

Программный комплекс PSS Sincal позволяет показать различные сценарии исполнения схем электроснабжения для обеспечения надлежащего качества электроэнергии у потребителей. Применение оптимального варианта модернизации рекомендуется после анализа математической модели схемы электроснабжения.

### **Источники**

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.

2. Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства [Электронный ресурс]: Приказ Министерства энергетики РФ от 17 декабря 2019 г. № 10. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант» (дата обращения: 17.02.2021).

УДК 621.314

## **ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ОПРЕССОВКИ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

В.Р. Басенко<sup>1</sup>, М.Ф. Низамиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань

<sup>1</sup>vasiliybas123@mail.ru, <sup>2</sup>marat.nizamiev.90@mail.ru

Науч. рук. И.В. Ившин

Рассмотрен метод контроля уровня опрессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора по вибрационным характеристикам. Разработан лазерный контрольно-измерительный комплекс для апробации предложенного метода. Проведены экспериментальные исследования по контролю уровня опрессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора, определены информативные частотные диапазоны.

**Ключевые слова:** лазерный контрольно-измерительный комплекс, силовой трансформатор, параметры вибрации, контроль технического состояния, программное обеспечение LabVIEW, лазерный виброметр, коэффициент корреляции.

Основными элементами силового трансформатора являются магнитопровод и обмотки. Электрические и вибрационные методы позволяют контролировать техническое состояние обмоток и магнитопровода трансформатора. В отличие от электрических и других методов контроля, вибрационные методы имеют высокую точность и чувствительность к зарождающимся и развивающимся дефектам, обладают возможностью применения компьютерных технологий для обработки и анализа информации [1, 2].

Для реализации контроля силовых трансформаторов по вибрационным параметрам предлагается лазерный контрольно-измерительный комплекс (ЛКИК), который позволяет измерять виброскорость колебаний, полученных от контролируемого трансформатора в определенный временной промежуток, преобразовывать измеренный сигнал в цифровую форму, формировать амплитудный спектр с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1].

Лазерный контрольно-измерительный комплекс (рис. 1) состоит из бесконтактного лазерного виброметра 1, многофункционального модуля ввода-вывода 2, персонального компьютера 3, разработанного программного обеспечения в среде LabVIEW 4.



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

С помощью разработанного ЛКИК проведены экспериментальные измерения параметров вибрации бака работающего силового трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ. Измерения проводились в 6 точках трансформатора и соответствуют верхней и нижней границе его обмоток. Схема месторасположения данных точек показана на рис. 2 и соответствует методике контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации [4].

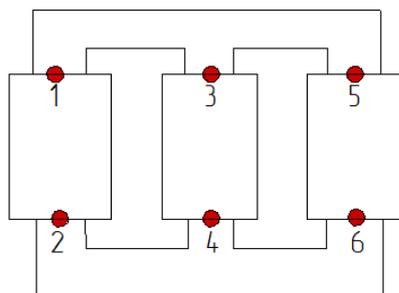


Рис. 2. Схема месторасположения точек измерений на баке трансформатора относительно его обмоток

Результаты измерений всех 6 точек обработаны в программном обеспечении разработанного ЛКИК. На временном интервале от 0 до 0,5 с сформированы амплитудные спектры виброскорости для фаз *A*, *B*, *C* в верхних и нижних точках. На рис. 3 представлен амплитудный спектр верхней точки фазы *A*.

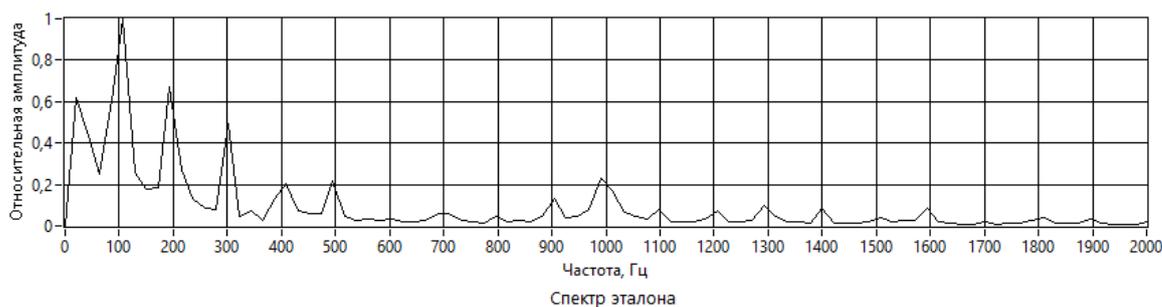


Рис. 3. Амплитудный спектр вибрации бака трансформатора верхней точки фазы *A*

По результатам анализ работ А.Н. Тюрина, А.В. Гавриленко, А.П. Долина [4], можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Трансформатор, находящийся в хорошем техническом состоянии, будет содержать в себе три амплитудных пика на частотах 100, 300 и 500 Гц. Пик на частоте 100 Гц появляется в результате магнитострикции в магнитопроводе и воздействия электродинамических сил на обмотку. Пики вибрационного спектра на частотах 300 и 500 Гц появляются вследствие воздействия насыщения ферромагнитного сердечника трансформатора [4].

