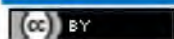


МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ОСНОВАННЫЙ НА ФРАКТАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Цель данной работы – усовершенствование метода вибрационного контроля силового трансформатора за счет применения фрактального анализа амплитудно-временного сигнала. Фрактальный анализ амплитудно-временной характеристики позволит количественно оценить степень «изрезанности» вибрационного сигнала трансформатора, связанной с дефектом. Для количественной оценки введен коэффициент фрактального анализа (КФА) на основе определения фрактальной размерности по методу Хаусдорфа-Безиковича. Для апробации разработанного метода применен бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс (ЛКИК) с разработанным программным обеспечением на основе LabVIEW, ImageJ и Python. Проведены экспериментальные исследования трансформатора ТСЗ 16 с использованием разработанного метода и ЛКИК. Определен КФА обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора, уровень технического состояния для контролируемых элементов трансформатора.

МЕТОДЫ. Усовершенствованный метод контроля позволяет повысить точность контроля силового трансформатора во время его работы под напряжением, что позволяет перейти от плановой системы ремонтов трансформаторов к системе вывода в ремонт по текущему техническому состоянию.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля апробирован с помощью разработанного бесконтактного ЛКИК, определен уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля позволяет определять уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением с возможностью автоматического получения решения о техническом состоянии, а также использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов.

Ключевые слова: фрактальный анализ; бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс; силовой трансформатор; амплитудно-временная характеристика; контроль технического состояния; программное обеспечение LabVIEW; программное обеспечение ImageJ; лазерный виброметр.

Для цитирования: Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 124-136. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136.

IMPROVED METHOD FOR VIBRATION CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF A POWER TRANSFORMER BASED ON FRACTAL ANALYSIS OF THE AMPLITUDE-TIME CHARACTERISTICS

Nizamiev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to improve the method of vibration control of a power transformer through the use of fractal analysis of the amplitude-time signal. Fractal analysis of the amplitude-time characteristics will allow to quantify the degree of «indentation» of the vibration signal of the transformer associated with a defect. For a quantitative assessment, the fractal analysis coefficient (FAC) was introduced based on the determination of the fractal dimension by the Hausdorff-Besikovich method. To test the developed method, a non-contact laser measuring and diagnostic complex (LCMC) with developed software based on LabVIEW, ImageJ and Python was used. Experimental studies of the transformer TSZ 16 were carried out using the developed method and LCIK. The CFA of the windings and magnetic circuit of the transformer under study, the level of technical condition for the controlled elements of the transformer are determined.

METHODS. The improved method of control makes it possible to increase the accuracy of control of a power transformer during its operation under voltage, which makes it possible to switch from a planned system of transformer repairs to a system for taking repairs according to the current technical condition.

RESULTS. The improved method of vibration control was tested using the developed non-contact LCIK, the level of technical condition of the power transformer under voltage was determined.

CONCLUSION. An improved method of vibration control makes it possible to determine the level of technical condition of an energized power transformer with the possibility of automatically obtaining a decision on the technical condition, as well as to use statistical methods for processing and analyzing the signals received from the transformer.

Keywords: fractal analysis; non-contact laser measuring and diagnostic complex; power transformer; amplitude-time characteristic; technical condition control; LabVIEW software; ImageJ software; laser vibrometer.

For citation: Nizamiev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV. Improved method for vibration control of the technical condition of a power transformer based on fractal analysis of the amplitude-time characteristics. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 124-136. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136.

Введение

Работоспособность современных силовых трансформаторов определяется надежностью его составных частей, а также обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) при эксплуатации. Техническое состояние электротехнических комплексов определяется по результатам их контроля и диагностики, что позволяет перейти к обслуживанию по их текущему техническому состоянию. Разработка новых, более точных, объективных, чувствительных, достоверных и рациональных методов определения технического состояния является актуальной задачей неразрушающего контроля силовых трансформаторов.

Диагностика электротехнического комплекса зависит от полноты диагностической информации. На современном этапе развития методов контроля технического состояния перспективным направлением является разработка новых подходов и методов обработки полученной диагностической информации.

Задачи диагностики часто являются трудно формализуемыми, т.к. характеризуются большим числом случайных факторов, действующих на силовой трансформатор в эксплуатации, множественностью причинно-следственных связей между данными факторами, отсутствием или сложностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечеткостью исходных данных, нечеткостью конечных целей и ограничений при принятии решений [1].

