

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ*

УДК 621.311

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ПРИЗНАКОВ***

В.З. МАНУСОВ¹, ДЖ.С. АХЪЕЕВ², Д.В. ОРЛОВ³

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий. E-mail: manusov36@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий. E-mail: javod_66@mail.ru

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры систем электроснабжения предприятий. E-mail: 4ell@inbox.ru

В работе рассмотрен возможный способ технической диагностики электрооборудования систем электроснабжения, подстанций и электрических сетей с помощью математического аппарата теории нечетких множеств и нечеткой логики. Показано, что с помощью нечетких экспертных оценок можно делать достаточно правдоподобное предсказание о возможных неисправностях и причинах отказов. Условиями такого анализа являются текущее состояние электротехнического оборудования и экспертные оценки диагностических признаков. Проводится сравнение признаков по фундаментальной шкале Саати в соответствии с девятью степенями предпочтения. В основе нечетких оценок лежит попытка формализации лингвистической информации, а именно лингвистических переменных, значениями которых могут быть слова или словосочетания. В работе проводится ранжирование возможных неисправностей по предпочтениям экспертов, что позволяет выявить наиболее существенные признаки неисправности и принять решение о дальнейшей эксплуатации объекта. Достоверность положений представленной методики подтверждаются соответствующими расчетами, в результате которых демонстрируется адекватное поведение модели применительно к трансформаторному оборудованию. Показано, что при возникновении некоторых нечетких признаков неисправностей и оценке их по максимальным значениям функций принадлежности экспертов, а также по шкале предпочтений можно делать заключения о дальнейшей эксплуатации электрооборудования или его выводе в ремонт. Таким образом, математическая модель, построенная на нечетких отношениях признаков с помощью эксперт-

* Статья получена 21 мая 2017 г.

ных оценок, содержит в себе элементы предсказания возможных отказов электрооборудования систем электроснабжения.

Ключевые слова: электроэнергетика, техническая диагностика, электрооборудование, трансформаторы, экспертные оценки, нечеткая логика, текущее состояние, нечеткие причинно-следственные отношения

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-109-123

ВВЕДЕНИЕ

Транспорт электроэнергии от источника до потребителя включает в себя несколько этапов, а именно: изменение величины напряжения электроэнергии, получаемой с шин электрической станции; передачу электроэнергии по сетям электроэнергетической системы к центрам потребления; преобразование величины напряжения до уровня номинального напряжения электроприемников. Изменение величины напряжения и угла раствора векторов необходимо для снижения потерь и увеличения количества передаваемой энергии по сетям электроэнергетических систем и систем электроснабжения. Кроме того, во многих случаях 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».

Термин «трансформаторное оборудование» подразумевает силовые трансформаторы и масляные шунтирующие реакторы, конструкции которых схожи, и в разрезе интересующей нас диагностики эти устройства имеют одинаковые дефекты и признаки неисправностей. Наряду с этим необходимо диагностировать также коммутационную аппаратуру, связанную с этим оборудованием: выключатели, разъединители, короткозамыкатели и другие.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Описание рассматриваемой системы

Термин «оперативная диагностика» включает в себя сбор данных о состоянии трансформаторного оборудования, находящегося в работе, и анализ их для получения определенного вывода об оценке его технического

состояния. Такая диагностика может производиться после осмотра электрооборудования и выявления признаков неисправности. Признаков может быть множество, но лишь некоторые из них на практике встречаются 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. 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.

Сравнение признаков производится с учетом наличия одной из причин неисправности. Суть метода заключается в том, что для человека привычнее задавать значения переменной не числами, а словами, а также получать и воспроизводить информацию, которая содержит в себе компоненты неточности. Теория нечетких множеств позволяет формализовать лингвистическую информацию 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 этому множеству с различной степенью. Лингвистическая переменная – это переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания. Ежедневно мы принимаем решения на основе лингвистической информации типа «очень высокая температура», «утомительная поездка» и прочее [1]. Эта информация не несет в себе точных определений, поэтому она является нечеткой.

Математическая модель экспертных оценок

Рассмотрим математическую модель технической диагностики электрооборудования энергетических и промышленных объектов, основанную на нечетких отношениях между возможными причинами отказов и реальными повреждениями.

Примем следующую модель технической диагностики трансформаторов с использованием матрицы нечетких отношений, которая, в свою очередь, требует некоторых экспертных оценок. Эти лингвистические оценки представляются как некоторые точки функции принадлежности, отражающей субъективное восприятие повреждения экспертом на основе его опыта и знаний.

