Научная статья

УДК 621.314.21

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-4-45-56

EDN: CFPTZS

Для цитирования:
Инаходова Л.М., Фролов А.Л. Фрактальная математическая модель срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 6-10 кВ // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 4. С. 45-56. https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-45-56

Получена: 02.05.2023
Принята: 08.11.2023
Опубликована: 08.12.2023

For citation:
Inakhodova L.M., Frolov A.L. Fractal mathematical model of the service life of power transformers of distribution electric networks 6-10 kV. Russian Arctic, 2023, vol. 5, no. 4,pp. 45-56. (In Russian). https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-4-45-56

ФРАКТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-10 КВ

Л.М. Инаходова, А.Л. Фролов*

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

E-mail: *frolov.aees@gmail.com

Аннотация
Данная статья посвящена вопросам составления математической модели для определения срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных сетей 6-10 кВ с помощью метода фрактального анализа. Применение метода фрактального анализа при исследовании силовых трансформаторов позволяет дать количественную оценку эксплуатационных параметров активной части силового трансформатора в зависимости от срока эксплуатации. В ходе исследований разработана математическая модель, описывающая изменение индекса фрактальности на временных участках не зависимо от его изменения в течение жизненного цикла силового трансформатора, позволяющая производить диагностику состояния активной части силового трансформатора [16] на любом сроке эксплуатации путем применения статистического анализа. Исследования проводились на силовых трансформаторах марок ТМ ТМГ ТМЗ мощностью 400 кВА парка трансформаторов распределительных электрических сетей новых и с дефектами активной части.

Ключевые слова: фрактальный анализ, индекс фрактальности, математическая модель, силовой трансформатор, срок эксплуатации, амплитудно-частотная характеристика, полиномиальное распределение.

FRACTAL MATHEMATICAL MODEL OF THE SERVICE LIFE OF POWER TRANSFORMERS OF DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS 6-10 KV

L.M. Inakhodova, A.L. Frolov*

Samara State Technical University, Samara, Russia

E-mail: *frolov.aees@gmail.com

Abstract
This article is devoted to the issues of compiling a mathematical model for determining the service life of power transformers of 6-10 kV distribution networks using the fractal analysis method. The use of the fractal analysis method in the study of power transformers makes it possible to quantify the operational parameters of the active part of a power transformer depending on the service life. In the course of the research, a mathematical model was developed that describes the change in the fractality index in time sections, regardless of its change during the life cycle of a power transformer, which allows diagnosing the state of the active part of a power transformer at any period of operation by applying statistical analysis. The studies were carried out on power transformers of the TM TMG TMZ brands with a capacity of 400 kVA of a park of transformers for distribution electrical networks, new and with defects in the active part.

Keywords: fractal analysis, fractality index, mathematical model, power transformer, service life, frequency response, polynomial distribution

Введение

Диагностика силового оборудования электрических сетей в современных условиях требует создания новых методов и методик диагностирования и обработки полученных результатов. Наиболее остро стоит вопрос о критичности выявленных неисправностей в целом, необходимости и рациональности дальнейших действий по локализации и устранению неисправных узлов или частей объекта диагностирования [17]. При проведении диагностирования силовых трансформаторов (СТ) с помощью электрических методов неразрушающего контроля особое внимание стоит уделить методам чувствительным к появлению остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов, таких как метод низковольтных импульсов и метод анализа частотного отклика, которые рассматриваются в работах Хренникова А.Ю.[21], [22], Завидей В.И. [4], Александрова Н.М. [5], и др., а также исследованиям [3] факторов, влияющих на срок эксплуатации трансформаторов и вызывающих их аварийные отключения. Данные методы, а также метод фрактального анализа легли в основу анализа и исследования зависимости степени износа активной части силового трансформатора при различных сроках и условиях эксплуатации от наличия дефектов активной части силового трансформатора. Метод фрактального анализа позволяет за счет чувствительности к структуре и форме графика амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) описывать специфические физические процессы, для которых другие методы неприменимы. Методы фрактального анализа показали свою эффективность в области энергетики при реализации процессов анализа и обработки данных моделей физических процессов в работах Балагула Ю.М. [1], Purkait, Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji [23] и др. Целью работы является создание фрактальной математической модели срока эксплуатации силовых трансформаторов распределительных электрических сетей 6-10 кВ с учетом условий экстремально низких температур для достижения которой необходимо определить наличие и степень развития дефекта активной части силового трансформатора, включая основную изоляцию [6], [15], методом фрактального анализа АЧХ группы силовых трансформаторов.

Материалы и методы

Для определения зависимости изменения АЧХ силового трансформатора от наличия дефекта его активной части [2], а также срока и условий его эксплуатации, были проведены измерения с записью АЧХ группы силовых трансформаторов ТМГ 400/6 (рис. 1), которые эксплуатировались в условиях умеренного и арктического климата [7]. Анализ АЧХ новых силовых трансформаторов показал, что их графики АЧХ в той или иной степени подобны графикам, полученным в результате моделирования. Однако, в зависимости от мощности силового трансформатора – амплитуда и частота резонансных пиков существенно отличается от результатов моделирования. В той же мере на результаты повлияли условия и методы, повышающие эффективность эксплуатации силовых трансформаторов [8].

Для сравнительного анализа АЧХ воспользовались методом исследования самоподобия графиков и определения индекса фрактальности для каждого из них. Полученные индексы фрактальности графиков АЧХ исследуемых новых силовых трансформаторов изменяются нелинейно в зависимости от срока и условий эксплуатации силовых трансформаторов, оставаясь практически неизменными при средних значениях срока эксплуатации трансформаторов от 0 до 60 лет (таблица 1).