В зоне частот, меньших 100 Гц, сосредоточены в основном вибрации, вызванные собственными резонансными колебаниями элементов конструкции бака. Вибрации с частотами выше 1000 Гц, сильно затухают в масле, поэтому полезная для контроля технического состояния информация в этой зоне, как и в зоне частот, менее 100 Гц, отсутствует [4].

Присутствие в амплитудном спектре пиков на других частотах в диапазоне от 100 Гц до 1000 Гц не поддается систематизации. Это связано с различием между конструкциями трансформаторов, различной жесткостью корпуса бака, разницей токовых параметров сторон ВН и НН, наличием РПН и т. д. [5].

Для установления взаимосвязи (корреляции) проведен анализ измеренных сигналов в разработанном программном обеспечении в среде графического программирования LabVIEW 13.0.

В качестве эталонного амплитудного спектра принят спектр, сформированный из спектров сигналов, полученных в 6 точках (см. рис. 2). Внешний вид эталонного спектра представлен на рис. 4.

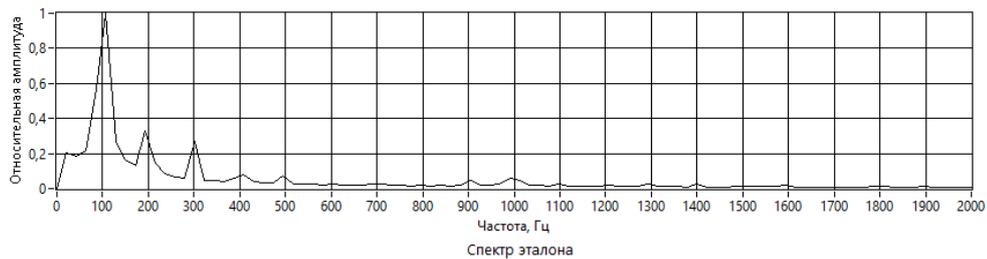


Рис. 4. Эталонный амплитудный спектр

Произведено сравнение 6 спектров виброскорости с эталонным в информативном диапазоне частот от 100 Гц до 1000 Гц с использованием характеристики сравнения «коэффициент корреляции»:

$$r = \frac{\sum a_i a_{si} - (\sum a_i \sum a_{si}) / n}{\sqrt{\left(\sum a_i^2 - (\sum a_i)^2 / n\right) \left(\sum a_{si}^2 - (\sum a_{si})^2 / n\right)}}$$

где  $a_i$  – амплитуда на  $i$ -й частоте текущего спектра;  $a_{si}$  – амплитуда на  $i$ -й частоте эталонного спектра;  $n$  – количество частот в спектре, сравниваемых с эталоном.

Результаты сравнения приведены на рис. 5.

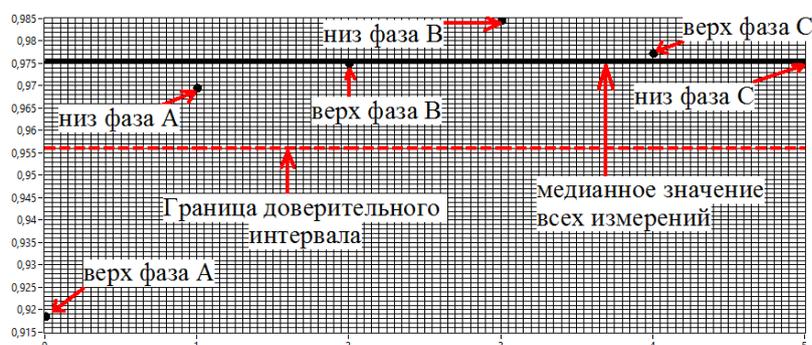


Рис. 5. Сравнение коэффициентов корреляции амплитудных спектров в каждой точке измерений с эталонным спектром

Значения целевой функции «коэффициент корреляции» для всех точек, кроме верхней точки фазы  $A$ , находится выше минимального значения доверительного интервала  $r = 0,956$ , построенного с уровнем доверительной вероятности  $0,95$ , что говорит о допустимом уровне опрессовки обмоток трансформатора. Значение коэффициента корреляции верхней точки фазы  $A$   $r = 0,919$ , ниже границы доверительного интервала, что говорит о возможной распрессовки верхней части обмотки фазы  $A$ .

Таким образом, в результате проделанной работы:

- разработан ЛКИК для бесконтактного вибрационного контроля уровня опрессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора;
- разработано программное обеспечение ЛКИК на основе программной среды LabVIEW для обработки и анализа вибрационных сигналов силового трансформатора.

### **Источники**

1. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 108–113.
2. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / М.Ф. Низамиев [и др.] // Электрика. 2015. № 6. С. 18–25.
3. Программный комплекс для экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора газового двигателя КАМАЗ / М.Ф. Низамиев [и др.] // Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин: матер. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. молодых специалистов. Казань, 2014. С. 94–95.
4. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества опрессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов: руководство по эксплуатации. Пермь, 2015. 60 с.
5. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // Энергия – 2020: матер. 15-й Всерос. (7-й Междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. Т. 3. С. 26.