

А.И. НОСИРОВ, базовый докторант (ИПЭ АН РУз)  
Научный руководитель Д.Т. ЮСУПОВ, PhD, с.н.с. (ИПЭ АН РУз)  
г. Ташкент

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАСЛА

Силовые трансформаторы являются одними из основных элементов электроэнергетической системы. Их надёжная работа обеспечивает стабильность всей цепи электроснабжения [1, 2]. Контроль технического состояния трансформатора, как правило, осуществляется на основе традиционных испытаний (электрическая прочность, тангенс  $\delta$ , анализ растворённых газов и другие) [2–3]. Однако эти показатели изменчивы и зависят от множества факторов [3]. В результате становится затруднительным оценить состояние трансформатора в чётко определённых пределах.

Поэтому использование методов нечеткой логики (fuzzy logic) является эффективным подходом при оценке технического состояния силовых трансформаторов [3]. С помощью нечеткой логики учитываются неопределённость, субъективность и степень неполноты исходных параметров, что повышает надёжность оценки технического состояния трансформаторов.

В качестве входных переменных выбраны параметры бумажной изоляции, показатели системы охлаждения, диэлектрические и тепловые характеристики обмоток, эффективность работы магнитопровода и показатели трансформаторного масла. Для функции принадлежности выбраны лингвистические категории «Отлично», «Хорошо», «Удовлетворительно», «Не удовлетворительно» и «Очень плохо» [2]. Они математически моделируются с помощью S-образных, трапециевидных и Z-образных функций.

Общая база правил записывается следующим образом:

$R_i$ : если  $R_i: Agar(x_1 \in A_1^i) \cap (x_2 \in A_2^i) \dots (x_n \in A_n^i)$  то,  $y = B^i$ .

Здесь  $x_j$  – входные параметры,  $A_j^i$  – определённые значения,  $B^i$  – выходная категория.

Нечёткий вывод осуществляется на основе модели Мамдани:

- формируется база правил;

$$\alpha_i = \min \{ \mu_{A_1^i}(x_1), \mu_{A_2^i}(x_2), \dots, \mu_{A_n^i}(x_n) \}.$$

- для выходных величин определяется соответствующая функция принадлежности;

- результаты агрегируются.

#### 1. Дефаззификация

Выходная переменная приводится к чёткому значению с помощью метода центроидов (центра тяжести):

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}.$$

Выходная переменная: состояние\_магнитного\_сердечника

Диапазон: [0, 100]

Функции принадлежности имеют ту же форму, что и в  $TH_{MA}$ .

#### 2. Система нечетких правил

Общий вид 45 правил следующий:

$R_i$ : Если  $(TH_{MA} \in A_1^i) \cap (TH_{SM} \in A_2^i) \cap (TH_{KM} \in A_3^i)$  то,  $C_1 = B^i$

$R_1: (1,1,3) \rightarrow 1$

$R_{14}: (5,4,4) \rightarrow 5$

$R_{38}: (3,3,3) \rightarrow 3$

$\vdots$

$R_{45}: (3,3,3) \rightarrow 3$

#### 3. Процесс нечёткого вывода

##### 3.1. Степень активности правил

Для каждого правила:

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_i}(TH_{MA}), \mu_{B_i}(TH_{SM}), \mu_{C_i}(TH_{KM})).$$

##### 3.2. Формирование функции принадлежности выхода

Каждое правило формирует усечённую (обрезанную) функцию принадлежности для соответствующего выхода:

$$\mu_{D_i}^*(y) = \min(\alpha_i, \mu_{D_i}(y)).$$

##### 3.3. Агрегация

Объединение результатов всех правил:

$$\mu_{out}(y) = \max \sum_{i=1}^{45} \mu_{D_i}^*(y).$$

#### 4. Дефаззификация (метод центроида)

Окончательное значение выхода:

$$y_{output} = \frac{\int_0^{100} y \cdot \mu_{out}(y) dy}{\int_0^{100} \mu_{out}(y) dy}.$$

В качестве основных диагностических параметров в модель были включены: тангенс диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ), электрическая прочность, содержание влаги и кислотное число масла. Изменение этих параметров через базу нечетких правил позволяет оценить техническое состояние транс-форматора по категориям: «Отлично», «Хорошо», «Удовлетворительно», «Не удовлетворительно» и «Очень плохо». Разработанная система на основе механизма нечёткого вывода Мамдани позволила снизить неопределённость входных данных. Результаты показали, что модель формирует более объек-тивные и комплексные выводы по сравнению с традиционными методами оценки. В частности, по сравнению с анализом растворённых газов или мето-дами, основанными на одном параметре, нечеткая система обеспечивает бо-лее надёжную диагностику за счёт интеграции нескольких показателей одно-временно. В ходе практических расчётов установлено, что при приближении значений параметров к критическим пределам модель идентифицирует состо-яние трансформатора как опасную зону, что позволяет своевременно плани-ровать ремонтные мероприятия. Моделирование выполнено в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox (рисунок 1). Модель включает следующие основные компоненты: входные параметры – система охлаждения, бумажная изоляция, магнитопровод и обмотки. База правил: разработано 45 нечетких правил, каждое из которых имеет форму «Если ..., то ...». Механизм вывода: исполь-зован метод Мамдани. Дефаззификация: выходное значение вычисляется по методу центра тяжести (centroid) в диапазоне от 0 до 100 баллов.

Функции принадлежности входных переменных (основных элементов трансформатора) приведены на рисунке 2. Оценка технического состояния основных элементов трансформатора позволила получить комплексную оцен-ку общего технического состояния трансформатора.

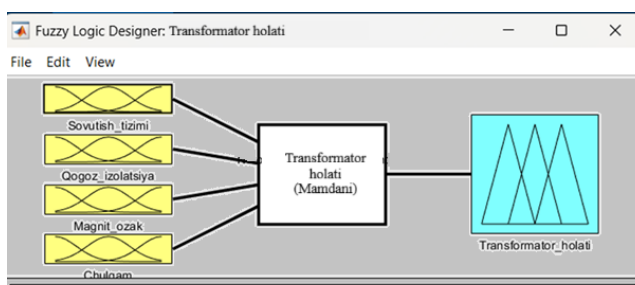


Рис.1. Окно Fuzzy Logic

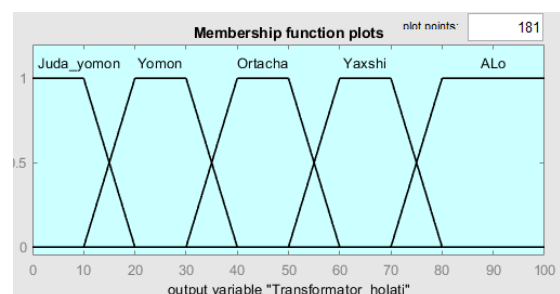


Рис. 2. Функции принадлежности входных переменных для оценки технического состояния транс-форматора

Разработана математическая модель на основе нечеткой логики для оценки технического состояния силовых трансформаторов. Модель функционирует на базе 45 правил и использует механизм нечёткого вывода Мамдани. В качестве основных входных параметров приняты: тангенс диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ), электрическая прочность, содержание влаги и кислотное число масла.

Список литературы:

1. Jiang, B. Geng, Y. Wang, H. et al., Power Transformer Condition Assessment Method Based on Environment and Property Analysis // in Proc. IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, 2017. – pp. 225–228.
2. Levin, V.M. Yahya, A.A. Boyarova, D.A. Predicting the technical condition of the power transformer using fuzzy logic and dissolved gas analysis method // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2022.–Vol. 12, №. 2, – pp. 1139–1146.
3. Yusupov, D.T. Muminov, A.B. Nosirov, A.I. Berdiev U.T. and Kutbidinov, O.M. Development of an algorithm of processes for cleaning power transformer oil in a circulatory way // 15th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications, ICTEA 2024.

Информация об авторах:

Носиров Асрорбек Исмоилжон угли, базовый докторант, ИПЭ АН РУз, 100047, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Академика Яхъё Гуламова, д. 70, asrorbeknosirov6210@gmail.com

Юсупов Дилмурод Турдалиевич, ученый секретарь, PhD с.н.с., ИПЭ АН РУз, 100047, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Академика Яхъё Гуламова, д. 70, dilmurod85@list.ru