Таблица 1

Индексы фрактальности силовых трансформаторов с повреждениями

МАРКА	СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ, лет	ИНДЕКС ФРАКТАЛЬНОСТИ	ПРИМЕЧАНИЕ
ТМГ 400/6	0	0,35	-
ТМГ 400/6	5	0,352	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	10	0,37	Воздействие пониженных температур
ТМ 400/6	16	0,377	Воздействие пониженных температур
ТМГ 400/6	22	0,386	Воздействие ВГ
ТМЗ 400/6	28	0,391	Воздействие ВГ
ТМЗ 400/6	32	0,41	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	34	0,42	Воздействие ВГ
ТМ 400/6	37	0,492	Воздействие пониженных температур

МАРКА	СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ, лет	ИНДЕКС ФРАКТАЛЬНОСТИ	ПРИМЕЧАНИЕ
ТМ 400/6	45	0,5	Воздействие ВГ
ТМГ 400/6	48	0,613	Воздействие ВГ
ТМ 400/6	60	0,618	Воздействие ВГ

Примечание. Воздействие пониженных температур при длительной эксплуатации СТ в равной степени снижает остаточный ресурс подобно воздействию высших гармоник (ВГ) [10], [24].

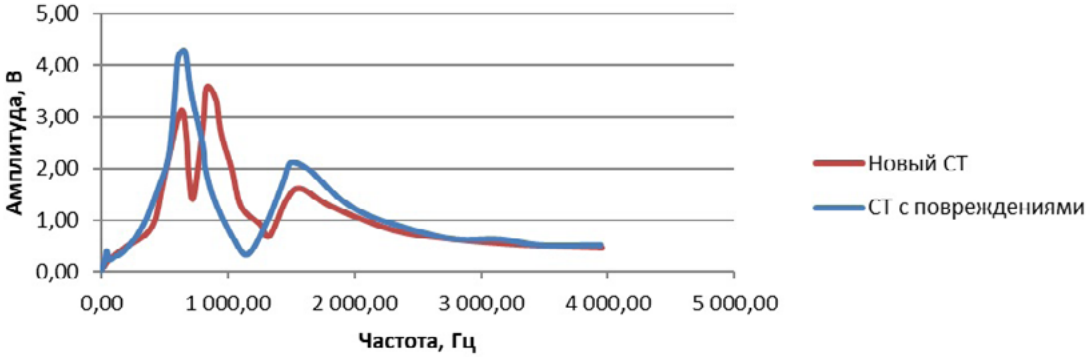


Рисунок 1. Сравнение АЧХ силовых трансформаторов мощностью 400 кВА

Из графика на рисунке 1 видно, что при возникновении повреждений в активной части силовых трансформаторов марок ТМ, ТМГ, ТМЗ мощностью 400 кВА, таких как: межвитковые замыкания, нарушение главной и продольной изоляции обмоток, смещение обмоток, нарушение изоляции между отдельными листами шихтованной стали магнитопровода, - частоты резонансов, а также их амплитуды изменяются. При этом, наблюдается уменьшение количества пиков резонансов и увеличение амплитуды резонансов при наличии повреждений в среднем на 22,3%.

Для исследования двух графиков рассчитаны их индексы фрактальности с помощью клеточного анализа (метода фрактального анализа). Для графика «Новый СТ» индекс фрактальности составил 0,32. Для графика «СТ с повреждениями» индекс фрактальности составил 0,58. Для определения конкретных видов повреждений СТ необходимы исследования зависимости индекса фрактальности от изменения параметров схемы замещения силового трансформатора (емкости, индуктивности).

Для решения поставленной задачи определения резонансов АЧХ нового силового трансформатора проведено исследование универсальной расчетной модели силового трансформатора с усредненными параметрами схемы замещения силовых трансформаторов 6-10 кВ марок ТМ, ТМГ, ТМЗ с мощностью 400 кВА в ПО Multisim (рис 2) [18]. Под «усредненными параметрами» приняты средние арифметические значения электрических параметров схемы замещения группы исследуемых силовых трансформаторов.

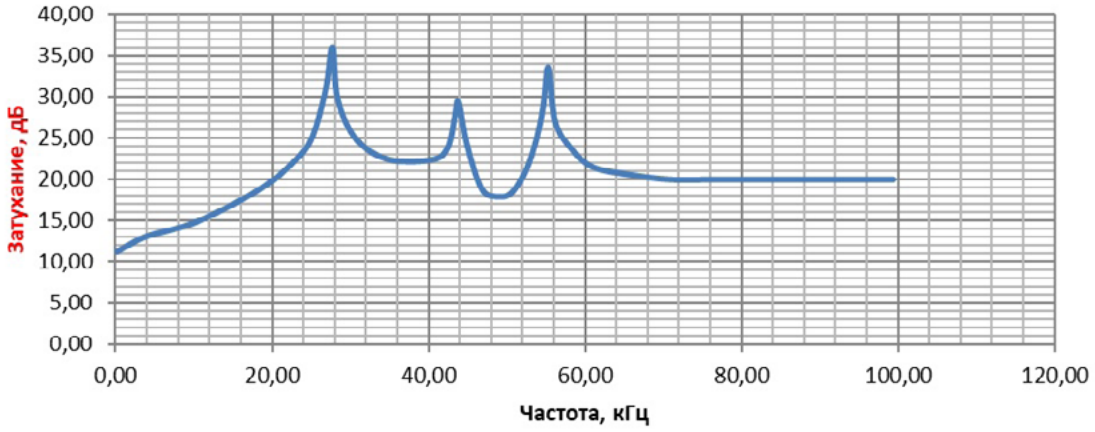
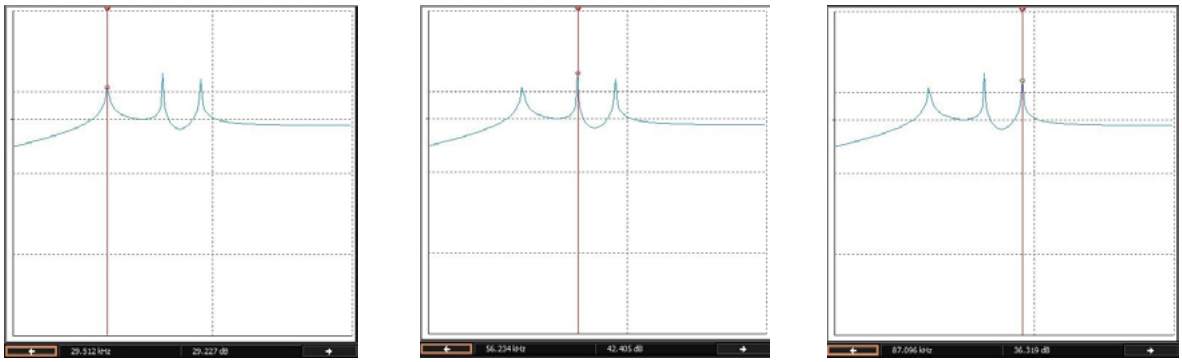


Рисунок 2. АЧХ модели нового силового трансформатора в ПО Multisim

Как видно из рисунка 2, амплитудные пики расчетной модели силового трансформатора в ПО Multisim соответствуют экспериментальным исследованиям (рисунок 1), проведенным на новых силовых трансформаторах марок ТМ-400, ТМГ-400, ТМЗ-400.



