

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ О СОСТОЯНИИ ИЗОЛЯЦИИ ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИКИ С НЕЧЕТКИМИ МНОЖЕСТВАМИ

И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, Е.А. Храмшина

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

На мощных печных трансформаторах ПАО «ММК» установлены системы непрерывного контроля их технического состояния. Существующей системой диагностики с использованием электрического метода измеряются кажущийся заряд и интенсивность частичных разрядов PDI. Существует задача создания экспертной системы по принятию решений, дающей возможность определить появление дефекта изоляции, оценить уровень его опасности для дальнейшей эксплуатации трансформатора. Совокупность диагностических переменных предлагается свести к одному обобщенному детерминированному параметру, определяющему количественное и качественное состояние изоляции. Для этого используется математический аппарат, разработанный на основе синтеза нечетких лингвистических переменных и количественных характеристик двух измеряемых параметров диагностируемого печного трансформатора. Достоверность и удобство предложенного метода подтверждается соответствующими расчетными результатами на основе данных, снятых с промышленной системы on-line мониторинга, демонстрирующими адекватное поведение модели применительно к печным трансформаторам.

Ключевые слова: печной трансформатор, бумажно-масляная изоляция, мониторинг состояния изоляции, частичные разряды, величина кажущегося заряда, интенсивность частичных разрядов, обобщенный показатель, нечеткое множество, лингвистическая переменная, ухудшенное и предаварийное состояния.

Введение

Вопросы диагностики электрооборудования в России сегодня особенно актуальны, так как большая его часть уже отработала эксплуатационный ресурс (или установленный нормативными документами) и эксплуатируется на пределе своих возможностей. Такое оборудование требует повышенного внимания и более частых проверок при эксплуатации [1]. Необходимость усиленного контроля технического состояния наиболее актуальна для трансформаторов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш (печных трансформаторов). Это объясняется тем, что они работают в тяжелых условиях, вызванных резкопеременной, несимметричной нагрузкой, на обмотки трансформатора действуют значительные электродинамические нагрузки, возникающие вследствие бросков тока, связанных с технологией электродугового расплава стали. Кроме того, переключение РПН, которое на сетевых трансформаторах происходит несколько раз в год, на печных трансформаторах осуществляется до 1000 раз в сутки [2].

В настоящее время за рубежом и в России разрабатываются и активно внедряются стационарные системы on-line мониторинга параметров высоковольтных сетевых и блочных трансформаторов, а также системы непрерывного контроля состояния печных трансформаторов. На ПАО «ММК» подобные системы установлены на печные трансформаторы ДСП-180 ЭСПЦ FTONBR-150200/35 фирмы «TAMINI» (Италия) и трансформаторы агрегатов печь-ковш (АПК) ЭТЦНКВ – 40000/110-УХЛ-4, изготовленные на ОАО «Электrozавод» [3, 4].

Системы on-line мониторинга разработаны на базе диагностического оборудования ОАО «Димрус» (г. Пермь) с использованием прибора непрерывного контроля газов и влажности масла MINITRANS фирмы *Kelman* [5]. Кроме этого производится контроль ряда других параметров. В работе [6] на основе анализа газов, растворенных в масле, проводится принятие решения о текущем техническом состоянии и прогнозирование периода дальнейшей эксплуатации силового трансформатора методом экстраполяции временных рядов.

Известно, что наиболее восприимчиво к образованию частичных разрядов (ЧР) оборудование с бумажно-масляной изоляцией. В силовых трансформаторах ЧР возникают между слоями бумаги (прокладками из электрокартона). Особенно подвержены образованию ЧР высоковольтные вводы (проходные изоляторы).

В системе непрерывной диагностики печных трансформаторов ПАО «ММК» для измерения параметров ЧР используется электрический метод, обладающий достаточно высокой чувствительностью при условии подавления помех. Он заключается в регистрации электрических сигналов на трехфазном высоковольтном вводе, возникающих в датчиках при протекании в них импульсов тока. По амплитудным значениям сигналов на выходе датчика определяют кажущиеся заряды ЧР, по числу импульсов в единицу времени (или за период воздействующего напряжения) – соответствующее число разрядов, а по их расположению во времени – фазовое расположение каждого ЧР относительно воздействующего переменного напряжения [7, 8].

Существующей системой диагностики измеряются два параметра ЧР. Прежде всего, это кажущийся заряд, Q_{02} (нКл), который количественно пропорционален максимальной амплитуде импульса. Система настроена таким образом, что длительность импульса должна быть не более 640 нс и в течение 2560 нс после импульса не должно быть импульсов амплитудой выше 30 % от первоначального импульса. В случае если эти условия не выполняются, импульс считается помехой и не регистрируется (блокируется). Импульс ЧР считается периодически повторяющимся, если частота его следования составляет 0,2 импульса на один период питающей сети.

В действующей системе регистрации ЧР применяются приборы, в которых максимальная амплитуда импульса измеряется как напряжение U_{02} (мВ). Зная его, для нахождения кажущегося заряда используется линейная зависимость, определяющая настройки системы $Q_{02} = U_{02}/k_0$ ($k_0 = 32,56$). Таким образом, величина кажущегося заряда Q_{02} и напряжение повторяющихся импульсов U_{02} связаны между собой и представляют одну и ту же характеристику ЧР.