Пусть описание полного пространства возможных повреждений (предположительно) X состоит из m факторов, а полное пространство причин (заклучений) появления этих повреждений Y – из n симптомов [2].

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для облегчения поиска причин неисправностей и их устранения ниже приведены наиболее характерные отказы в работе масляных баковых выключателей и методы проверок характеристик.

К вопросу устранения неисправностей и отказов необходимо подходить с учетом следующего:

- во многих случаях обнаруженная неисправность может оказаться причиной или следствием неисправности другого узла. Так, например, несоответствие параметра привода может оказаться результатом несоответствия параметров выключателя;

- качество выполненных работ по устранению отказов и неисправностей, как правило, должно подтверждаться результатами проведенных проверок параметров. Для подвижных элементов (приводов) результаты работ должны подтверждаться проверкой скоростных и временных параметров;

- при резких изменениях параметров в пределах допустимого необходимо провести анализ изменений.

Для высоковольтных выключателей пространство возможных повреждений и причин их возникновения будет, конечно, другим. Оценка экспертов также изменится [3, 4].

Пусть неисправности, обнаруженные у высоковольтного выключателя, будут следующими:

y_1 – выключатель не поддается включению;

y_2 – утечка газа;

y_3 – утечка воздуха.

Перечень причин возникновения той или иной неисправности приводится ниже в соответствии с вышеуказанными:

x_1 – обрыв в цепи катушки управления;

x_2 – отсутствие контакта механизма свободного расцепления;

x_3 – дефекты сварки или материала корпуса;

x_4 – неисправность датчика давления газа;

x_5 – повреждена прокладка клапана из-за попадания сторонних частиц.

Между x_i и y_i существуют некоторые нечеткие причины – следственные отношения $r_{ij} = x_i \rightarrow y_i$ которые можно представить в виде некоторой матрицы R с элементами $r_{ij} \in [0,1]$. Конкретные входы (предпосылки) и выходы (заклучения) можно рассматривать как нечеткие множества A и B на пространстве X и Y .

Отношение этих нечетких множеств можно обозначить как

$$B = A \cdot R,$$

где знак « \cdot » обозначает правило композиции нечетких выводов.

В данном случае направление решения в отношении выводов является обратным к направлению выводов правил, т. е. в случае диагностики имеется матрица R (знания экспертов) и определяются входы (или факторы).

Исходя из вышеизложенного, используя теорию нечетких отношений и экспертные оценки возможных причин повреждаемости, можно составить структурную схему матриц нечетких отношений между причинами (повреждениями) и их следствиями [5–13].

Рассмотрим пример, когда знания эксперта по диагностике после осмотра высоковольтного выключателя имеют вид нечетких отношений причин и следствий:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 & 0.7 \\ 0.4 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0.6 & 1 \end{bmatrix}.$$

В результате осмотра выключателя его состояние можно оценить как функцию принадлежности

$$B = 0.7 / y_1 + 0.4 / y_2 + 0.1 / y_3,$$

Требуется определить возможную причину такого состояния

$$A = a_1 / x_1 + a_2 / x_2 + a_3 / x_3 + a_4 / x_4 + a_5 / x_5.$$

Отношение введенных нечетких множеств можно представить после транспонирования в виде нечетких векторов и столбцов:

$$\begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.4 \\ 0.1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0.8 & 0.6 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}.$$

При использовании (max – min)-композиции (взятие максимума из минимума) последнее соотношение преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} 0.7 &= (1 \wedge a_1) \vee (0.9 \wedge a_2) \vee (0.2 \wedge a_3) \vee (0.4 \wedge a_4) \vee (0 \wedge a_5) \\ 0.4 &= (0 \wedge a_1) \vee (0.1 \wedge a_2) \vee (0.9 \wedge a_3) \vee (0.8 \wedge a_4) \vee (0.6 \wedge a_5) \\ 0.1 &= (0 \wedge a_1) \vee (0.1 \wedge a_2) \vee (0.7 \wedge a_3) \vee (0.2 \wedge a_4) \vee (1 \wedge a_5) \end{aligned} \right\}.$$

Из первого уравнения получим

$$0.7 \geq 1.0 \wedge a_1, \quad a_1 \leq 0.7.$$

Из второго уравнения

$$0.4 \geq 0.9 \wedge a_3, \quad a_3 \leq 0.4.$$

Из третьего уравнения

$$0.1 \geq 1.0 \wedge a_5, \quad a_5 \leq 0.1.$$

Решение данной системы линейных нечетких уравнений позволяет сделать вывод, что при известных экспертных оценках специалистов в виде матрицы нечетких отношений наиболее вероятными являются следующие причины:

- обрыв в цепи катушки управления с принадлежностью 0.7;
- дефекты сварки или материала корпуса с принадлежностью 0.4;
- повреждена прокладка клапана из-за попадания сторонних частиц с принадлежностью 0.1.