а) б) в)

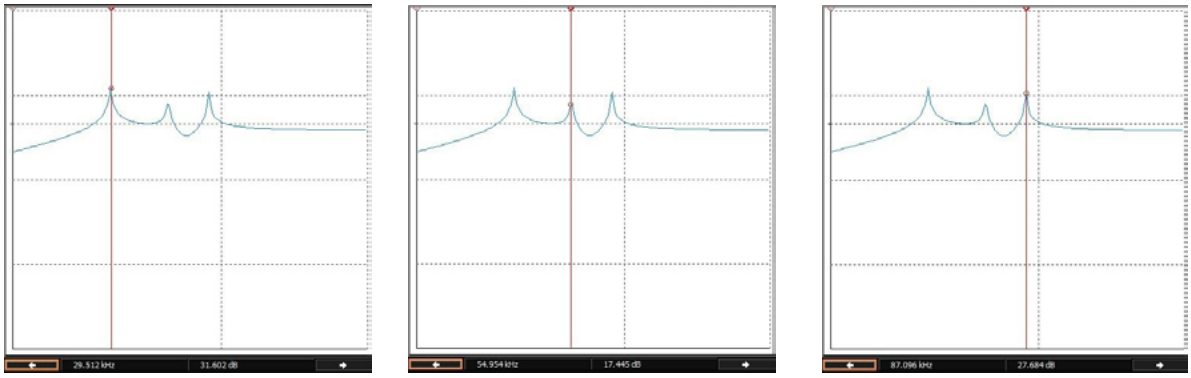
Рисунок 3. АЧХ схемы замещения нового СТ

Для получения АЧХ схемы замещения СТ в ПО Multisim проведено моделирование данной схемы с получением графиков АЧХ и их исследования на предмет резонансов. На рисунке 3 представлен график АЧХ с маркерами, установленными в точках наибольшей амплитуды: а) первый резонанс, б) и в) - второй и третий резонансы соответственно. Полученные значения в токах резонансов будут являться базовыми при проведении сравнительного анализа значений в точках резонансов для графиков с измененными параметрами емкости и индуктивности. Параметры резонансов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	29,2
б)	56,2	42,4
в)	87,1	36,3



а) б) в)

Рисунок 4. АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями

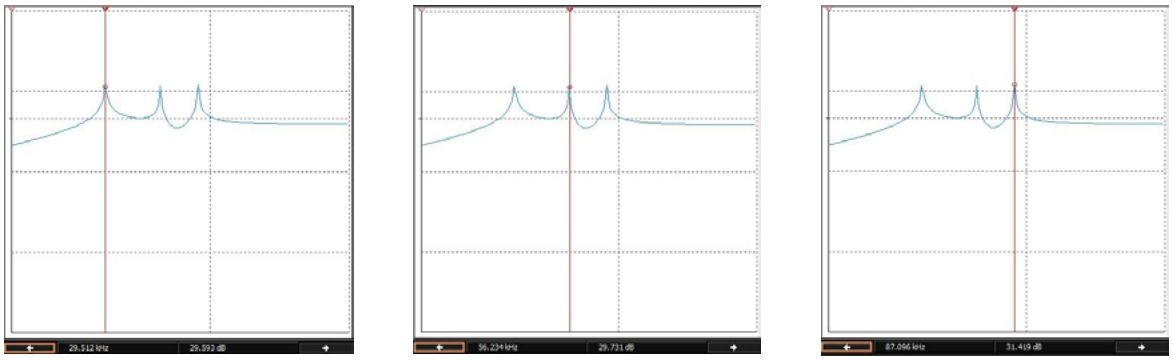
АЧХ схемы замещения СТ с измененными параметрами, соответствующими наличию таких дефектов в активной части СТ как межобмоточные замыкания, нарушение главной изоляции СТ, вызывают изменение емкости в схеме замещения СТ, в свою очередь межвитковые, межслойные замыкания, а также нарушение изоляции шихтованной стали магнитопровода, вызывают изменение индуктивности в схеме замещения СТ. На рисунке 4 представлен график АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями, где: а) первый резонанс б) и в) второй и третий резонансы соответственно. Параметры данных резонансов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ с измененными емкостями

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	31,6
б)	55,0	17,4
в)	87,1	27,7

Из приведенных данных в таблице 3 видно, что увеличение значений проходных межобмоточных емкостей на величину не более 5% от исходных приводит к смещению второго резонанса вниз по частоте более чем на 1кГц, а изменение сигнала по уровню – более чем в 2 раза, что является показателем изменений в системе межобмоточной изоляции трансформатора [19].



а) б) в)

Рис. 5. АЧХ схемы замещения СТ с измененными индуктивностями

Таблица 4

Параметры резонансов АЧХ схемы замещения СТ с измененными индуктивностями

График АЧХ	Частота, кГц	Уровень, дБ
а)	29,5	29,6
б)	56,2	29,7
в)	87,1	31,4

Из приведенных данных в таблице 4, в соответствии с рисунком 5, видно, что изменение значения индуктивности одной из обмоток не влияет на частоты резонансов, однако, приводит к изменению всех трех величин резонансов по уровню, что является показателем изменений механического состояния обмоток трансформатора. С целью выявления зависимости формы и структуры графика от наличия повреждений активной части исследуем полученные АЧХ силовых трансформаторов с помощью метода клеточного фрактального анализа (рисунок 6).

