

В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

Розроблена і навчена нечітка нейронна мережа для інтерпретації результатів хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів. Запропоновано визначати функції приналежності лінгвістичних термів з урахуванням функцій щільності розподілу концентрацій газів для трансформаторів з різним станом. Виконано тестування навченої мережі на незалежній вибірці. Проаналізовано можливості нейронних мереж розпізнавати дефекти на ранній стадії їх розвитку, або зростання концентрацій газів в справних трансформаторах, після аварійних впливів з боку електричних мереж. Бібл. 16, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: діагностика трансформаторів, аналіз розчинених у маслі газів, особливості вмісту газів, рівні концентрацій, нечіткі нейронні мережі, функції приналежності, розподіл Вейбулла, навчання мережі, нечіткий висновок, помилкові рішення.

Разработана и обучена нечеткая нейронная сеть для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. Предложено определять функции принадлежности лингвистических термов с учетом функций плотностей распределения концентраций газов для трансформаторов с различным состоянием. Выполнено тестирование обученной сети на независимой выборке. Проанализированы возможности нейронных сетей распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития, или рост концентраций газов в исправных трансформаторах, после аварийных воздействий со стороны электрических сетей. Библ. 16, табл. 3, рис. 9.

Ключевые слова: диагностика трансформаторов, анализ растворенных в масле газов, особенности газосодержания, уровни концентраций, нечеткие нейронные сети, функции принадлежности, распределение Вейбулла, обучение сети, нечеткий вывод, ошибочные решения.

Введение. Одним из путей повышения эксплуатационной надежности высоковольтного электроэнергетического оборудования, особенно того, что эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, является усовершенствование существующих методов и средств контроля для получения диагностической информации, разработка математических моделей и алгоритмов оценки технического состояния электрооборудования. Наиболее перспективным, по мнению авторов, направлением такого усовершенствования является разработка компьютерных систем технической диагностики с использованием аппарата нечеткой логики и нейронных сетей, которые способны обеспечить повышение достоверности распознавания и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта.

Анализ публикаций. В настоящее время для обнаружения развивающихся дефектов и распознавания их типа как отечественными [1-6], так и зарубежными [7-11] исследователями широко используются математический аппарат нечеткой логики и нейронных сетей. В большинстве из опубликованных работ в качестве решающего правила используются международные, национальные или ведомственные стандарты или методики по интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ). При использовании аппарата нечеткой логики вид функции принадлежности, а также их численные характеристики задаются исходя из экспертных оценок или же из действующих стандартов. Как правило, при обучении и тестировании разработанных систем нечеткого вывода или нейронных сетей использовались либо результаты ХАРГ соответствующие исправному либо дефектному состоянию оборудования. Но при этом не учитывались особенности газосодержания масел в исправных трансформаторах, которые обусловлены особенностями конструктивно-

го исполнения, условиями эксплуатации и рядом других факторов. Кроме того, несмотря на достаточно большое количество публикаций по использованию нейронных сетей для интерпретации результатов ХАРГ, ряд вопросов остается неосвещенными. В частности не рассмотрены, вопросы, связанные с возможностью нейронных сетей распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития, или рост концентраций газов в исправных трансформаторах, после аварийных воздействий со стороны электрических сетей. Последние обстоятельства и послужили поводом для написания данной статьи.

Целью данной работы является разработка, обучение и тестирование нечеткой нейронной сети, для диагностики силовых трансформаторов по результатам ХАРГ, а также анализ возможности данной сети распознавать развивающиеся дефекты на ранней стадии их развития и рост концентраций газов в исправных трансформаторах, в результате внешних воздействий.

Исходные данные для обучения сети. Для обучения сети использовались результаты ХАРГ по Донецкой, Луганской, Сумской и Харьковской областям, Украины. Всего проанализированы результаты наблюдений по 426 трансформаторам напряжением 110 и 330 кВ, негерметичного исполнения. Анализируемые трансформаторы отличаются и по классу напряжения, и по номинальной мощности, и по конструкции, а самое главное – по условиям эксплуатации, т.е. по значениям загрузки, по частоте и уровню воздействия токов короткого замыкания, по кратности воздействий перенапряжений и т.д. Все это приводит к тому, что значения концентраций газов изменяются в достаточно широком диапазоне значений. Для удобства анализа значений концентраций газов были

использованы уровни концентраций, которые рекомендованы в [12], для диагностики состояния высоковольтного оборудования напряжением до 330 кВ. Значения концентраций газов соответствующие разным уровням приведены в табл. 1. Согласно [12] если значения концентраций газов соответствуют уровню 1, то это свидетельствует о нормальном, бездефектном состоянии оборудования. Если концентрация хотя бы одного из газов соответствует уровню 2, то решение о состоянии оборудования, принимается на основании анализа значений скоростей нарастания суммы газов углеводородного ряда (дефект считается «присутствующим», если эта скорость превышает 30 мл/сутки). Если значения концентраций хотя бы одного из газов соответствует уровню 3, то прогнозируется наличие дефекта без учета скорости нарастания концентраций газов.

