



**БЕСКОНТАКТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ПРЕССОВКИ ОБМОТОК
И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

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

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Цель данной работы - разработка бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса (ЛКИК) для вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора. В качестве измерительного элемента применяется лазерный виброметр, инструментом для обработки вибрационных сигналов служит разработанное программное обеспечение в среде графического программирования LabVIEW. Техническое состояние силового трансформатора анализируется по амплитудным спектрам вибрации бака исследуемого трансформатора, сформированным с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье в программном обеспечении LabVIEW.

МЕТОДЫ. Вибрационный метод контроля позволяет осуществлять контроль 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. Разработанный ЛКИК позволяет провести бесконтактные измерения параметров вибрации силового трансформатора под напряжением и установить текущий уровень прессовки обмоток и магнитопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный ЛКИК с программным обеспечением позволяет бесконтактно контролировать техническое состояние магнитопровода и обмоток силового трансформатора по амплитудно-частотным характеристикам параметров вибрации, а также использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов.

Ключевые слова: бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс; силовой трансформатор; параметры вибрации; контроль технического состояния; программное обеспечение LabVIEW; лазерный виброметр.

Для цитирования: 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. 140-153. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153.

**CONTACTLESS LASER CONTROL AND MEASURING COMPLEX FOR
DETERMINING THE LEVEL OF WINDING PRESSURE AND MAGNETIC
CONDUCTOR OF POWER TRANSFORMER**

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

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *TARGET. The purpose of this work is to develop a non-contact laser control and measuring complex (LCMC) for vibration control of the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. A laser vibrometer is used as a measuring element, the developed software in the LabVIEW graphical programming environment serves as a tool for processing vibration signals. The technical condition of the power transformer is analyzed by the amplitude spectra of the vibration of the tank of the transformer under study, formed using the fast Fourier transform algorithm in the LabVIEW software.*

METHODS. The vibration control method makes it possible to control a power transformer during its operation under voltage, which makes it possible to move from a planned system of transformer repairs to a system for taking out for repair according to the current technical condition.

RESULTS. The developed LCMC allows to carry out non-contact measurements of vibration parameters of a power transformer under voltage and to establish the current level of pressing of windings and magnetic circuit.

CONCLUSION. The developed LCMC with software allows contactless control of the technical condition of the magnetic circuit and the windings of the power transformer according to the amplitude-frequency characteristics of the vibration parameters, as well as the use of statistical methods for processing and analyzing signals received from the transformer.

Keywords: *non-contact laser control and measuring complex; power transformer; vibration parameters; technical condition monitoring; LabVIEW software; laser vibrometer.*

For citation: Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF Contactless laser control and measuring complex for determining the level of winding pressure and magnetic conductor of power transformer. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):140-153. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153.

Введение

Эффективная работа силовых трансформаторов определяется надежной работой его элементов. Основными элементами силового трансформатора являются магнитопровод и обмотки, которые составляют его электромагнитную систему. Находясь под нагрузкой, трансформатор нагревается, что вызывает увеличение осевых усилий электромагнитной системы трансформатора. Помимо нагрузки на температурный режим трансформатора влияют условия окружающей среды и состояние изоляционной среды трансформатора. Соответственно, данные факторы влияют и на осевые усилия обмоток и магнитопровода. Для оценки осевых усилий электромагнитной системы трансформатора используется термин «прессовка». При изменении температуры обмоток и магнитопровода происходит изменение прессовки электромагнитной системы трансформатора, что приводит к снижению электродинамической стойкости элементов активной части силового трансформатора. Поэтому актуальным становится технический контроль за уровнем прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора. [1]

Наиболее эффективными методами, позволяющими контролировать уровень прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора, являются электрические и вибрационные методы. Но электрические методы не позволяют осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, в отличие от вибрационных методов, кроме того, преимуществом вибрационных методов являются высокая точность, чувствительность к зарождающимся и развивающимся дефектам, и возможность применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации. [2, 3]

Использование методов вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора требует ряд преобразований измеренного вибрационного сигнала. Лазерный контрольно-измерительный комплекс (ЛКИК) позволяет регистрировать параметры вибрации, полученных от контролируемого трансформатора, преобразовывать их в электрический сигнал прямо пропорционально виброскорости объекта контроля и формировать амплитудный спектр на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Подходящим инструментом для решения задач обработки вибрационного сигнала является программная среда *LabVIEW*, которая позволяет обрабатывать и анализировать результаты проведенных измерений. [2, 3]

Литературный обзор

С физической точки зрения вибрация силового трансформатора зависит от уровня прессовки его активной части. Снижение прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора во время его работы меняет общую картину вибрации трансформатора.