Математическая модель на основе степеней предпочтения

Предположим, что имеются все четыре признака неисправности. Сравним эти признаки по фундаментальной шкале Саати [14–16], которая имеет девять степеней предпочтения: 1-я степень – равная предпочтительность; 2-я степень – слабая степень предпочтения; 3-я степень – средняя степень предпочтения; 4-я степень – предпочтение выше среднего; 5-я степень – умеренно сильное предпочтение; 6-я степень – сильное предпочтение; 7-я степень – очень сильное (очевидное) предпочтение; 8-я степень – чрезвычайно сильное предпочтение; 9-я степень – абсолютное предпочтение. Если признак A имеет умеренно сильное предпочтение над признаком B , то последний имеет обратную степень предпочтения над A .

В следующих матрицах представлены степени предпочтения одних признаков неисправности над другими с учетом наличия одной из шести предпосылок:

$$A(G_1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0.2 & 0.2 & 1 & 0.333 \\ 0.333 & 0.333 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \quad A(G_2) = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 & 5 \\ 0.2 & 1 & 7 & 5 \\ 0.111 & 0.142 & 1 & 0.142 \\ 0.2 & 0.142 & 7 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 5 & 5 \\ 0.333 & 0.2 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad A(G_4) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 3 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0.142 & 0.2 & 1 & 0.333 \\ 0.333 & 0.333 & 3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A(G_5) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ 0.142 & 0.2 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.333 & 5 & 1 \end{bmatrix}, \quad A(G_6) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & 7 & 7 \\ 0.142 & 0.142 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.142 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\lambda_{\max G_1} = 4.042; \quad I.C_{G_1} = 0.014; \quad \lambda_{\max G_2} = 4.559; \quad I.C_{G_2} = 0.18;$$

$$\lambda_{\max G_3} = 4.029; \quad I.C_{G_3} = 0.009; \quad \lambda_{\max G_4} = 4.037; \quad I.C_{G_4} = 0.012;$$

$$\lambda_{\max G_5} = 4.203; \quad I.C_{G_5} = 0.068; \quad \lambda_{\max G_6} = 4.005; \quad I.C_{G_6} = 0.001.$$

Расчет коэффициентов относительной важности критериев проведем методом парных сравнений по фундаментальной шкале Саати. Будем считать известными следующие лингвистические парные сравнения важности критериев $G_1 - G_6$:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.2 \\ 3 & 1 & 3 & 1 & 3 & 0.2 \\ 3 & 0.333 & 1 & 0.333 & 1 & 0.2 \\ 3 & 0.333 & 3 & 1 & 3 & 0.333 \\ 3 & 0.333 & 1 & 0.333 & 1 & 0.2 \\ 5 & 5 & 5 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}.$$

Находим коэффициенты относительной важности признаков $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6$. После необходимых расчетов получаем: $\alpha_1 = 0.049$; $\alpha_2 = 0.17$; $\alpha_3 = 0.082$; $\alpha_4 = 0.161$; $\alpha_5 = 0.082$; $\alpha_6 = 0.456$, означающее наиболее важные предпосылки G_2, G_6 . Максимальное собственное число вектора $\lambda_{\max} = 6.254$, индекс согласованности суждений $I.C = 0.05$.