Таблица 1

Уровни состояния маслонаполненного оборудования по значениям концентраций газов

Уровень концентрации	Растворенные в масле газы				
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
1	<0,01	<0,005	<0,005	<0,0015	<0,00005
2	0,01-0,015	0,005-0,012	0,005-0,01	0,0015-0,01	0,00005-0,001
3	>0,015	>0,012	>0,005	>0,0015	>0,001

Выполненный анализ показал, что из 7393 результатов измерения концентраций водорода 5161 (H₂) значение или 69,81 % не превышало предела обнаружения хроматографа. Еще 2106 значений (28,49 %) концентраций, не превышали значения аналитического порога распознавания (0,005 % об.), регламентированного в [12]. Только 71 значение (0,96 %) соответствовало уровню 1 (менее 0,01 % об.). Уровню 2 (0,01-0,015 % об.), соответствовали 26 значений (0,35 %), а уровню 3 (более 0,015 % об.) – 29 значений (0,39 %).

Концентрации метана (CH₄) ниже предела обнаружения хроматографом выявлены в 2304 пробах масла, что составляет 31,6 % всех наблюдений по данному газу, еще 3342 (45,2 %) концентраций метана имели значения ниже аналитического порога распознавания (0,0015 % об.). Уровню 1 (до 0,005 % об.) соответствовали 1160 значений (15,69 %), уровню 2 (0,005-0,012 % об.) – 367 значений (4,96 %), а уровню 3 (более 0,012) – 220 значений (2,98 %).

Концентрации этана (C₂H₆) не превышают предела обнаружения хроматографа в 1957 пробах (26,47 %), еще в 4485 пробах масла (60,67 %), концентрации этана не превышали аналитического порога распознавания (0,0015 % об.). Уровню 1 (до 0,005 % об.) соответствовали 619 значений концентраций (8,37 %), уровню 2 (0,005-0,01 % об.) – 153 значения (4,96 %), а уровню 3 (более 0,01 % об.) – 179 значений (2,42 %).

Из 7393 значений концентраций этилена (C₂H₄), ниже предела обнаружения хроматографом выявлено 1090 значений (14,74 %), 3763 (50,90 %) не превышали аналитического порога распознавания (который составляет 0,0015 % об.). Здесь следует учесть, что для этилена значения аналитического порога распознавания совпадают со значением верхней границы уровня 1. В связи с этим, в дальнейшем

для этилена все значения соответствующие уровню 1 отнесены к значениям, не превышающим аналитического порога распознавания. В 1914 пробах, значения концентраций этилена (25,89 %) соответствуют уровню 2 (0,0015-0,01 % об.), а 626 значений этилена (8,47 %) соответствуют уровню 3 (более 0,01 % об.).

Концентрации ацетилен (C₂H₂) не превышающие предела обнаружения хроматографом выявлены в 4551 пробе масла, что составляет 61,56 % всех наблюдений по данному газу еще 1602 значения (21,67 %) концентраций ацетилен имели значения ниже аналитического порога распознавания. В связи тем, что для ацетилен уровень распознавания (0,0003 % об.) превышает верхнюю границу уровня 1 (0,00005 % об.) значения ацетилен с концентрациями выше аналитического порога распознавания, но ниже уровня 3 отнесены к уровню 2 (от 0,00005 до 0,001 % об.). Уровню 2 соответствовали 982 значения (13,28 %), а уровню 3 (более 0,001 % об.) – 258 значений (3,49 %).

Таким образом, на основании анализа установлено, что, в исправных трансформаторах негерметичного исполнения возможно превышение концентрациями газов, верхних граничных значений уровня 2, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Наибольшую вероятность превышения граничного значения уровня 2 выявлено у этилена, потом ацетилен, метана, этана и меньше всего у водорода.

В тоже время, наибольшую вероятность реализации концентраций газов ниже аналитического порога распознавания имеет водород, далее ацетилен, этан и метан. Для этилена данная вероятность является самой низкой. Максимальное количество значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания имеет C₂H₄ (2540 значений или 34,36 %). Далее следует CH₄ (1747 значений или 23,63 %), потом C₂H₂ (1240 значений или 16,77 %). Меньше всего значений с концентрациями выше аналитического порога распознавания выявлено у C₂H₆ (951 значение или 12,86 %) и H₂ (126 значений или 1,70 %).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в исправных трансформаторах, значения концентраций могут соответствовать значениям характерным для дефектного состояния (уровень 3). Как показал анализ, выполненный в работах [13-14] одной из основных причин превышения концентраций газов граничных значений, в бездефектных трансформаторах являются аварийные воздействия со стороны электрических сетей (короткие замыкания, перенапряжения, перегрузки и т.д.).

Для обучения нейронной сети были использованы результаты ХАРГ, для дефектного оборудования, которые получены как в результате сотрудничества авторов с энергетическими компаниями Украины, так и из открытых отечественных и зарубежных литературных источников. Общий объем выборочных значений составил 1103 измерения. Распределение выборочных значений по типам дефектов приведено в табл. 2. Как видно из таблицы в представленной к анализу выборке, разные типы дефекта имеют разный объем выборочных значений, т.е. разную вероятность их появления. Наибольшее число дефектов связано с перегревами в диапазоне температур выше 700 °С

(в таблице обозначен как перегрев высоких температур) и перегревами в области высоких температур, которые сопровождаются электрическими разрядами. Меньше всего наблюдений приходится на электрические разряды низкой энергии и перегревы, переходящие в дуговой разряд. Выполненный анализ показал, что в дефектном оборудовании значения концентраций газов, существенно зависят от стадии развития дефекта, при этом на начальных стадиях значения концентраций могут и не превышать граничных значений, соответствующих уровню 3 [12], но по мере развития дефекта значения концентраций возрастают. Еще одним немаловажным фактором, влияющим на значения концентраций отдельных газов, является тип дефекта. Как правило, максимальные значения концентраций, наблюдаются у газов, характерных для данного типа дефектов. Для сопутствующих газов значения концентраций несколько меньше. В тоже время, значения концентраций газов, не характерных для данного типа дефекта имеют значения соответствующие либо уровням 1 или 2, либо же вообще не превышают предела обнаружения хроматографа.