При этом уровень прессовки зависит от температуры активной части силового трансформатора. Изменение температуры обмоток трансформатора во время работы приводят к увеличению сил сжатия по отношению к заводским характеристикам прессовки трансформатора. Снижение нагрева обмоток сопровождается уменьшением осевых усилий сжатия обмоток. Зависимости осевых усилий от температуры обмоток представлены на диаграммах изменения осевых усилий обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения для трансформаторов ТРДН-40000/110 (рисунок 1).

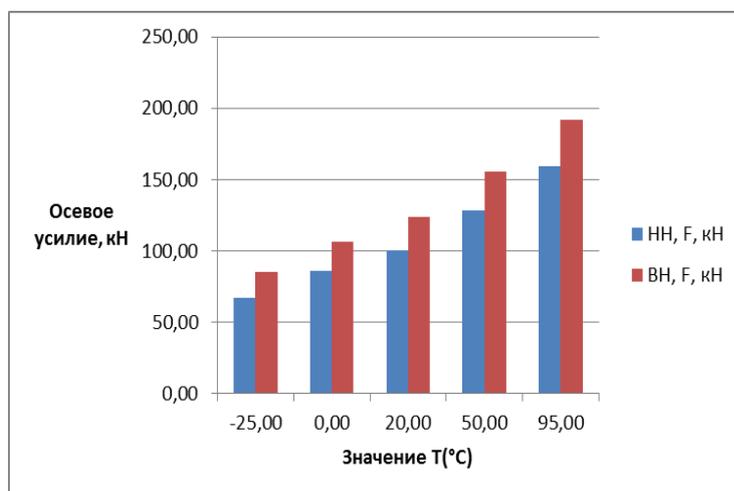


Рис. 1. Диаграмма изменения осевых усилий обмоток трансформатора марки ТРДН-40000/110

Fig. 1. Diagram of changes in the axial forces of the transformer windings of the TRDN-40000/110 brand

При температурах обмоток близких к 95°C осевые усилия возрастают на 15-20% от заводских значений. Данное повышение температуры является в пределах допустимых нагревов для трансформатора и не приводит к возникновению дефектов. Температуры около 50°C являются оптимальными для трансформатора, при данных температурах осевые усилия наиболее близки к заводским параметрам прессовки. Понижение температур в обмотках приводит к возникновению различных механических повреждений. Уменьшение

осевых усилий в обмотках при температуре -25°C приводят к возникновению смещений и деформаций в обмотках. Смещения и деформации обмоток опасны тем, что в результате их возникновения изменяются изоляционные промежутки, что в дальнейшем приводит к появлению дефектов и аварий в силовом трансформаторе. [4]. При этом необходимо понимать, что температурные режимы трансформатора связаны с его конструкцией, номиналом, рабочими режимами, типом изоляции, типом системы охлаждения. Все перечисленные факторы вносят определенный вклад и в вибрационную картину трансформатора и его элементов, и их влияние необходимо снизить.

Современные методы вибрационного контроля силовых трансформаторов дают возможность определить уровень прессовки обмоток и магнитопровода без вывода трансформатора из работы, определить снижение прессовки для каждой фазы и установить другие причины повышения вибрации трансформатора.

По результатам анализа работ авторов Тюрина А.Н., Баширова З.А., Долина А.П., [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 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. [8]

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. [8]

На сегодняшний день существуют системы, реализующие вибрационный контроль силовых трансформаторов. Системы вибрационного контроля, такие как «Веста» и «BALTECH», используют контактные датчики вибрации, которые 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).

Лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений.

ЛКИК для реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора

С целью реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора разработан и создан лазерный контрольно-измерительный комплекс. Схема разработанного ЛКИК показана на рисунке 2.

ЛКИК состоит из лазерного виброметра PDV – 100 - 1, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI USB – 6251 - 2, персонального компьютера - 3 и программного обеспечения - 4 на основе LabVIEW.



