

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

**Бардик Є.І., к.т.н., доц., Коваль Я.С., аспірант, Цупра Е.В., магістрант**  
*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** В процесі експлуатації дуже важливо визначити не тільки технічний стан електрообладнання (тобто знати які характеристики має електрообладнання в даний момент часу), але й передбачити технічний стан і залишковий ресурс в майбутній відрізок часу. Зазвичай визначення цих характеристик в електрообладнанні виконують в основному при продовженні термінів експлуатації за межі нормативного терміну, а також для планування контролю технічного стану з метою безпечної його експлуатації і визначення ефективної стратегії управління технічним станом шляхом своєчасного переведення на резерв, виводу в ремонт або переходу на нові робочі режими [1, 4, 5].

**Мета роботи.** Задача прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу може бути вирішена методами екстраполяції і класифікації. Методи класифікації широко використовуються в діагностуванні електрообладнання, але вимагають великого об'єму статистичних даних по експлуатації і проведення спеціальних експериментів, а успіх визначається вдалим вибором діагностичних параметрів. В якості математичного апарату використовують статистичну класифікацію яка ґрунтується на теорії розпізнавання образів. Методи екстраполяції реалізують принципи переносу на майбутнє тенденцій минулого використання математичного апарату аналітичного і ймовірнісного моделювання діагностичних ознак [2, 3, 5].

**Матеріали й результати досліджень.** Дуже часто при прогнозуванні ресурсу електрообладнання використовують підходи, за яких не враховують ймовірнісні характеристики процесів деградації параметрів технічного стану і залишкового ресурсу безпечної експлуатації ґрунтуються на визначенні об'єктивних закономірностей розвитку дефектів і пошкоджень, статистичної обробки даних, екстраполяції трендів до гранично допустимих значень і на ймовірнісній оцінці значень показників.

З відомих на сьогоднішній день фактографічних методів для прогнозування технічного стану і залишкового ресурсу електрообладнання, що базуються на даних про об'єкт прогнозування та його минулий розвиток в основному використовуються дві групи [2, 3, 5]:

а) статистичні, які базуються на статистичній обробці даних про відмови і ресурси аналогів, коли по параметрам технічного стану ретроспективних даних немає (не використовується стратегія обслуговування за технічним станом);

б) екстраполяційні, які ґрунтуються на аналізі тренду параметрів технічного стану електрообладнання.

При використанні екстраполяційних методів, які потребують наявності ретроспективних даних по параметрам технічного стану ( $t_i, x_i, i=1, \dots, N$ ), визначення залишкового ресурсу полягає в розрахунку терміну на протязі якого електрообладнання за деяким параметром технічного стану  $x_i$  з моменту останньої діагностики буде знаходитись в працездатному стані. Метою прогнозування технічного стану є побудова адекватної прогнозної моделі і визначення терміну досягнення вибраним параметром технічного стану граничного значення. Екстраполяційні моделі, які використовуються в існуючих експертних системах ґрунтуються на базі регресійного аналізу і значення параметра технічного стану  $x(t)$  в них визначається з виразу [2, 3]

$$x(t) = F(t, a, b, \dots) + \varepsilon(t),$$

де  $F(t, a, b, \dots)$  - вибрана функція з невідомими параметрами  $a, b, \dots$ ;  $\varepsilon(t)$  - нормальний стаціонарний процес з нульовим середнім, який описує випадкову похибку;  $\varepsilon(t) \rightarrow N(0, \sigma^2)$ .

Якщо відомі дані діагностування ( $t_i, x_i, i=1, \dots, N$ ) за методами найменших квадратів оцінюються коефіцієнти рівняння тренду:

$$\dot{x}(t) = F(t, a', b', \dots),$$

Функції  $F$ , які відтворюють тенденцію динаміки змінювання параметра технічного стану  $x(t)$  орієнтуються на відомі основні лінії тренду:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= a' + b' \cdot t; \quad \dot{x}(t) = a' + b' \cdot t + c' \cdot t^2 \\ \dot{x}(t) &= \exp(a' + b' \cdot t); \quad \dot{x}(t) = a' + b'/t; \\ \dot{x}(t) &= a' + b' \cdot \ln(t). \end{aligned}$$

Вибір прийнятої моделі тренда проводять шляхом оцінювання дисперсійної похибки  $S^2$  по кожній залежності

$$S^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \dot{x}_i)^2}{N - p},$$

де  $x_i$  - розрахункове за вибраною моделлю значення параметра технічного стану в момент часу  $t_i$ ;  $p$  - число параметрів в моделі. Вибирають модель  $\dot{x}(t)$ , яка має мінімальне значення  $S^2$ .