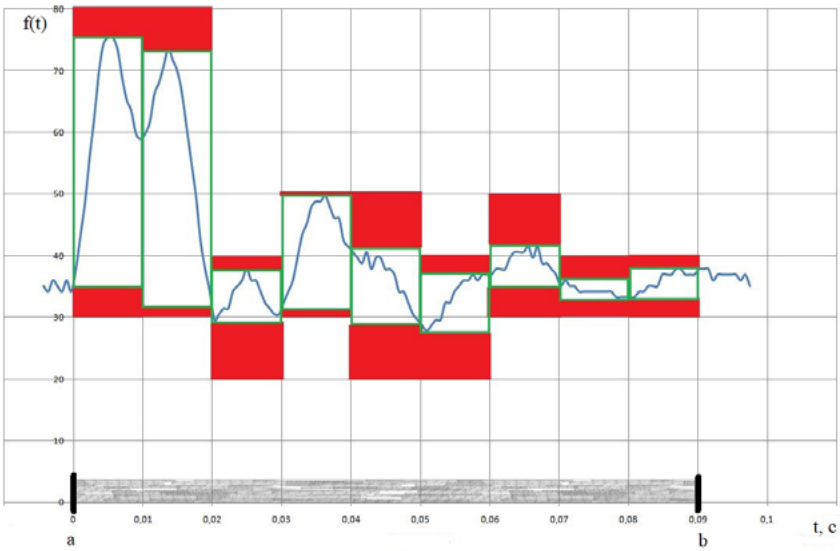


Рисунок 6. Построение минимального клеточного покрытия графика осциллограммы (выходной сигнал), где f(t) – амплитуда сигнала в мВ, t, с – время в секундах.

Для исследования фрактальной структуры, полученных в ходе проведения исследования осциллограмм новых СТ и с повреждениями, предлагается использовать вычисление их фрактальной размерности путем определения их клеточной размерности Dc. Dc – размер наименьшей клетки со стороной ε, на которые можно разбить плоскость графика, каждая из которых содержит хотя бы одну точку графика. Для этого необходимо разбить плоскость графика полученной осциллограммы на клетки размером ε и определить число клеток N(ε), в которых определена хотя бы одна точ-

ка графика. Для определения числа клеток выбран конечный участок, определяемый отрезком [a, b] на горизонтальной оси. График функции покрываем прямоугольниками с основанием ε и высотой равной амплитуде колебаний Ai(ε), определяющей разности максимального и минимального значения функции на отрезке ε.

Таким образом, для вычисления величин индексов фрактальности использовано выражение:

$$V_f(\varepsilon) \stackrel{def}{=} \sum_{i=1}^{m} A_i(\varepsilon)\,, \qquad (1)$$

Тогда полную площадь минимального покрытия $S\mu(\varepsilon)$ можно записать в виде: $S\mu(\varepsilon) = Vf(\varepsilon)\,\varepsilon$. Поэтому из соотношения $S(\varepsilon) \sim \varepsilon^{2-D}$ следует, что $Vf(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-\mu}$ при $\varepsilon \to 0$, где $\mu \stackrel{def}{=} D\mu - 1$. Назовем размерность D_μ размерностью минимального покрытия.

Так как $D_\mu = D$ и для одномерной функции топологическая размерность $Dt = 1$, то из формулы $\mu = D_\mu - 1$, следует $\mu = D - Dt$, где μ - индекс фрактальности, D_μ – размерность минимального покрытия, Dt – топологическая размерность, A_i – амплитуда функции $f(t)$.

Полученные индексы фрактальности графиков АЧХ группы силовых трансформаторов ТМ, ТМЗ, ТМГ мощностью 400 кВА – новых и имеющих повреждения: межвитковые замыкания, нарушение главной и продольной изоляции обмоток, смещение обмоток, нарушение изоляции между отдельными листами шихтованной стали магнитопровода со сроком эксплуатации от 0 до 60 лет приведены в таблице 1 [11], [20].

Таблица 6

Динамика прироста индекса фрактальности на интервалах жизненного цикла массива СТ

№ п/п	Интервал, лет	μ, в год
1	0-10	0,0004
2	10-32	0,0025
3	32-48	0,00864
4	48-60	0,00641

Скорость прироста индекса фрактальности непостоянна на участках и показывает резкое увеличение индекса после значения 0,4 на этапе появления дефектов в активной части СТ в 1,5~2 раза.

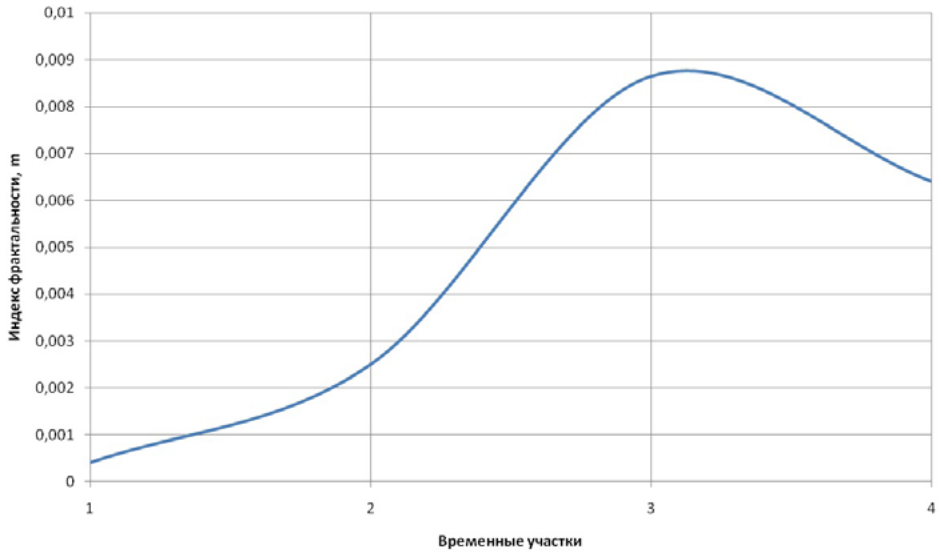


Рисунок 7. Изменение индекса фрактальности на временных участках срока эксплуатации СТ

Темп прироста индекса фрактальности на участке 2 (10-32 лет) по отношению к предыдущему периоду эксплуатации на участке 1 (0-10 лет) составил 525%, что означает увеличение индекса в 5,25 раз; в период эксплуатации на участке 3 (32 до 48 лет) по отношению к предыдущему участку 2 (10-32 лет) прирост индекса фрактальности составил 244%, что означает увеличение индекса в 2,44 раза. В период эксплуатации на участке 4 (48-60 лет) по отношению к предыдущему периоду эксплуатации на участке 3 (32-48 лет) индекс фрактальности снизился на 25%. Расчет

прироста проводился по формуле *(B * 100 / A) - 100 = C*, где B – искомый участок, A – предыдущий участок.