Самыми эффективными методами контроля технического состояния силовых трансформаторов являются:

- хроматографический анализ растворенных газов в масле трансформатора;
- температурный контроль элементов трансформатора;
- контроль электрических параметров трансформатора;
- контроль вибрационных параметров силовых трансформаторов [10].

Трендом в области контроля технического состояния трансформаторов являются методы, позволяющие осуществить проведение измерений и испытаний под напряжением.

Методы вибрационного контроля, в отличие от остальных, позволяют осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, также обладают высокой точностью, чувствительностью к зарождающимся и развивающимся дефектам, и возможностью применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации [1].

По результатам анализа работ [4, 5, 6, 7] можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуд на частотах 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. Соответственно, анализируемые основные частоты 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц амплитудного спектра не несут существенной информации для диагностики силового трансформатора.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [1, 2, 7, 8], основываются на сравнении эталонного (бездефектного) и текущих спектров вибрации активной части силового трансформатора. Однако, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что используемые программные обеспечения имеют погрешность при преобразовании амплитудно-временного сигнала в спектр с использованием быстрого преобразования Фурье. В результате возникновения дефекта в обмотке трансформатора появляются дополнительные моды колебаний во временном сигнале, но на амплитудном спектре существенных изменений вибрационных параметров не наблюдается.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [7, 8, 9, 11], позволяют оценить техническое состояние активной части силового трансформатора только как исправное и неисправное. Однако при оценке состояния как неисправное, обмотки или магнитопровод могут находиться в работоспособном состоянии, и нет необходимости в оперативном выводе такого трансформатора из эксплуатации. Но при этом при вибрационном контроле возникают трудности с интерпретацией вибрационного сигнала, ввиду его сложной систематизации, что может увеличить погрешность измерений и в дальнейшем привести к неверной оценке технического состояния активной части силового трансформатора [4, 5].

В этой связи необходимо усовершенствовать метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, используя фрактальный анализ амплитудно-временного сигнала, с целью более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик.

Материалы и методы.

Методы вибрационного контроля силового трансформатора

Современными методами вибрационного контроля силовых трансформаторов являются [2]:

- определение уровня вибрации стенки бака трансформатора;
- метод спектрального вибрационного контроля;
- метод частотного контроля.

Самым распространенным методом сегодня является метод спектрального вибрационного контроля. Но существующие системы вибрационного контроля, такие как «Веста» и «BALTECH», используют контактные датчики вибрации. Данные датчики обладают рядом существенных недостатков, влияющих на качество измерений. Данными недостатками являются:

- наличие неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- возникновение несовпадений АЧХ у однотипных датчиков;
- низкая повторяемость сигнала для датчика, находящегося на поверхности бака трансформатора, что приводит к высокому разбросу измерений вибрации;

- ограниченный температурный диапазон работы датчиков;
- трудоемкость процесса крепления датчика;
- влияние качества поверхности бака трансформатора (ровности, гладкости и чистоты) на сохранение широкого рабочего частотного диапазона;
- механический контакт «трансформатор – датчик» вызывает «ложные» сигналы, которые снижают качество измерений, что влияет на качество контроля трансформатора;
- небезопасность крепления датчиков на объекты повышенной опасности (под высоким напряжением).

Бесконтактные лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений. Задача устранения недостатков контактных датчиков решена за счет создания бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса (ЛКИК) на основе лазерного виброметра [1.2].

Но при проведении вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора также возникает ряд проблем с формализацией и количественной оценкой полученного амплитудного спектра. Рассмотрим проблемы, возникающие при проведении спектрального анализа вибрационных характеристик силового трансформатора.

Виброскорость элементов трансформатора V_{mp} является функцией от амплитуды смещения (виброперемещения) данного элемента трансформатора от своего начального положения в пространстве (1):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} \quad (1)$$

Возникновение вибрации в трансформаторе, находящегося под напряжением, связано с колебаниями электромагнитного поля, поэтому функция виброскорости трансформатора имеет гармонический вид (2):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} = Va \cos(\omega t) = Va \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

Графиком данной функции является синусоида. Для силовых трансформаторов определен информативно-частотный диапазон – 100 - 700 Гц [3]. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуды на частоте 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. [3]

В амплитудном спектре вибрации трансформатора в области частот меньших 100 Гц находятся вибрации, связанные с собственными вибрациями конструкции, либо же вибрации от систем охлаждения трансформатора, если таковые имеются. Частоты более 1000 Гц могут быть вызваны различными причинами, в частности для масляных трансформаторов данные вибрации связаны с колебательными процессами в масле, но, чаще всего, в диапазоне частот от 1000 Гц и выше вибрации обмоток и магнитопровода затухают, поэтому информативность данной области амплитудного спектра вибрации трансформатора очень низка.