Оцінка дисперсії  $D_k$  ( $k=1, \dots, p$ ) для коефіцієнтів  $d_k$  рівняння регресії дозволяє визначити для  $x_k$  довірчі інтервали:  $d_k - t_\gamma \cdot \sqrt{D_k}, x_k - t_\gamma \cdot \sqrt{D_k}$ , де  $t_\gamma$  - квантиль

нормованого нормального закону (або розподілу Ст'юдента), який залежить від довірчої імовірності  $\gamma$ .

Гарантовані оцінки коефіцієнтів вибирають такими:  $d_m^k = d_k + t_\gamma \cdot \sqrt{D_k}$ , якщо параметр збільшується, і  $d_m^k = d_k - t_\gamma \cdot \sqrt{D_k}$ , якщо параметр зменшується. Очікуваний залишковий ресурс визначається шляхом розв'язання рівняння

$$\dot{x}(t) = x_{\text{гр}} \rightarrow t_{\text{гр}}. \quad (1)$$

Тоді очікуваний залишковий ресурс дорівнює:

$$t_{\text{зр}} = t_{\text{гр}} - t_N, \quad (2)$$

де  $x_{\text{гр}}$  – граничне значення параметра;  $t_N$  – термін останньої діагностики.

Гарантований залишковий ресурс  $t'_{\text{зр}}$  можна визначити з (1), якщо в рівняння регресії  $\dot{x}(t)$  підставити гарантовані оцінки коефіцієнтів  $d_m^k$ .

Середня швидкість змінювання параметра технічного стану при цьому визначається з виразу:

$$\gamma_{\text{сер}} = \frac{|x_N - x_0|}{t_N - t_0}, \quad (3)$$

де  $t_0$  – термін початку контрольних вимірів;  $x_N = x(t_N)$ ;  $x_0 = x(t_0)$

Розрахунки за вищезгаданим алгоритмом визначення залишкового ресурсу електрообладнання дозволяють планувати проведення технічного обслуговування і ремонтів таким чином, при якому можна продовжити наявний строк експлуатації електрообладнання. Особливо це стосується основного силового і комутаційного електрообладнання електростанцій, підстанцій і електричних мереж, яке відпрацювало свій нормативний строк і реальний технічний стан якого та можливість продовження строку служби багато в чому залежить не тільки від фактичного терміну експлуатації, а й від кількості експлуатаційних факторів (загальної кількості пусків і зупинок, їх частоти, кількості підвищених робочих температур, перевантажень, високого рівня механічних вібрацій, недостатнього контролю і якості технічного обслуговування і других причин).

За результатами оціни технічного стану визначають наявність і місця знаходження можливого дефекту та розробляють відповідні міри щодо пом'якшення та призупинки процесів старіння, які повинні реалізовуватися в рамках ТО і ремонтах. Про існуючих на сьогоднішній день підходах, комплексна оцінка поточного технічного стану електрообладнання не завжди виконується або

характеризується суб'єктивним порівнянням окремих параметрів за даними поточних і капітальних ремонтів.

Для більшості одиниць електрообладнання електростанцій, підстанцій і електричних мереж здійснюється постійний контроль, проводяться вимірювання багатьох параметрів, на основі яких виконуються відповідні ремонти і відновлення електрообладнання, передбачається також перевірка відповідності значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації. При цьому дуже часто не виконують аналіз динаміки змінювання невідновлюваних параметрів старіння, які характеризують незворотні деградаційні змінювання, без яких неможливо достеменно визначити ступінь старіння і залишковий ресурс.

В рамках підходу, який ґрунтується на принципах «безпечної експлуатації зношеного електрообладнання за технічним станом», коли оцінка стану електрообладнання здійснюється за параметрами технічного стану, яка забезпечує його надійну і безпечну експлуатацію, такий підхід є прийнятним.

