

УДК 621.311

**М. В. Костерев, д-р. техн. наук, проф.; Є. І. Бардик, канд. техн. наук, доц.;
Р. В. Вожаков, асп.; М. П. Болотний**

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РОБОТОЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Подано результати нечіткого моделювання для оцінки технічного стану і прогнозування ресурсу роботоздатності силових трансформаторів

Вступ

Силові трансформатори є одними з найвідповідальніших і вартісніших елементів основного електрообладнання сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС), від надійності функціонування яких значною мірою залежить надійність як систем електропостачання споживачів так і складної ЕЕС в цілому. Збільшення частки силових трансформаторів (СТ) з терміном експлуатації, що перевищує 25–30 років, загострює проблему забезпечення контролю, об'єктивної оцінки технічного стану (ТС) і прогнозування ресурсу роботоздатності СТ та розрахунку кількісних показників ризику експлуатації як окремих елементів так і систем електропостачання споживачів.

На сьогоднішній день для найвідповідальніших підвищувальних потужних трансформаторів електростанцій і вузлових підстанцій використовують дорогі системи безперервного контролю і діагностування технічного стану (вартість їх сягає 10 % від вартості СТ). Разом з цим для більшості масляних СТ не великої і середньої потужності для діагностування ТС зазвичай використовують як методи періодичних планових аналізів і випробувань (виявлення виду і характеру можливого дефекту по оперативних даних випробувань і історії життя) так і методи безперервного контролю ТС (сигналізують про можливість виходу з ладу СТ), що потребує створення і використання відповідних систем контролю і діагностування ТС.

Окрім розв'язання задач, пов'язаних з діагностуванням ТС СТ важливою є проблема визначення залишкового ресурсу роботоздатності окремих функціональних елементів СТ, що визначають залишковий ресурс роботоздатності трансформатора в цілому, який визначаються динамікою змінення визначальних невідновлювальних параметрів старіння кожного елемента СТ [1].

Складність задачі оцінки ТС і прогнозування ресурсу роботоздатності визначається періодичністю виконуваних вимірювань і тим, що не завжди існуючі СТ оснащені відповідними системами моніторингу. Крім того критеріальні значення параметрів ТС, що відділяють один стан СТ від іншого часто отримані на основі обмежених статистичних даних та суб'єктивної інформації ремонтного і експлуатаційного персоналу. Тому для розв'язання цих задач необхідна розробка декількох типів математичних моделей на основі апарату теорії нечітких множин [2–4], які становлять основу бази знань відповідних прототипів експертних систем: нечіткі моделі для діагностування ТС СТ (М1); нечіткі моделі для прогнозування ресурсу роботоздатності СТ (М2).

Матеріали дослідження

Система вимірювань і спостережень СТ, що проводиться в плановому порядку по заданому план-графіку з періодичним уточненням дати аналізу для виявлення виду і характеру дефекту зазвичай включає: хроматографічний аналіз розчинених газів (ХАРГ); фізико-хімічний аналіз масла (ФХАМ); визначення діелектричних характеристик твердої ізоляції; визначення опору обмоток постійному струму, втрат неробочого ходу, опору короткого замикання; перевірку коефіцієнта трансформації; тепловізійний контроль; контроль часткових розрядів. При цьому також необхідно враховувати деякі оперативні дані, які можуть бути

отримані з датчиків і контрольно-вимірювальних приладів (наприклад, сила струму, температура різних точок трансформатора, вологовміст в маслі, стан пристроїв РПН, вводи, системи охолодження газіваність в маслі).

Для визначення ТС силового масляного трансформатора на базі результатів окремих випробувань та вимірювань розроблена математична модель М1, яка містить в собі правила нечіткого логічного висновку, терм-множини та функції належності вхідних параметрів до тієї чи іншої лінгвістичної величини. База знань відповідного прототипу експертної системи діагностування технічного стану СТ ґрунтується на ієрархічному представленні і складається із системи вкладених одна в іншу баз знань меншої розмірності. Інтегральна оцінка ТС здійснюється шляхом агрегування висновків щодо виду і характеру дефекту СТ за результатами окремих випробувань і вимірювань з використанням відповідних баз знань.

Розроблена нечітка модель М1 діагностування ТС СТ дозволяє визначати і виявляти такі найважливіші види дефектів: часткові розряди з низькою та високою щільністю енергії; розряди малої та високої потужності; термічні дефекти низької, середньої та високої температури; оцінка стану твердої ізоляції; оцінка механічного стану обмоток; оцінка стану масла і паперово-масляної ізоляції; оцінка стану пристроїв РПН і трансформаторних ввідів. Ієрархічна структурна схема моделі і алгоритм нечіткого логічного виводу про ТС складового масляного трансформатора (рис. 1) докладно описані в [2].

