

О. Є. Рубаненко, канд. техн. наук, доц.;

О. І. Казмирук

КОНТРОЛЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА

Проведено аналіз причин пошкоджень системи охолодження трансформаторів 110-750 кВ та їх впливів на навантажувальну здатність. Запропоновано метод оперативного діагностування стану системи охолодження в умовах неповноти вихідних даних з використанням нечіткого моделювання. Показано, що визначення значного забруднення охолоджувачів дозволяє, вчасно очистивши їх, збільшити навантажувальну здатність трансформатора за інших однакових умов.

Вступ

Необхідність в докорінному вдосконаленні методів та засобів оперативно-диспетчерського керування виникла вже в середині 60-х років, коли традиційні методи та засоби стали недостатніми для забезпечення надійної та економічної роботи потужного энергооб'єднання, утвореного з'єднанням на паралельну роботу електроенергетичних систем країни [1].

Задачі, які розв'язує диспетчер в циклі оперативного керування, різні та залежать від стану об'єкта керування — від режиму, в якому знаходиться енергетична система.

Так, наприклад, одною з основних функцій оперативного персоналу в нормальному режимі є регулювання режиму з метою забезпечення економічності, виконуючи вимоги надійності, та якості електричної енергії.

Специфічні вимоги до алгоритмів розв'язання задач оперативного керування полягають в тому, що диспетчер під час свого чергування, не має можливості швидко залучати інших спеціалістів для оцінки стану експлуатованого обладнання [1], для розрахунку оптимальних за критерієм мінімуму сумарних втрат електричної енергії, параметрів режиму, а також для оцінки можливих наслідків коригувальних дій з метою оптимізації параметрів поточного режиму.

За таких умов максимально використовуються досвід та знання диспетчера або іншої людини, яка відповідає за підтримання оптимальних параметрів нормального режиму за надійнісними, якісними та економічними показниками.

В ЕЕС серед пристроїв регулювання параметрів режиму широко використовуються силові трансформатори з РПН. Можливість їх ефективного використання залежить від технічного стану як окремих вузлів, так і трансформатора в цілому.

Тому актуальною є задача визначення технічного стану трансформатора, що приймає участь в процесі автоматичного або автоматизованого керування параметрами нормального режиму не періодично, а в темпі процесу передачі електричної енергії.

Діагностування силових трансформаторів

Існуючі системи діагностування традиційно прийнято умовно поділяти на системи тестового та функціонального діагностування. Якщо перші передбачають подавання на об'єкт діагностування спеціально організованих тестових впливів, то інші застосовують, використовуючи об'єкт за призначенням, коли потрібні перевірка правильності функціонування і пошук дефектів. При цьому на об'єкт надходять лише передбачені його алгоритмом функціонування робочі впливи [2]. В літературі зустрічаються такі види діагностування, як ремонтне, експрес та інші [2]. Враховуючи велику відповідальність і вартість силових трансформаторів, ці види діагностування передбачають залучення спеціалістів, які займаються визначенням технічного стану обладнання і мають достатньо часу для аналізу ретроспективної та поточної інформації.

В умовах обмеженого часу на прийняття рішення оперативним персоналом щодо дотримання параметрів режиму роботи ЕЕС виправданим є використання оперативного діагностування — діагностування працюючого обладнання силами оперативного персоналу [2].

Розробка систем технічного діагностування передбачає аналіз діагностованого обладнання

(особливостей конструкції, умов експлуатації, видів та причин пошкоджень тощо). Аналіз пошкоджувальності силових трансформаторів [2] свідчить про те, що найчастіше причинами пошкоджень стають системи охолодження (146 випадків з 643 [2], що складає 22,71 %), далі високовольтні вводи (14,71 %), виділення газів в масло (9,02 %), старіння масла (7,47 %), дефекти в пристроях РПН (7,15 %) та інші. Тому актуальною з точки зору забезпечення виправданого (за критеріями надійності і зменшення залишкового ресурсу) навантажувальної здатності трансформатора, є визначення технічного стану системи охолодження в темпі процесу оперативного керування параметрами режимів ЕЕС.