Але у випадку коли, оцінка технічного стану здійснюється для визначення залишкового ресурсу або продовження строку служби в якості параметрів необхідно приймати ті фізичні параметри, змінювання яких може привести в непрацездатний стан або граничний стан внаслідок накопичення незворотніх деградаційних змінювань, пов'язаних зі старінням даного електрообладнання. Згідно з [4] ці параметри називають визначальними. Для кожного виду електрообладнання вибір визначальних параметрів повинен здійснюватись виходячи з фізичних властивостей і аналізу оперативної діагностики, статистики змінювань у часі.

В процесі оцінки технічного стану електрообладнання важливо також знати не тільки чи справне або не справне електрообладнання, але й ступінь його справного стану для того, щоб зробити висновок щодо допустимості і можливих термінах експлуатації. У відповідності з [4] по кожному визначальному параметру можна ввести коефіцієнт відносної оцінки технічного стану даного електрообладнання:

$$K_i = 1 - \frac{x_{0i} - x_{vi}}{x_{0i} - x_{гри}}$$

де  $x_{0i}$ ,  $x_{vi}$ ,  $x_{гри}$  – початкове, виміряне, і граничне значення і-го визначального параметра.

Коефіцієнт  $K_i$  змінюється і по мірі старіння обладнання він знижується від 1 до 0. При цьому встановлюють у відповідності зі значенням  $K_i$  градації технічного стану електрообладнання : «відмінний», «добре», «задовільний», «незадовільний». Загальна оцінка технічного стану електрообладнання при цьому визначається методом «слабкої ланки», тобто загальний технічний стан можна визначити значенням лінійного коефіцієнта  $K_i$  одного з визначальних параметрів.

Процес старіння електрообладнання визначається шляхом змінювання в залежності від часу визначальних параметрів і виявлення домінуючого визначального параметра, швидкість  $\gamma_{\text{сер}}$  змінювання якого максимальна.

На рис. 1 представлені типові лінії трендів параметрів технічного стану силових трансформаторів однієї з електростанцій України, визначені на основі моніторингу фізико-хімічних характеристик трансформаторної олії та опору ізоляції обмоток трансформатора ТДТН - 63000/110 (Упробтін – пробивна напруга;  $\text{tg}\delta_m$  – тангенс кута діелектричних втрат; W – вологість масла;  $T_{\text{всп}}$  – температура спалаху, КОН – кислотне число;  $R_{\text{вн}}$  – опір ізоляції обмотки високої напруги). Аналогічні лінії трендів визначаються з урахуванням моніторингу інших характеристик, наприклад, концентрацій газів, визначених за результатами ХАРГ.