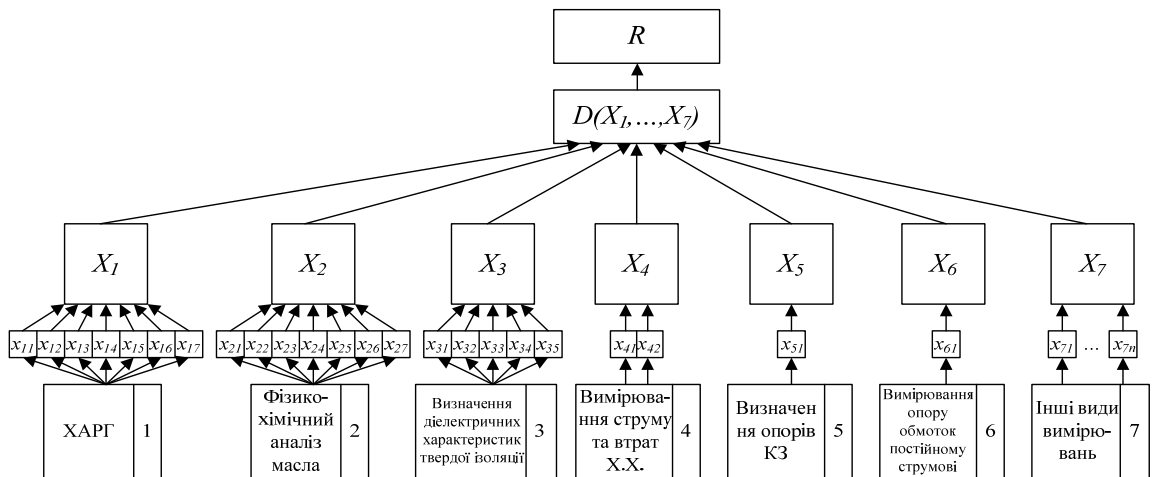


Рис. 1. Ієрархічна структурна схема нечіткого логічного виводу про технічний стан масляного трансформатора

У світовій практиці в енергокомпаніях, а також в енергосистемах України ХАРГ у маслі застосовують як основний вид діагностики за допомогою якого виявляють більшість дефектів і він зараз використовується як базовий метод для оцінювання технічного стану трансформаторів [5]. Існуючі різні методи інтерпретації ХАРГ внаслідок розходження норм і критеріїв оцінки стану трансформаторів часто призводять до різних висновків і жоден з існуючих методів не може бути взятий як універсальний, базовий що спонукає для діагностування ТС за результатами ХАРГ застосовувати одночасно декілька методів [1].

Особливо ефективно для інтерпретації результатів ХАРГ і інших вимірювань та випробувань використання апарата нечіткої логіки, яка дозволяє на основі нечітких критеріїв оцінки об'єктивніше визначити стан трансформаторного обладнання [2–4].

Загальна кількість правил нечіткої бази знань, що відповідає структурній схемі (рис. 1), сягає більш ніж 200 (внаслідок обмеження об'єму статті не наводиться).

В табл. 1 як приклад наведено критерії для визначення характеру дефекту в СТ по відношенням концентрацій характерних газів та терми лінгвістичних змінних відношень концентрації газів.

Лінгвістичні змінні відношень концентрацій пар газів $C_i (i = \overline{1,4})$, що подані в таблиці 1 мають такі терм-множини:

$$C_1 = \{T_H^1, T_C^1, T_B^1\} \rightarrow C_2H_2/C_2H_4, \text{ в. о.}; \quad C_2 = \{T_H^2, T_C^2, T_B^2\} \rightarrow CH_4/H_2, \text{ в. о.};$$

$$C_3 = \{T_H^3, T_C^3, T_B^3\} \rightarrow C_2H_4/C_2H_6, \text{ в. о.}; \quad C_4 = \{T_H^4, T_C^4, T_B^4\} \rightarrow CO_2/CO, \text{ в. о.},$$

де T_H^i, T_C^i, T_B^i – низьке, середнє і високе значення параметрів.