Прогнозування технічного стану обладнання оперативним персоналом може здійснюватись з використанням методів нечіткого моделювання тому, що: оперативний персонал здійснює діагностування на базі обмеженої кількості інформації; непряма інформація про стан системи охолодження трансформатора надається персоналу у вигляді множини початкових (поточних) значень параметрів та результатів попередніх, інколи застарілих, результатів випробувань, що характеризують компоненти вектора вихідних сигналів, який рухається в просторі станів, та інші.

Нечітка модель навантажувальної здатності трансформатора

Розглянемо, знаючи прогнозований графік навантаження, як передбачити можливе передавальне або аварійне зростання температури верхніх шарів масла і вжити заходів щодо очищення охолоджувачів, а в разі необхідності і ремонту маслонуосів, вентиляторів, систем керування вентиляторів і маслонуосами, заміни ущільнень і т. п.

Для цього проаналізуємо статистичні дані дев'ятирічних спостережень за параметрами автотрансформатора фази А типу АОДЦТН 333000/750/330 підстанції «Вінницька-750» з метою визначення температури верхніх шарів масла в залежності від навантаження ($P_{\text{нав.}}$), часу навантаження (T), різниці температур між входом і виходом охолоджувача (Δt), температури повітря ($t_{\text{пов.}}$). З метою зменшення інформаційного навантаження на оперативний персонал, пропонуємо замість різниці температур між входом і виходом i -го охолоджувача враховувати його коефіцієнт залишкового ресурсу ($k_{\text{рес. } i, j}$), який визначається за виразом (1) і змінюється в процесі експлуатації від 1 до 0 в. о.

$$k_{\text{рес. } i, j} = \Delta t_{\text{пот. } i, j} / \Delta t_{i, j \text{ справ.}} \quad (1)$$

де $\Delta t_{\text{пот. } i, j}$ — поточне значення різниці температур для j -го режиму i -го охолоджувача; $\Delta t_{\text{справ. } i, j}$ — значення різниці температур справного i -го охолоджувача трансформатора для j -го режиму.

Замість коефіцієнта залишкового ресурсу кожного охолоджувача пропонуємо використовувати загальний коефіцієнт залишкового ресурсу всіх охолоджувачів:

$$k_{\text{рес. заг. } j} = \sum_{i=1}^n \lambda k_{\text{рес. } i, j} \quad (2)$$

де $\lambda = 1/8 = 0,125$ — коефіцієнт, який враховує вплив кожного охолоджувача окремо.

Вважаємо, що погіршення стану одного охолоджувача на стан іншого не впливає.

Фрагмент результатів спостережень наведений в табл. 1 (повна вибірка містить $N = 2457$ спостережень).

Під час експлуатації є можливість контролювати температуру зовнішніх шарів масла ($t_{\text{верх. ш. } j}$) за допомогою штатного термометра або іншого термометра з виходом на мікроконтролер постійного спостереження, а з нього на АРМ диспетчера підстанції. Для отримання залежності

$$t_{\text{верх. ш. } j} = f(P_{\text{нав. } j}, T_j, t_{\text{пов. } j}, k_{\text{рес. заг. } j}) \quad (3)$$

використаємо математичний апарат нечіткого моделювання.

Результати спостережень за зміною температур в процесі експлуатації

$P_{\text{нав},j}$, МВт	T_j , годин	$t_{\text{пов},j}$, °С	$\Delta t_{\text{пот. } i,j}$, °С	$\Delta t_{i,j \text{ справ.}}$, °С	$k_{\text{рес. заг. } j}$, в. о.	$t_{\text{верх ш } j}$, °С
121	4	13	7,67	8,67	0,89	52
85	4	15	7,14	7,14	1	42
125	4	17	9,69	9,69	1	57

Для досліджень та аналізу результатів спостережень за впливом стану охолоджувачів на температуру верхніх шарів масла використовуємо (див. табл. 1) NARX (Nonlinear AutoRegressive eXogenous) нелінійну авторегресійну модель з зовнішнім входом. Вона встановлює нечітке перетворення між попередніми, змінюваними значеннями таких аргументів, як усереднене навантаження трансформатора ($P_{\text{нав},j}$) за час роботи трансформатора (T_j) з цим навантаженням, температура повітря ($t_{\text{пов},j}$), коефіцієнт залишкового ресурсу охолоджувачів ($k_{\text{рес. заг. } j}$) рівняння (2) і прогнозованим, також змінюваним в процесі експлуатації, значенням ($t_{\text{верх.ш.}j}$) функції $f(P_{\text{нав},j}, T_j, t_{\text{пов},j}, k_{\text{рес. заг. } j})$.

