УДК 621.314 **DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143**

3 D МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ВИБРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

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

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

Резюме: *ЦЕЛЬ. Цель данной работы - разработка 3-D модели силового трансформатора для исследований параметров колебаний и определения технического состояния. Техническое состояние силового трансформатора анализируется по амплитудным спектрам вибрации, сформированным с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье.*
МЕТОДЫ. Для определения информативных частот объектов сложной формы, таких как силовой трансформатор, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с помощью компьютерного моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics
РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам проведенного моделирования частот механических колебаний магнитопровода трансформатора определены информативные частотные диапазоны для определения уровня технического состояния силового трансформатора.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Конечно-элементное моделирование позволяет представить трансформатор в виде дискретной системы, состоящей из компонентов, объединенных между собой в узловых точках, что позволяет моделировать дефекты трансформатора и определять его вибрационные параметры в разных технических состояниях.

Ключевые слова: *силовой трансформатор, метод конечных элементов, амплитудный спектр, вибрационный метод контроля.*

Для цитирования: Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. 3 D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 130-143. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143.

3 D MODEL OF A POWER TRANSFORMER TO STUDY ITS TECHNICAL CONDITION BY OSCILLATION PARAMETERS

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

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *TARGET. The purpose of this work is the development of a 3-D model of a power transformer to study the oscillation parameters and determine the technical condition. The technical condition of the power transformer is analyzed by the vibration amplitude spectra formed using the fast Fourier transform algorithm.*
METHODS. To determine the informative frequencies of objects of complex shape, such as a power transformer, it is advisable to use the finite element method (FEM), implemented using computer simulations in the COMSOL Multiphysics software
RESULTS. According to the results of the calculation of the frequencies of mechanical vibrations of the magnetic circuit of the transformer, informative frequency ranges were determined to determine the level of technical condition of the power transformer.

CONCLUSION. Finite element modeling makes it possible to represent a transformer as a discrete system consisting of components interconnected at nodal points, which will allow modeling transformer defects and determining its vibration parameters in different technical conditions.

Keywords: *power transformer, finite element method, amplitude spectrum, vibration control method.*

For citation: Basenko VR., Nizamiev MF., Ivshin IV., Vladimirov OV.3 D model of a power transformer to study its technical condition by oscillation parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 130-143. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143.

Введение

Силовые трансформаторы являются основным элементом электрической подстанции. Техническое состояние силового трансформатора, от которого зависит надежная работа всей электрической подстанции, определяется по результатам контроля и диагностики. Трендом в области неразрушающего контроля и диагностики является проведение измерений и испытаний для трансформаторов под напряжением, что позволяет перейти к обслуживанию трансформаторов по их текущему техническому состоянию и снизить технологический и экономический ущерб вывода оборудования из эксплуатации. Создание более точных, чувствительных, достоверных и рациональных методов контроля технического состояния силовых трансформаторов под напряжением является актуальной задачей неразрушающего контроля.

Среди методов неразрушающего контроля, позволяющих определять техническое состояние трансформатора под напряжением, наиболее эффективным методом является вибрационный метод контроля [1]. С помощью вибрационного метода контролируется состояние магнитопровода и обмоток, составляющих электромагнитную систему или «активную часть» трансформатора.

С целью разработки методики контроля технического состояния силовых трансформаторов по параметрам вибрации, необходимо провести теоретические исследования по определению информативного частотного интервала, характеризующих наличие дефекта. Для определения информативных частот объектов сложной формы, таких как силовой трансформатор, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с использованием компьютерного моделирования.

С помощью МКЭ активная часть трансформатора разбивается на ряд областей (конечных элементов), в которых неизвестные физические величины (механическое смещение, магнитная индукция, электрический потенциал и т.д.) будут иметь аналитическое выражение в виде известных математических уравнений. Таким образом, МКЭ позволяет представить трансформатор в виде дискретной системы, состоящей из компонентов, объединенных между собой в узловых точках, что позволяет моделировать дефекты трансформатора и определять его вибрационные параметры в разных технических состояниях.

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 трансофрматора [8].

Материалы и методы. *Построение 3D модели трансформатора*

Для реализации исследования по определению информативного частотного диапазона выбран программный пакет *COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics* - это комплексная интегрированная среда для моделирования различных физических явлений.

Данный программный пакет имеет полную совместимость с системами типа *CAD/CAM/CAE*, что позволяет использовать дополнительные инструменты для создания 3D геометрии исследуемого трансформатора.

Блок-схема алгоритма расчета частот колебаний магнитопровода силового трансформатора представлена на рисунке 1.

Рис. 1. Блок-схема расчета частот колебаний магнитопровода.

Fig. 1. Block diagram for calculating the oscillation frequencies of the magnetic core.