Таблица 2

Распределение выборочных значений по типам дефектов

№	Тип дефект	Объем выборки
1	Частичные разряды	115
2	Частичные разряды высокой интенсивности	15
3	Искровые и ползучие разряды	81
4	Разряды низкой энергии	17
5	Дуговой разряд (H ₂)	67
6	Дуговой разряд (C ₂ H ₂)	43
7	Разряды большой энергии (C ₂ H ₂)	53
8	Перегревы низких температур (CH ₄)	48
9	Перегревы низких температур (C ₂ H ₆)	57
10	Перегревы средних температур (CH ₄)	68
11	Перегревы средних температур (C ₂ H ₄)	81
12	Перегревы высоких температур (C ₂ H ₄)	260
13	Перегревы низких температур и разряды	35
14	Перегревы переходящие в дугу (CH ₄)	16
15	Перегревы переходящие в разряды (C ₂ H ₆)	27
16	Перегревы высоких температур и разряды	120

Примечание: в скобках приведен газ с максимальной концентрацией.

Каждому результату измерений концентраций газов был присвоен код, соответствующий уровням концентраций из таблицы 1. Кодировка диагнозов трансформаторов приведена в табл. 3.

Таблица 3

Кодировка диагнозов трансформаторов

Код	Диагноз
1	Исправное состояние
2	Подозрительное состояние
3	Дефектное состояние

Обучение нечеткой нейронной сети. Далее была разработана нечеткая нейронная сеть топология, которой приведена на рис. 1. У созданной сети 15 входов, по три входа по каждому из газов. Количество циклов обучения созданной нечеткой нейронной сети составило 300 эпох.

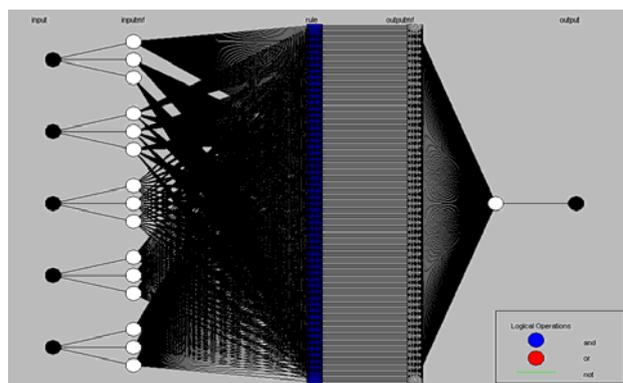


Рис. 1. Топология нечеткой нейронной сети

На рис. 2 показана зависимость ошибки обучения от количества циклов обучения.

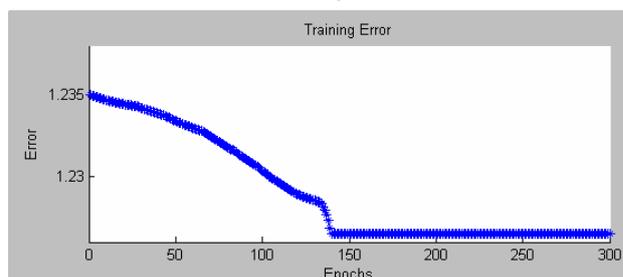


Рис. 2. Зависимость ошибки обучения нечеткой нейронной сети от количества циклов обучения

Как видно из рис. 2 снижение погрешности обучения наблюдается примерно до середины интервала обучения. Дальнейшее увеличение числа циклов обучения не приводит к повышению достоверности распознавания. Для снижения погрешности был использован аппарат нечеткой логики.

Этап фаззификации. На данном этапе были выделены входные лингвистические переменные:

- ЛП_{вх 1}: <концентрация водорода>
- ЛП_{вх 2}: <концентрация метана>
- ЛП_{вх 3}: < концентрация этана >
- ЛП_{вх 4}: < концентрация этилена >
- ЛП_{вх 5}: < концентрация ацетилена >

Далее ЛП_{вх i} делится на несколько лингвистических термов ЛТ_{ij} характеризующих особенности состояния данной переменной:

$$ЛТ_{ij}, j=1 \dots n,$$

где: j – номер терма ЛП_{вх i}, n – количество термов, на которое разбито – ЛП_{вх i}.

Разбиение на термы для каждого из газов проводилось следующим образом:

- ЛП_{вх 1} разделена на три ЛТ
 - ЛТ₁₁: < концентрация в пределах нормы – 1>
 - ЛТ₁₂: < подозрительная концентрация – 2>
 - ЛТ₁₃: < дефектная концентрация – 3>
- ЛП_{вх 2} разделена на три ЛТ
 - ЛТ₂₁: < концентрация в пределах нормы – 1>
 - ЛТ₂₂: < подозрительная концентрация – 2>
 - ЛТ₂₃: < дефектная концентрация – 3>
- ЛП_{вх 3} разделена на три ЛТ
 - ЛТ₃₁: < концентрация в пределах нормы – 1>
 - ЛТ₃₂: < подозрительная концентрация – 2>
 - ЛТ₃₃: < дефектная концентрация – 3>
- ЛП_{вх 4} разделена на три ЛТ

ЛТ₄₁: < концентрация в пределах нормы – 1 >

ЛТ₄₂: < подозрительная концентрация – 2 >

ЛТ₄₃: < дефектная концентрация – 3 >

ЛП_{вх 5} разделена на три ЛТ

ЛТ₅₁: < концентрация в пределах нормы – 1 >

ЛТ₅₂: < подозрительная концентрация – 2 >

ЛТ₅₃: < дефектная концентрация – 3 >

Определение функций принадлежности, является достаточно сложной задачей. Для того, чтобы выбранные функции принадлежности и их границы наиболее адекватно описывали результаты хроматографического анализа, использовались функции плотности распределения концентраций газов для исправного и дефектного состояний [15]. В качестве примера на рис. 3, приведены плотности теоретических распределений Вейбулла для концентраций метана, полученных для исправных трансформаторов (D_1), исправных трансформаторов после аварийных воздействий со стороны электрических сетей (D_{12}) и трансформаторов у которых выявлен дефект (D_2).

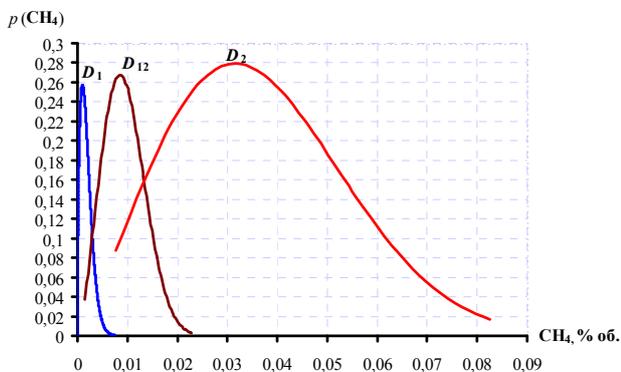


Рис. 3. Плотности теоретических распределений метана для трансформаторов с разным состоянием

В качестве функции принадлежности очень удобно использовать трапецидальную функцию, степень принадлежности которой имеет максимальное значение в середине интервала и снижается по его краям. В качестве границ для ЛТ₁ всех лингвистических переменных были выбраны границы соответствующие функциям плотностей распределения концентраций газов, для трансформаторов с разным состоянием (см. рис. 3). Значения границ для ЛТ₂ и ЛТ₃ всех лингвистических переменных выбирались на основе функций плотностей распределения. На рис. 4 приведены функции принадлежности метана для трех лингвистических термов. Как видно из рис. 4 функции принадлежности выбраны таким образом, чтобы учесть как рекомендации СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006, так и опыт эксплуатации отраженный в виде функций плотности распределения.

Выходные лингвистические переменные имеют вид:

ЛП_{вых 1}: <Значения концентраций в пределах нормы – 1 >

ЛП_{вых 2}: <Значения концентраций выше нормы – 2 >

ЛП_{вых 3}: <Значения концентраций соответствуют наличию дефекта – 3 >

Разбиение на термы проводилось следующим образом:

ЛП_{вых 1} разделена на два ЛТ

ЛТ₁₁: <Соответствует – Y >

ЛТ₁₂: <Не соответствует – N >

ЛП_{вых 2} разделена на два ЛТ

ЛТ₂₁: <Соответствует – Y >

ЛТ₂₂: < Не соответствует – N >

ЛП_{вых 3} разделена на два ЛТ

ЛТ₃₁: <Соответствует – Y >

ЛТ₃₂: < Не соответствует – N >

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана треугольная функция.

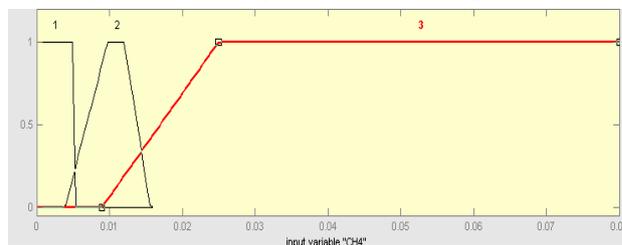


Рис. 4. Функции принадлежности трех лингвистических термов для, лингвистической переменной содержание метана в масле

Этап вычисления правила. Система с нечеткой логикой должна иметь базу правил, которая, по сути представляет собой эмпирические знания эксперта о механизме управления. Для вычисления правил используются нечеткие входы, полученные от блока фаззификации, и правила, находящиеся в базе знаний. В левой части правил перебираются возможные ситуации на входе системы, а в правой части указывается, какая ЛП описывает правильную реакцию системы. В качестве решающего правила была реализована методика распознавания регламентированная в [9]. Сокращенно базу правил можно представить в виде:

Правило 1: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 1$];

Правило 2: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

Правило 3: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 6: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 7: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 17: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 1$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 18: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 1$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

Правило 27: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$] И [$CH_4 \in 1$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 2$] ТО [$D \in 2$];

Правило 28: ЕСЛИ [$H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 2$] И [$C_2H_2 \in 1$] ТО [$D \in 2$];

...

...

Правило 48: ЕСЛИ [$H_2 \in 1$ ИЛИ $H_2 \in 2$] И [$CH_4 \in 1$ ИЛИ $CH_4 \in 2$] И [$C_2H_6 \in 1$ ИЛИ $C_2H_6 \in 2$] И [$C_2H_4 \in 3$] И [$C_2H_2 \in 3$] ТО [$D \in 3$];

Правило 49: ЕСЛИ $[H_2 \in 3]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 1]$ ИЛИ $C_2H_4 \in 2]$ И $[C_2H_2 \in 1]$ ИЛИ $C_2H_2 \in 2]$ ТО $[D \in 3]$;

...

Правило 63: ЕСЛИ $[H_2 \in 1]$ ИЛИ $H_2 \in 2]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 3]$ И $[C_2H_2 \in 3]$ ТО $[D \in 3]$;

Правило 64: ЕСЛИ $[H_2 \in 3]$ И $[CH_4 \in 3]$ И $[C_2H_6 \in 3]$ И $[C_2H_4 \in 3]$ И $[C_2H_2 \in 3]$ ТО $[D \in 3]$;

Этап дефаззификации. На данном этапе происходит преобразование нечеткой информации, содержащейся в виде достоверности лингвистического термина, в четко определенное значение. Дефаззификация производится по фигуре, полученной путем сложения всех функций принадлежности термов входной переменной. В качестве метода дефаззификации был принят метод правого модального значения, который обеспечивает наибольшую достоверность при определении степени принадлежности выходных переменных.

Тестирование нечеткой нейронной сети. Обученная сеть была протестирована на независимой выборке (значения, которой не использовались при обучении). Для удобства анализа тестовые данные были разбиты согласно известным диагнозам на три группы. Результаты тестирования для исправных трансформаторов, значения концентраций которых не превышают значений для уровня 1, из табл. 1, приведены на рис. 5.

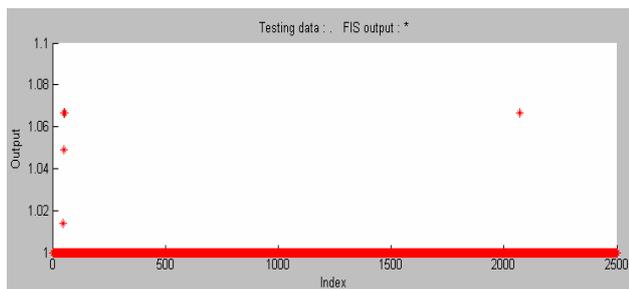


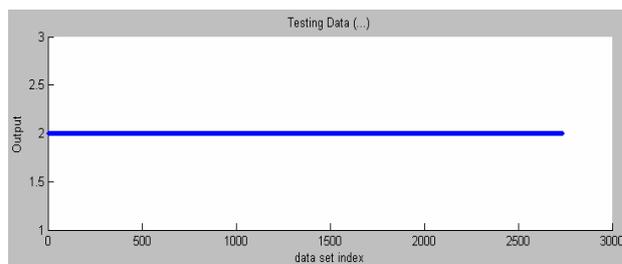
Рис. 5. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ трансформаторов не имеющих дефекта

Как видно из рис. 5, нечеткая нейронная сеть безошибочно отнесла представленные к распознаванию данные к уровню 1. Далее обученной нейронной сети были представлены к распознаванию значения концентраций растворенных газов, которые соответствуют уровню 2. Результаты тестирования приведены на рис. 6.

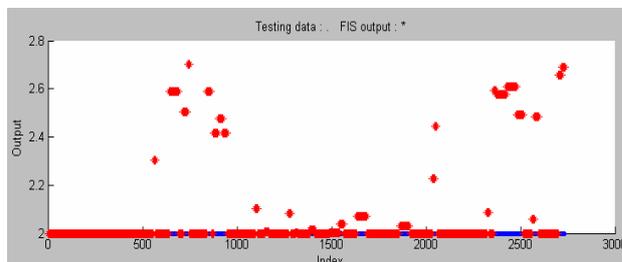
Из рис. 6 видно, что сеть безошибочно, но с разной степенью принадлежности отнесла все представленные на вход результаты ХАРГ к уровню 2. На последнем этапе тестирования на вход нечеткой нейронной сети были поданы результаты ХАРГ, для обнаружения в котором были выявлены дефекты различного типа. Следует отметить, что в подаваемой на вход сети выборки, значение концентрации как минимум одного из газов соответствовало уровню 3.

Результаты тестирования приведены на рис. 7.

Как видно из рисунка нечеткая нейронная сеть, безошибочно распознала и дефектное состояние трансформаторов.

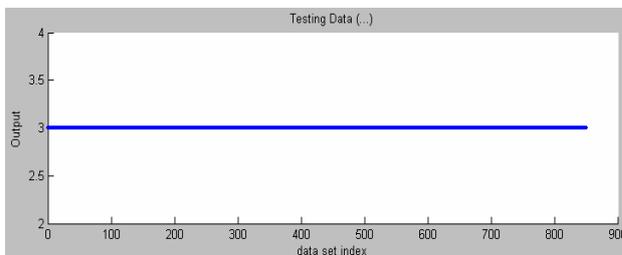


а

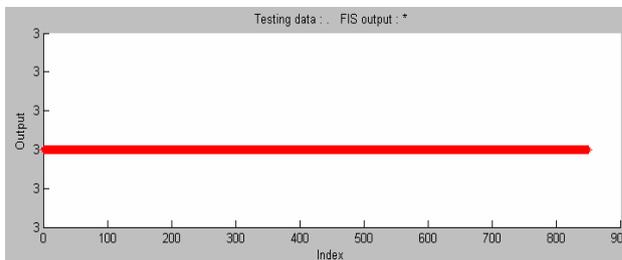


б

Рис. 6. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ трансформаторов, значения концентраций газов которых соответствуют уровню 2 (а – исходные данные; б – результаты тестирования)



а



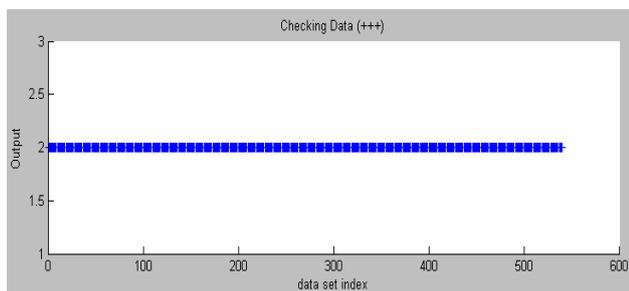
б

Рис. 7. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ дефектных трансформаторов (а – исходные данные; б – результаты тестирования)

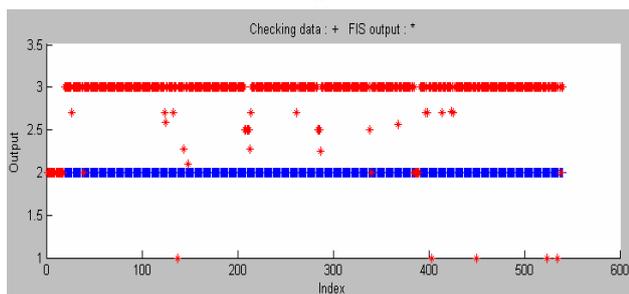
Анализ возможностей нечеткой нейронной сети. Далее на вход нечеткой нейронной сети были поданы результаты ХАРГ исправных трансформаторов, в которых концентрации газов соответствовали уровню 3. Причиной роста концентраций газов служили как аварийные режимы работы электрических сетей (воздействие токов короткого замыкания, перенапряжений, перегрузки трансформаторов [13, 14]), так и нарушения оперативным персоналом в процессе отбора, транспортировки и хранения проб масел, а также при проведении испытаний. Результаты работы сети приведены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, из 541 поданного на вход результатов ХАРГ к бездефектному состоянию сеть отнесла только 5. Выполненный анализ показал, что в этих пяти пробах масел уровни 3 соответствовали

значения только одного из пяти газов. Значения концентраций остальных четырех не превышали предела обнаружения хроматографом (условно равнялись нулю). Подобное газосодержание не характерно для дефектного состояния, т.е. в обучающей выборке такие данные отсутствовали, что, наверное, и позволило сети поставить данный диагноз. Еще 27 результатов ХАРГ, были отнесены сетью к подозрительному состоянию, т.е. уровню 2. В данных пробах масел концентрация только одного из пяти газов соответствовала уровню 3. Концентрации остальных четырех не превышали предела обнаружения хроматографом или соответствовали уровню 1. Все остальные результаты ХАРГ предъявленные к распознаванию были отнесены сетью к состоянию 3, т.е. ошибочно признаны дефектными, что является ошибкой первого рода (ложная тревога).



a

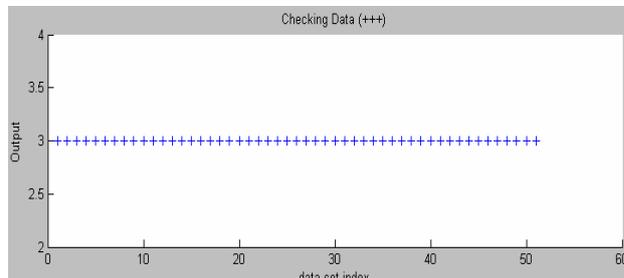


б

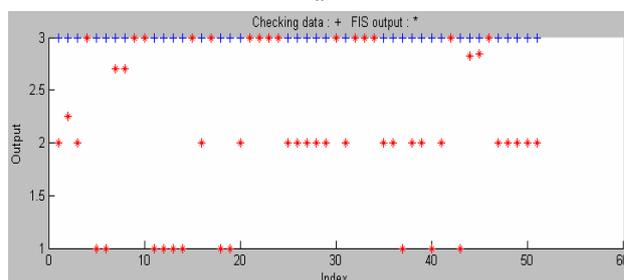
Рис. 8. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ бездефектных трансформаторов, у которых концентрации газов соответствовали уровню 3 (*a* – исходные данные; *б* – результаты тестирования)

Не менее интересными являются результаты работы нечеткой сети, при распознавании состояния трансформаторов по результатам ХАРГ дефектного оборудования, которые получены на ранних стадиях развития дефекта, когда концентрации газов не превышают верхней границы уровня 2. Результаты работы электрической сети отражены на рис. 9. Как видно из рис. 9 из 51 результата поданного на вход сети только для 15, сетью был поставлен диагноз дефектное состояние. Для 25 проб масел, с разной степенью принадлежности, сетью был поставлен диагноз подозрительное состояние (уровень 2). Примечательно, что к уровню 2 сетью были отнесены результаты ХАРГ трансформаторов гидростанции «Nelson river», Северная Канада [16], которые были получены за 10 месяцев и пять дней до их повреждения (соответственно 1 и 2 результаты). Следует отметить, что используемая компанией экспертная система не смогла предотвратить повреждение данных трансформато-

ров. Однако, по представленным результатам ХАРГ, нечеткая нейронная сеть однозначно не определила дефектное состояние в этих трансформаторах, а только отнесла полученные результаты к состоянию «подозрительных концентраций». Для 11 результатов ХАРГ нечеткая нейронная сеть поставила диагноз отсутствие дефекта, что является ошибкой второго рода (пропуск цели).



a



б

Рис. 9. Результаты тестирования нечеткой нейронной сети для результатов ХАРГ дефектных трансформаторов, у которых концентрации газов не превышали граничных значений уровня 2 (*a* – исходные данные; *б* – результаты тестирования)

Анализируя полученные результаты, следует признать, что разработанной и обученной нейронной сети пришлось решать взаимоисключающую задачу. С одной стороны для распознавания дефектов оборудования на ранней стадии их развития функция принадлежности для дефектного состояния должна быть смещена в область более низких значений, с другой стороны для распознавания влияния аварийных режимов работы сети, функция принадлежности для дефектного состояния должна быть смещена в область более высоких значений. Однако, даже в такой ситуации нечеткая нейронная сеть, достаточно успешно справилась с задачей, особенно если учесть, что безошибочное распознавание аварийных воздействий и дефектов на ранней стадии развития, на основе использования только значений концентраций газов принципиально невозможно. В тоже время как показано в [6] использование в качестве критерия развития дефекта, характера изменений концентраций газов во времени, позволяет решить данную задачу практически со 100 % достоверностью. Таким образом, на достоверность диагноза нейронной сети значимое влияние оказывают как диагностические признаки, используемые для постановки диагноза, так и правило принятия решений.

Кроме того, достоверность диагноза, который ставит нейронная сеть, существенно ограничивается особенностями метода ХАРГ. Наглядно это продемонстрировал пример с распознаванием состояния

вызванного аварийным воздействием со стороны электрической сети либо ошибками персонала. Поскольку как развития дефекта, так и воздействие аномально высоких токов, напряжений или температур, вследствие аварийных режимов работы сети, приводят к росту концентраций газов, то на основании анализа только значений концентраций газов, определить причину газовой выделенной не представляется возможным. Поэтому ожидать, безошибочной постановки диагноза со стороны нейронной сети было бы крайне некорректным.

Выводы:

1. Разработана, обучена и протестирована нечеткая нейронная сеть для интерпретации результатов ХАРГ. В отличие от аналогичных исследований, при обучении нейронной сети, функции принадлежности лингвистических термов выбирались с учетом функций плотностей распределения концентраций газов для трансформаторов с различным состоянием, что позволило учесть как особенности газосодержания масел, характерные для негерметичных трансформаторов, так и условия эксплуатации данного оборудования.

2. По результатам проверки сети на независимой выборке установлено, что наибольшую трудность при постановке диагноза по критерию граничных концентраций газов, представляют собой результаты ХАРГ, полученные для исправных трансформаторов в которых концентрации растворенных в масле газов превышают свои граничные значения, а также для дефектных трансформаторов на ранней стадии развития дефектов.

3. Выполненный анализ показал, что достоверность распознавания нечетких нейронных сетей имеет ограничения, которые определяются особенностями метода ХАРГ, используемыми диагностическими признаками и выбранным правилом принятия решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.
2. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Жук І.А. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №1. – С. 43-51.
3. Костерев М.В., Бардик Є.І., Вожаков Р.В., Болотний М.П. Оцінка технічного стану і прогнозування ресурсу роботоздатності силових трансформаторів на основі теорії нечітких множин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №2. – С. 83-87.
4. Костерев Н.В., Бардик Е.И. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С. 39-43.
5. Денисова Н.В., Сахапов А.А. Нейронная сеть как инструмент диагностики силовых масляных трансформаторов // Архивариус. – 2016. – №3(7). – С. 33-37.
6. Шутенко О.В. Формирование процедуры нечеткого вывода для обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2008. – №44. – С. 162-177.
7. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dis-

solved gas analysis // 21st Mediterranean Conference on Control and Automation. – Jun. 2013. – pp. 584-589. doi: 10.1109/MED.2013.6608781.

8. Hongzhong Ma, Zheng Li, P. Ju, Jingdong Han, Limin Zhang. Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method // 2005 International Power Engineering Conference, 2005. doi: 10.1109/ipecc.2005.206897.

9. C.-H. Liu, T.-B. Lin, L. Yao, S.-Y. Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – Oct. 2015. – vol.10. – no.6. – pp. 689-698. doi: 10.1002/tee.22148.

10. M. A. A. Siddique, S. Mehfuz. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers // 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), Dec. 2015. doi: 10.1109/indicon.2015.7443174.

11. C. H. Liu, L. T. Yao, T. B. Lin, S. Y. Wang. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis // Applied Mechanics and Materials. – Jan. 2013. – vol.284-287. – pp. 1082-1086. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.284-287.1082.

12. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маслосодержащего трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ, 2007. – 92 с.

13. Шутенко О.В. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2008. – Т.1. – №73. – С. 45-48.

14. Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А., Мельник Н.Ю. Анализ причин газовой выделенной в силовых трансформаторах, на основе исследования корреляционных связей между растворенными в масле газами // Світлотехніка та електроенергетика. – 2012. – №3 – С. 72-81.

15. Шутенко О.В., Баклай Д.М. Аналіз законів розподілу концентрацій газів, розчинених в маслі високовольтних трансформаторів негерметичного виконання // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – №60(1033). – С. 136-150.

16. Аксенов Ю.П. Мониторинг технического состояния высоковольтной изоляции электрооборудования энергетического назначения в эксплуатации и при ремонтах. – М.: Научтехлитиздат, 2002. – 338 с.

REFERENCES

1. Kosterev M.V., Bardik E.I. *Pytannya pobudovy nechitkykh modeley otsinky tekhnichnoho stanu ob'yektiv elektrychnykh system* [The issue of building fuzzy models evaluate the technical condition of the objects of electrical systems]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2011. 654 p. (Ukr).
2. Lezhnjuk P.D., Rubanenko O.E., Zhuk I.A. Diagnosis of power transformers using fuzzy sets. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2005, no.1, pp. 43-51. (Ukr).
3. Kosterev M.V., Bardik E.I., Vozhakov R.V., Bolotnij M.P. Technical condition evaluation and prediction of the resource operability of power transformers based on the theory of fuzzy sets. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2012, no.2, pp. 83-87. (Ukr).
4. Kosterev N.V., Bardik E.I. Fuzzy modeling of electrical equipment for the evaluation of the technical condition and deciding on further exploitation strategy. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki»*, 2006, no.3, pp. 39-43. (Rus).
5. Denisova N.V., Sahapov A.A. Neural network as a tool for diagnosis power oil transformers. *Archivarius*, 2016, no.3(7), pp. 33-37. (Rus).
6. Shutenko O.V. Formation of fuzzy inference procedures to detect emerging defects in high-voltage transformers. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2008, no.44, pp 162-177. (Rus).

7. Ahmed M.R., Geliel M.A., Khalil A. Power transformer fault diagnosis using fuzzy logic technique based on dissolved gas analysis. *21st Mediterranean Conference on Control and Automation*, Jun. 2013, pp. 584-589. doi: 10.1109/MED.2013.6608781.
8. Hongzhong Ma, Zheng Li, P. Ju, Jingdong Han, Limin Zhang. Diagnosis of power transformer faults on fuzzy three-ratio method. *2005 International Power Engineering Conference, 2005*. doi: 10.1109/ipecc.2005.206897.
9. C.-H. Liu, T.-B. Lin, L. Yao, S.-Y. Wang. Integrated power transformer diagnosis using hybrid fuzzy dissolved gas analysis. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Oct. 2015, vol.10, no.6, pp. 689-698. doi: 10.1002/tee.22148.
10. M. A. A. Siddique, S. Mehruz. Artificial neural networks based incipient fault diagnosis for power transformers. *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Dec. 2015. doi: 10.1109/indicon.2015.7443174.
11. C. H. Liu, L. T. Yao, T. B. Lin, S. Y. Wang. Innovated Fault Diagnosis for Power Transformer Using Hybrid Fuzzy Dissolved Gas Analysis. *Applied Mechanics and Materials*, Jan. 2013, vol.284-287, pp. 1082-1086. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.284-287.1082.
12. SOU-N EE 46.501: Diagnostika maslonapovnenogo transformatornogo obladnannja za rezul'tatami hromatografichnogo analizu vil'nih gaziv, vidibranih iz gazovogo rele, i gaziv, rozchinenih ui zoljacijnomu masli [SOU-N EE 46.501: Diagnosis oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gas with gas relay selected, i gases dissolved in insulating oil]. Kiiiv, 2007, 92p.(Ukr).
13. Shutenko O.V. Research of influence of operational factors on results of chromatographic analysis of the gases dissolved in oil. *Bulletin of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 2008, vol.1, no.73, pp. 45-48. (Ukr).
14. Shutenko O.V., Baklay D.N., Ostriukova T.A., Melnik N.Y. Analysis of the causes of gassing in the power transformer, based on a study of correlations between dissolved in oil gases. *Lighting Engineering and Power Engineering*, 2012, no.3, pp. 72-81. (Rus).
15. Shutenko O.V., Baklay D.M. Analysis of gases concentration distribution laws, dissolved in oil of high voltage transformers unpressurized of execution. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.60(1033), pp.136-150. (Ukr).
16. Aksenov Yu.P. *Monitoring tekhnicheskogo sostoianiiia vysokovol'tnoi izoljatsii elektrooborudovaniia energeticheskogo naznacheniiia v ekspluatatsii i pri remontakh* [Technical condition monitoring of high-voltage insulation of electrical energy purposes in the operation and repairs]. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2002. 338 p. (Rus).

Поступила (received) 25.01.2017

Бондаренко Владимир Емельянович¹, д.т.н., проф.,
 Шутенко Олег Владимирович¹, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
 тел/phone +38 057 7076246,
 e-mail: bond@kpi.kharkov.ua, o.v.shutenko@gmail.com

V.E. Bondarenko¹, O.V. Shutenko¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
Development of fuzzy neural network for the interpretation of the results of dissolved in oil gases analysis.

Purpose. The purpose of this paper is a diagnosis of power transformers on the basis of the results of the analysis of gases dissolved in oil. **Methodology.** To solve this problem a fuzzy neural network has been developed, tested and trained. **Results.** The analysis of neural network to recognize the possibility of developing defects at an early stage of their development, or growth of gas concentrations in the healthy transformers, made after the emergency actions on the part of electric networks is made. It has been established greatest difficulty in making a diagnosis on the criterion of the boundary gas concentrations, are the results of DGA obtained for the healthy transformers in which the concentration of gases dissolved in oil exceed their limit values, as well as defective transformers at an early stage development defects. The analysis showed that the accuracy of recognition of fuzzy neural networks has its limitations, which are determined by the peculiarities of the DGA method, used diagnostic features and the selected decision rule. **Originality.** Unlike similar studies in the training of the neural network, the membership functions of linguistic terms were chosen taking into account the functions gas concentrations density distribution transformers with various diagnoses, allowing to consider a particular gas content of oils that are typical of a leaky transformer, and the operating conditions of the equipment. **Practical value.** Developed fuzzy neural network allows to perform diagnostics of power transformers on the basis of the result of the analysis of gases dissolved in oil, with a high level of reliability. References 16, tables 3, figures 9.

Key words: diagnostics of transformers, analysis of dissolved gases in oil, peculiarities of gas content, concentration levels, fuzzy neural networks, membership function, Weibull distribution, network training, fuzzy conclusion, wrong decisions.