

УДК 621.314.22.08

В. В. Грабко, д. т. н., проф.;

О. В. Косюк

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ХРОМАТОГРАФІЇ

Розроблено математичну модель із застосуванням теорії нечітких множин для діагностування дефектів, що розвиваються у високовольтних вимірювальних трансформаторах. Діагностування здійснюється за результатами хроматографічного аналізу газів, розчинених у трансформаторному маслі.

Вступ

В теперішній час діагностування дефектів, що розвиваються, високовольтних вимірювальних трансформаторів за результатами хроматографічного аналізу газів, розчинених у трансформаторному маслі, проводиться за методикою, викладеною в [1].

Аналіз газів, які виділяються за наявності дефектів електричної ізоляції, проводиться з метою виявлення їх складу та визначення концентрацій [2].

Хроматографічний аналіз розчинених у трансформаторному маслі газів передбачає визначення концентрацій водню (H_2), метану (CH_4), ацетилену (C_2H_2), етилену (C_2H_4), етану (C_2H_6), оксиду вуглецю (CO), діоксиду вуглецю (CO_2).

Постановка задачі

У відповідності з [3], діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів здійснюється з урахуванням критеріїв діагностування дефектів, що розвиваються в них (критерію ключових газів, критерію швидкості наростання концентрації газів в маслі); експлуатаційних факторів, які впливають на результати аналізу розчинених газів (АРГ), а також дефектів, які виявляються в трансформаторах за допомогою АРГ.

Періодичність АРГ для трансформаторів з дефектами, що розвиваються, визначається динамікою зміни концентрації газів та тривалістю розвивання дефекту.

Під час аналізу складу розчинених у трансформаторному маслі газів для діагностування експлуатаційного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів необхідно враховувати умови їх експлуатації за попередній період часу та фактори, які зумовили зміну цього складу газів.

Граничні значення концентрації газів і відносної швидкості її наростання наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Граничні значення концентрацій розчинених у маслі газів [3]

Обладнання	Концентрація газів, % об'єму						
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Трансформатори напругою 110—500 кВ	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	$\frac{0,05^*}{0,06}$	$\frac{0,6(0,2^*)}{0,8(0,4)}$
Трансформатори напругою 750 кВ	0,003	0,002*	0,001	0,002	0,001	0,05	0,40

Таблиця 2

Граничні значення відносної швидкості наростання концентрації розчинених у маслі газів [3]

Швидкості наростання концентрації газів, % в міс.						
H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
10						

Для CO — в чисельнику наведено значення для трансформаторів із азотним або плівковим за-

хистом трансформаторного масла, в знаменнику — для трансформаторів із вільним диханням; для CO_2 — в чисельнику наведені значення для трансформаторів із вільним диханням для терміну експлуатації до 10 років, в знаменнику — більше 10 років, в дужках наведені ті самі дані трансформаторів із плівковим та азотним захистами трансформаторного масла.

Недоліком викладеної у [3] методики діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів є те, що існує невизначеність діагнозів при значеннях параметрів АРГ, що можуть мати місце, але вони та їх комбінації не враховані нормативними документами.

Основна частина

Для уникнення такої невизначеності у цій роботі пропонується математична модель із застосуванням теорії нечітких множин, яка дозволяє враховувати значення параметрів діагностування, що знаходяться в межах від нульових до граничних значень та різні комбінації їх співвідношень. Для цього, у відповідності з ідеологією застосування теорії нечітких множин [4], проводимо фаззифікацію параметрів, приймаючи лінгвістичні змінні, які відповідають параметрам діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів. Для кожної лінгвістичної змінної вводимо свої терми з відповідними функціями належності (табл. 3).

Таблиця 3

Вхідні параметри моделі та їх лінгвістична оцінка

Параметри	Назва	Діапазони зміни	Терми
A_{H_2}	Концентрація водню H_2	0...0,01 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
V_{H_2}	Відносна швидкість наростання концентрації водню H_2	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
A_{CH_4}	Концентрація метану CH_4	0...0,01 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
V_{CH_4}	Відносна швидкість наростання концентрації метану CH_4	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
$A_{\text{C}_2\text{H}_2}$	Концентрація ацетилену C_2H_2	0...0,001 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
$V_{\text{C}_2\text{H}_2}$	Відносна швидкість наростання концентрації ацетилену C_2H_2	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
$A_{\text{C}_2\text{H}_4}$	Концентрація етилену C_2H_4	0...0,01 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
$V_{\text{C}_2\text{H}_4}$	Відносна швидкість наростання концентрації етилену C_2H_4	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
$A_{\text{C}_2\text{H}_6}$	Концентрація етану C_2H_6	0...0,001 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
$V_{\text{C}_2\text{H}_6}$	Відносна швидкість наростання концентрації етану C_2H_6	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
A_{CO}	Концентрація оксиду вуглецю CO	0...0,06 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
V_{CO}	Відносна швидкість наростання концентрації оксиду вуглецю CO	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)
A_{CO_2}	Концентрація діоксиду вуглецю CO_2	0...0,8 % об'єму	низький (S), середній (M), високий (B)
V_{CO_2}	Відносна швидкість наростання концентрації діоксиду вуглецю CO_2	0...10 % в міс.	низький (S), середній (M), високий (B)

Аналогічно задаємо лінгвістичні змінні для діагнозів та періодичності діагностування із термами та відповідними функціями належності (табл. 4).