Рис. 2. Схема ЛКИК: 1 – лазерный виброметр PDV - 100; 2 – АЦП NI USB – 6251; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение LabVIEW; 5 – силовой трансформатор

Fig. 2. LKIK scheme: 1 - PDV-100 laser vibrometer; 2 – NI USB-6251 ADC; 3-personal computer; 4- LabVIEW software; 5-power transformer

Структурная блочная схема ЛКИК изображена на рисунке 3.

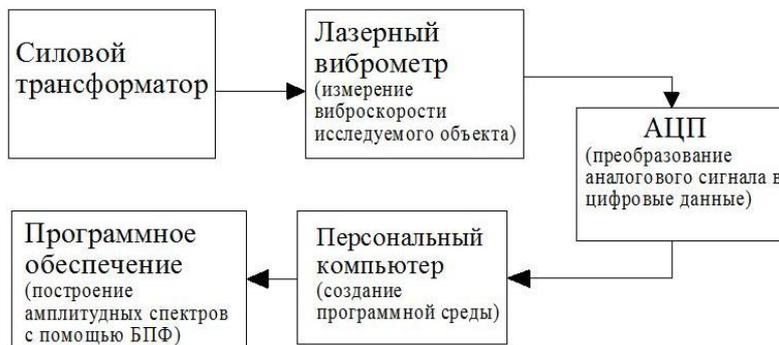


Рис.3. Структурная блочная схема ЛКИК

Fig. 3. Structural block diagram of the LCIC

Отличительной чертой разработанного ЛКИК является использование в качестве датчиков для измерений лазерных виброметров вместо традиционных контактных датчиков вибрации, которые позволяют производить бесконтактные измерения параметров вибрации силового трансформатора без подготовки поверхности бака трансформатора, в зоне повышенной опасности (силовой трансформатор) и в труднодоступных местах.[9]

Лазерный виброметр обладает следующими техническими характеристиками:

- диапазон частот измерения виброскорости – [0 Гц - 22 кГц];
- возможность цифровой обработки сигнала;
- выходы сигнала – аналоговый и цифровой;
- возможность измерения вибрации трансформатора на расстоянии от 0,1 до 30 метров (зависит от отражающей способности поверхности объекта);
- видимое и безопасное лазерное излучение (класс 2);
- низкое энергопотребление.

После проведения измерений на выходе виброметра формируется сигнал напряжения, который пропорционален мгновенному значению виброскорости силового трансформатора в точке измерения. После измерения вибрационный сигнал бака силового трансформатора преобразуется в цифровой вид с помощью модуля NI USB-6251, а затем анализируется в программном обеспечении на основе LabVIEW.[9]

Разработанное программное обеспечение состоит из следующих подпрограмм:

- подпрограммы «Формирования эталона»;
- подпрограммы «Сравнение эталоном».

Подпрограмма «Формирования эталона» создает эталонный амплитудный спектр вибрации исправного силового трансформатора и формирует доверительный интервал на основе рассчитанной доверительной вероятности. Эталонный спектр формируется из большого числа измерений силового трансформатора и включает в себя общие характеристики вибрации. При формировании эталонного спектра вибрации трансформатора применяется метод робастного взвешивания. В результате, сформированный эталон содержит в себе только характерные составляющие вибрации трансформатора для всех исследуемых амплитудных спектров и не содержит в себе случайные составляющие для отдельно взятого амплитудного спектра. Программа сравнения спектров с эталоном реализует сравнение и дает возможность определять отличия измеренных спектров вибрации от эталонного спектра трансформатора.

Подпрограмма работает по следующему алгоритму:

- открывается файл сформированного эталонного амплитудного спектра;
- из измеренных сигналов формируется текущий амплитудный спектр вибрации;
- вычисляются коэффициенты сравнения с использованием различных целевых функций для сформированных амплитудных спектров;
- производится определение коэффициентов сравнения относительно сформированных границ доверительного интервала.

При определении состояния прессовки обмоток (рисунок 4) применяется метод отбраковки аномалий: программное обеспечение определяет вычисленные значения коэффициентов сравнения в виде статистики (p_1, p_2, \dots, p_m), затем данное множество измеренных значений интерпретируется как некий абстрактный параметр. Далее, разработанное программное обеспечение, реализует следующий алгоритм [9]:

- происходит определение медианного значения \bar{p} ;
- вычисляется разброс S в виде среднего абсолютного отклонения;
- строится доверительный интервал по формуле 1:

$$\bar{p} \pm S \cdot t \left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2 \right) \tag{1}$$

где $t(\alpha, m)$ - α -квантиль распределения Стьюдента со степенями свободы.