Таблиця 1

Діагностичні критерії і лінгвістичні змінні для визначення характеру дефекту в СТ по відношенням концентрацій

Відношення характерних газів			Лінгвістичні змінні відношень концентрацій			Характер Прогнозованого дефекту	Терм-множина дефектів
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H}{C_2H_6}$	C_1	C_2	C_3		
< 0,1	0,1–1	≤ 1	T_H^8	T_C^2, T_B^2	T_H^3	Нормально	$D_1^{(3)}$
< 0,1	< 0,1	< 1	T_H^1	T_H^2	T_H^3	ЧР з низькою щільністю енергії	$D_2^{(3)}$
0,1–3	< 0,1	≤ 1	T_C^1	T_H^2	T_H^3	ЧР з високою щільністю енергії	$D_3^{(3)}$
> 0,1	0,1–1	≥ 1	T_C^1, T_B^1	T_C^2, T_B^2	T_C^3, T_B^3	Розряди малої потужності	$D_4^{(3)}$
0,1–3	0,1–1	≥ 3	T_C^1	T_C^2, T_B^2	T_B^3	Розряди великої потужності	$D_5^{(3)}$
< 0,1	0,1–1	1–3	T_H^1	T_C^2, T_B^2	T_C^3	Термічний дефект низької температури (< 150 °С)	$D_6^{(3)}$
< 0,1	≥ 1	≤ 1	T_H^1	T_B^2	T_H^3	Термічний дефект у діапазоні низьких температур (150–300 °С)	$D_7^{(3)}$
< 0,1	≥ 1	1–3	T_H	T_B^2	T_C^3	Термічний дефект у діапазоні середніх температур (300–700 °С)	$D_8^{(3)}$
< 0,1	≥ 1	≥ 3	T_H^1	T_B^2	T_B^3	Термічний дефект високої температури (> 700 °С)	$D_9^{(3)}$

Функції належності терм-множин лінгвістичних змінних C_i показано на рис. 2а–г.

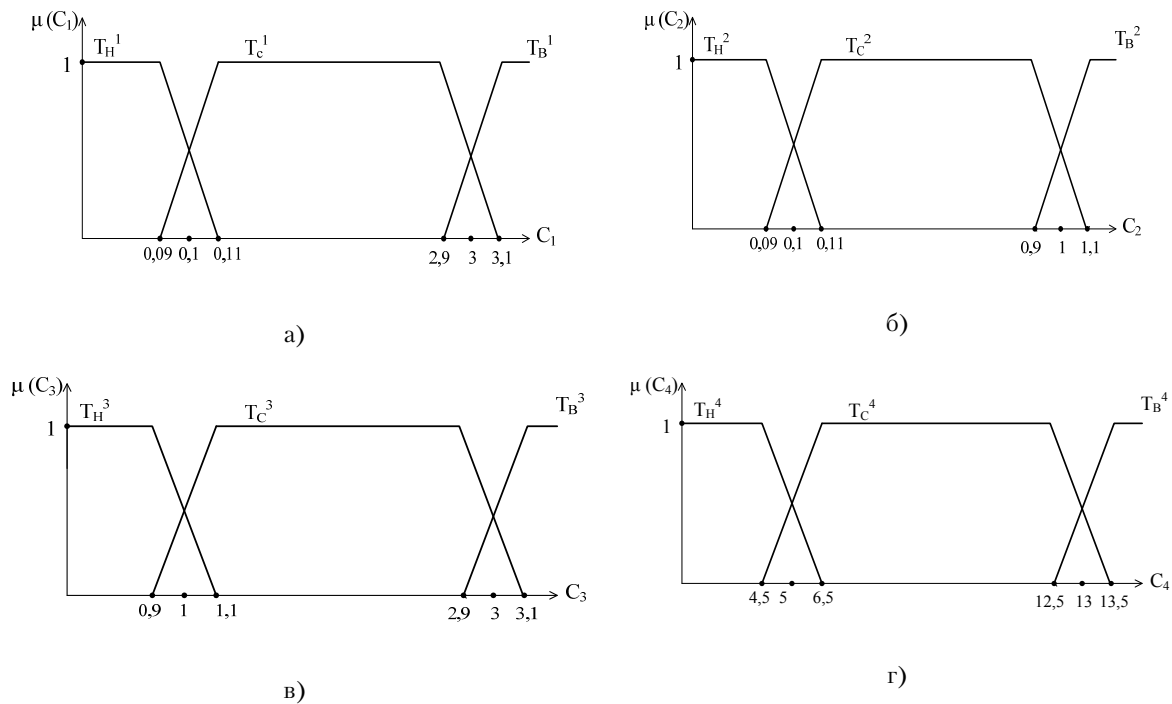


Рис. 2. Функції належності для терм-множин лінгвістичних змінних $C_i (i = \overline{1,4})$

Нижче наведено фрагмент бази знань, що відповідає визначенню характеру дефекту, який розвивається в трансформаторі, побудованого у відповідності до критеріїв для визначення ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 2

характеру дефекту в СТ по відношенням концентрацій характерних газів.