В качестве объекта исследования для определения информативных частот магнитопровода, характеризующих наличие дефекта, выбран трансформатор типа ТСЗ 16 кВА 0,4/0,22 кВ (рис. 2).

Рис. 2. ТСЗ 16 кВА *Fig.2. TSZ 16 kVA*

С помощью вибрационного контроля анализируется состояние магнитопровода и обмоток трансформатора, поэтому объектом исследования будет служить не весь трансформатор, а его активная часть. С помощью программного пакета КОМПАС – 3D, совместимого *COMSOL Multiphysics*, создана 3D модель активной части трансформатора ТСЗ 16 кВА, представленная на рисунке 3.

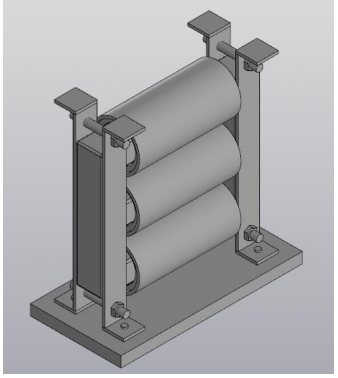

Рис. 3. 3D модель активной части трансформатора ТСЗ 16 кВА *Fig. 3D model of the active part of the transformer TSZ 16 kVA*

Трансформатор ТСЗ 16 кВА имеет стержневой тип магнитопровода, стержни которого расположены горизонтально. Вертикально расположенное ярмо стянуто балками по бокам, которые скреплены между собой шпильками и гайками с резьбой М14.

Задача данного исследования заключается в определении частот механических колебаний магнитопровода, вызванных магнитострикционным эффектом. Данная геометрическая модель является трудоемкой для проведения расчета колебаний магнитопровода под действием электромагнитного поля, поэтому принято решение об изменении модели активной части трансформатора с допущениями. Новая геометрическая модель с допущениями представлена на рисунке 4.

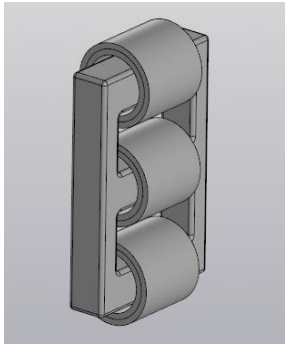

Рис. 4. 3D модель активной части трансформатора с допущениями *Fig 4. 3D model of the active part of the transformer with assumptions*

Допущения заключаются в том, что в новой модели присутствуют только магнитопровод и обмотки. Балки и крепления магнитопровода будут заменены на фиксации и механические усилия, оказывающие давление на ярма магнитопровода. Обмотки трансформатора представлены в виде двух цилиндров разных диаметров. Для программного пакета *COMSOL* этого будет достаточно, так как он имеет функцию задания электрических обмоток общего типа с указанием материала, числа витков и электрической проводимости.

Геометрические размеры активной части трансформатора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Размеры активной части ТСЗ 16 кВА

Элемент	Размер (мм)
Длина стержня	290
Длина ярма	240
Длина цилиндра обмоток ВН и НН	210
Толщина цилиндра обмотки НН	10
Толщина цилиндра обмотки ВН	8

Построенная геометрическая модель (рис. 4) позволяет корректно провести исследование информативных частот механических колебаний магнитопровода.

Расчет механических колебаний магнитопровода под воздействием электромагнитного поля

В программном обеспечении *COMSOL Multiphysics* проведен расчет вынужденных механических колебаний магнитопровода, вызванных действием электромагнитного поля.

Перед проведением расчета физических процессов были заданы следующие материалы физической модели активной части силового трансформатора. Для магнитопровода был выбран материал *Soft Iron*, который является наиболее близким по параметрам к шихтованной стали магнитопровода. Основные значения параметров магнитопровода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры материала магнитопровода трансформатора

Параметр	Значение параметра
Electrical conductivity	1[S/m]
Relative permittivity	1
Density	8300[kg/m^3]
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus	205e9[Pa]

Для обмоток выбран материал *Copper*, наиболее подходящий по параметрам для обмоток трансформатора. Основные значения параметров обмоток представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры материала обмоток трансформатора

Параметр	Значение параметра
Relative permeability	1
Relative permittivity	1
Density	8960[kg/m^3]
Young's modulus	110e9[Pa]
Poisson's ratio	0.35
Electrical conductivity	5.998e7[S/m]
Coefficient of thermal expansion	17e-6[1/K]
Heat capacity at constant pressure	385[J/(kg*K)]

Число витков катушки определено исходя из коэффициента трансформации, и составляют для высшего напряжения 400, а низшего 230.

Проведен расчет механических колебаний магнитопровода, вызванных электромагнитным полем. Данная задача включает в себя моделирование нескольких физических процессов, а именно:

1) моделирование 3-х фазной электрической цепи;
2) моделирование магнитных полей;
3) моделирование механики твердого тела.