Таблиця 4

Вихідний параметр моделі, та його лінгвістична оцінка

Параметри	Назва	Діапазони зміни	Терми
Termin	Час, який залишився до виведення обладнання із експлуатації в ремонт	0...180 днів	дуже низький (VS), низький (S), середній (M), високий (B), дуже високий (VB)

Для термів вхідних параметрів прийняті такі функції належності:

- низький (S), високий (B) — сигмоїдні функції належності;
- середній (M) — функція належності щільності нормального розподілу.

Для термів вихідного параметру прийняті такі функції належності:

- дуже низький (VS), дуже високий (VB) — сигмоїдні функції належності;

— низький (S), середній (M), високий (B) — функція належності щільності нормального розподілу.

Складаємо базу нечітких правил для комбінацій лінгвістичних змінних параметрів діагностування.

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{H_2}) \vee \mu^S(V_{H_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{H_2}) \vee \mu^M(V_{H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{H_2}) \vee \mu^B(V_{H_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{H_2}) \vee \mu^S(V_{H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{H_2}) \vee \mu^M(V_{H_2}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{H_2}) \vee \mu^B(V_{H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{H_2}) \vee \mu^S(V_{H_2}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{H_2}) \vee \mu^M(V_{H_2}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{H_2}) \vee \mu^B(V_{H_2});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CH_4}) \vee \mu^S(V_{CH_4}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CH_4}) \vee \mu^M(V_{CH_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CH_4}) \vee \mu^B(V_{CH_4}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CH_4}) \vee \mu^S(V_{CH_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CH_4}) \vee \mu^M(V_{CH_4}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CH_4}) \vee \mu^B(V_{CH_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CH_4}) \vee \mu^S(V_{CH_4}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CH_4}) \vee \mu^M(V_{CH_4}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CH_4}) \vee \mu^B(V_{CH_4});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_2}) \vee \mu^S(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_2}) \vee \mu^M(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_2}) \vee \mu^B(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_2}) \vee \mu^S(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_2}) \vee \mu^M(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_2}) \vee \mu^B(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_2}) \vee \mu^S(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_2}) \vee \mu^M(V_{C_2H_2}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_2}) \vee \mu^B(V_{C_2H_2});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_4}) \vee \mu^S(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_4}) \vee \mu^M(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_4}) \vee \mu^B(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_4}) \vee \mu^S(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_4}) \vee \mu^M(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_4}) \vee \mu^B(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_4}) \vee \mu^S(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_4}) \vee \mu^M(V_{C_2H_4}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_4}) \vee \mu^B(V_{C_2H_4});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_6}) \vee \mu^S(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_6}) \vee \mu^M(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{C_2H_6}) \vee \mu^B(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_6}) \vee \mu^S(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_6}) \vee \mu^M(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{C_2H_6}) \vee \mu^B(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_6}) \vee \mu^S(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_6}) \vee \mu^M(V_{C_2H_6}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{C_2H_6}) \vee \mu^B(V_{C_2H_6});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO}) \vee \mu^S(V_{CO}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO}) \vee \mu^M(V_{CO}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO}) \vee \mu^B(V_{CO}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO}) \vee \mu^S(V_{CO}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO}) \vee \mu^M(V_{CO}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO}) \vee \mu^B(V_{CO}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO}) \vee \mu^S(V_{CO}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO}) \vee \mu^M(V_{CO}); \\
 \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO}) \vee \mu^B(V_{CO});
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \mu^{VB}(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO_2}) \vee \mu^S(V_{CO_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO_2}) \vee \mu^M(V_{CO_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^S(A_{CO_2}) \vee \mu^B(V_{CO_2}); \\
 \mu^B(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO_2}) \vee \mu^S(V_{CO_2}); \\
 \mu^M(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO_2}) \vee \mu^M(V_{CO_2}); \\
 \mu^S(\text{Termin}) = \mu^M(A_{CO_2}) \vee \mu^B(V_{CO_2});
 \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} \mu^M(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO_2}) \vee \mu^S(V_{CO_2}); \\ \mu^S(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO_2}) \vee \mu^M(V_{CO_2}); \\ \mu^{VS}(\text{Termin}) = \mu^B(A_{CO_2}) \vee \mu^B(V_{CO_2}). \end{cases}$$

За отриманою математичною моделлю в ППП Matlab 6.5 Fuzzy Toolbox [5] проведено моделювання процесів старіння ізоляції за алгоритмом Мамдані.

В результаті отримано графічні залежності, що характеризують процеси старіння ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів.

