LR2}) \text{ and } (T^4 = T^4_{LR2}) \text{ and } (T^5 = T^5_L) \text{ then } D = D^{(2)}_1 \\ \dots \end{cases} \quad (1.2)$$

Елементи терм-множини дефектів мають вигляд лінгвістичних змінних відповідно до табл. 3 і підказують оперативному персоналу вид та характер можливого пошкодження, допомагаючи йому прийняти виважене рішення щодо наслідків використання того чи іншого вимикача.

Використання математичної моделі (1.3) дозволяє покращити роботу комп’ютерних систем підтримки прийняття рішень оперативним, експлуатаційним та ремонтним персоналом. Відомо, що спад тиску у повітряного вимикача 330 кВ при операції “вимикання” (регулюється голкою відсічки) має бути  $(2,8 \leq \Delta P \leq 2,9)$  кгс/см<sup>2</sup>, і час безконтактної паузи в складному циклі не повинен  $T_{\text{бп}}$  не повинен відхилятися від номінального  $T_{\text{бп ном}}$ . Функції приналежності для вхідних величин  $\Delta P$  та  $T_{\text{бп}}$  – трикутні: mf1-  $\Delta P \leq 2,8$ ; mf2 –  $2,8 \leq \Delta P \leq 2,9$ ; mf3 –  $2,9 \leq \Delta P$ ; mf4-  $T_{\text{бп}} \leq T_{\text{бп ном}}$ ; mf5 –  $T_{\text{бп}} = T_{\text{бп ном}}$ ; mf6 –  $T_{\text{бп ном}} \leq T_{\text{бп}}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } \Delta P = \text{mf1 then } y = y_1 \\ \text{IF } \Delta P = \text{mf3 then } y = y_2 \\ \dots \\ \text{IF } \Delta P = \text{mf3 and } T_{\text{оп}} = \text{mf5 then } y = y_3 \\ \dots \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Y – множина значень лінгвістичної змінної – вихідної величини, наприклад  $y_1$  – “наступну операцію не проводити, вивести вимикач в ремонт і понизити тиск в резервуарі до 0”;  $y_2$  – “провести декілька відключень вимикача і якщо скидання не увійшло до норми, вивести вимикач в ремонт, а для ремонтного персоналу розібрати, прочистити золотник відсічки і його порожнину”;  $y_3$  – “провести декілька відключень вимикача і продовжувати експлуатувати устаткування” ;...

Таблиця 3

**Фрагмент значень елементів терм-множини дефектів**

Зростання нагрівання контактів ( $D_j^{(1)}$ )	
$D_1^{(1)}$	велика температура – більше 150 °C
$D_2^{(1)}$	зона ризику – температура 100–149 °C
$D_3^{(1)}$	малий перегрів – 70 °C
Зменшення сил дії пружин на рухомі частини $D_j^{(3)}$	
$D_1^{(2)}$	порушення в роботі вузлів пневматики
$D_2^{(2)}$	порушення в роботі вузлів регулювання
$D_3^{(2)}$	затирання контактів
$D_4^{(2)}$	порушення герметичності елементів вимикача

Застосуємо вищенаведені методи для оперативного діагностування силового трансформатора. Трансформатор – це складна фізична система, яка функціонує під впливом множин керуючих та збурюючих дій. Ця система має множини компонент і миттєвих значень компонент векторів вхідних і вихідних сигналів і вектори стану, потужності яких близькі до нескінченних. Узагальнений вектор стану трансформатора рухається в дискретному часі в просторі станів, який складається з двох субпросторів – дійсного  $x_A$  і бінарного  $x_B$ . Поведінка трансформатора описується рівнянням