$$\text{IF}(C_1 = T_H^1)\text{AND}(C_2 = T_C^2)\text{AND}(C_3 = T_H^3), \text{ THEN } D = D_1^{(3)};$$

$$\text{IF}(C_1 = T_H^1)\text{AND}(C_2 = T_H^2)\text{AND}(C_3 = T_H^3), \text{ THEN } D = D_2^{(3)};$$

$$\text{IF}(C_1 = T_C^1)\text{AND}(C_2 = T_H^2)\text{AND}(C_3 = T_H^3), \text{ THEN } D = D_3^{(3)};$$

.....

$$\text{IF}(C_1 = T_H^1)\text{AND}(C_2 = T_B^2)\text{AND}(C_3 = T_C^3), \text{ THEN } D = D_1^{(3)};$$

$$\text{IF}(C_1 = T_H^1)\text{AND}(C_2 = T_B^2)(C_3 = T_B^3), \text{ THEN } D = D_2^{(3)}.$$

За вихідними даними результатів ХАРГ (табл. 2) подано скорочений протокол роботи програми (табл. 3).

Таблиця 2

Вихідні дані результатів ХАРГ

Газ	Водень (H ₂)	Метан (CH ₄)	Ацетилен (C ₂ H ₂)	Етилен (C ₂ H ₄)	Етан (C ₂ H ₆)	Оксид вуглецю (CO)	Диоксид вуглецю (CO ₂)
A, % об.	0,004	0,084	—	0,02	0,011	0,05	0,48

Таблиця 3

Результати діагностування технічного стану СТ за результатами ХАРГ

№	Методика	Висновки
1	Критерій ключових (основних) газів	Основний газ — метан CH ₄ . Можливий дефект термічного характеру. Ймовірно нагрівання масла і паперово-масляної ізоляції в діапазоні 400–600 °С або з виникненням розрядів. Ступінь належності = 1
2	Критерій граничних концентрацій газів, розчинених в маслі	Термічний дефект в діапазоні середніх температур (300–700 °С). Можливий місцевий перегрів сердечника через концентрації потоку. Зростання температури «гарячої точки». Ступінь належності = 0,981
3	Роджерса	Циркуючі струми в обмотках. Ступінь належності = 1
4	Критерій відношення концентрацій пар газів	Прогнозується перегрів масла. Тверда ізоляція не ушкоджена. Ступінь належності = 1
5	Типові нормограми	Основний газ — CH ₄ . Ймовірний дефект: дефекти термічного характеру в діапазоні середніх температур

В залежності від наявності поточної інформації щодо змінення визначальних ресурсних параметрів функціональних елементів СТ або статистичної інформації про пошкодження окремих елементів і СТ розроблено два типи моделей М2 для прогнозування ресурсу роботоздатності [6].

Для випадку, коли здійснюється безперервний або періодичний моніторинг визначальних параметрів ТС і окремих елементів СТ, розроблені математичні моделі прогнозування ресурсу їх роботоздатності, які ґрунтуються на використанні теорії нечітких часових рядів і нечіткого регресійного аналізу.

За наявності статистичних даних щодо відмов окремих вузлів СТ даного типу та СТ певного класу напруги або потужності розроблені відповідні математичні моделі та програмне забезпечення, яке дає можливість визначати ймовірність відмови СТ на заданому інтервалі часу і ґрунтуються на використанні як статистичної так і нечіткої інформації, щодо стану об'єкта [7].

Висновки

1. В умовах значного старіння трансформаторного парку України актуальними є питання контролю і об'єктивної оцінки ТС та визначення ресурсу роботоздатності СТ.
2. Розроблені нечіткі моделі діагностування ТС СТ на основі агрегування результатів вимірювань і випробувань та прогнозування вичерпання ресурсу роботоздатності дають можливість обґрунтовано формувати стратегію експлуатації СТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев. — М. : НЦ ЭНАС, 2002. — 216 с.
2. Костерев Н. В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н. В. Костерев, Е. И. Бардик // Технічна електродинаміка. Темат. вип. — «Проблеми сучасної електротехніки». — 2006. — Ч. 3. — С. 39—43.
3. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : — Телеком, 2007. — 288 с.
4. Лежнюк П. Д. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. А. Жук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 1. — С. 43—51.
5. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РД 153-34.0-46.302- 00. — М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2001.
6. Ситников В. Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования а процессе эксплуатации / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // Электричество. — 2007. — № 11. — С. 9—15.
7. Костерев М. В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, В. В. Літвінов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Електротехніка і енергетика. — Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. — Вип. 11 (186). — С. 199—204.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 25.11.11

Костерев Микола Володимирович — професор, **Бардик Євген Іванович** — завідувач кафедри, **Вожяков Роман Вікторович** — аспірант, **Болотний Микола Петрович** — асистент.

Кафедра електричних станцій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