Из графика на рисунке 7 видно, что наибольший абсолютный прирост индекса фрактальности наблюдается на участке 3 (32-48 лет), что означает наибольшее изменение эксплуатационных параметров (таблица 4), способных повлиять на дальнейшую вероятность отказа СТ.

Строим график изменения индекса фрактальности μ(t) по данным экспериментальных исследований парка СТ (таблица 1).

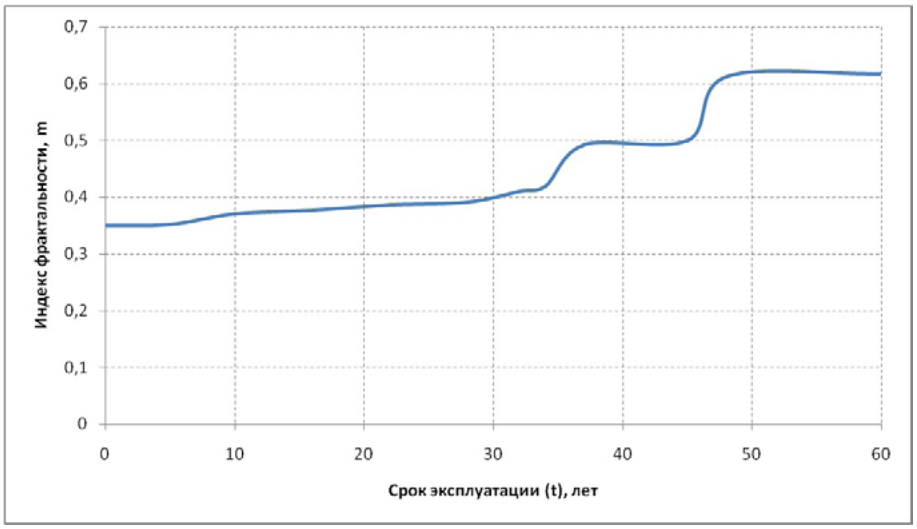


Рисунок 8. Изменение индекса фрактальности в период эксплуатации СТ

Индекс фрактальности для графика силовых трансформаторов мощностью 400 кВА (рис. 8) при эксплуатации до 30 лет составил в среднем 0,38, а для трансформаторов с неисправностями и достигших предельного состояния – 0,51 [13]. Исходя из данных приведенных в таблице 1 видно, что изменение индекса фрактальности имеет прямую зависимость от срока, условий эксплуатации и накопленных внутренних повреждений активной части СТ.

Результаты

Для визуализации данной зависимости построим гистограмму изменения индекса фрактальности от срока эксплуатации на участке от 0 до 60 лет (рис. 9).

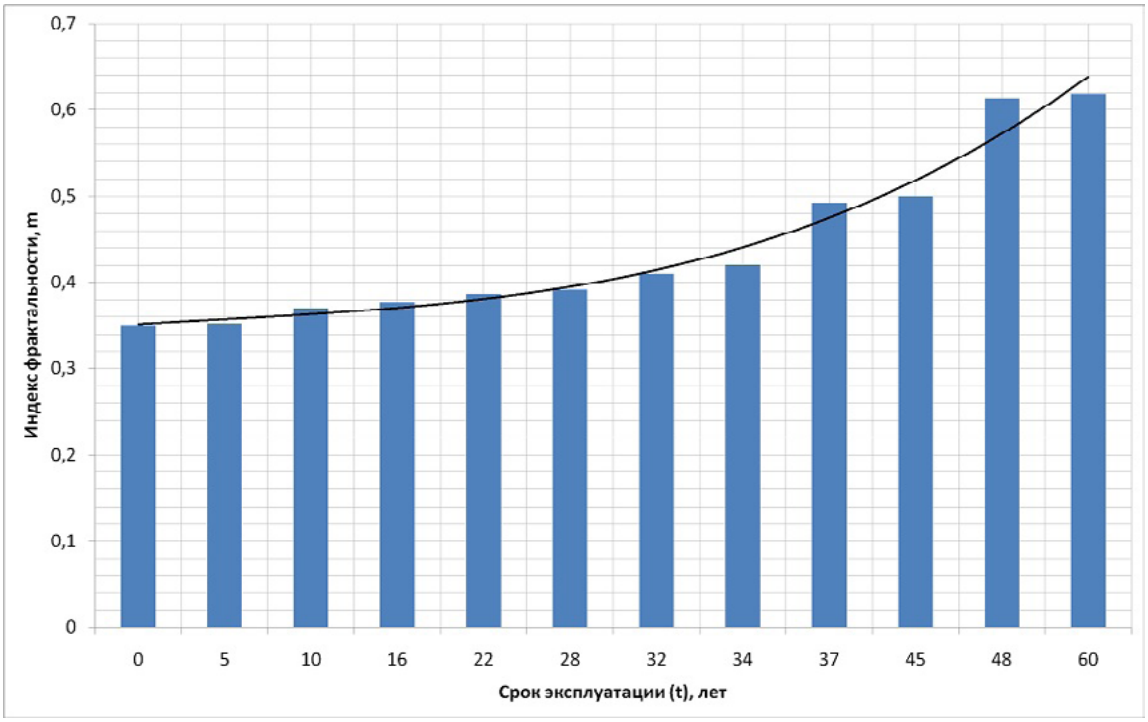


Рисунок 9. Гистограмма изменения индекса фрактальности

Представленная гистограмма и полиноминальная аппроксимирующая распределения индекса фрактальности построена на основании данных 125 силовых трансформаторов марок ТМ, ТМЗ, ТМГ мощностью 400 кВА по объектам ООО «ЭККА», ЗАО «СГЭС». ПАО «Россети».

