

## АНАЛИЗ НЕЧЕТКИХ ПРИЗНАКОВ НЕИСПРАВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**В.З. Манусов, Д.И. Коваленко, С.А. Дмитриев, С.А. Ерошенко**

В статье показаны возможности анализа нечеткой и неопределенной информации о неисправности трансформаторного оборудования для повышения достоверности определения эксплуатационных показателей функционирования объектов электрической сети. Такой анализ проводится на основе экспертных оценок и диагностируемых признаков неисправности электротехнического оборудования, характеризующих работоспособное состояние оборудования. В настоящей работе предлагается использование математического аппарата, разработанного на основе синтеза нечетких лингвистических определений и количественных характеристик диагностируемого оборудования. Представленный подход реализуется путем парных сравнений с использованием фундаментальной шкалы Саати, позволяющей выявить наиболее существенные признаки неисправности. Достоверность положений представленной методики подтверждается соответствующими расчётными результатами, демонстрирующими адекватное поведение модели применительно к трансформаторному оборудованию. Сделаны выводы о возможных причинах возникновения неисправностей, а также о возможности применения разработанной технологии в системах поддержки принятия решений.

*Ключевые слова:* диагностика оборудования, системы принятия решений, нечёткая логика, шкала Саати.

### Введение

Транспорт электроэнергии до потребителя включает в себя несколько этапов, а именно: изменение величины напряжения электроэнергии, получаемой с шин электрической станции, до уровня, удовлетворяющего критериям экономической целесообразности; передачу электроэнергии по сетям электроэнергетической системы к центрам потребления; преобразование величины напряжения до уровня номинального напряжения электрических приемников.

Изменение величины напряжения передаваемой электрической энергии необходимо для снижения потерь и увеличения количества передаваемой энергии по сетям электроэнергетических систем и систем электроснабжения. Кроме того, в ряде случаев требуется применение устройств компенсации реактивной мощности, необходимых для регулирования напряжения в сети, повышения статической и динамической устойчивости, а также для ограничения коммутационных перенапряжений. Известно, что силовые трансформаторы могут преобразовать величину напряжения, а шунтирующие реакторы применяются в качестве устройств компенсации реактивной мощности. Задачи силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов различны, но конструкция и виды неисправностей, встречающихся как на трансформаторах, так и на реакторах, позволяет нам объединить их под одним термином «трансформаторное оборудование». Данный термин объединяет силовые трансформаторы и масляные шунтирующие реакторы, конструкция которых схожа? и в разрезе интересующей нас диагностики эти устройства имеют одинаковые дефекты и признаки неисправностей.

### Общие положения

Диагностика – комплекс средств и методов, призванных определить техническое состояние электрооборудования. Введем термин «оперативная диагностика», под которым понимается получение информации с находящегося в работе трансформаторного оборудования на относительно коротких промежутках времени и анализ данных для получения определенного вывода о техническом состоянии оборудования. Такая диагностика может производиться после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности. Признаков может быть множество, но приведем лишь некоторые из них, на практике встречающиеся довольно часто:

$P_1$  – перегрев трансформаторного оборудования;

$P_2$  – повышенная вибрация и шум трансформаторного оборудования;

$P_3$  – высокий ток утечки через изоляцию высоковольтного ввода;

$P_4$  – увлажнение трансформаторного масла.

Основными предпосылками или причинами указанных неисправностей могут быть:

$G_1$  – высокая температура окружающей среды;

$G_2$  – неисправность системы охлаждения трансформаторного оборудования;

$G_3$  – перегрузка по току;

$G_4$  – пожар стали магнитопровода;

$G_5$  – несимметричность нагрузки по фазам;

$G_6$  – повреждение внутри бака трансформатора или реактора;

$G_7$  – ухудшение изоляционных характеристик ввода;

$G_8$  – атмосферные осадки.

Стоит заметить, что, как правило, повреждение, вызывающее глубокое изменение в работе трансформатора или реактора (короткое замыкание, интенсивное газовыделение), ликвидируется релейной защитой и в данном случае не рассматривается. Но есть развивающиеся дефекты, которые не вызывают каких-либо серьезных отклонений в краткосрочной перспективе и потому располагают временем для их распознавания и принятия соответствующих мер.

Предположим, что имеются все четыре признака неисправности. Каким образом можно выделить наиболее важные, а в стороне оставить менее значительные признаки?