Второй измеряемой величиной является мощность ЧР, этот параметр сведен к интегральному параметру PDI (*Partial Discharge Intensity* – интенсивность частичных разрядов), который измеряется в мВт и определяется как

$$PDI = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m Q_i U_d,$$

где T – время наблюдения; m – число регистрируемых импульсов за время T ; U_d – действующее значение напряжения.

В настоящее время общепринятые нормы на допустимые уровни ЧР в эксплуатируемых печных трансформаторах отсутствуют. Для печных трансформаторов были определены и согласованы со службами эксплуатации и технического контроля ПАО «ММК» пороги Q_{r1} , PDI_{r1} ухудшенного состояния изоляции трансформатора

$$U_{02} > U_{r1} = 80 \text{ мВ } (Q_{02} > Q_{r1} = 2,5 \text{ нКл}); \quad PDI > PDI_{r1} = 60 \text{ мВт};$$

и пороги Q_{r2} , PDI_{r2} предаварийного состояния

$$U_{02} > U_{r2} = 160 \text{ мВ } (Q_{02} > Q_{r2} = 5 \text{ нКл}); \quad PDI > PDI_{r2} = 80 \text{ мВт}.$$

С помощью существующей системы мониторинга производится непрерывная регистрация уровня частичных разрядов в изоляции вводов, обмоток и сердечника. Вместе с тем, стала актуальной задача создания экспертной системы по принятию решений, дающей возможность определить появление дефекта изоляции, оценить уровень его опасности для дальнейшей эксплуатации трансформатора. В создаваемой системе контроль за ЧР должен производиться в комплексе с системой контроля газов, растворенных в масле, это обеспечит наиболее точные результаты по идентификации неисправности и локализации места ее зарождения. Обычно при создании подобной системы совокупность диагностических параметров стремятся по возможности свести до одного обобщенного детерминированного параметра, определяющего количественное и качественное состояние изоляции.

Постановка задачи

Имеются два измеряемых параметра частичных разрядов: U_{02} (или Q_{02}) и PDI. Устойчивый диагностируемый уровень любого из них при сравнении с заданными пороговыми значениями

говорит о наличии степени развития дефектов в изоляции трансформатора. С позиции обычных четких множеств техническое состояние изоляции трансформатора можно отобразить, как показано на рис. 1.

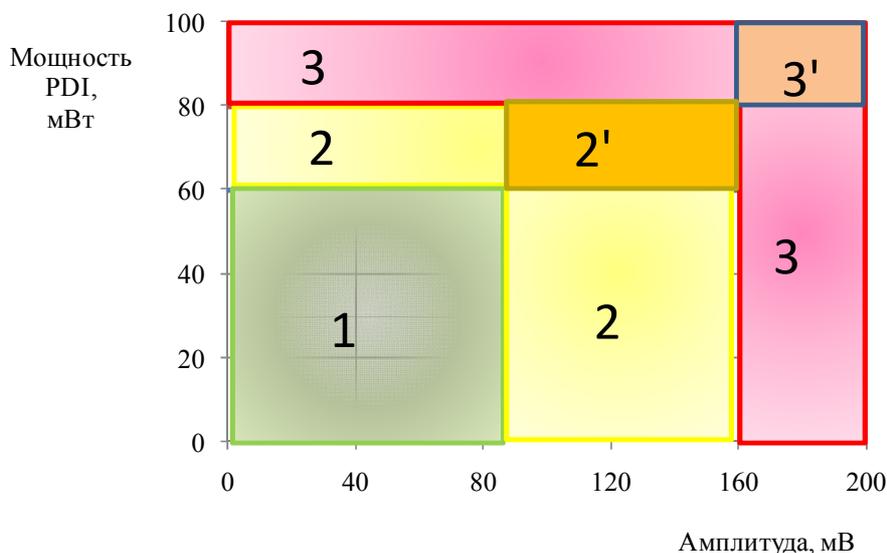


Рис. 1. Оценка состояния изоляции трансформатора по измеряемым параметрам ЧР с позиции четких множеств: 1 – нормальное состояние; 2 – ухудшенное состояние; 3 – предаварийное состояние

В этом случае диагноз текущего состояния изоляции состоит в применении характеристической функции $\mu_A(U_{02}, PDI)$ принадлежности к одному из трех множеств состояния:

- норма (1), если $0 \leq U_{02} < U_{02\ r1}$ или $0 \leq PDI < PDI_{r1}$;
- ухудшенное (2), если $U_{02\ r1} \leq U_{02} < U_{02\ r2}$ или $PDI_{r1} \leq PDI < PDI_{r2}$;
- предаварийное (3), если $U_{02\ r2} \leq U_{02}$ или $PDI_{r2} \leq PDI$.

Из рис. 1 видно, что можно выделить еще два подмножества:

- сильно ухудшенное (2'), если $U_{02\ r1} \leq U_{02} < U_{02\ r2}$ и $PDI_{r1} \leq PDI < PDI_{r2}$;
- аварийное (3'), если $U_{02\ r2} \leq U_{02}$ и $PDI_{r2} \leq PDI$.