Производим расчет нечетких множеств по следующему выражению:

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

После некоторых преобразований получаем нечеткие множества [17–21]:

$$\tilde{G}_1^{\alpha_1} = \left\{ \frac{0,955}{P_1}, \frac{0,955}{P_2}, \frac{0,877}{P_3}, \frac{0,912}{P_4} \right\}; \quad \tilde{G}_2^{\alpha_2} = \left\{ \frac{0,917}{P_1}, \frac{0,793}{P_2}, \frac{0,563}{P_3}, \frac{0,687}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_3^{\alpha_3} = \left\{ \frac{0,924}{P_1}, \frac{0,933}{P_2}, \frac{0,827}{P_3}, \frac{0,818}{P_4} \right\}; \quad \tilde{G}_4^{\alpha_4} = \left\{ \frac{0,867}{P_1}, \frac{0,856}{P_2}, \frac{0,637}{P_3}, \frac{0,734}{P_4} \right\};$$

$$\tilde{G}_5^{\alpha_5} = \left\{ \frac{0,936}{P_1}, \frac{0,919}{P_2}, \frac{0,783}{P_3}, \frac{0,854}{P_4} \right\}; \quad \tilde{G}_6^{\alpha_6} = \left\{ \frac{0,567}{P_1}, \frac{0,695}{P_2}, \frac{0,286}{P_3}, \frac{0,297}{P_4} \right\}.$$

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

$$\mu_D(P_1) = \min(0.955; 0.917; 0.924; 0.867; 0.936; 0.567) = 0.567;$$

$$\mu_D(P_2) = \min(0.955; 0.793; 0.933; 0.856; 0.919; 0.695) = 0.695;$$

$$\mu_D(P_3) = \min(0.877; 0.563; 0.827; 0.637; 0.783; 0.286) = 0.286;$$

$$\mu_D(P_4) = \min(0.912; 0.687; 0.818; 0.734; 0.854; 0.297) = 0.297.$$

В результате получаем нечеткое множество

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0.567}{P_1}, \frac{0.695}{P_2}, \frac{0.286}{P_3}, \frac{0.297}{P_4} \right\},$$

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

Показано, что при наличии признаков неисправности и оценке этих признаков по шкале предпочтений исходя из нечеткой информации о возможных причинах на основе экспертных оценок можно сделать окончательное заключение. В данном случае повышенная вибрация и шум могут быть вызваны неисправностью системы охлаждения либо повреждением внутри бака трансформатора или реактора. Притом наиболее вероятной причиной шума или вибрации с оценкой 0.456 является повреждение внутри бака, а неисправность системы охлаждения может вызвать повышенную вибрацию и шум трансформатора либо реактора с вероятностью 0.17.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что при наличии некоторых признаков неисправностей трансформаторного или коммутационного оборудования, а также лингвистической нечеткой оценки этих признаков экспертами можно сделать основные выводы о причинах тех или иных неисправностей.

Данный метод технической диагностики на основе нечеткой информации позволяет выбрать наиболее достоверный признак повреждения при наличии нескольких альтернатив и критериев. Процесс принятия решений по результатам текущей диагностики может быть основан на симбиозе теории нечетких множеств [1, 2] и фундаментальной шкалы парных сравнений по Саати [14].

Развитие данного метода свидетельствует о возможности итогового принятия решений для двух важных случаев:

- возможна дальнейшая эксплуатация электрооборудования с учащенным контролем параметров (неисправное работоспособное состояние);
- немедленный вывод оборудования в ремонт (предельное состояние).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.
2. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
3. Пугач О.В. Математические методы оценки рисков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 7. – С. 64–69.
4. Хрусталева С.А., Орлов А.И., Шаров В.Д. Математические методы оценки эффективности управленческих решений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 11. – С. 67–72.
5. Manusov V.Z., Ahyoev Dzh.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 324–329. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
6. Манусов В.З., Ахьёев Дж.С. Техническая диагностика электрооборудования с использованием нечетких моделей // Электротехника. Электротехнология. Энергетика. ЭЭЭ-2015: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г.: в 3 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3: Секция «Энергетика». – С. 254–258.
7. Манусов В.З., Ахьёев Дж.С. Диагностирование трансформаторного электрооборудования на основе экспертных моделей с нечеткой логикой // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
8. Попов Е.А., Манусов В.З., Ахьёев Дж.С. Диагностика текущего состояния высоковольтного оборудования на основе экспертных нечетких моделей // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов, Новосибирск, 5–9 декабря 2016 г.: в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. Секция «Энергетика». – С. 50–52.
9. Манусов В.З., Ахьёев Дж.С. Анализ текущего состояния трансформаторов на основе экспертных оценок и нечеткой логики // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2 (74). – С. 37–40.
10. Гатауллин А.М. Система мониторинга и диагностирования высоковольтного оборудования на основе анализа статистических параметров ЧР // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2013. – № 7–8. – С. 19–26.
11. Левин В.М., Танфильева Д.В. Выбор признаков для идентификации дефектов в трансформаторе при мониторинге растворенных в масле газов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 4–6 декабря 2013 г. – Томск: Скан, 2013. – Т. 1. – С. 107–110.

12. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация: методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
13. *Зотьев Д.Б.* К проблеме определения весовых коэффициентов на основании экспертных оценок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 75–78.
14. *Saaty T.L.* 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 // Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas. – 2008. – Vol. 102 (2). – P. 251–318.
15. Анализ нечетких признаков неисправностей трансформаторного оборудования / В.З. Манусов, Д.И. Коваленко, С.А. Дмитриев, С.А. Ерошенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 124–127.
16. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
17. Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования: СТО 56947007-29.200.10.XXX–2008. – URL: http://cius-ees.ru/uploaded/document_files/67/sys_monitor.pdf (дата обращения: 29.11.2017).
18. *Петровский А.Б.* Теория принятия решений: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2009. – 400 с.
19. *Новиков Д.А., Орлов А.И.* Экспертные оценки – инструменты аналитика // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 4. – С. 3–4.
20. *Горский В.Г., Гриценко А.А., Орлов А.И.* Метод согласования кластеризованных ранжировок // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 3. – С. 159–167.
21. *Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh.* Modern state problems and prospects of development of the electric power system of Tajikistan // 2016 11th International forum on strategic technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk, 2016. – Pt. 3. – P. 136–139.

Манусов Вадим Зиновьевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – применение методов искусственного интеллекта для планирования и оптимизации режимов электроэнергетических систем. Имеет более 300 публикаций, в том числе 4 монографии. E-mail: manusov36@mail.ru.

Ахьёев Джавод Саламиевич, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – мониторинг и диагностика текущего технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики. Имеет более 15 публикаций. E-mail: javod_66@mail.ru.

Орлов Дмитрий Викторович, магистрант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. E-mail: 4ell@inbox.ru.

Analysis of the technical condition of electrical equipment of power supply systems based on fuzzy symptoms*

V.Z. Manusov¹, J.S. Ahyoev², D.V. Orlov³

¹ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, doctor of technical sciences, professor of the industrial electrical supply systems department. E-mail: manusov36@mail.ru*

² *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student of the industrial electrical supply systems department. E-mail: javod_66@mail.ru*

³ *Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master degree student of the industrial electrical supply systems department. E-mail: 4eel@inbox.ru*

The paper considers a possible method of technical diagnostics of electric equipment of power supply systems, substations and electrical networks by means of mathematical apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic. It is shown that a possible failures and causes of failures can be predicted quite plausible by fuzzy expert assessments. The conditions of this analysis are the current condition of electrical equipment and expert assessments of diagnostic signs. The paper show the comparison of the features scale of Saaty, in accordance with nine degrees of preference. The method of fuzzy estimations are based on the attempt of formalization of linguistic information, namely linguistic variables whose values can be words or phrases. The paper presents the full space of preconditions defects consisting of m factors and their corresponding space conclusions about the causes of these malfunctions (defects) of the n symptoms. Fuzzy causal relations in the space of underlying factors are established between the assumptions and conclusions of the experts. The resulting system of equations is solved by the method based on the composition of the fuzzy conclusions. Possible failures are ranked by preference to experts, it reveals the most significant signs of malfunction and decide on the future operation of the facility. The validity of the provisions of the presented method is confirmed by appropriate calculations, which demonstrates the correct behavior of the model with regard to transformer equipment. It is shown that in case of appearance of the fuzzy symptoms and evaluation of these features on a scale of preferences, it is possible to conclude about the

* Received 21 May 2017.

further operation of electrical equipment or the withdrawal of repair. Thus, the mathematical model based on the fuzzy relations of signs by means of the expert estimations, contains elements of the predicting the possible failures of power systems' electrical equipment.