Посилки правил [3, 5] представлені лінгвістичними змінними, які описуються нечіткими термами.

Для вхідної змінної $P_{\text{нав},j}$ — навантаження трансформатора це: терм «мале» навантаження — менше 40 % від номінального, терм «середнє» навантаження — від 40 % до 75 % і «велике» — більше 75 %.

Для вхідної змінної T_j — час це: терм «малий» — менше 0,1 години, терм «середній» — від 0,1 години до 1 години, терм «великий» — понад 1 годину.

Для вхідної змінної $t_{\text{пов},j}$ — температура повітря це: терм «низька» — менше -5 °С, терм «близька до нуля» — від -5 °С до $+5$ °С і терм «велика» — більше $+5$ °С.

Для вхідної змінної коефіцієнта залишкового ресурсу ($k_{\text{рес. заг. } j}$) це: терм «малий» — менше 0,3 в. о., терм «середній» — від 0,3 в. о. до 0,6 в. о. і терм «великий» — більше 0,6 в. о.

NARX-модель охолоджувача містить базу з 72 правил. Фрагмент бази правил має такий вигляд:

$$\left. \begin{array}{l}
 \dots \\
 \text{ЯКЩО } P_{\text{нав.}(r-1)} \in \text{«середнє» ТА } T_{r-1} \in \text{«середній» ТА } t_{\text{пов.}(r-1)} \in \text{«висока»} \\
 \text{ТА } k_{\text{рес. заг.}(r-1)} \in \text{«малий» ТОДІ } t_{\text{верх.ш.}(r-1)} = \sum_{i=1}^n a_{(r-1),i} \cdot \prod_{j=1}^m x_{(r-1),j}^{\alpha_{(r-1),j,i}} + c_{r-1}; \\
 \text{ЯКЩО } P_{\text{нав.}(r)} \in \text{«середнє» ТА } T_r \in \text{«великий» ТА } t_{\text{пов.}(r)} \in \text{«висока» ТА} \\
 k_{\text{рес. заг.}(r)} \in \text{«малий» ТОДІ } t_{\text{верх.ш.}(r)} = \sum_{i=1}^n a_{(r),i} \cdot \prod_{j=1}^m x_{(r),j}^{\alpha_{(r),j,i}} + c_r; \\
 \text{ЯКЩО } P_{\text{нав.}(r+1)} \in \text{«середнє» ТА } T_{r+1} \in \text{«малий» ТА } t_{\text{пов.}(r+1)} \in \text{«висока» ТА} \\
 k_{\text{рес.}(r+1)} \in \text{«малий» ТОДІ } t_{\text{верх.ш.}(r+1)} = \sum_{i=1}^n a_{(r+1),i} \cdot \prod_{j=1}^m x_{(r+1),j}^{\alpha_{(r+1),j,i}} + c_{r+1} \prod_{j=1}^m x_{(r+1),j}^0; \\
 \dots,
 \end{array} \right\} \quad (4)$$

де $\dots, r-1, r, r+1$ — номери правил, які відповідають умовам роботи СОСТ; i — номер доданка в поліноміальному рівнянні; n — кількість доданків; j — номер множника у добутку контрольованих параметрів для кожного з доданків поліноміального рівняння; a — коефіцієнт перед кожним з добутків; c — вільний член поліноміального рівняння; α — степінь кожного з аргументів; x — контрольовані параметри ($x_1 = P_{\text{нав.}}$, $x_2 = T$, $x_3 = t_{\text{пов.}}$, $x_4 = k_{\text{рес. заг.}}$, $m = 4$ — кількість контрольованих параметрів).