На самом деле понятия границ перехода изоляции из одного состояния в другое по некоторому пороговому значению чисто условные (неопределенные), поэтому для оценки технического состояния более подходит логика с нечеткими множествами.

В настоящее время из литературы известны подходы, когда рассматриваются алгоритмы принятия решений с использованием нечетких лингвистических переменных. Так, авторами работы [1] предложен метод определения вероятности проявления или не проявления признаков состояния основного оборудования на базе технологии нечеткой логики, позволяющей получить формализованный результат. В качестве признаков состояния рассматривалось содержание газов в масле и перегревы элементов оборудования, полученные с помощью тепловизионного контроля. В зависимости от того, находится ли выбранный показатель в норме или нет и наличия при этом дефекта у силового трансформатора, введены четыре градации различных состояний для каждого вида диагностики.

Целью данной работы является получение обобщенного показателя, характеризующего состояние изоляции трансформатора, на основе on-line мониторинга двух параметров ЧР с использованием алгоритмов логики с нечеткими множествами.

Основная часть

Выбор обобщенного показателя на основе логики с нечеткими множествами

В настоящее время существует довольно большое количество программного обеспечения, использующего теорию нечетких множеств при решении задач в различных областях [9, 10].

Управление в технических системах

При моделировании сложных технических систем наибольшей универсальностью обладают пакеты программ *Fuzzy TECH* и *Fuzzy Logic Toolbox for MatLab* [9]. При их использовании основные трудности связаны с генерацией базы нечетких правил и корректировкой формы функций принадлежности. Кроме этого в настоящий момент не существует какого-либо одного общепризнанного метода адаптации нечетких моделей.

В данной работе использовался пакет *Fuzzy Logic Toolbox for MatLab*, преимуществом которого является наличие достаточного количества документации и информационных источников по его применению в различных областях, в том числе в области безопасности эксплуатации промышленного оборудования. Степень принадлежности элемента нечеткому множеству определяется функцией принадлежности, причем ее конкретное значение определяется коэффициентом принадлежности. Переменные, которые используются в нечетких высказываниях подусловий правил нечеткого вывода, называются входными лингвистическими переменными, а переменные, используемые в высказываниях подзаключений – выходными лингвистическими переменными. Для каждой из выбранных переменных зададим соответствующие терм-множества и функции принадлежности.

В качестве входных лингвистических переменных используются максимальная амплитуда ЧР и мощность PDI, а в качестве выходной лингвистической переменной – уровень опасности эксплуатации трансформатора на основании оценки состояния изоляции. Выбранные лингвистические переменные и соответствующие им терм-множества представлены в табл. 1.

Техническое состояние изоляции трансформатора определялась матрицей правил в зависимости от параметров ЧР (табл. 2).

Таблица 1

Описание лингвистических переменных

Тип лингвистической переменной	Наименование	Терм-множества
Входная	Максимальная амплитуда ЧР (U_{02})	Низкий
		Средний
		Высокий
	Мощность ЧР (PDI)	Низкий
		Средний
		Высокий
Выходная	Уровень опасности эксплуатации	Нормальное
		Ухудшенное
		Предаварийное

На основании табл. 1 можно сформулировать 9 правил для нечеткого вывода при оценке технического состояния оборудования. Первое из них будет иметь следующий вид: **Если** U_{02} «Низкий» **И** PDI «Низкий», **ТО** техническое состояние «Нормальное»; второе: **Если** U_{02} «Средний» **И** PDI «Низкий», **ТО** техническое состояние «Ухудшенное» и т. д.

Таблица 2

Матрица правил для оценки уровня опасности эксплуатации оборудования

Максимальная амплитуда ЧР (U_{02})	Мощность ЧР (PDI)		
	Низкий	Средний	Высокий
Низкий	Нормальное	Ухудшенное	Предаварийное
Средний	Ухудшенное	Ухудшенное	Предаварийное
Высокий	Предаварийное	Предаварийное	Предаварийное

Каждому правилу можно придать весовые коэффициенты F_i , ($i = 1, 2, \dots, 9$), принимающие значения из интервала $[0, 1]$. При первоначальном составлении правил значения весовых коэф-

фициентов принимаются равными единице. В дальнейшем, при необходимости оптимизации базы правил нечеткого вывода и ее адаптации к практическим данным, значения весовых коэффициентов уточняются.

При реализации нечетких моделей входными сигналами являются измеряемые величины U_{02} и PDI, однозначно определяющие входные значения, при этом должны быть однозначными соответствующие выходные значения при заданных входных. Для обеспечения взаимодействия этих двух видов множеств используется нечеткая система с фуззификатором на входе и дефуззификатором на выходе [11].