Вибрационный сигнал идеально работающего трансформатора должен содержать частоту 100 Гц, которая вызвана магнитострикционным эффектом. Амплитудно-временная характеристика (ABX) идеально работающего трансформатора имеет вид, как показано на рисунке 1.

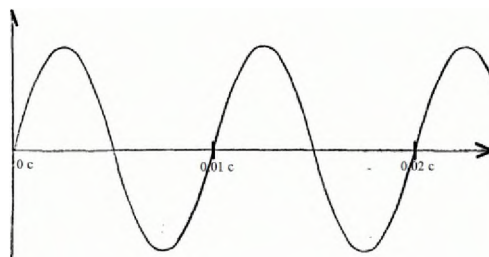


Рис.1 Амплитудно-временная характеристика *Fig.1 Amplitude-time characteristic of an ideally working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На практике, при измерении вибрации работающего трансформатора получается сигнал, имеющий сложную форму, состоящий из множества синусоид, но при этом, измеренный сигнал сохраняет периодичность, как показано на рисунке 2.

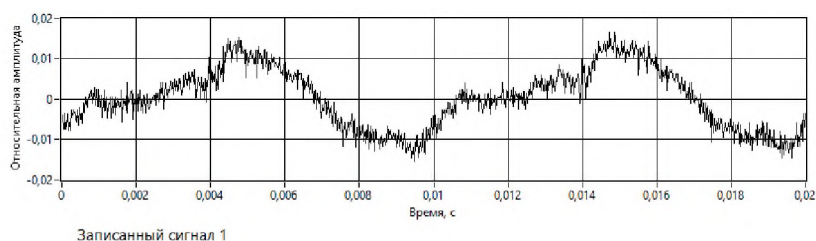


Рис.2. Амплитудно-временная характеристика работающего трансформатора *Fig.2. Amplitude-time characteristic of a working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На сегодняшний день, из данных временных сигналов строят амплитудные спектры для анализа технического состояния трансформатора. Пример амплитудного спектра представлен на рисунке 3.

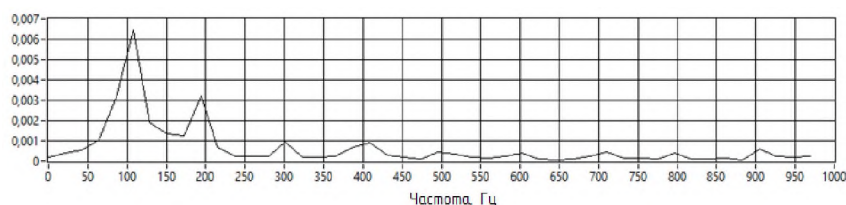


Рис.3. Амплитудный спектр работающего трансформатора *Fig.3. Amplitude spectrum of a working transformer*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

При этом анализируется возникновение амплитуды виброскорости на характерной частоте. Но по амплитудному спектру сложно количественно оценить состояние той или иной части трансформатора. Возникновение или отсутствие пиков амплитуд на частотах, отличных от 100 Гц могут носить случайный характер или содержать программную ошибку. Ниже представлены амплитудно-временные характеристики трансформатора ТСЗ и построенные из них амплитудные спектры.

На рисунке 4 представлена амплитудно – временная характеристика обмотки трансформатора ТСЗ. Данная обмотка трансформатора не имеет дефектов и находится в хорошем техническом состоянии, поэтому форма вибрационного сигнала очень близка к синусоидальной.

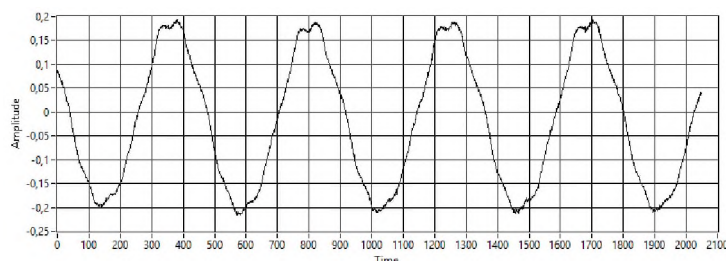


Рис.4. Амплитудно - временная характеристика бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ *Fig.4. Amplitude - time characteristic of the defect-free winding of the transformer TSZ*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Из представленной на рисунке 4 АВХ построен амплитудный спектр виброскорости бездефектной обмотки, который представлен на рисунке 5.