Кривая распределения индекса фрактальности исследованного массива СТ получена методом полиномиальной кубической интерполяции сплайном.

$$f(t) = at^3 + bt^2 - ct + d \tag{2}$$

Уравнение (2) представляет собой сплайн, где коэффициенты a, b, c, d – коэффициенты полинома. Для определения математического закона изменения сплайна для каждого участка гистограммы разобьем его на соответствующие временные участки и произведем расчет коэффициентов a, b, c, d.

На каждом временном участке $[t_{i-1}, t_i]$, $i = \overline{1,N}$ функция сплайна *S(t)* представляет собой полином третьей степени $S_i(t)$, для определения коэффициентов которого запишем $S_i(t)$ в виде:

$$S_i(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3, \tag{3}$$

тогда

$$S_i(t_i) = a_i,\ S_i'(t_i) = b_i, S_i''(t_i) = 2c_i, S_i'''(t_i) = 6d_i, i = \overline{1,N}. \tag{4}$$

В соответствии с условиями непрерывности производных функция $S_i(t)$ в пределах временного участка t_{i-1}, t_i периода эксплуатации СТ значение функции не изменится. Аналогично и для второй производной функции $S_i(t)$ скорость изменения значения функции на данном временном участке не изменится:

$$S_i(t_{i-1}) = S_{i-1}(t_{i-1}), \quad S_i'(t_{i-1}) = S_{i-1}'(t_{i-1}), \quad S_i''(t_{i-1}) = S_{i-1}''(t_{i-1}), \tag{5}$$

где i меняется от 1 до *N*, а функция интерполяции $S_i(t_i)$ описывает изменение индекса фрактальности $f(t_i)$ в каждой точке t_i, отсюда:

$$S_i(t_i) = f(t_i). \tag{6}$$

Для получения формулы вычисления коэффициентов сплайна временной участок эксплуатации СТ обозначим:

$$\tau_i = t_i - t_{i-1}\ \ (i = \overline{1,N}), f_i = f(t_i)\ \ (i = \overline{0,N})$$

Отсюда получаем формулы для вычисления коэффициентов полиномиального кубического сплайна:

$$a_i = f(t_i)\ a_i = f(t_i) \tag{7}$$

$$d_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{3\tau_i}, \tag{8}$$

$$b_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{\tau_i} + \frac{2c_i + c_{i-1}}{3}\tau_i, \tag{9}$$

$$c_{i-1} \cdot \tau_i + 2c_i(\tau_i + \tau_{i+1}) + c_{i+1} \cdot \tau_{i+1} = 3\left(\frac{a_{i+1} - a_i}{\tau_{i+1}} - \frac{a_i - a_{i-1}}{\tau_i}\right), \tag{10}$$

причем $c_N = S''(t_N) = 0$ и $c_1 - 3d_1\tau_1 = S''(t_0) = 0$

На основании полученных уравнений определим коэффициенты сплайнов, описывающих изменение индекса фрактальности на временных участках представленных на рисунке 8.

$$
\begin{aligned}
&f(x) = 0{,}0004x^2 - 0{,}0081x + 0{,}4001, [0;5]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0085x + 0{,}4023, [5;10]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0087x + 0{,}4011, [10;16]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0078x + 0{,}3851, [16;22]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0088x + 0{,}4073, [22;28]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0077x + 0{,}4092, [28;32]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0083x + 0{,}4008, [32;34]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0075x + 0{,}4071, [34;37]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0073x + 0{,}4005, [37;45]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0068x + 0{,}4001, [45;48]\\
&f(x) = -\,0{,}0000x^3 + 0{,}0004x^2 - 0{,}0081x + 0{,}4102, [48;60]
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

Система уравнений (11) является фрактальной математической моделью срока эксплуатации силовых трансформаторов, описываемой функцией кубической интерполяции (сплайн) распределения величины индекса фрактальности на участке от 0 до 60 лет срока эксплуатации группы из 125 исследованных новых силовых трансформаторов и с дефектами в активной части. В представленной группе силовых трансформаторов исследование показало, что количество СТ с дефектами составило 37 (значение индекса фрактальности превысило 0,51 во всех случаях) со сроком эксплуатации более 37 лет, 12 из них – более 50 лет. Для оставшихся 88 трансформаторов исследование показало отсутствие дефектов, 5 из которых не эксплуатировались, остальные 83 эксплуатировались менее 34 лет.

Обсуждение

Полученная математическая модель описывает изменение индекса фрактальности на временных участках независимо от его изменения в течение жизненного цикла СТ и позволяет производить диагностику состояния активной части СТ на любом сроке эксплуатации и в условиях низких температур путем применения статистического анализа [12]. Данная математическая модель не привязана к конкретным СТ, служит для принятия решения о дальнейшей эксплуатации СТ и мерам по устранению неисправностей, повышения энергоэффективности [14], также для выполнения мероприятий превентивной диагностики, служащей для выявления неисправностей на этапе зарождения дефекта. Результаты данного исследования могут быть использованы предприятиями распределительных электрических сетей и другими эксплуатирующими организациями.

Выводы

Созданная математическая модель отражает физические процессы в активной части СТ и позволяет на основании данных исследований АЧХ силового трансформатора сделать вывод о состоянии СТ на определенном сроке эксплуатации – наличии дефекта, необходимости проведения обслуживания или ремонта. Метод фрактального анализа применим в условиях эксплуатации СТ в умеренном климате, так и в экстремальных условиях крайнего Севера и Арктики, а также показывает целесообразность применения при проведении подобного рода диагностики с помощью электрических методов неразрушающего контроля. Метод диагностики с применением фрактального анализа может быть рекомендован к применению в аналогичных исследованиях в области электроэнергетики, таких как исследование режимов электрических сетей с использованием фрактального моделирования и т.д.

Математическая модель разработана на основе диагностических данных полученных электрическими методами НК при использовании согласующего устройства для диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора (патент на изобретение № 2792177 от 19.12.2022) [9].