Рис. 4. Принцип принятия решения об уровне прессовки обмоток «годная-распрессовка» на основе целевой функции сравнения «Площадь спектра»

Fig. 4. The principle of making a decision on the level of pressing of windings "suitable-decompression" based on the objective comparison function "Spectrum area"

В том случае, когда коэффициенты сравнения расположены в пределах сформированного доверительного интервала, то уровень прессовки обмоток и магнитопровода признается «годным». Когда коэффициенты сравнения не попадают в пределы доверительного интервала, то обмотка и магнитопровод считаются «распрессованными».

Для амплитудных спектров вибрации трансформатора целевыми функциями сравнения являются:

- площадь спектра;
- коэффициент корреляции.

Функция сравнения «Площадь спектра» определяется как сумма значений амплитуд вибрации для дискретных частот по формуле 2:

$$S = \sum_{i=k}^n a_i, \quad (2)$$

где k – нижняя частота среза;

n – верхняя частота среза;

a_i – амплитуда колебаний на i – ой частоте.

Функция сравнения «Коэффициент корреляции» определяется расчетным путем по формуле 3:

$$r = \frac{\sum a_i a_{si} - (\sum a_i \sum a_{si}) / n}{\sqrt{(\sum a_i^2 - (\sum a_i)^2 / n) \cdot (\sum a_{si}^2 - (\sum a_{si})^2 / n)}}, \quad (3)$$

где a_i – амплитуда на i -ой частоте текущего спектра;

a_{si} – амплитуда на i -ой частоте эталонного спектра;

n – количество частот в спектре, сравниваемых с эталоном.

В программном обеспечении осуществлена возможность анализа амплитудных спектров силового трансформатора с помощью целевых функций на информативных участках, характеризующих «распрессованное» состояние обмотки и магнитопровода трансформатора. Для силовых трансформаторов информативным диапазоном частот при проведении измерений под нагрузкой будут частоты от 100 Гц до 1000 Гц, так амплитуды вибрации в данном частотном диапазоне возникают под воздействием токов, протекающих в обмотках трансформатора.

Таким образом, используя разработанное программное обеспечение, можно произвести анализ уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Результаты

С помощью разработанного ЛКИК проведены экспериментальные исследования параметров вибрации работающего силового трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ. При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 3 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.

Регистрация параметров вибрационного сигнала проводилась в 6 точках трансформатора. Данные точки измерений расположены на баке трансформатора и соответствуют верхней и нижней границе его обмоток. Схема месторасположения данных точек показана на рисунке 5 и соответствует системе контроля «Веста» ООО «Димрус» качества прессовки обмоток и стали трансформаторов.

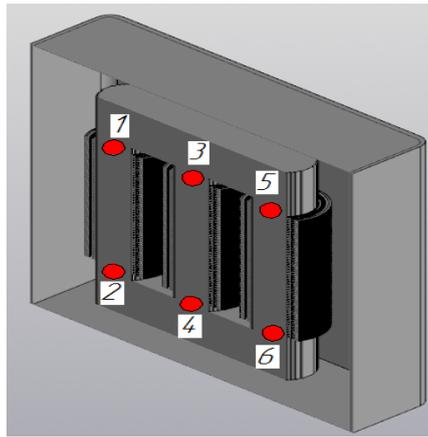


Рис. 5. Упрощенная 3D модель соответствия точек измерения точкам на обмотках трансформатора ТМН 6300 35/10 кВ

Fig. 5. Simplified 3D model of the correspondence of measurement points to points on the windings of the TMN 6300 35/10 kV transformer

Точки 1,3,5 и 2,4,6 являются верхними и нижними границами обмоток фаз А, В, С соответственно, перенесенными на бак трансформатора.

Результаты измерений всех 6 точек обработаны в программном обеспечении разработанного ЛКИК. На рисунке 6 представлена амплитудно - временная характеристика вибрации бака трансформатора в точке 1 (фаза А).