Стоит отметить, что человеку свойственно оперировать лингвистическими определениями, а затем, при необходимости, переводить эту информацию в цифровое поле, если при этом существует шкала измерений, которая может установить связь между нечеткой лингвистической информацией и четкой цифровой. Так, специалист обслуживающий электротехническое оборудование, не может четко определить, насколько уровень шума и вибрации превосходит значения, которые считаются критическими. Он может сказать, что уровень вибрации «очень высокий», либо «сегодня уровень шума намного больше». Возникает несколько важных вопросов, а именно: каким образом определить момент, когда за оборудованием необходим более внимательный контроль; как определить степень признака неисправности, то есть насколько данный признак превосходит тот уровень, ниже которого находятся нечеткие признаки исправного оборудования; в чем первопричина неисправности.

Понятие нечеткого множества – это попытка формализации лингвистической информации для построения математических моделей. В основе этого лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать им в различной степени и, следовательно, принадлежать к этому множеству с различной степенью. Лингвистическая переменная – это переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания [1]. Ежедневно мы принимаем решения на основе лингвистической информации типа: «очень высокая температура»; «утомительная поездка» и прочее. Эта информация не несет в себе точных определений, поэтому она является нечеткой.

#### Диагностическая модель трансформаторного оборудования

Разобраться в предыдущих вопросах поможет шкала парных сравнений, опыт и знания экспертов, а также лингвистическая информация о текущем состоянии трансформаторного оборудования.

Сравним эти признаки по фундаментальной шкале Саати [2], которая имеет девять степеней предпочтения:

- 1 степень – равная предпочтительность;
- 2 степень – слабая степень предпочтения;
- 3 степень – средняя степень предпочтения;
- 4 степень – предпочтение выше среднего;
- 5 степень – умеренно сильное предпочтение;
- 6 степень – сильное предпочтение;
- 7 степень – очень сильное (очевидное) предпочтение;
- 8 степень – очень, очень сильное предпочтение;
- 9 степень – абсолютное предпочтение.

Если признак  $A$  имеет умеренно сильное предпочтение над признаком  $B$ , то последний имеет обратную степень предпочтения над  $A$ .

Сравнение признаков производится с учетом наличия одной из восьми причин неисправности. Суть заключается в том, что для человека привычнее задавать переменные не числами, а словами, а также получать и воспроизводить информацию, содержащую в себе компоненты неточности. В следующих матрицах представлены степени предпочтения одних признаков неисправности над другими с учетом наличия одной из шести предпосылок:

$$A(G_1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0,2 & 0,2 & 1 & 0,333 \\ 0,333 & 0,333 & 3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_1} = 4,042; \quad I.C._{G_1} = 0,014.$$

$$A(G_2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 9 & 3 \\ 1 & 1 & 9 & 7 \\ 0,111 & 0,111 & 1 & 1 \\ 0,333 & 0,142 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_2} = 4,129; \quad I.C._{G_2} = 0,043.$$

$$A(G_3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 5 & 5 \\ 0,333 & 0,2 & 1 & 1 \\ 0,2 & 0,2 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_3} = 4,029; \quad I.C._{G_3} = 0,009.$$

$$A(G_4) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0,142 & 0,2 & 1 & 0,333 \\ 0,333 & 0,333 & 3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_4} = 4,037; \quad I.C._{G_4} = 0,012.$$

$$A(G_5) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0,142 & 0,2 & 1 & 0,2 \\ 0,2 & 0,333 & 5 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_5} = 4,203; \quad I.C._{G_5} = 0,068.$$

$$A(G_6) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & 7 & 7 \\ 0,142 & 0,142 & 1 & 1 \\ 0,2 & 0,142 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_6} = 4,005; \quad I.C._{G_6} = 0,001.$$

$$A(G_7) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,111 & 1 \\ 1 & 1 & 0,111 & 1 \\ 9 & 9 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 0,111 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_7} = 4,004; \quad I.C._{G_7} = 0,001.$$

$$A(G_8) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,111 & 0,142 \\ 1 & 1 & 0,111 & 0,111 \\ 9 & 9 & 1 & 7 \\ 7 & 9 & 0,142 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\lambda_{\max G_8} = 4,186; \quad I.C._{G_8} = 0,062.$$

Расчет коэффициентов относительной важности критериев проведем методом парных сравнений по фундаментальной шкале Саати. Будем считать известными следующие лингвистические парные сравнения важности критериев  $G_1 - G_8$ .