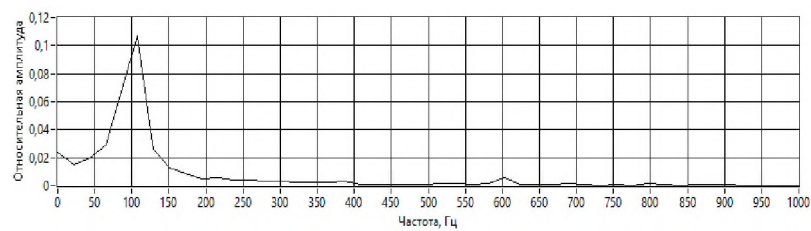


Рис.5. Амплитудный спектр бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ *Fig.5. Amplitude spectrum of the defect-free winding of the transformer TSZ*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В построенном амплитудном спектре присутствует только амплитуда виброскорости на частоте 100 Гц, так как обмотка является бездефектной.

Рассмотрим АВХ и амплитудный спектр обмотки с зарождающимся дефектом изоляции обмотки. Обмотка имеет повреждение изоляции, что приводит к дополнительному нагреву до 5-7 градусов Цельсия. Её АВХ представлена на рисунке 6.

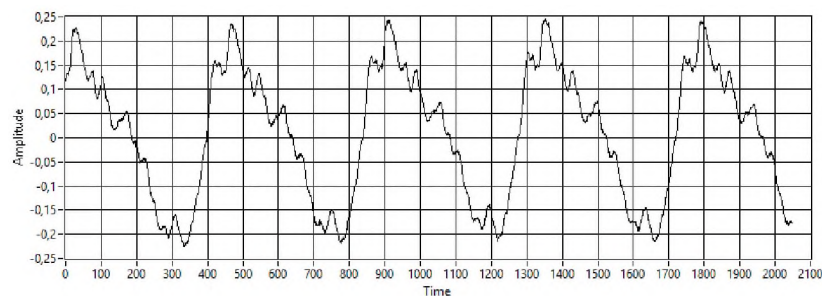


Рис.6. Амплитудно - временная характеристика дефектной обмотки трансформатора ТСЗ *Fig.6. Amplitude - time characteristic of the defective winding of the transformer TSZ*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В результате появления дефекта в обмотке, частично изменились механические и электрические характеристики обмотки трансформатора, что привело к изменению АВХ. Появились дополнительные моды колебаний в вибрационном сигнале трансформатора. Но на амплитудном спектре данного сигнала существенных изменений в составе спектра, в отличие от спектра бездефектной обмотки, не наблюдается (рис. 7).

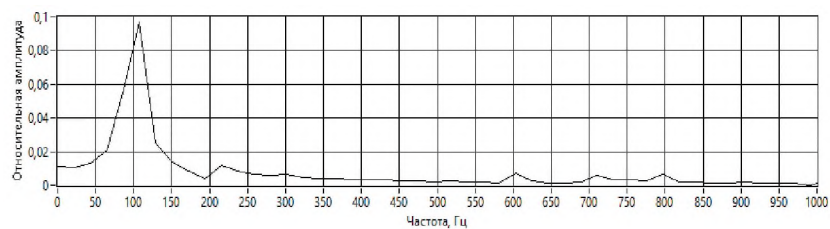


Рис.7. Амплитудный спектр дефектной обмотки трансформатора ТСЗ *Fig.7. Amplitude spectrum of the defective winding of the transformer TSZ*

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Поэтому, необходимо решить задачу повышения точности и качества проведения вибрационного анализа силового трансформатора, путем более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик с помощью фрактального анализа.