Вихід моделі знаходиться як зважена сума висновків бази правил [3, 5], наприклад, для k -х умов роботи СОСТ

$$t_{\text{верх.ш.}k} = \sum_{g=1}^{72} \omega_g \left(\sum_{i=1}^n a_{g,i} \cdot \prod_{j=1}^m x_{k,j}^{\alpha_{k,j,i}} + c_g \prod_{j=1}^m x_{k,j}^0 \right), \quad (5)$$

де $0 \leq \omega_g \leq 1$ — вага кожного g -го правила, від якої залежить відповідність розрахункового прогнозованого значення температури верхніх шарів масла реальному значенню температури за тих самих значень $P_{\text{нав},k}, T_k, t_{\text{пов},k}, k_{\text{рес.заг},k}$

$$\omega_k = \frac{\mu_{P_{\text{нав},k}}(P_{\text{нав},k}) \cdot \mu_{T,k}(T_k) \cdot \mu_{t_{\text{пов},k}}(t_{\text{пов},k}) \cdot \mu_{k_{\text{рес.заг},k}}(k_{\text{рес.заг},k})}{\sum_{g=1}^{72} \mu_{P_{\text{нав},g}}(P_{\text{нав},g}) \cdot \mu_{T,g}(T_g) \cdot \mu_{t_{\text{пов},g}}(t_{\text{пов},g}) \cdot \mu_{k_{\text{рес.заг},g}}(k_{\text{рес.заг},g})}, \quad k = \overline{1, g}, \quad (6)$$

де $\mu_{P_{\text{нав},k}}(P_{\text{нав},k}), \mu_{T,k}(T_k), \mu_{t_{\text{пов},k}}(t_{\text{пов},k}), \mu_k(P_k)$ — значення функцій належності вхідних параметрів до відповідних (за умовами правил) множин; $P_{\text{нав},k} \in P_{\text{нав. «середнє»}$ і $T_k \in T_{\text{«великий»}}$ і $t_{\text{пов},k} \in t_{\text{пов. «висока»}$ і $k_{\text{рес.заг},k} \in k_{\text{рес.заг. «малій»}$ і т. д., бо якщо одна з цих умов не виконується, то відповідне (наприклад, k -те) правило не буде враховуватись у виході моделі; k, g — номери правил. Загальна, не оптимізована кількість правил — 72. Терми, які відповідають лінгвістичним змінним, задаємо у вигляді гаусових функцій належності.

Гаусова функція належності [3—5] є добре відомою в теорії ймовірностей функція щільності нормального розподілу за умови, що $\sqrt{2\pi}\sigma = 1$, і яка в нашому випадку задається аналітично таким виразом:

$$\mu_k(x, \sigma_k, u_k) = \exp\left[-(x - u_k)^2 / (2\sigma_k^2)\right]. \quad (7)$$

Тут σ_k та u_k — числові параметри; σ_k^2 — в теорії ймовірностей називається дисперсією розподілу, а u — математичним очікуванням.

Для адаптації NARX-моделі до реальних параметрів конкретної СОСТ реалізуємо її у вигляді нейронної багат шарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. Використовуючи правила навчання, параметри мережі налаштовуємо так, щоб мінімізувати середньоквадратичну похибку між результатом розрахунку $t_{\text{верх ш}, k}$ і реальним значенням температури верхніх шарів масла (для $v = 1 \div N$, де $N = 2457$):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (t_{\text{верх ш розрах}, v} - t_{\text{верх ш реальне}, v})^2} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Модель СОСТ реалізована у вигляді ANFIS мережі з використанням пакету прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MathLab. З урахуванням ітераційних розрахунків під час обробки результатів спостережень за параметрами СОСТ був визначений вид функцій належності і вектор параметрів функцій належності посилок, фрагмент яких показаний в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри функцій належності термів