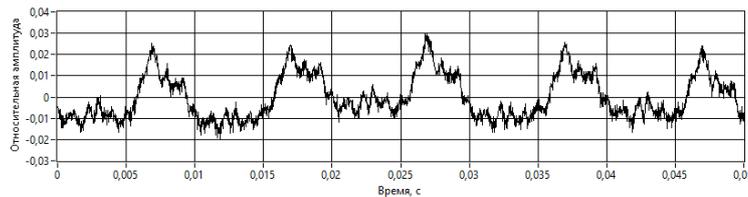


Рис.6. Амплитудно-временная характеристика колебаний трансформатора в точке 1, верх фазы А

Fig. 6. The amplitude-time characteristic of the transformer oscillations at point 1, the top of phase A

На временном интервале от 0 до 0,5 с сформированы амплитудные спектры виброскорости для фаз А, В, С в верхних и нижних точках (рисунок 7-9).

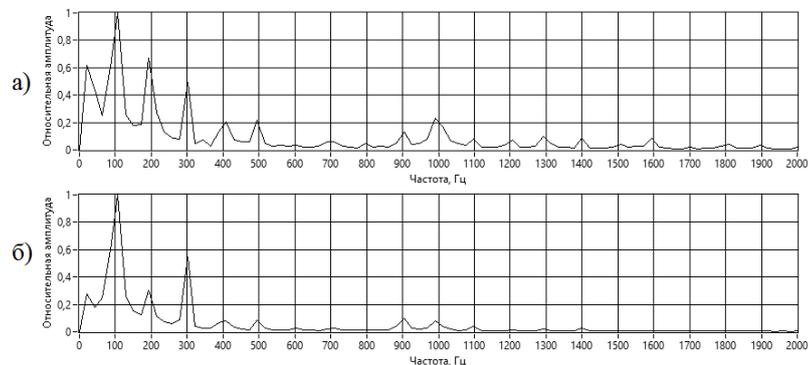


Рис. 7. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы А; б) нижней точки фазы А

7. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: a) the upper point of phase A; b) the lower point of phase A

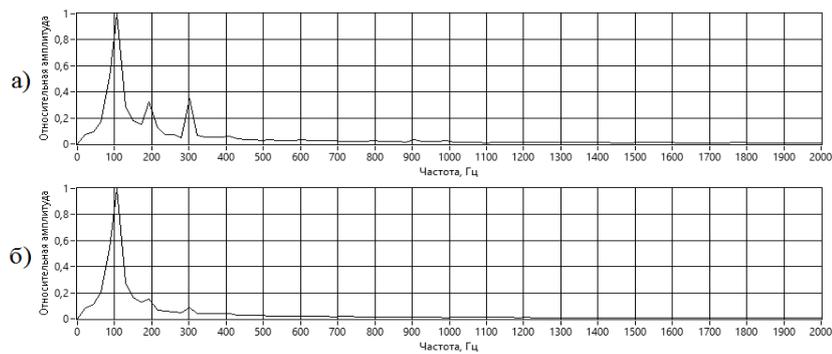


Рис. 8. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы В; б) нижней точки фазы В

Fig. 8. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: a) the upper point of phase B; b) the lower point of phase B

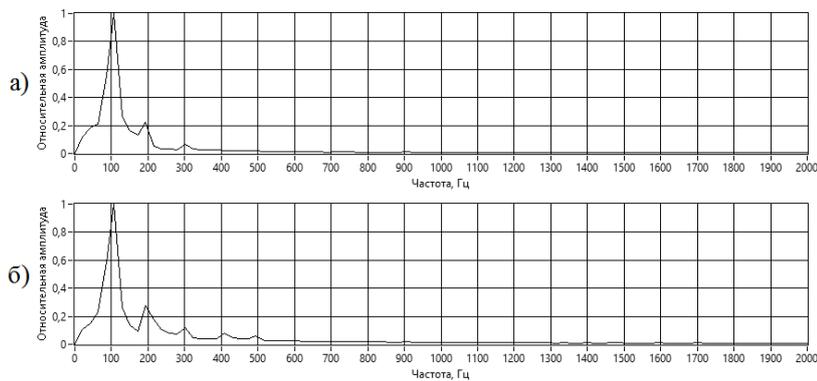


Рис. 9. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора: а) верхней точки фазы С; б) нижней точки фазы С

Fig. 9. The amplitude spectrum of the vibration of the transformer tank: a) the upper point of phase C; b) the lower point of phase C

В качестве эталонного амплитудного спектра принят спектр, сформированный из сигналов, полученных с двух работоспособных трансформаторов марки ТМН 6300 35/6 кВ, находящихся в эксплуатации более 35 лет, в 12 точках (по 6 с разных сторон трансформатора) (рисунок 5). Внешний вид эталонного спектра представлен на рисунке 10.