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0,2 & 1 & 0,142 & 3 & 0,111 & 0,2 & 1 \\ 5 & 1 & 5 & 0,2 & 5 & 0,142 & 0,333 & 3 \\ 1 & 0,2 & 1 & 0,2 & 3 & 0,142 & 0,333 & 3 \\ 7 & 5 & 5 & 1 & 5 & 0,2 & 3 & 5 \\ 0,333 & 0,2 & 0,333 & 0,2 & 1 & 0,142 & 0,2 & 0,333 \\ 9 & 7 & 7 & 5 & 7 & 1 & 7 & 7 \\ 5 & 3 & 3 & 0,333 & 5 & 0,142 & 1 & 3 \\ 1 & 0,333 & 0,333 & 0,2 & 3 & 0,142 & 0,333 & 1 \end{bmatrix}.$$

Находим коэффициенты относительной важности признаков  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8$ . После необходимых расчетов получаем:  $\bar{b}_1 = 0,034$ ;  $\bar{b}_2 = 0,095$ ;  $\bar{b}_3 = 0,046$ ;  $\bar{b}_4 = 0,208$ ;  $\bar{b}_5 = 0,023$ ;  $\bar{b}_6 = 0,441$ ;  $\bar{b}_7 = 0,117$ ;  $\bar{b}_8 = 0,036$ , означающие наиболее важные предпосылки  $G_4$  и  $G_6$ . Максимальное собственное число вектора  $\lambda_{\max} = 9,082$ , индекс согласованности суждений  $I.C. = 0,14$ .

Произведем расчет нечетких множеств по следующему выражению:

$$\mu_D(P_j) = \min(\mu_{G_i}(P_j))^{\alpha_i}. \quad (1)$$

Из (1) получаем нечеткие множества:

$$\tilde{G}_1^{\alpha_1} = \left\{ \frac{0,968}{P_1}, \frac{0,968}{P_2}, \frac{0,913}{P_3}, \frac{0,938}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_2^{\alpha_2} = \left\{ \frac{0,915}{P_1}, \frac{0,931}{P_2}, \frac{0,762}{P_3}, \frac{0,788}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_3^{\alpha_3} = \left\{ \frac{0,957}{P_1}, \frac{0,962}{P_2}, \frac{0,899}{P_3}, \frac{0,893}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_4^{\alpha_4} = \left\{ \frac{0,831}{P_1}, \frac{0,818}{P_2}, \frac{0,559}{P_3}, \frac{0,671}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_5^{\alpha_5} = \left\{ \frac{0,982}{P_1}, \frac{0,976}{P_2}, \frac{0,934}{P_3}, \frac{0,957}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_6^{\alpha_6} = \left\{ \frac{0,679}{P_1}, \frac{0,703}{P_2}, \frac{0,298}{P_3}, \frac{0,31}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_7^{\alpha_7} = \left\{ \frac{0,747}{P_1}, \frac{0,747}{P_2}, \frac{0,967}{P_3}, \frac{0,747}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_8^{\alpha_8} = \left\{ \frac{0,894}{P_1}, \frac{0,892}{P_2}, \frac{0,987}{P_3}, \frac{0,948}{P_4} \right\}.$$

Пересечение этих нечетких множеств дает такие степени принадлежности нечеткого решения  $\tilde{D}$ :

$$\mu_D(P_1) = \min(0,968; 0,915; 0,957; 0,831; 0,982; 0,679; 0,747; 0,894) = 0,679;$$

$$\mu_D(P_2) = \min(0,968; 0,931; 0,962; 0,818; 0,976; 0,703; 0,747; 0,892) = 0,703;$$

$$\mu_D(P_3) = \min(0,913; 0,762; 0,899; 0,559; 0,934; 0,298; 0,967; 0,987) = 0,298;$$

$$\mu_D(P_4) = \min(0,938; 0,788; 0,893; 0,671; 0,957; 0,31; 0,747; 0,948) = 0,31.$$

В результате получаем нечеткое множество

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,679}{P_1}, \frac{0,703}{P_2}, \frac{0,298}{P_3}, \frac{0,31}{P_4} \right\},$$

свидетельствующее о преимуществе варианта, обусловленного повышенной вибрацией и шумом трансформаторного оборудования, над остальными признаками.

### Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что при наличии признаков неисправности и оценки этих признаков по шкале предпочтений, а также исходя из нечеткой информации о возможных причинах или предпосылках неисправности трансформаторного оборудования и на основе экспертных оценок, повышенная вибрация и шум могут быть вызваны повреждением внутри бака трансформатора или реактора, либо пожаром стали магнитопровода.

Так, первопричиной повышенного шума и вибрации трансформатора или реактора в данном случае могут быть следующие отклонения:

- повреждение внутри бака с вероятностью 0,441;
- пожар стали магнитопровода с вероятностью 0,208;
- ухудшение изоляционных характеристик ввода с вероятностью 0,117;
- неисправность системы охлаждения с вероятностью 0,095;
- перегрузка по току с вероятностью 0,046;

- атмосферные осадки с вероятностью 0,036;
- высокая температура окружающей среды с вероятностью 0,034;
- несимметричность нагрузки по фазам с вероятностью 0,023.

Данный метод принятия решения на основе нечеткой информации может быть использован для диагностики не только трансформаторного оборудования, но и всего электротехнического оборудования в целом при наличии нескольких альтернатив, то есть нескольких признаков, свидетельствующих о различных неисправностях. Известно, что при наличии большого количества альтернатив и критериев процесс принятия решения довольно сложен, а зачастую даже невозможен без предварительных расчетов. Поэтому так важно использовать специальные математические средства для реализации процесса принятия решения. Таким средством может быть симбиоз теории нечетких множеств, теории принятия решения, а

также фундаментальной шкалы парных сравнений.

Математически обоснованный процесс принятия решения для целей диагностики силового электротехнического оборудования поможет субъектам электроэнергетики качественно и безаварийно эксплуатировать электроэнергетический комплекс, повысит социальную ответственность, снизит издержки в отрасли, что в итоге положительно скажется на общем экономическом состоянии современного общества.

#### **Литература**

1. Zadeh L. *Fuzzy Sets / L. Zadeh // Information and Control.* – 1965. – № 8. – P. 338–353.
2. Thomas L. Saaty. *Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process.* – 2008. – № 102. – P. 251–318.

**Манусов Вадим Зиновьевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, тел.: +7(383)346-15-51, e-mail: manusov36@mail.ru.

**Коваленко Дмитрий Иванович**, аспирант, кафедра «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, тел.: +7(383)346-15-51.

**Дмитриев Степан Александрович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Автоматизированные электрические системы» Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)375-95-77, e-mail: dmstepan@gmail.com

**Ерошенко Станислав Андреевич**, аспирант, кафедра «Автоматизированные электрические системы» Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, тел.: +7(343)375-95-77, e-mail: stas\_ersh@mail.ru.

---

### ***Bulletin of the South Ural State University Series "Power Engineering" 2013, vol. 13, no. 1, pp. 124–127***

---

## **Transformer Equipment Fuzzy Fault Data Analysis**

**V.Z. Manusov**, *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation, manusov36@mail.ru*

**D.I. Kovalenko**, *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation,*

**S.A. Dmitriev**, *Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation@gmail.com*

**S.A. Eroshenko**, *Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation, stas\_ersh@mail.ru*

The paper addresses the problem of transformer equipment fault data analysis in application to power system equipment operation data consistency improvement. Fuzzy and indefinite nature of such data is a primary barrier for effective problem solution. Fault data analysis is based on expert ranking results and transformer diagnostics data. Proposed approach integrates fuzzy linguistic estimations and quantitative characteristics of power equipment under consideration, carried out by pair comparison using fundamental Saaty scale, which gives the possibility to reveal the most considerable failure symptoms. The methodology is verified by corresponding calculations results. Transformer failure cause analysis is given in the paper conclusion. Additional discussion about the possibility of proposed methodology application in decision-making systems are provided as well.

*Keywords: power equipment diagnostics, decision-making system, fuzzy logic, Saaty scale.*

#### **References**

1. Zadeh L. *Fuzzy Sets, Information and Control*, 1965, no. 8, p. 338–353.
2. Thomas L. Saaty. *Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy, Network Process*, 2008, no. 102, p. 251–318.

*Поступила в редакцию 18.02.2013 г.*