Параметр	Терм					
	мала		середня		велика	
Потужність, МВА	$\sigma_{P_{\text{нав},m}} = 14,6$	$u_{P_{\text{нав},m}} = 85$	$\sigma_{P_{\text{нав},c}} = 17,6$	$u_{P_{\text{нав},c}} = 174,4$	$\sigma_{P_{\text{нав},b}} = 16,81$	$u_{P_{\text{нав},b}} = 262$
Час, годин	малій		середній		великий	
	$\sigma_{T_m} = 2,788$	$u_{T_m} = 4,025$	$\sigma_{T_m} = 2,647$	$u_{T_c} = 4,128$	$\sigma_{T_m} = 3,188$	$u_{T_b} = 7,878$
Температура повітря, °С	низька		близька до нульової		висока	
	$\sigma_{t_{\text{пов},n}} = 8,538$	$u_{t_{\text{пов},n}} = 36$	$\sigma_{t_{\text{пов},0}} = 8,531$	$u_{t_{\text{пов},c}} = 17$	$\sigma_{t_{\text{пов},b}} = 8,558$	$u_{t_{\text{пов},b}} = 31,99$
Коефіцієнт залишкового ресурсу, в. о.	малій		середній		великий	
	$\sigma_{k_{\text{рес},m}} = 0,1776$	$u_{k_{\text{рес},n}} = 0,2655$	$\sigma_{k_{\text{рес},c}} = 0,08522$	$u_{k_{\text{рес},c}} = 0,9158$	$\sigma_{k_{\text{рес},b}} = 0,231$	$u_{k_{\text{рес},b}} = 0,858$

Був використаний гібридний алгоритм навчання. Середньоквадратична похибка навчання моделі склала $\approx 0,5$ °С, або 0,8 %.

Під час навчання за даними з журналів багаторічних спостережень були отримані параметри висновків правил, фрагмент яких, у відповідності до (4), показаний в (9):

$$\begin{aligned}
 & \dots \\
 & \text{ЯКЦО «навантаження» = «середнє» ТА «час» = «середній» ТА} \\
 & \text{«температура повітря» = «велика» ТА «коефіцієнт залишкового ресурсу» =} \\
 & = \text{«малий», ТО «температура верхніх шарів» = } -33,8P_{\text{нав.}}k_{\text{рес.заг.}} + \\
 & + 0,1646t_{\text{пов.}}k_{\text{рес.заг.}} + 4,5381k_{\text{рес.заг.}}^2 - 0,8k_{\text{рес.заг.}} - 0,013P_{\text{нав.}}t_{\text{пов.}} + \\
 & + 0,008t_{\text{пов.}}^2 - 0,078t_{\text{пов.}} + 1,083P_{\text{нав.}}1,017 - 0,00105P_{\text{нав.}}^2; \\
 & \text{ЯКЦО «навантаження» = «середнє» ТА «час» = «великий» ТА} \\
 & \text{«температура повітря» = «велика» ТА «коефіцієнт залишкового ресурсу» =} \\
 & = \text{«малий», ТО «температура верхніх шарів» = } -29,8Pk_{\text{рес.заг.}} + \\
 & + 0,11t_{\text{пов.}}k_{\text{рес.заг.}} + 2,81k_{\text{рес.заг.}}^2 - 0,4k_{\text{рес.заг.}} - 0,0198P_{\text{нав.}}t_{\text{пов.}} + \\
 & + 0,007t_{\text{пов.}}^2 - 0,06t_{\text{пов.}} + 1,24P_{\text{нав.}} - 11,92 - 0,0009P_{\text{нав.}}^2; \\
 & \text{ЯКЦО «навантаження» = «середнє» ТА «час» = «малий»} \\
 & \text{ТА «температура повітря» = «велика»} \\
 & \text{ТА «коефіцієнт залишкового ресурсу» = «малий», ТО} \\
 & \text{«температура верхніх шарів» = } -42,5P_{\text{нав.}}k_{\text{рес.заг.}} + \\
 & + 0,121t_{\text{пов.}}k_{\text{рес.заг.}} + 2,963k_{\text{рес.заг.}}^2 - 14,93k_{\text{рес.заг.}} - \\
 & - 0,0123P_{\text{нав.}}t_{\text{пов.}} + 0,0046t_{\text{пов.}}^2 - 0,0924t_{\text{пов.}} + \\
 & + 0,976P_{\text{нав.}} - 0,262 - 0,000745P_{\text{нав.}}^2_{(k+1)}; \\
 & \dots
 \end{aligned} \tag{9}$$