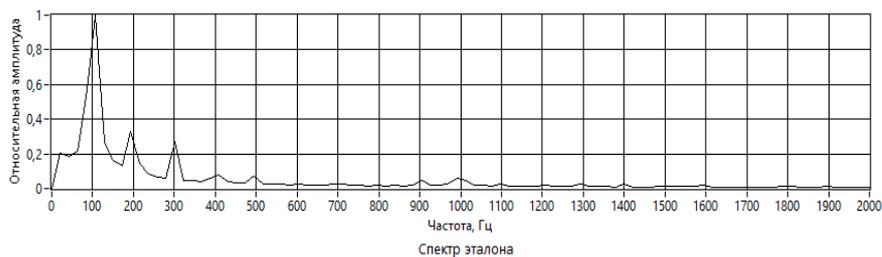


Рис. 10. Эталонный амплитудный спектр

Fig. 10. Reference amplitude spectrum

С целью апробации ЛКИК и определения уровня прессовки обмоток трансформатора произведено сравнение спектров виброскорости во всех точках с эталонным в информативном диапазоне частот от 100 Гц до 1000 Гц с использованием 2-х целевых функций:

- площадь спектра;
- коэффициент корреляции.

Результаты сравнения по целевой функции «Площадь спектра» приведены на рисунке 11.

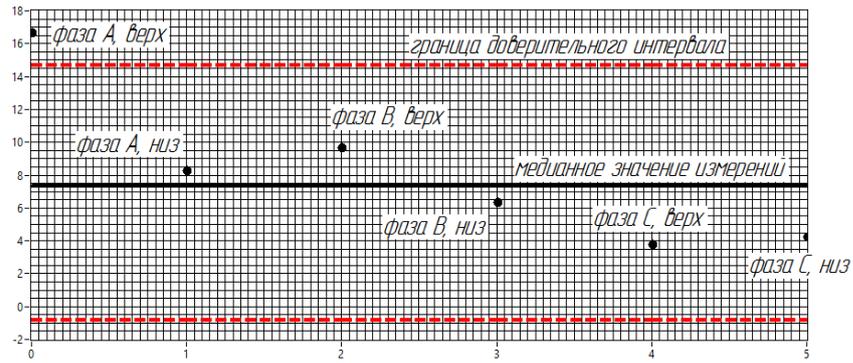


Рис. 11. Сравнение амплитудных спектров в каждой точке измерений с эталонным спектром по целевой функции «Площадь спектра»

Fig. 11. Comparison of the amplitude spectra at each measurement point with the reference spectrum by the objective function "Spectrum area"

Значения целевой функции «Площадь спектра» для всех точек, кроме верхней точки фазы А, находится в пределах значения доверительного интервала построенного с уровнем доверительной вероятности 0,95, что говорит о допустимом уровне прессовки обмоток трансформатора. Значение площади спектра $S = 16,8$ верхней точки фазы А, выше границы доверительного интервала. Данное значение вышло за пределы доверительного интервала в результате появления дополнительных амплитуд вибрации верхней точки фазы А на частотах 400, 500, 900 и 1000 Гц, что говорит о возможной распрессовки верхней части обмотки фазы А на уровне ~10%.

Также с помощью целевой функции сравнения площадь спектра можно определить аномальную вибрацию, связанную с дефектом трансформатора. В этом случае характеристика сравнения «Площадь спектра» выйдет за пределы верхнего или нижнего доверительного интервала, что будет показателем аномального спектра.

Результаты сравнения по целевой функции «Коэффициент корреляции» приведены на рисунке 12.

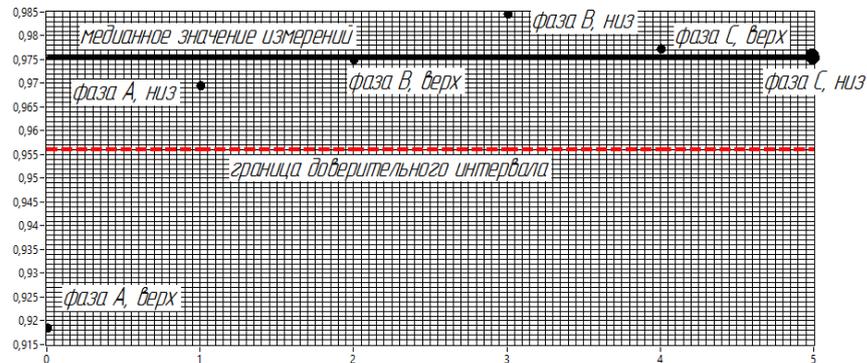


Рис. 12. Сравнение амплитудных спектров в каждой точке измерений с эталонным спектром по целевой функции «Коэффициент корреляции»

Fig. 12. Comparison of the amplitude spectra at each measurement point with the reference spectrum according to the objective function "Correlation coefficient"

Функция «коэффициент корреляции» для верхней точки фазы А получилась $r=0,919$, что находится ниже минимального значения границы доверительного интервала $r=0,956$, построенного с уровнем доверительной вероятности 0,95, и говорит о возможной «распрессовке» верхней части обмотки фазы А на уровне ~10%.

Данное значение распрессовки является не значительным, но говорит о наличии заражающегося механического дефекта обмотки фазы А исследуемого трансформатора.

Совпадение результатов сравнения по двум характеристикам подтверждает достоверность анализа уровня прессовки обмоток, проведенного с помощью разработанного ЛКИК.

Выводы

1. Разработан ЛКИК для реализации спектрального метода вибрационного контроля уровня прессовки активной части силового трансформатора с применением бесконтактных методов лазерной виброметрии.

2. Разработано программное обеспечение ЛКИК, с помощью которого реализуется метод вибрационного контроля с применением бесконтактных методов лазерной виброметрии.

3. Разработанный ЛКИК с программным обеспечением позволяет:

– бесконтактно контролировать уровень прессовки активной части силового трансформатора по амплитудным спектрам вибрации бака трансформатора;

– анализировать амплитудные спектры эталонного и контролируемого трансформатора с помощью различных характеристик сравнения, на выбранных информативных участках спектра вибрации, характеризующей наличие дефекта в объекте контроля;

– использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов;

– применять компьютерные технологии в задачах контроля уровня прессовки активной части силового трансформатора.

4. С помощью разработанного ЛКИК:

– проведены экспериментальные исследования по регистрации параметров вибрации силового трансформатора ТМН 6300 кВА 35/6;

– построены амплитудно-временные и амплитудно-частотные характеристики виброскорости в 6 точках бака трансформатора, характеризующие уровень прессовки активной части силового трансформатора;

– установлены информативные частоты виброскорости бака трансформатора: 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц, 400 Гц, 500 и 900 Гц (частоты кратные 100 Гц).

– определено снижение уровня прессовки части обмотки фазы А трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ в ~10 %, что говорит о начальной стадии возникновения механического дефекта обмотки.

5. Разработанный ЛКИК апробирован в результате экспериментальных исследований и подтвердил свою работоспособность по определению уровня прессовки обмотки и магнитопровода силового трансформатора.

Литература

1. 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.

2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования // Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. 2020. С. 297-300

3. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., и др. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика 2015. С.18–25

4. 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

5. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., 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. 2018. V. 1, Part 5. P. 320-325.

6. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects // Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, V. 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

7. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020». 2020. С.26.

8. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации // Вестник Чувашской ГСХА, №2, 2018, С.108-111

9. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. 2014. №Т.1 С. 151-152.

10. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 // Известие вузов. Проблемы энергетики № 5 Казань: КГЭУ, 2019, С. 141-151.

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

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

13. 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.

14. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известие вузов. Проблемы энергетики № 7-8. Казань: КГЭУ, 2017, С. 71-77

15. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // Известие вузов. Проблемы энергетики № 3 Казань: КГЭУ, 2020, С. 78-89

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. 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.

2. Nizamiev 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

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

4. 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

5. 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. 2018;1(5):320-325.

6. 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 Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research.* 2018;8(1):322-333.

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

8. 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.

9. 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.

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

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

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

13. 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.

14. Gracheva EI, OV. Naumov, EA. Fedotov Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Izvestiya vuzov. Energy Problems.* Kazan: KSPEU. 2017,7-8:71-77.

15. 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.

Authors of the publication

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

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

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

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

Получено ***26.04.2021 г.***

Отредактировано ***12.05.2021 г.***

Принято ***03.06.2021 г.***