Метод фрактального анализа вибрационного сигнала силового трансформатора

Для решения задачи повышения качества диагностики силового трансформатора предлагается применять метод фрактального анализа на основе определения фрактальной размерности виброскорости измеренного сигнала [9,10]. Данный метод заключается в следующем. График амплитудно-временной характеристики трансформатора будет разбиваться на равномерную квадратную сетку с длиной стороны квадрата, равного ε и с числом ячеек равным N . Далее будет определяться фрактальная размерность виброскорости силового трансформатора, по методу Хаусдорфа-Безиковича [11], с помощью формулы (3):

$$Dv = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» амлитудно-временной характеристики виброскорости трансформатора. Так как, вибрационный сигнал работающего трансформатора зависит не только от его технического состояния, но и от параметров окружающей среды и от режима эксплуатации [12,13], целесообразно оценивать не абсолютную фрактальную размерность, а ее значение относительно фрактальной размерности идеальной АВХ трансформатора. Идеальной является АВХ, которая содержит в себе только одну моду колебаний, с частотой 100 Гц (рисунок 1). Для оценки предлагается ввести коэффициент фрактального анализа (КФА), который будет рассчитываться следующим образом:

$$KFA = \frac{Dv}{D_{100}} \quad (4)$$

где Dv – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ виброскорости силового трансформатора;

D_{100} – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ идеального синусоидального сигнала с частотой 100 Гц. Полученный КФА будет являться диагностическим признаком, по которому будет оцениваться техническое состояние контролируемого трансформатора [14]. КФА предлагается оценивать на основе приказа министерства энергетики № 676 [20]. В зависимости от значения КФА трансформатору будет присваиваться решение о техническом состоянии. Данное решение будет иметь следующие формулировки:

- «очень хорошее»
- «хорошее»
- «удовлетворительное»
- «плохое»
- «критическое»

На сегодняшний день существует большое количество способов определения фрактальной размерности. В данном методе предлагается определять фрактальную размерность на основе тангенса угла наклона для зависимости логарифма размеров ячейки квадратной сетки АВХ виброскорости трансформатора от числа ячеек данной сетки [15].

Для определения граничных значений КФА использованы две типовые кривые. За идеальную, принята кривая, описывающая синусоиду с частотой колебаний 100 Гц (рисунок 1), так как она соответствует АВХ идеально работающего трансформатора. За кривую, КФА которой будет соответствовать критическому состоянию, принята кривая Киссветтера, представленная на рисунке 8.



Рис.8. Кривая Киссветтера

Fig.8. Kisswetter curve

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Кривая Киссветтера является ориентационной кривой в теории фракталов, у которой известна фрактальная размерность, равная 1.5 [14]. При этом КФА кривой Киссветтера будет превышать КФА АВХ любого трансформатора, так как информативный вибрационный сигнал трансформатора содержит в себе моды в диапазоне от 100 до 700 Гц и по степени «изрезанности» не превысит кривую Киссветтера.

Фрактальная размерность синусоиды (рисунок 1) равна $D = 1,003$, а так как она соответствует идеальному состоянию трансформатора, то её КФА = 1. Фрактальная размерность кривой Киссветтера $D = 1,5$, следовательно $KFA = \frac{1,5}{1,003} = 1,496$.

В диапазоне от 1 до 1.496 будут присваиваться решения о техническом состоянии трансформатора со следующими границами, в соответствии с приказом министерства энергетики № 676 [20]:

- «очень хорошее» - [КФА от 1 до 1.1];
- «хорошее» - [КФА от 1.101 до 1.2];

- «удовлетворительное» - [КФА от 1.201 до 1.3];
- «плохое» - [КФА от 1.301 до 1.4];
- «критическое» - [КФА от 1.401 до 1.496].

Результаты реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора на основе фрактального анализа с помощью бесконтактного ЛКИК

С помощью разработанного ЛКИК [1] проведены экспериментальные исследования параметров вибрации работающего силового трансформатора ТСЗ 16 кВА (рисунок 9).



Рис.9. ТСЗ 16 кВА

Fig. 9. TSZ 16 kVA

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 1 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были установлены следующие характеристики:

- границы диапазона частот от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44,1 кГц.

С данного трансформатора был снят защитный корпус для получения доступа к обмоткам и магнитопроводу. Измерения проводились непосредственно с трех обмоток и магнитопровода трансформатора [16, 17], точки измерений показаны на рисунке 10.

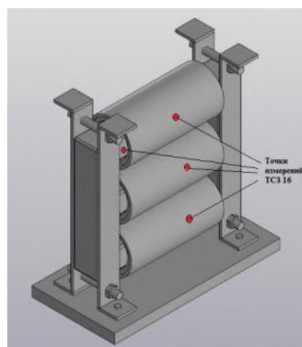


Рис.10. Точки измерений виброскорости ТСЗ 16 кВА

Fig.10. Vibration velocity measurement points TSZ 16 kVA

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Результаты измерений с помощью разработанного ЛКИК представлены на рисунках 11-15 в виде АВХ виброскорости, построенных в разработанном программном обеспечении LabVIEW. На рисунках 11-13 представлены АВХ обмоток работающего трансформатора.