Дослідження збільшення навантажувальної здатності трансформатора

Розглянемо випадок, коли для однофазного автотрансформатора підстанції «Вінницька-750» типу АОДЦТН-333000/750000/330000 у відповідності до добового графіка навантаження заплановано збільшити потужність навантаження до $P_{\text{нав.}} = 214$ МВА і працювати з такою потужністю протягом $T = 3$ години, а в цей час температура повітря на вулиці $t_{\text{пов.}} = 36$ °С і забруднення поверхонь охолоджувачів відповідає коефіцієнту залишкового ресурсу охолоджувачів $k_{\text{рес.заг.}} = 0,355$ в. о. Тоді прогнозована температура верхніх шарів масла у відповідності до (9) становитиме $t_{\text{верх ш}} = 80$ °С, що перевищує максимальне нормативне значення 75 °С і вимагатиме зменшення навантаження з метою зменшення температури. Тому потрібно почистити охолоджувачі. Після очистки $k_{\text{рес.}} = 1$ в. о., тоді для $P_{\text{нав.}} = 214$ МВА; $T = 3$ години, $t_{\text{пов.}} = 36$ °С — температура верхніх шарів масла становитиме $t_{\text{верх ш}} = 65$ °С. За цих же умов є можливість збільшити навантаження трансформатора на 36 % — до 333 МВА (номінальне навантаження). При цьому температура зросте лише до $t_{\text{верх ш}} = 70$ °С, що не перевищує нормованих значень.

За інших умов, наприклад, якщо $T = 8$ годин; $k_{\text{рес.заг.}} = 0,355$; $P_{\text{нав.}} = 220$ МВА; $t_{\text{пов.}} = 32$ °С, то $t_{\text{верх ш}} = 74$ °С; а зі зростанням $k_{\text{рес.заг.}}$ до 1 в. о., температура зменшується до $t_{\text{верх ш}} = 59$ °С, а це дає можливість збільшити навантаження до 333 МВА ($t_{\text{верх ш}} = 71$ °С), а саме на 34 %.

Якщо $T = 0,5$ годин; $k_{\text{рес.заг.}} = 0,355$; $P_{\text{нав.}} = 270$ МВА; $t_{\text{пов.}} = 36$ °С, то $t_{\text{верх ш}} = 74$ °С, а для $k_{\text{рес.}} = 1$ — $t_{\text{верх ш}} = 41$ °С, що дозволяє збільшити навантаження до 333 МВА (на 19 %) для $t_{\text{верх ш}} = 47$ °С.

Висновок

Використання методів нейро-нечіткого моделювання дозволяє прогнозувати навантажувальну здатність силових трансформаторів і автотрансформаторів, оцінювати стан системи охолодження та пропонувати оперативному персоналу заходи, щодо зміни величини завантаження трансформатора, а експлуатаційному персоналу обґрунтовано визначати терміни очистки охолоджувачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизация управления энергообъединениями / [Гончуков В., Горнштейн В. М., Крумм Л., Савалов С.]. — М. : Энергия, 1979. — 432 с.
2. Алексеев Б. А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии / Борис Алексеевич Алексеев. — М. : НТФ «Энергопрогресс», 2010. — 88 с. — (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 1(133)).
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Александр Васильевич Леоненков. — Санкт-Петербург: «БХВ-Петербург», 2004. — 736 с. — ISBN 5-94157-087-2.
4. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] / Сергей Дмитриевич Штовба. — Режим доступа : http://www.nnsru.ru/Matlab_RU/fuzzylogic/book1/4_2.asp.htm [7.10.2008].
5. Применение нечёткой нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом для оценки состояния электрооборудования / [О. Н. Агамалов, Н. В. Костерев, Н. П. Лукаш и др.] // Технічна електродинаміка. — 2004. — № 2. — С. 49—58.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем

Стаття надійшла до редакції 23.02.11

Рекомендована до друку 21.03.11

Рубаненко Олександр Євгенійович — доцент, **Казмирук Олег Іванович** — асистент.

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця