

УДК 621.314

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:

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

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

Нечёткий вывод осуществляется на основе модели Мамдани:

- формируется база правил;

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

- для выходных величин определяется соответствующая функция принадлежности;

- результаты агрегируются.

### 1. Дефазификация

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<sub>MA</sub>.

### 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,  $C_1 = B^i$

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

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

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

⋮

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

### 3. Процесс нечёткого вывода

#### 3.1. Степень активности правил

Для каждого правила:

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

#### 3.2. Формирование функции принадлежности выхода

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

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

#### 3.3. Агрегация

Объединение результатов всех правил:

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

### 4. Дефазификация (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 трансформатора 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 объективные и комплексные выводы по сравнению с традиционными методами оценки. В частности, по сравнению с анализом растворённых газов или метадами, основанными на одном параметре, нечеткая система обеспечивает более надёжную диагностику за счёт интеграции нескольких показателей одновременно. В ходе практических расчётов установлено, что при приближении значений параметров к критическим пределам модель идентифицирует состояние трансформатора как опасную зону, что позволяет своевременно планировать 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: использован метод Мамдани. Дефазификация: 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 оценку общего технического состояния трансформатора.

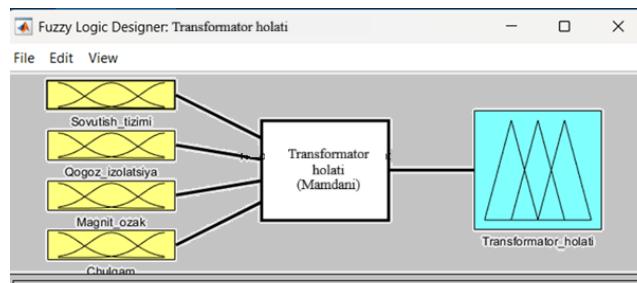


Рис.1. Окно Fuzzy Logic

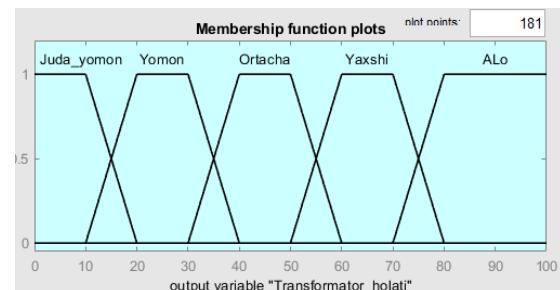


Рис. 2. Функции принадлежности входных переменных для оценки технического состояния трансформатора

Разработана математическая модель на основе нечеткой логики для оценки технического состояния силовых трансформаторов. Модель функционирует на базе 45 правил и использует механизм нечеткого 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 Дилмурад Турдалиевич, ученый секретарь, PhD с.н.с., ИПЭ АН РУз, 100047, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Академика Яхъё Гуламова, д. 70, dilmurod85@list.ru