Список литературы:

1. Балагула, Ю.М. Применение фрактального анализа в задачах электротехники: специальность 05.09.05 "Теоретическая электротехника": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Балагула Юрий Моисеевич. – Санкт-Петербург, 2013. 18 с.
2. Волков А.Ю., Ларин В.С. Подходы к анализу частотных характеристик для оценки состояния силовых трансформаторов // Энергоэксперт. 2019. № 2 (70). С. 34 - 38.
3. Грунтович Н.В., Федоров О.В., Мороз Д.Р. [и др.] / Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонаполненных трансформаторов // Энергия и менеджмент, 2017. № 3(96). С. 2-6.
4. Завидей В.И., Ларин В.С., Волков А.Ю., [и др.] / К диагностике технического состояния обмоток силовых трансформаторов после воздействия токов коротких замыканий // Экспозиция Нефть Газ, 2018. № 5(65). С. 80-84.
5. Золотарев Р.В., Александров Н.М. Методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности / Материалы II Международной научно-технической конференции. // ЧГУ, Чебоксары, 2018. С. 216 - 221.
6. Медведев В.О. Влияние старения межслойной изоляции магнитопровода на изменение уровня потерь при эксплуатации трансформаторов сверх нормативного срока / В.О. Медведев, Е.А. Чащин // Планирование, проведение и интерпретация результатов научно-технических исследований: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 08 мая 2019 года. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2019. С. 38-40.
7. Микешкин О.Д., Заболотских В.И. Современные методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // ИГТУ, Ижевск, 2015. С. 296 - 300.
8. Мухаметзянова А.Ф. Повышение эффективности эксплуатации трансформаторов, применяемых в системах промышленного электроснабжения / А.Ф. Мухаметзянова, Е.И. Грачева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т. 2. № 1(6). С. 117-126.
9. Патент РФ № 2792177, 19.12.2022. Согласующее устройство для диагностики механического состояния обмоток силового трансформатора // Инаходова Л.М., Фролов А.Л.
10. Пахоменко Ю.Н. Условия работы электрооборудования в условиях Арктики / Ю.Н. Пахоменко, Н.А. Старцев; науч. рук. Н. М. Космынина // Творчество юных - шаг в успешное будущее : Арктика и её освоение : материалы IX Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, г. Томск, 10-14 октября 2016 г. Томск : Изд-во ТПУ, 2016. С. 291-293.
11. Поляков, М. А. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М. А. Поляков, В. В. Василевский // Электротехника и электромеханика, 2014. № 3. С. 38-41.
12. Попов, Г.В. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // Г.В. Попов, Е.Б. Игнатьев, 2014. № 4. С. 25-32.
13. Семенова, К.В. Методика расчета жизненного цикла трансформаторов / К. В. Семенова, А.В. Подобный, А.И. Тихонов // Надежность и долговечность машин и механизмов: Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 18 апреля 2019 года. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2019. С. 167-171.
14. Сериков А.В. Математическая модель электромагнитных процессов в энергоэффективном силовом масляном трансформаторе / А.В. Сериков, В.В. Иванов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы V Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 06–11 декабря 2021 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.), А.С. Гудим, Н.Н. Любушкина. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 159-162.
15. Третьяков М.Ю. Старение изоляции трансформаторов / М.Ю. Третьяков, О.И. Фисенко, В. Н. Зуева // Современные электротехнические и информационные комплексы и системы, Армавир, 23–24 октября 2020 года. Армавир: ООО «Редакция

газеты «Армавирский собеседник» (Армавирская типография), 2020. С. 106-108.
16. Файрушин И.Ф. Исследование методов диагностики изоляции силового трансформатора / И.Ф. Файрушин // Тинчуринские чтения: Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции: В 3-х томах, Казань, 24–27 апреля 2018 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. С. 132-133.
17. Фролов. А.Л. Опытная модель схемы диагностирования силовых трансформаторов с использованием согласующих трансформаторов // Энергия единой сети, 2022. № 3-4 (64-65). С. 58 - 63.
18. Фролов А.Л., Инаходова Л.М. Разработка метода диагностирования силовых трансформаторов с использованием измерительной системы и согласующего трансформатора тока // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации. Белебей, 2022. С. 34 - 36.
19. Фролов А.Л. Диагностика механического состояния обмоток силового трансформатора // Энергетика будущего – цифровая трансформация. Липецк, 2022. С. 22 - 25.
20. Фролов А.Л., Инаходова Л.М. Применение метода фрактального анализа для определения остаточного ресурса силовых трансформаторов 6-10 кв распределительных сетей электросетевых и промышленных предприятий // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации. Белебей, 2022. С. 31 - 33.
21. Хренников А.Ю. Обнаружение деформаций обмоток силовых трансформаторов средствами технической диагностики после коротких замыканий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2022. № 3 - 4. С. 74-79.
22. Хренников А.Ю., Назарычев А.Н., Новоселов Е.М. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов (реакторов) при коротких замыканиях: повреждения, испытания и диагностика // ИГЭУ, Иваново. 2011. 92 с.
23. Purkait, Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji. (2003). Impulse fault classification in transformers by fractal analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 10. No.1. P. 109 - 116. http://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1176571.
24. Ismoilov A.I., Karimov E.D., Sidorov D. A., Hismatullin A. S. Modernization of Diagnostic Methods for Oil Transformers // Components of Scientific and Technological Progress. 2021. No. 4(58). P. 5-8.

References:

1. Balagula YU. M. Primenenie fraktal'nogo analiza v zadachah elektrotekhniki: special'nost' 05.09.05 "Teoreticheskaya elektrotekhnika": avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskih nauk / Balagula YUrij Moiseevich. – Sankt-Peterburg. 2013. 18 p.
2. Volkov A.YU., Larin V.S. Podhody k analizu chastotnyh harakteristik dlya ocenki sostoyaniya silovyh transformatorov // Energoekspert, 2019, no. 2 (70), pp. 34 - 38.
3. Gruntovich N.V., Fedorov O.V., Moroz D.R. [et al.] / Analiz problemnyh voprosov ekspluatacii maslonapolnennyh transformatorov // Energiya i menedzhment, 2017, no. 3(96), pp. 2-6.
4. Zavidej V.I., Larin V.S., Volkov A.YU., Drobyshevskij S.A. K diagnostike tekhnicheskogo sostoyaniya obmotok silovyh transformatorov posle vozdejstviya tokov korotkih zamykanij // Ekspoziciya Neft' Gaz, 2018, no. 5(65), pp. 80-84.
5. Zolotarev R.V., Aleksandrov N.M. Metody diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovyh transformatorov // problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti / Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. // CHGU, CHeboksary, 2018, pp. 216 - 221.
6. Medvedev V.O. Vliyanie stareniya mezhslojnoj izolyacii magnitoprovoda na izmenenie urovnya poter' pri ekspluatacii transformatorov sverh normativnogo sroka / V. O. Medvedev, E. A. CHashchin // Planirovanie, provedenie i interpretaciya rezul'tatov nauchno-tekhnicheskih issledovanij: Sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Volgograd, 08 maya 2019 goda. Volgograd: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnyh issledovanij", 2019, pp. 38-40.
7. Mikeshkin O.D., Zabolotskih V.I. Sovremennye metody diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovyh transformatorov // IGTU, Izhevsk. 2015, pp. 296 - 300.
8. Muhametzyanova A.F. Povyshenie effektivnosti ekspluatacii transformatorov, primenyaemyh v sistemah promyshlennogo elektrosnabzheniya / A.F. Muhametzyanova, E.I. Gracheva // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i

praktika, 2014, vol. 2, no. 1(6), pp. 117-126.
9. Patent RF № 2792177, 19.12.2022. Soglasuyushchee ustrojstvo dlya diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovogo transformatora // Inahodova L.M., Frolov A.L.
10. Pahomenko YU.N. Usloviya raboty elektrooborudovaniya v usloviyah Arktiki / YU.N. Pahomenko N.A. Starcev; nauch. ruk. Kosmynina N.M. // Tvorchestvo yunyh - shag v uspeshnoe budushchee: Arktika i eyo osvoenie: materialy IX Vserossijskoj nauchnoj molodezhnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem s elementami nauchnoj shkoly imeni professora M.K. Korovina, g. Tomsk, 10-14 oktyabrya 2016 g. Tomsk: Izd-vo TPU, 2016, pp. 291-293.
11. Polyakov M.A. Ocenka ostatochnogo resursa izolyacii na osnove ucheta individual'nyh osobennostej zhiznennogo cikla silovogo transformatora / M.A. Polyakov, V.V. Vasilevskij // Elektrotekhnika i elektromekhanika, 2014, no. 3, pp. 38-41.
12. Popov G.V. Opredelenie indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya silovyh transformatorov v processe ih ekspluatacii / G. V. Popov, E. B. Ignat'ev, 2014, no. 4, pp. 25-32.
13. Semenova K.V. Metodika rascheta zhiznennogo cikla transformatorov / K.V. Semenova, A.V. Podobnyj, A. I. Tihonov // Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov: Sbornik materialov X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Ivanovo, 18 aprelya 2019 goda. – Ivanovo: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby Ministerstva Rossijskoj Federacii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychajnym situaciyam i likvidacii posledstvij stihijnyh bedstvij», 2019, pp. 167-171.
14. Serikov A.V. Matematicheskaya model' elektromagnitnyh processov v energoeffektivnom silovom maslyanom transformatore / A.V. Serikov, V.V. Ivanov // Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Komsomol'sk-na-Amure, 06–11 dekabrya 2021 goda / Redkollegiya: S.I. Suhorukov (otv. red.), A.S. Gudim, N.N. Lyubushkina. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj universitet, 2022, pp. 159-162.
15. Tret'yakov M.YU. Starenie izolyacii transformatorov / M.YU. Tret'yakov, O. I. Fisenko, V. N. Zueva // Sovremennye elektrotekhnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy, Armavir, 23–24 oktyabrya 2020 goda. – Armavir: OOO «Redakciya gazety «Armavirskij sobesednik» (Armavirskaya tipografiya), 2020, pp. 106-108.
16. Fajrushin I.F. Issledovanie metodov diagnostiki izolyacii silovogo transformatora / I.F. Fajrushin // Tinchurinskie chteniya: Tezisy dokladov XIII molodezhnoj nauchnoj konferencii: v 3-h tomah, Kazan', 24–27 aprelya 2018 goda / Pod obshchej redakciej E.YU. Abdullazyanova. Vol.1. Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2018, pp. 132-133.
17. Frolov A.L. Opytnaya model' skhemy diagnostirovaniya silovyh transformatorov s ispol'zovaniem soglasuyushchih transformatorov // Energiya edinoj seti, 2022, no. 3-4 (64-65), pp. 58 - 63.
18. Frolov A.L., Inahodova L.M. Razrabotka metoda diagnostirovaniya silovyh transformatorov s ispol'zovaniem izmeritel'noj sistemy i soglasuyushchego transformatora toka // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy, dostizheniya i innovacii. Belebej, 2022, pp. 34 - 36.
19. Frolov A.L. Diagnostika mekhanicheskogo sostoyaniya obmotok silovogo transformatora // Energetika budushchego – cifrovaya transformaciya. Lipeck, 2023, pp. 22 - 25.
20. Frolov A.L., Inahodova L.M. Primenenie metoda fraktal'nogo analiza dlya opredeleniya ostatochnogo resursa silovyh transformatorov 6-10 kv raspredelitel'nyh setej elektrosetevyh i promyshlennyh predpriyatij // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy, dostizheniya i innovacii, Belebej, 2022, pp. 31 - 33.
21. Hrennikov A.YU. Obnaruzhenie deformacij obmotok silovyh transformatorov sredstvami tekhnicheskoj diagnostiki posle korotkih zamykanij // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2022, no. 3 - 4, pp. 74-79.
22. Hrennikov A.YU., Nazarychev A.N., Novoselov E.M. Elektrodinamicheskaya stojkost' silovyh transformatorov (reaktorov) pri korotkih zamykaniyah: povrezhdeniya, ispytaniya i diagnostika // IGEU, Ivanovo, 2011, 92 p.
23. Purkait Prithwiraj & Chakravorti, Sivaji. (2003). Impulse fault classification in transformers by fractal analysis. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 1, pp. 109 - 116. http://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1176571.
24. Ismoilov A.I., Karimov E.D., Sidorov D.A., Hismatullin A.S. Modernization of Diagnostic Methods for Oil Transformers // Components of Scientific and Technological Progress, 2021, no. 4(58), pp. 5-8.