На рисунках 14-15 показаны АВХ магнитопровода до и после распрессовки.

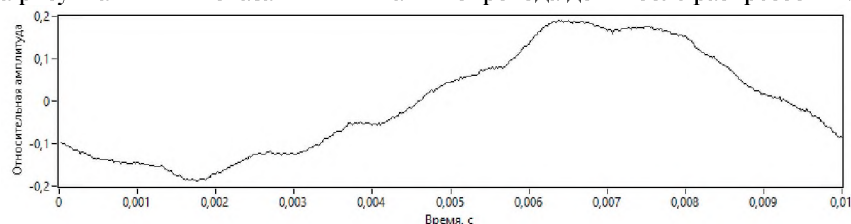


Рис.11. АВХ виброскорости верхней обмотки

Fig.11. ATR vibration velocity of the upper winding

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

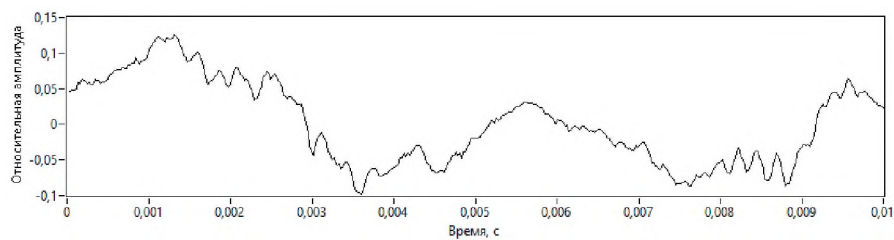


Рис.12. АВХ виброскорости средней обмотки (с дефектом) Fig.12. ATR vibration velocity of the middle winding (with a defect)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

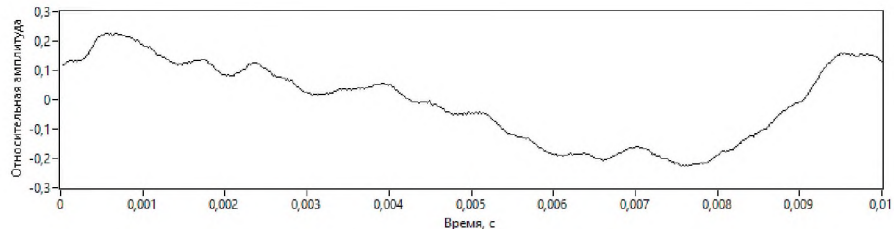


Рис.13. АВХ виброскорости нижней обмотки Fig.13. ATR vibration velocity of the lower winding

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

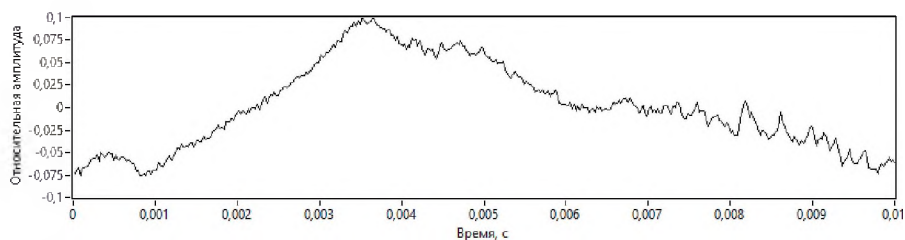


Рис.14. АВХ виброскорости магнитопровода до распрессовки Fig.14. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit before pressing out

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

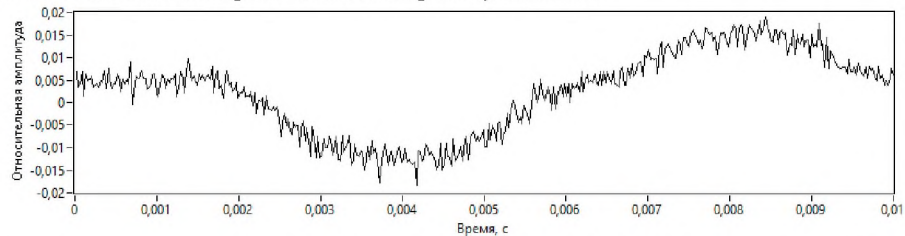


Рис.15. АВХ виброскорости магнитопровода после распрессовки Fig.15. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit after pressing out

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Для данных АВХ в разработанном программном обеспечении на основе ImageJ определены их фрактальные размерности. Фрактальная размерность определяется по формуле (1) и графически представляется как тангенс угла наклона от графика зависимости логарифмов числа ячеек сетки и размеров полученной ячейки. Определение фрактальной размерности АВХ виброскорости верхней обмотки ТСЗ 16 представлено на рисунке 16.

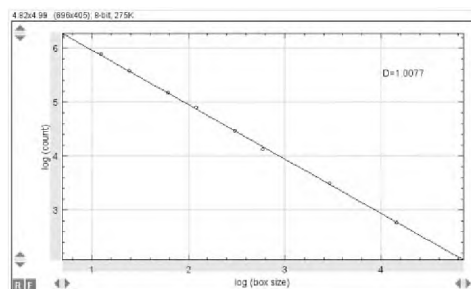


Рис. 16. График определения фрактальной размерности в программе ImageJ Fig. 16. Graph for determining the fractal dimension in the ImageJ program

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Результаты фрактального анализа трансформатора ТСЗ 16 представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Table 1

Результаты фрактального анализа ТСЗ 16

Results of TC3 fractal analysis 16

Показатель	Место измерения ТСЗ 16				
	верхняя обмотка	средняя обмотка	нижняя обмотка	магнитопровод до распрессовки	магнитопровод после распрессовки
D	1,06	1,12	1,0077	1,11	1,31
КФА	1,057	1,117	1,004	1,106	1,306
Состояние элемента трансформатора	очень хорошо	хорошо	очень хорошо	хорошо	неудовлетворительно

По результатам проведения фрактального анализа установлено, что верхняя и нижняя обмотка находятся в очень хорошем техническом состоянии, средняя обмотка и запрессованный магнитопровод определяются как элементы с хорошим техническим состоянием, а магнитопровод после распрессовки на 40 Н/м перешел в неудовлетворительное техническое состояние. Данные решения определяются в созданной подпрограмме «Вывод о техническом состоянии», в программной среде python. Внешний вид подпрограммы представлен на рисунке 17.

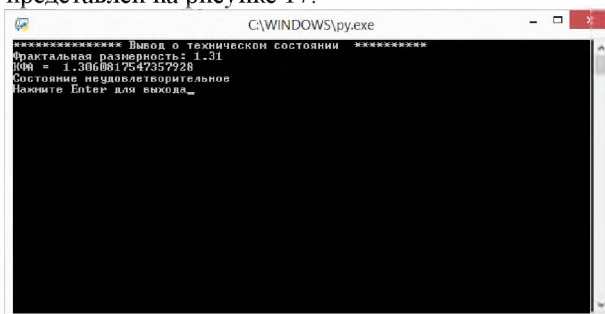


Рис.17. Подпрограмма «Вывод о техническом состоянии»

Fig.17. Subprogram «Conclusion on the technical condition»

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Применение усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора на основе фрактального анализа с помощью бесконтактного ЛКИК на трансформаторе ТСЗ 16 показало возможность обнаружения развивающихся дефектов, а также количественной оценки вибрационного сигнала силового трансформатора на основе расчета КФА.

Выводы

1. Разработан усовершенствованный метод контроля технического состояния силового трансформатора путем фрактального анализа АВХ виброскорости.
2. Разработанный метод контроля технического состояния реализован с помощью бесконтактного ЛКИК с разработанным программным обеспечением в среде LabVIEW, ImageJ и python.
3. С помощью бесконтактного ЛКИК с разработанным программным обеспечением проведены экспериментальные исследования контроля технического состояния трансформатора ТСЗ 16 по результатам которых:
 - построены амплитудно-временные характеристики виброскорости в 4 точках трансформатора ТСЗ, характеризующие уровень технического состояния его активной части;
 - рассчитаны КФА АВХ виброскорости силового трансформатора;
 - сделан вывод об ухудшении технического состояния средней обмотки и магнитопровода ТСЗ 16;
 - подтверждены интервалы КФА для принятия решения о техническом состоянии трансформатора.

4. Разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе АВХ позволяет:

- бесконтактно контролировать уровень технического состояния силового трансформатора;
- анализировать амплитудно-временные характеристики силового трансформатора на основе фрактального анализа;
- количественно оценивать вибрационные параметры силового трансформатора на основе определения КФА контролируемых элементов трансформатора;
- получать вывод о техническом состоянии силового трансформатора.

5. Разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля апробирован в результате экспериментальных исследований и подтвердил свою работоспособность по определению уровня технического состояния трансформатора.

Литература

1. Басенко В.Р. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022.Т. 24. № 3. С. 130-143.
2. Басенко В.Р. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров / Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022 Т. 24. № 5. С. 97-109.
3. Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 155-168.
4. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса / «ЭНЕРГИЯ-2020» Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник материалов конференции, 2020. Т. 3. С.26
5. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов / Димрус – Пермь: 2015. С. 60.
6. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования / Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. 2020. С. 297-300.
7. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / Электрика 2015. С.18–25.
8. Лазарев И.В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов / Динамика и прочность машин. 2014. С.12-18.
9. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Dolomanyk L.V. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods / 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. V.1, Pt 5, Novosibirsk 2018. P. 320-325.
10. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informative Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects / Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, Volum 8, Issue 1, Special Issue III. 2018. P. 322-333.
11. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020». 2020. С.26.
12. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации // Вестник Чувашской ГСХА. №2, 2018, С.108-111.
13. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. 2014. №Т.1 С. 151-152.
14. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики. 2019. № 5. С. 141-151.

13. Kurtz C, Ford G, Vainberg M., et al. Managing aged transformers. *Transmission & Distribution World*. 2005, July. P. 36–45.

14. Metwally I.A. Failures, monitoring, and new trends of power transformers // *IEEE potentials*. – 2011, May/June. P. 36–43.

15. Theil G. Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies // *Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst.*, KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

16. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. № 7-8. С. 71-77.

17. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. № 3. С. 78-89

18. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

Авторы публикации

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Basenko VR, Basenko VR, Nizamiyev MF, et al. 3D model of a power transformer for the study of its technical condition by vibration parameters. *NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. ENERGY PROBLEMS*. 2022;24(3):130-143. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143

2. Basenko VR. Diagnostics of transformers of electrotechnical complexes using non-contact laser vibrometers / Nizamiyev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV. *NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. ENERGY PROBLEMS*. 2022;24(5):97-109. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109

3. Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin IV, et al. Non-contact laser control and measuring complex for determining the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(3):155-168.

4. Basenko VR, Nizamiyev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. ENERGY-2020 - Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. 2020. Collection of conference materials, V. No. 3. P.26

5. Gavrilenko AV, Dolin AP. *Quality control system for pressing the windings and steel of transformers by measuring vibration, monitoring the state of oil pumps*. Dimrus - Perm: 2015. - P. 60.

6. Nizamiyev MF, Ivshin IV. Control of the technical condition of electrical equipment. *Energy security*. Collection of scientific articles of the III International Congress. 2020. P. 297-300

7. Nizamiyev MF, Ivshin IV, Maksimov VV, et al. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. *Electrica* 2015. P.18–25

8. Lazarev IV. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer when pressing windings, changing the temperature and moisture content of insulating materials.

Dynamics and Strength of Machines. 2014. P.12-18

9. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. *Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods*. 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) - 44894 Proceedings. Volume 1, Part 5, Novosibirsk 2018.P. 320-325.

10. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informative Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research*. 2018;8(1). Special Issue III., P. 322-333.

11. Basenko VR, Nizamiev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. ENERGY-2020. 2020. P.26

12. Rybakov LM. Methods and methods for assessing the state of power transformers during operation. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*., 2018;2:108-111

13. Nizamiev MF. *Analysis of methods for studying the vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape*. 2014;1:151-152.

14. Nguyen Tien, Gilfanov K.Kh. Thermal modeling of the TM-160/10 oil-filled power transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2019;5:141-151 Kazan: KSPEU.

15. Kurtz C, Ford G, Vainberg M, et al. *Managing aged transformers*. Transmission & Distribution World. 2005, July. P. 36–45.

16. Metwally IA. *Failures, monitoring, and new trends of power transformers*. IEEE potentials. 2011, May / June. P. 36–43.

17. Theil G. *Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies*. Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

18. Gracheva EI, O.V. Naumov E.A. Fedotov Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2017;7-8:71-77. Kazan: KSPEU.

19. Mustafin RG, Yarysh RF. Differential method for detecting turn short circuits in a three-phase transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2020;3:78-89. Kazan: KSPEU.

20. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017. No. 676 «On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and transmission lines of power plants and electrical networks»

Authors of the publication

Marat F. Nizamiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasily R. Basenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Igor V. Ivshin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vladimirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности:

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)

Получено

02.03.2023г.

Отредактировано

23.03.2023г.

Принято

24.03.2023г.