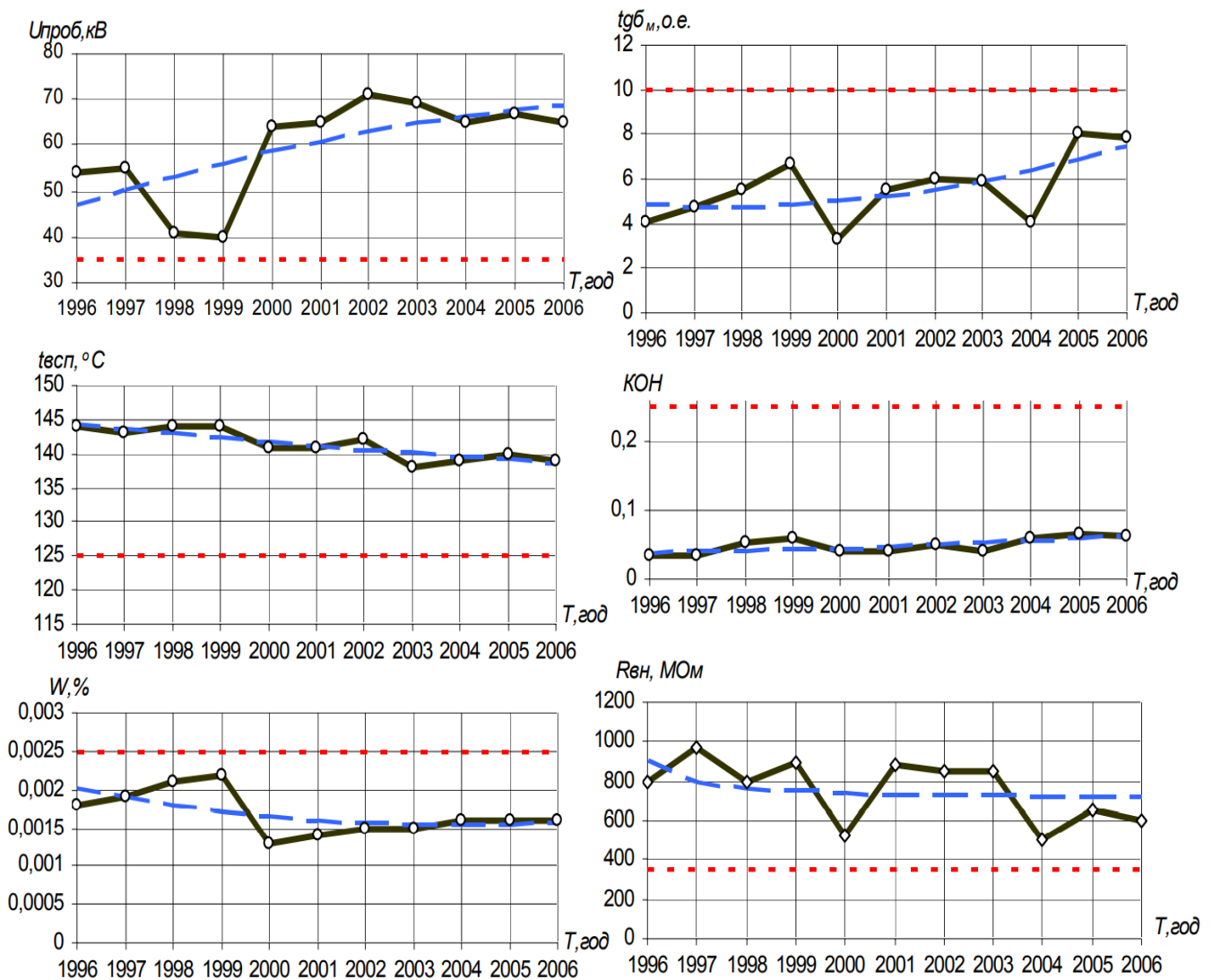


Рисунок 1 – Лінії трендів (----) параметрів технічного стану силового трансформатора, визначені на основі моніторингу фізико-технічних характеристик трансформаторного масла

**Висновки.** На основі вищеописаних алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу і загальної оцінки залишкового ресурсу і загальної оцінки технічного стану електрообладнання по методу «слабкої ланки» розроблено відповідне програмне забезпечення з допомогою на підставі вимірювань, виконаних на працюючому обладнанні, а також при проведенні поточних та капітальних ремонтів визначається динаміка визначальних параметрів і виявлення механізмів старіння, а також оцінка реального технічного стану за значенням коефіцієнта  $K_i$  і швидкості  $\gamma_{сер}$  змінювання визначального параметра для окремих параметрів експлуатації. Крім того, на основі вимірювань параметрів технічного стану, розгорнутих в часі розраховуються параметри і вибирається найбільш прийнятна модель тренда і прогнозується майбутнє змінювання, видаються рекомендації щодо частоти і періодичності контролю, визначаються терміни приближення параметрів до граничних значень.

#### Перелік посилань

1. Алексеев Б. Л. Контроль состояния крупных силовых трансформаторов. –М Издательство НУ «ЕНАС» 2008 - 216 с.
2. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М, Анализ временных рядов и прогнозирование -М. Финансы и статистика, 2001. - 228 с.
3. Калмуцкий В.С. Прогнозирование ресурса деталей машины и элементов конструкций - Кишинев, 1989. – 160 с.
4. Штабский Л.М., Шумков Е.А. Оценка технического состояния показателей надежности и остаточного ресурса электротехнического оборудования АЭС // Энергетика и электрификация - 2006, Киев
5. Бардик Є.І. Прогнозування змінення ресурсних параметрів високовольтних вимикачів на основі теорії нечітких часових рядів//Гідроенергетика України, випуск 3-4, 2011 р. с.63-66.