Keywords: electricity, technical diagnostics, electrical equipment, transformers, expert evaluation, fuzzy logic, current conditions, fuzzy causal relations

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-3-109-123

REFERENCES

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
2. Kaufmann A. *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs (fuzzy sets theory)*. Paris, Masson, 1977 [Introduction to the theory of fuzzy subsets] (Russ. ed.: Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 432 p.).
3. Pugach O.V. Matematicheskie metody otsenki riskov [The mathematical methods of risks estimation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 7, pp. 64–69. (In Russian).
4. Khrustalev S.A., Orlov A.I., Sharov V.D. Matematicheskie metody otsenki effektivnosti upravlencheskikh reshenii [The mathematical methods for evaluating the effectiveness of management decisions]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 11, pp. 67–72. (In Russian).
5. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 792. Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering, pp. 324–329. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
6. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. [Technical diagnostics of electrical equipment using fuzzy models]. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika. EEE-2015*. V 3 ch. Ch. 3 *Sektsiya "Energetika"*: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh [Electrical engineering. Electrotechnology. Energy. EEE-2015. In 3 pt. Pt. 3. Section "Energy": collection of scientific papers VII International scientific conference of young scientists], Novosibirsk, 9–12 June 2015, pp. 254–258. (In Russian).
7. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Diagnostirovanie transformatornogo elektrooborudovaniya na osnove ekspertnykh modelei s nechetkoi logikoi [Electrical transformer diagnostics based on expert models with fuzzy logic]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2015, no. 5, pp. 45–48.

8. Popov E.A., Manusov V.Z., Ahyoev J.S. [Diagnosis of the current state of high voltage equipment based on expert fuzzy models]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii*. V 9 ch. Ch. 4: sbornik nauchnykh trudov [Science. Technologies. Innovations. In 9 pt. Pt. 4: collection of scientific papers], Novosibirsk, 5–9 December 2016, pp. 50–52. (In Russian).

9. Manusov V.Z., Ahyoev J.S. Analiz tekushchego sostoyaniya transformatorov na osnove ekspertnykh otsenok i nechetkoi logiki [Transformer condition diagnostics based on expert opinions and fuzzy logic]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie – Energy Safety and Energy Economy*, 2017, no. 2 (74), pp. 37–40.

10. Gataullin A.M. Sistema monitoringa i diagnostirovaniya vysokovol'tnogo oborudovaniya na osnove analiza statisticheskikh parametrov ChR [System monitoring and diagnostics of high voltage equipment based on analysis of statistical parameters of Partial Discharges]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2013, no. 7–8, pp. 19–26.

11. Levin V.M., Tanfil'eva D.V. [Feature selection for identification of defects in transformer for monitoring dissolved gases in oil]. *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'*: materialy trudov XIX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Energy: efficiency, reliability, safety: material works XIX All-Russian scientific-technical conference], Tomsk, 4–6 December 2013, vol. 1, pp. 107–110. (In Russian).

12. Litvak B.G. *Ekspertnaia informatsiia: metody polucheniia i analiza* [The expert information: methods of obtaining and analyzing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 184 p.

13. Zot'ev D.B. K probleme opredeleniya vesovykh koeffitsientov na osnovanii ekspertnykh otsenok [The problem of determining the weighting coefficients on the basis of expert estimates]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2011, vol. 77, no. 1, pp. 75–78. (In Russian).

14. Saaty T.L. 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. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 2008, vol. 102 (2), pp. 251–318.

15. Manusov V.Z., Kovalenko D.I., Dmitriev S.A., Eroshenko S.A. Analiz nechetkikh priznakov neispravnosti transformatornogo oborudovaniya [The analysis of fuzzy symptoms of transformer equipment]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 124–127.

16. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007. 288 p.
17. *Sistemy monitoringa silovykh transformatorov i avtotransformatorov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya: STO 56947007-29.200.10.XXX–2008* [Monitoring system of power transformers and autotransformers. General technical requirements. Standards developing organization 56947007-29.200.10.XXX–2008]. Available at: http://cius-ees.ru/uploaded/document_files/67/sys_monitor.pdf accessed 29.11.2017).
18. Petrovskii A.B. *Teoriya prinyatiya reshenii* [The theory of decision making]. Moscow, Academia Publ., 2009. 400 p.
19. Novikov D.A., Orlov A.I. Ekspertnye otsenki – instrumenty analitika [Expert estimations – the analytics tools]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Industrial laboratory. Materials diagnostics*, 2013, vol. 79, no. 4, pp. 3–4. (In Russian).
20. Gorskii V.G., Gritsenko A.A., Orlov A.I. Metod soglasovaniya klasterizovannykh ran-zhirovok [A reconciliation method for clustered rankings]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2000, no. 3, pp. 159–167. (In Russian).
21. Sekretarev Yu.A., Sulonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Modern state problems and prospects of development of the electric power system of Tajikistan. *2016 11th International forum on strategic technology*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016, pt. 3, pp. 136–139.