Для входных переменных будем считать, что максимальная амплитуда ЧР меняется в диапазоне от 0 до 200 мВ, мощность ЧР от 0 до 100 мВт. Для выходной переменной уровня опасности эксплуатации укажем диапазон изменения в баллах от 0 до 10. Для входных переменных зададим три функции с именами «Низкий», «Средний», «Высокий», причем первые две имеют гауссовый тип

$$gaussmf(x, \sigma, c) = \exp\left[-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right],$$

а последняя – двухсторонняя гауссова функция принадлежности

$$gauss2mf(x, \sigma_1, c_1, \sigma_2, c_2),$$

где c – координата максимума функции принадлежности; c_1, c_2 – минимальное (максимальное) значение ядра нечеткого множества; σ, σ_1 и σ_2 – коэффициенты концентрации центральной, левой и правой частей функции принадлежности.

Для выходных переменных зададим три функции принадлежности треугольной формы с именами «Нормальное», «Ухудшенное», «Предаварийное». Ухудшенное состояние соответствует значению около 5 баллов, предаварийное – примерно 7,5 баллов. Треугольная функция принадлежности описывается следующим образом

$$trimf(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases},$$

где a, b, c – числовые параметры, удовлетворяющие условию $a \leq b \leq c$.

Характеристики функций принадлежности представлены в табл. 3, а сами функции для входных и выходных переменных на рис. 2.

Таблица 3

Характеристики входных и выходных переменных

Наименование	Терм-множества	Тип функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Максимальная амплитуда ЧР	<i>Низкий</i>	Гауссова	[x; 30; 0]
	<i>Средний</i>	Гауссова	[x, 30; 80]
	<i>Высокий</i>	Двухсторонняя гауссова	[x, 30; 160; 3,4; 201]
Мощность ЧР	<i>Низкий</i>	Гауссова	[x; 30; 0]
	<i>Средний</i>	Гауссова	[x; 10; 60]
	<i>Высокий</i>	Двухсторонняя гауссова	[x; 6,8; 78; 3,4; 101]
Уровень опасности эксплуатации	<i>Нормальное</i>	Треугольная	[-4; 0; 4]
	<i>Ухудшенное</i>	Треугольная	[1; 5; 9]
	<i>Предаварийное</i>	Треугольная	[6; 10; 14]

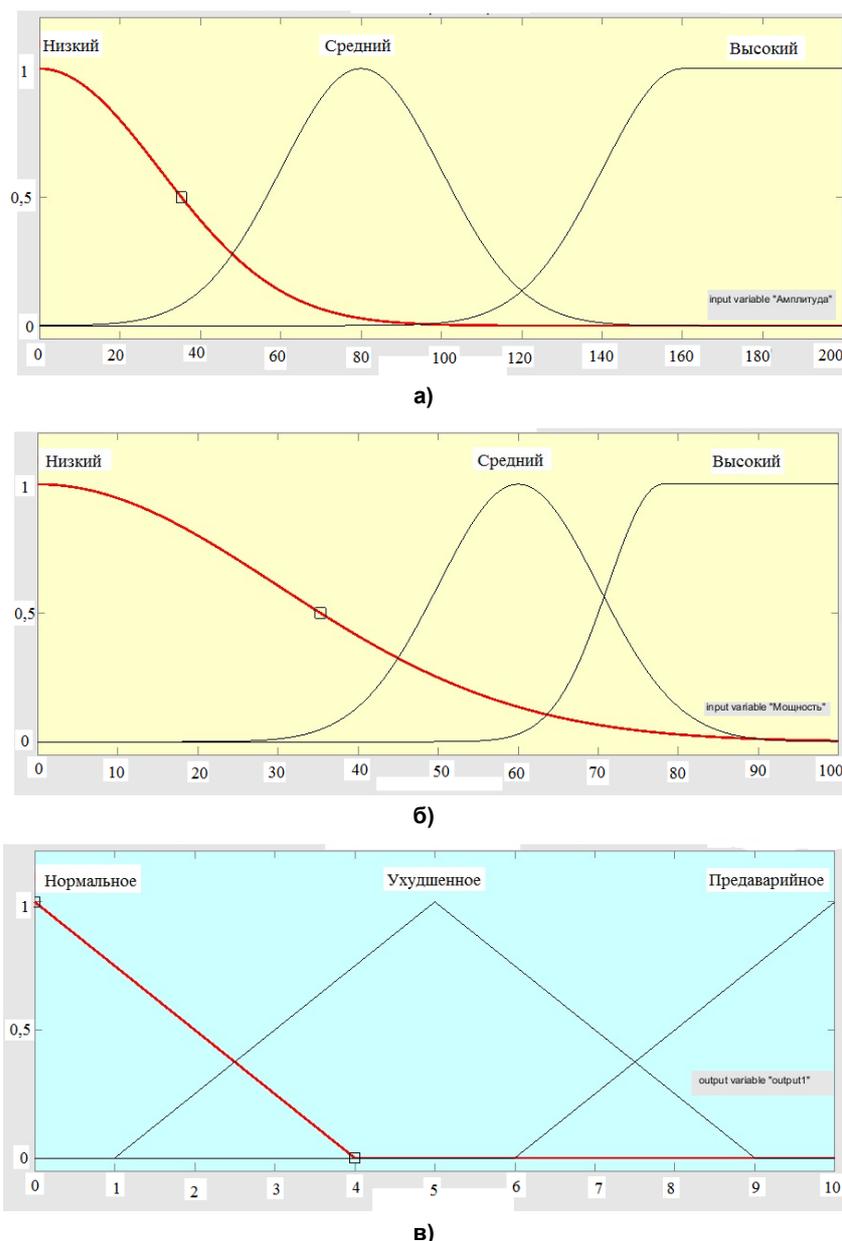


Рис. 2. Функции принадлежности входным переменным «Максимальная амплитуда ЧР» (а), «Мощность ЧР» (б) и выходной переменной «Уровень опасности эксплуатации» (в)