$$x_{k+1} = L(x_k, z_k, w_k), \quad z_k \in Z_k; x_0, \quad (1.4)$$

де  $x_{k+1}$ ,  $x_k$  – стан трансформатора в момент  $k+1$ ,  $k$ ;  $L$ - оператор перетворення вектора стану  $x_k$  в вектор  $x_{k+1}$  при відомому управлінні  $z_k$  і збуренні  $w_k$  в момент  $k$ . Система охолодження містить шість маслососів (АТДЦТН-250000/330) – п’ять робочих і один резервний. На момент  $k$  трансформатор є в робочому стані, який описується сукупністю векторів  $x_A$  і  $x_B$  та в момент  $k + 1$  виникає наступна ситуація. При несенні трансформатором номінального навантаження з причини технологічного порушення від’єдналась частина маслососів системи охолодження. Від’єднання зафіксоване оперативним персоналом. На трансформатор діяло збурення  $w_k$ . Персонал розпізнає стан у момент  $k + 1$  шляхом міркувань, які ґрунтуються на знаннях та фактично є лінгвістичним виразом оператора  $L$  – математичної моделі нечіткого висновку, побудованої за алгоритмом Мамдані. Задамо множину “режим роботи маслососів”  $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ , де  $x_1$  – лінгвістична змінна “відключені всі маслососи”;  $x_2$  – “відключені три маслососи”;  $x_3$  – “відключені два маслососи”;  $x_4$  – “відключений один маслосос”;  $x_5$  – “в роботі всі маслососи”. Задамо множину “режим навантаження”  $E = [0, \mu]$  на якій визначені множини:  $\{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5\}$ , де  $Z_1$  – “аварійне відключення трансформатора”;  $Z_2$  – “робота в режимі холостого ходу”;  $Z_3$  – “робота з навантаженням, яке не перевищує 40% від номінального”;  $Z_4$  – “робота з навантаженням, яке не

перевищує 60 % від номінального”;  $Z_5$  – ”робота з номінальним навантаженням”. Вибрані Z-подібні функції приналежності.

Задамо множину лінгвістичних змінних {“ресурс”} для оцінки працездатності трансформатора, які описуються так: <”ресурс” T, [0,1 година, 8 годин]>, де T = {“дуже малий”, “малий”, “декілька годин”, “до усунення несправності”} – терм-множина змінних.

Моделювання здійснюємо в середовищі MathLab. Побудована модель дозволяє визначити час, який може працювати трансформатор залежно від кількості працюючих маслonaсосів та від того наскільки завантажений трансформатор. Так, у разі п’яти працюючих насосів та 100% навантаження – час роботи – не менше 8 годин.

Така модель дає змогу побудувати іншу модель – модель підтримки прийняття рішень оперативним персоналом, фрагмент якої, у вигляді логічних рівнянь з лінгвістичними змінними, наведений в (1.5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЯКЩО у разі несення трансформатором номінального навантаження} \\ \text{відбулось від'єднання декількох робочих маслonaсосів,} \\ \text{ТО} \quad \text{необхідно перевірити вмикання резервного маслonaсоса,} \\ \text{Виконати ручне вмикання резервного насоса, організувати} \\ \text{постійний контроль за температурою масла} \\ \text{ТА} \quad \text{знизити навантаження трансформатора в найближчі 5 хвилин на} \\ \text{прогнозоване значення;} \end{array} \right. \quad (1.5)$$

**Висновки.** 1. Темпи зростання потужностей в усій світовій енергетиці різко знизились та приріст виробітку електричної енергії досягається переважно за рахунок інтенсифікації використання та покращання методів експлуатації обладнання. Помітно зростає частка обладнання, яке відпрацювало встановлений стандартами номінальний термін служби. Продовження терміну служби на 20–30 років дає більшу вигоду, ніж заміна обладнання на нове. Це потребує розвитку методів та засобів контролю та діагностування обладнання.

2. Використання отриманої моделі дозволить якісніше прогнозувати зменшення коефіцієнта якості функціонування РПН і скорегувати параметри режиму ЕЕС з урахуванням стану РПН під час оперативного управління режимами електроенергетичних систем.

3. Застосування двох нейронних мереж дає змогу точніше здійснити розрахунок та отримати систему, яка адекватно реагує на зміну вхідних параметрів.

4. Логічні математичні моделі стану трансформатора дозволяють розробити якісну систему підтримки прийняття рішень оперативним персоналом.

1. Алексеев Б.А. *Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов.* – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с. 2. ГОСТ 16555-75. *Трансформаторы силовые трехфазные герметичные масляные. Технические условия.* 3. ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93). *Трансформаторы силовые. Ч. 1: Общие положения.* 4. ДСТУ 2860-94. *Надійність техніки. Терміни та визначення.* 5. ДСТУ 2389-94. *Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення.* 6. Алтунин А.Е., Семухин М.В. *Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография.* – Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2000. – 352 с. 7. *Практический метод оптимизации электроэнергетической системы с помощью структурированной нейронной сети / Sakurai Kyoko, Nishimura Kazuo, Hayashi Hideki // Proc. Int. Jt Conf. Neural Networks, nagoya, Oct. 25–29, 1993: IJCNN'93 – Nagoya. Vol. 1. – Nagoya, 1993. – P.873.*