Як приклад, поверхня нечіткого виводу терміну працездатності високовольтних вимірювальних трансформаторів в залежності від концентрації та швидкості наростання концентрації водню має такий вигляд (рис. 1).

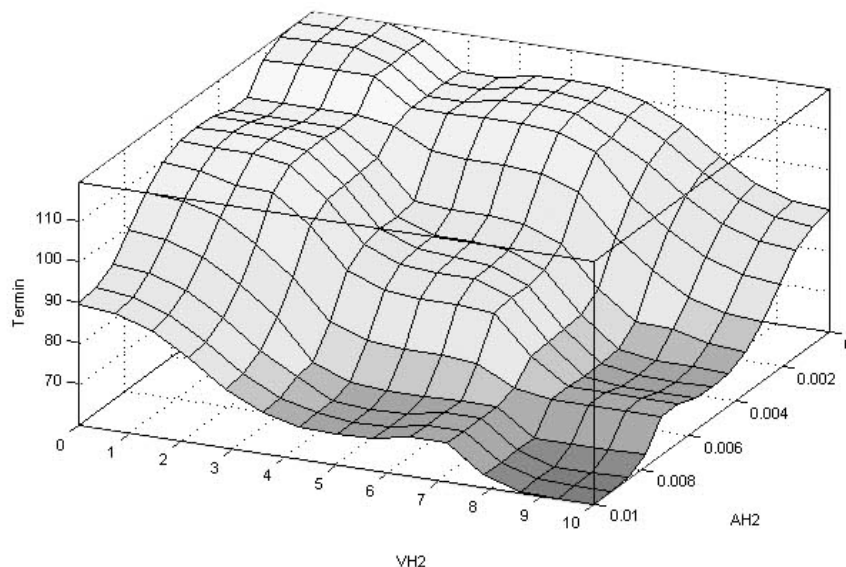


Рис. 1. Ілюстрація терміну працездатності високовольтних вимірювальних трансформаторів в залежності від концентрації та швидкості наростання концентрації водню

Аналогічний вигляд мають поверхні нечіткого виводу терміну працездатності високовольтних вимірювальних трансформаторів за діагностичними параметрами інших газів.

Покажемо як може змінюватись старіння ізоляції високовольтних вимірювальних трансформаторів в залежності від різних змін контрольованих параметрів згідно розробленої математичної моделі.

В таблиці 5 наведено прогнозований термін експлуатації обладнання з різними значеннями та комбінаціями контрольованих параметрів.

Таблиця 5

Термін експлуатації обладнання з різними комбінаціями контрольованих параметрів

Параметри	1	2	3	4	6
A_{H_2} , % об'єму	0,0021	0,0049	0,00647	0,0074	0,00744
V_{H_2} , % в міс.	2,3	4,97	5,98	7,37	7,48
A_{CH_4} , % об'єму	0,0022	0,0023	0,0024	0,00643	0,00747
V_{CH_4} , % в міс.	2,2	2,4	2,49	5,93	7,49
$A_{C_2H_2}$, % об'єму	0,000215	0,000237	0,000248	0,000645	0,000747
$V_{C_2H_2}$, % в міс.	2,15	2,46	2,47	5,95	7,49
$A_{C_2H_4}$, % об'єму	0,00213	0,00237	0,00244	0,00644	0,00744
$V_{C_2H_4}$, % в міс.	2,14	2,48	2,49	5,96	7,42

Параметри	1	2	3	4	6
$A_{C_2H_6}$, % об'єму	0,00121	0,00122	0,00124	0,00295	0,00376
$V_{C_2H_6}$, % в міс.	2,13	2,44	2,47	5,98	7,51
A_{CO} , % об'єму	0,0146	0,0147	0,0148	0,0358	0,0446
V_{CO} , % в міс.	2,17	2,48	2,49	5,99	7,49
A_{CO_2} , % об'єму	0,19	0,193	0,198	0,473	0,61
V_{CO_2} , % в міс.	2,16	2,37	2,45	5,95	7,51
Термін, днів	128	114	90	84,5	52,4

Висновки

З використанням теорії нечітких множин розроблено математичну модель діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів.

На основі розробленої математичної моделі здійснена програмна реалізація запропонованого підходу в середовищі Matlab 6.5 Fuzzy Toolbox, що дозволяє автоматизувати процес діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів, а також підвищити вірогідність їх діагностування і, отже, своєчасно запобігти виникненню аварійних режимів, які б могли призвести до економічних збитків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 128 с.
2. Кутин В. М., Брэйтбурд В. И. Диагностирование электрооборудования электрических систем. Учебное пособие. — К.: УМК ВО, 1991. — 128 с.
3. РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле — Российское акционерное общество энергетики и электрификации РАО «ЕЭС России», Департамент научно-технической политики и развития — 26 с.
4. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 302 с.
5. Леоненков А. В. Нечёткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. Учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 719 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 00.00.07
Рекомендована до друку 00.00.07

Грабо Володимир Віталійович — завідувач кафедри, **Косюк Олександр Володимирович** — асистент.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, Вінницький національний технічний університет