На основании этих данных и выбранных функций принадлежности на рис. 3 приведена диаграмма поверхности, отображающей влияние входных лингвистических переменных на значения выходной лингвистической переменной «Уровень опасности эксплуатации». Данная поверхность представляет собой результат работы правил нечеткого вывода для оценки уровня опасности эксплуатации при выбранном методе дефаззификации (алгоритм Мамдани). При выбранных функциях принадлежности максимальное значение выходной переменной составляет 8,7 балла, минимальное – 1,3 балла.

Видно, что, как и задавалось в модели, ухудшенное состояние соответствует значению около 5 баллов, а предаварийное – примерно 7,5 баллов. С помощью функции *Matlab evalfis* можно получить значения функций нечеткого вывода и на основе этого построить зависимости выходного параметра от одного из входов. С ее использованием на рис. 4 показаны зависимости обобщенного параметра технического состояния изоляции от наблюдаемой мощности ЧР при разных регистрируемых амплитудах ЧР.

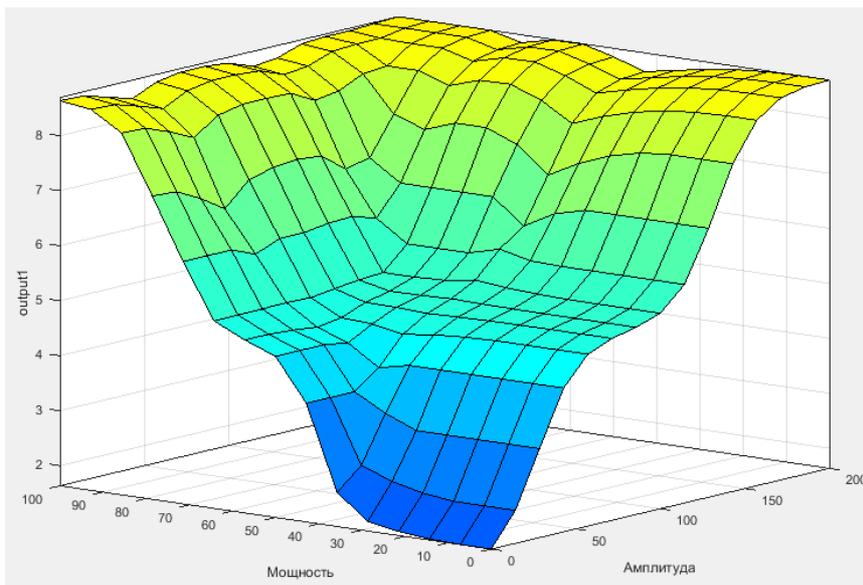


Рис. 3. Поверхность, отображающая влияние входных лингвистических переменных (мощности и амплитуды) на значение выходной лингвистической переменной (уровень технического состояния в баллах)

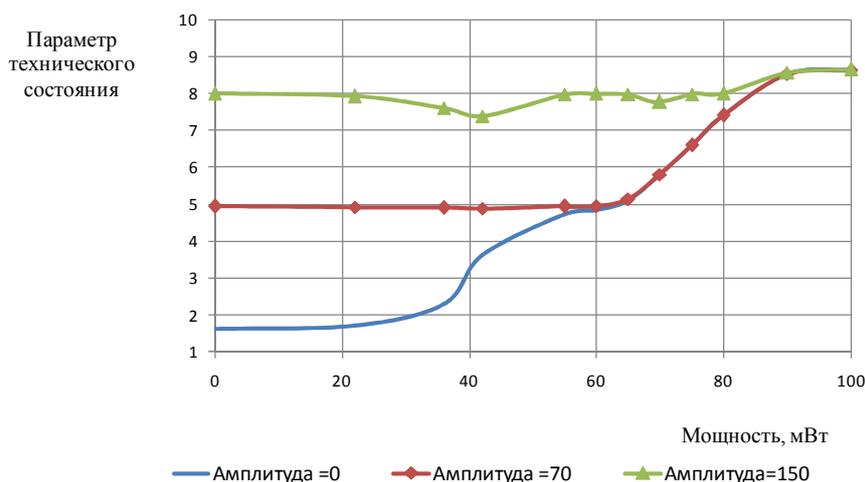


Рис. 4. Зависимость параметра технического состояния изоляции от мощности ЧР при разных регистрируемых амплитудах ЧР

Примеры оценивания состояния трансформатора по обобщенному показателю на основе логики с нечеткими множествами

На рис. 5 приведены исходные и сглаженные методом скользящих средних данные мониторинга амплитуды U_{02} и интенсивности PDI ЧР, полученные за период с 9 сентября по 22 декабря 2016 года для трансформатора ЭТЦНКВ – 40000/110-УХЛ-4 (выборка по каждой фазе примерно 650 точек). При наблюдении за временными рядами в конце сентября – начале октября было замечено резкое повышение уровня ЧР во всех фазах. Особенно резко PDI выросло в фазе С: так, 18 октября оно достигло 60 мВт (порог ухудшенного состояния), а 28 октября – 80 мВт (порог предаварийного состояния).

В конце октября мощности и амплитуды ЧР в фазах А и В начинают падать, а в фазе С продолжают монотонно расти до 3 ноября (PDI≈98 мВт), далее процесс несколько стабилизируется, но мощности ЧР остаются на более высоком значении, чем до своего роста. После относительно пологого участка изменения мощности ЧР, начиная с 15 декабря, было зарегистрировано резкое повышение интенсивности частичных разрядов. Во всех контролируемых фазах мощность и амплитуда ЧР возросли в 1,5–2 раза. В фазах А и В наблюдается повышение амплитуды ($U_{02} > 80$ мВ), а в фазе С повышение мощности до ухудшенного и даже до предаварийного состояния (PDI > 80 мВт).

Фирмой ООО «ДИМРУС» 6 октября 2016 г. проведены измерения акустической активности ЧР с помощью прибора AR-700, предназначенного для анализа частичных разрядов и локации зоны дефектов в изоляции высоковольтного оборудования при помощи акустических датчиков. Была обследована вся поверхность диагностируемого трансформатора. В результате проведенных исследований в баке трансформатора в районе ввода фаз обнаружена зона повышенной акустической активности.

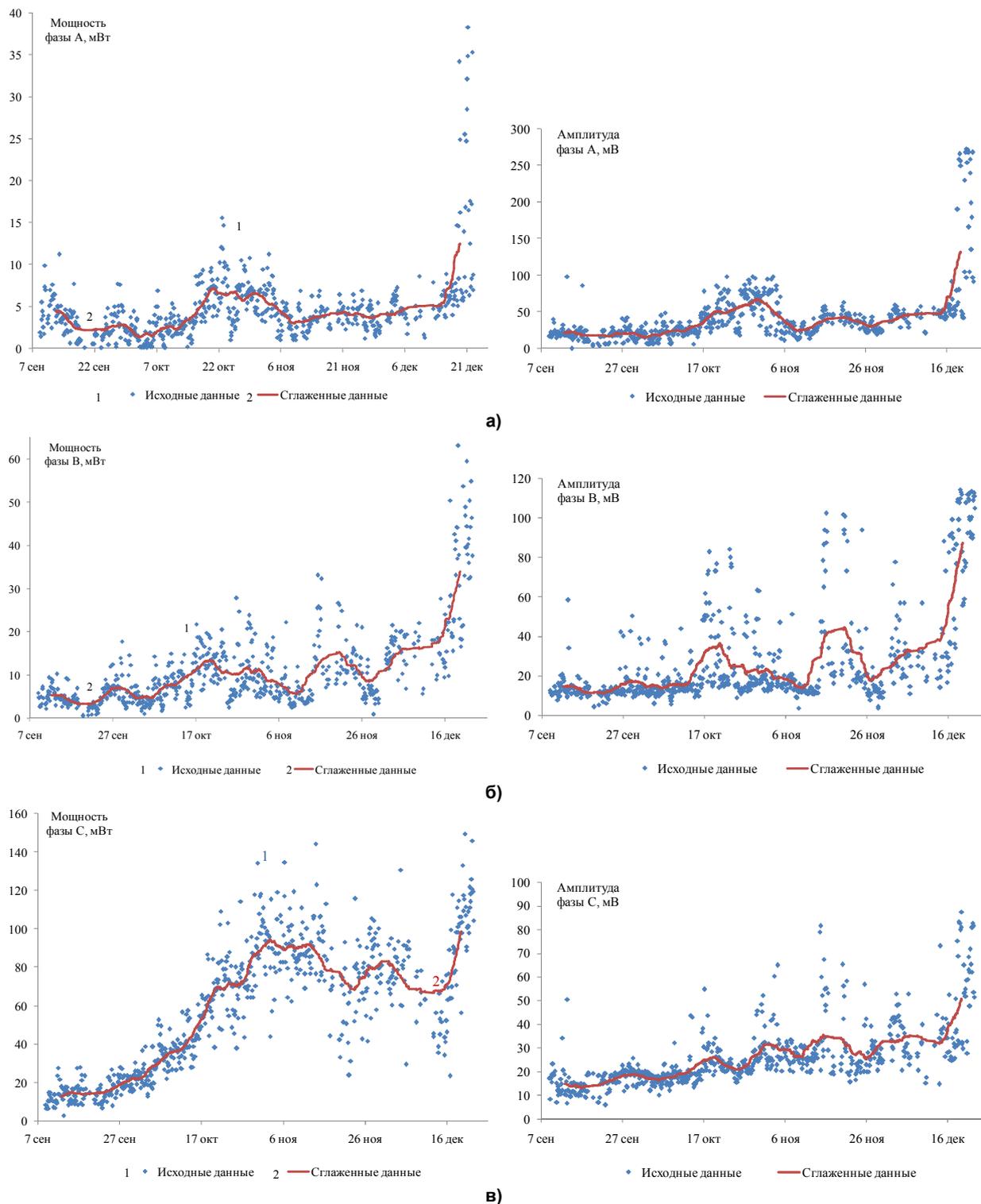


Рис. 5. Исходные и сглаженные (непрерывные линии) данные мощности PDI и амплитуды U_{02} частичных разрядов за период наблюдений с 9 сентября по 22 декабря 2016 г.: а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

На рис. 6 показаны изменения обобщенного параметра в разных фазах за тот же период мониторинга путем обработки данных рис. 5. Пунктирными линиями показаны выбранные уровни ухудшенного и предаварийного состояния изоляции трансформатора. Видно, что, как и в случае анализа рис. 5, самой проблемной оказалась фаза *C*, в которой, начиная примерно с 18 октября, возникла ситуация с ЧР «Ухудшенное состояние», переросшее через 10 дней в «Предаварийное состояние». Далее ЧР снизились почти до уровня 5 баллов и где-то 13–15 декабря опять начали расти одновременно с их ростом в фазах *A* и *B*. К 20 декабря в фазе *B* они достигли порога «Ухудшенное состояние», а в остальных фазах – «Предаварийное состояние».

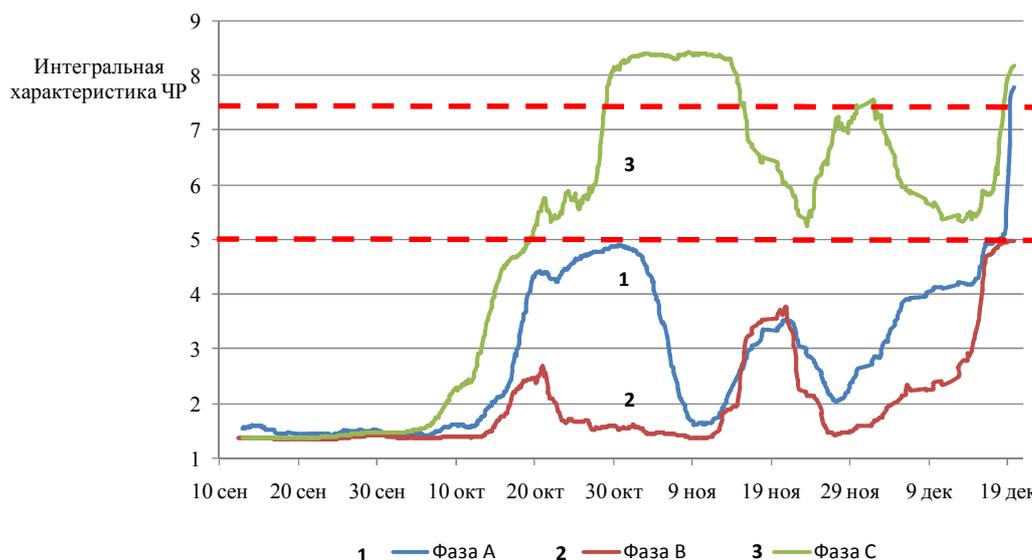


Рис. 6. Изменение обобщенного диагностического параметра за период наблюдений трансформатора в разных фазах высоковольтных вводов с 9 сентября по 22 декабря 2016 г.

Исходя из сложившегося положения, 23.12.16 была проведена остановка трансформатора АПК-2. При выполнении ремонтных работ был проведен демонтаж ввода фазы *C* вместе с адаптером. Во время осмотра активной части трансформатора был обнаружен и устранен ряд неисправностей, в том числе связанных с возникновением повышенного уровня ЧР. После устранения всех неисправностей трансформатор введен в эксплуатацию, и с использованием системы непрерывного мониторинга зафиксировано, что уровень ЧР снизился и дальнейшего резкого повышения ЧР не наблюдалось.

Обобщение результатов

Таким образом, предложена методика свертки двух частных параметров контроля ЧР к обобщенному показателю на основе логики с нечеткими множествами. При составлении логических правил значения весовых коэффициентов принимались равными единице. Как следует из определения, параметр Q_{02} характеризует амплитуду частичных разрядов. Но, так как существуют дефекты, развитие которых приводит к увеличению числа импульсов без увеличения амплитуды, некоторые авторы, например В.А. Русов [12], считают, что более чувствительным к развитию дефекта являются параметр PDI. В дальнейшем, при оптимизации базы правил нечеткого вывода, значения весовых коэффициентов, видимо, можно уточнять, исходя из дополнительных экспериментальных данных. Выбор весовых коэффициентов позволяет ранжировать правила по степени важности.

Заключение

Предложена методика свертки двух параметров контроля ЧР к однозначному обобщенному показателю, характеризующему уровень опасности эксплуатации изоляции на основе логики с нечеткими множествами. На основе данных, полученных промышленной системой непрерывного мониторинга, показан практический пример оценивания состояния изоляции печного трансфор-

мотора и принятия решения по обобщенному показателю, полученному на основе предлагаемого алгоритма логики с нечеткими множествами.

Литература

1. Оценка состояния силовых трансформаторов на основе анализа данных технической диагностики / А.И. Хальясмаа, С.А. Дмитриев, С.Е. Кокин и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 114–120.
2. Задачи многопараметрического диагностирования технического состояния силовых трансформаторов в системах on-line мониторинга / А.С. Карандаев, И.М. Ячиков, В.Р. Храмшин, А.А. Николаев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4 (546). – С. 65–73.
3. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). – Novosibirsk. – 2014. – Vol. 1. – P. 273–279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896
4. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 58–68.
5. System for real-time monitoring of the technical state of a transformer on an ultrahigh-power electric-arc steelmaking furnace / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khrumshin, A.A. Sarlybaev // Metallurgist. – 2014. – Vol. 58. – P. 872–879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
6. Power Transformer Condition Forecast with Time-Series Extrapolation / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, I.M. Yachikov et al. // Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017) / – Sydney, Australia? 2017. – P. 326–330. DOI: 10.1145/3057039.3057106
7. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 10, № 26 (126). – С. 26–31.
8. Вдовико, В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
9. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
10. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 800 с.
11. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2004. – 271 с.
12. Русов, В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Русов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 367 с.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; jachikov@mail.ru.

Ларина Татьяна Петровна, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; tp_larina@mail.ru.

Храмшина Екатерина Александровна, научный сотрудник кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; me_to_you27@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 марта 2018 г.

MAKING DECISIONS ABOUT STATUS OF FURNACE TRANSFORMER WITH GENERALIZED INDEX BASED ON FUZZY SET LOGIC

I.M. Yachikov, jachikov@mail.ru,

T.P. Larina, tp_larina@mail.ru,

E.A. Khramshina, me_to_you27@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Powerful transformers at PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works are equipped with continuous condition monitoring systems. Available diagnostic system uses the electric method to measure an apparent discharge and a partial discharge intensity (PDI). There is a challenge to develop a decision-making system that could detect an insulation defect and estimate its severity for further transformer operation. We propose to reduce the total of diagnostic variables to a common generalized deterministic parameter reflecting numerical and quality status of the insulation. For this purpose, we use the mathematical apparatus built upon composition of fuzzy linguistic variables and metric values of two measurable parameters of the diagnosable furnace transformer. Reliability and convenience of the proposed method are proven by corresponding calculation results based on data supplied by the industrial on-line monitoring system. These results demonstrate an adequate model behavior with regard to furnace transformers.

Keywords: furnace transformer, paper-oil insulation, insulation status monitoring, partial discharges, magnitude of apparent charge, intensity of partial discharges, generalized index, fuzzy set, linguistic variable, deteriorated and pre-emergency state.

References

1. Hal'yasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. et al. [Assessment of the State of Power Transformers Based on the Analysis of Technical Diagnostics Data]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 114–120. (in Russ.)
2. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Hramshin V.R., Nikolaev A.A. [The Tasks of Multiparameter Diagnosis of the Technical State of Power Transformers in On-line Monitoring Systems]. *News of Higher Educational Institutions. Electromechanics*, 2016, no. 4 (546), pp. 65–73. (in Russ.)
3. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. *12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)*. Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273–279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896
4. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. [Requirements for the Monitoring System for the Technical Condition of the Transformer of a Super-Power arc Steel-Smelting Furnace]. *Mechanical Engineering: Network Electronic Scientific Journal*, 2013, no. 2, pp. 58–68. (in Russ.)
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, pp. 872–879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
6. Radionov A.A., Karandaev A.S., Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Gasyarov V.R. Power Transformer Condition Forecast with Time-Series Extrapolation. *Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017)*. Sydney, Australia, 2017, pp. 326–330. DOI: 10.1145/3057039.3057106
7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chertousov A.A. [Monitoring of Technical Condition of Power Transformers by Acoustic Diagnosis Method]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2008, no. 26 (126), pp. 26–31. (in Russ.)
8. Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovol'nogo oborudovaniya* [Partial Discharge in the Diagnosis of High-Voltage Equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 155 p.

9. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB u fuzzyTECH* [Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTECH]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.

10. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Unclear Modeling and Control]. Moscow, Binomial. Laboratory of Knowledge Publ., 2013. 800 p.

11. Averchenkov V.I., Fedorov V.P., Hejfec M.L. *Osnovy matematicheskogo modelirovanija tehni-cheskih sistem* [Fundamentals of Mathematical Modeling of Technical Systems: Tutorial]. Bryansk, Publ. House of BSTU, 2004. 271 p.

12. Rusov V.A. *Izmerenie chastichnyh razrjadov v izoljácii vysokovol'tnogo oborudovanija* [Measurement of Partial Discharges in Insulation of High-Voltage Equipment]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2011. 367 p.

Received 2 March 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ячиков, И.М. Принятие решений о состоянии изоляции печного трансформатора с использованием обобщенного показателя на основе логики с нечеткими множествами / И.М. Ячиков, Т.П. Ларина, Е.А. Храмшина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 81–92. DOI: 10.14529/ctcr180208

FOR CITATION

Yachikov I.M., Larina T.P., Khramshina E.A. Making Decisions About Status of Furnace Transformer with Generalized Index Based on Fuzzy Set Logic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 81–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180208