С помощью пакета *Electrical Circuit* была смоделирована электрическая цепь трансформатора, представленная на рисунке 5.

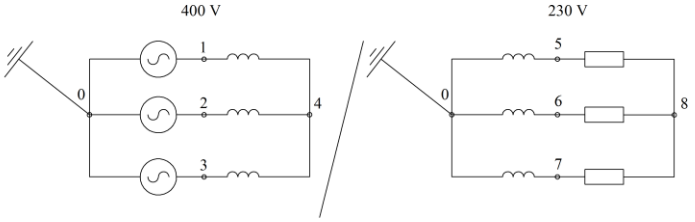

Рис. 5. Схема 3-х фазной электрической цепи трансформатора ТСЗ

Fig.5. Scheme of a 3-phase electrical circuit of a transformer TSZ

Напряжение на каждую фазу было задано по синусоидальному закону с амплитудой 400 Вольт и начальной фазой 0 радиан, 2,09 радиан и 4,18 радиан, что соответствует 0 градусам, 120 и - 120 градусам для уравнений симметричной трехфазной цепи.

Заданы параметры магнитного поля с помощью пакета *Magnetic Fields*. Основным параметром здесь служит задание магнитных свойств для магнитопровода, которые определены как интерполяция нелинейного магнитного материала *Soft Iron*. Данные параметры отображены на графике зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля, представленные на рисунке 6.

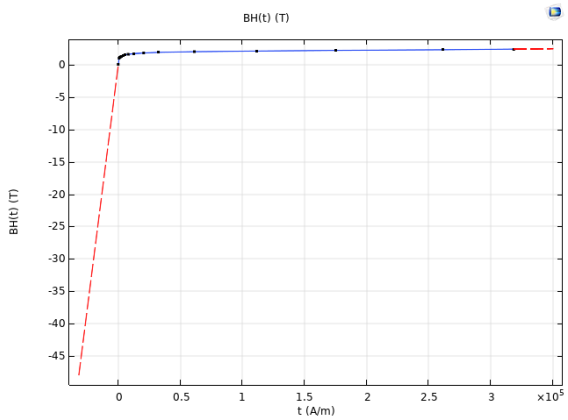

Рис. 6. Магнитные свойства материала магнитопровода трансформатора

Fig. 6. Magnetic properties of the material of the magnetic circuit of the transformer.

Расчет магнитных полей, возникающих под действием электрического тока 3-х фазной цепи, будет проводиться решением уравнений Максвелла дифференциальной форме, представленной в системе уравнений 1:

$$\left.\begin{aligned} &\nabla \times H = J \\ &B = \nabla \times A \\ &E = -\frac{\partial A}{\partial t} \\ &J = \sigma E \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

Магнитопровод является магнитострикционным материалом, поэтому уравнение магнитной индукции будет иметь измененную форму, представленную в формуле 2:

$$B = \mu_0 \left[H + M(H, S_{mech}) + M_r \right] \tag{2}$$

где важным элементом является M_r - величина напряженности магнитного поля, возникшей в результате остаточной намагниченности.

Для граничных условий, приняты условия магнитной изоляции, описанные в формуле 3:

$$n \times A = 0 \tag{3}$$

Моделирование механических колебаний магнитопровода осуществляется через понятия механических напряжений и тензора напряжений, описанных в уравнении 4:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot s + F_v \tag{4}$$

Активная часть трансформатора была зафиксирована в плоскости ХУ, вследствие чего значение *u* равно 0.

После задания условий физики расчета упрощенная геометрическая модель трансформатора построена конечно-элементная сетка, представленная на рисунке 7.

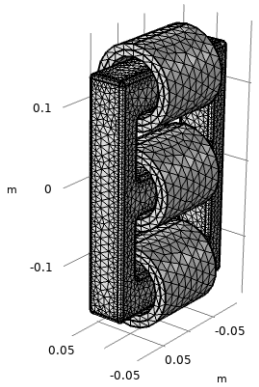

Рис.7. Конечно-элементная сетка магнитопровода и обмоток трансформатора ТСЗ

Fig.7. Finite element mesh of the magnetic core and windings of the transformer TSZ

Максимальный размер элемента сетки – 30 мм, минимальный – 3 мм, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, а коэффициент кривизны равен 0,6.

Произведен расчет по типу расчета *Time dependent*. Данный тип расчета производит вычисления во временной области, что позволяет учесть характер электромагнитного поля, которое меняется во времени. Решатель был задан синусоидальной функцией, временной период t = 0,02 с, что соответствует периоду колебаний электромагнитного поля промышленной частоты с шагом равным 0,001 с.

Результаты моделирования трансформатора.

Результатом расчета магнитного поля служит распределение магнитного потока в виде магнитной индукции в магнитопроводе, изображенной на рисунках 8 и 9.

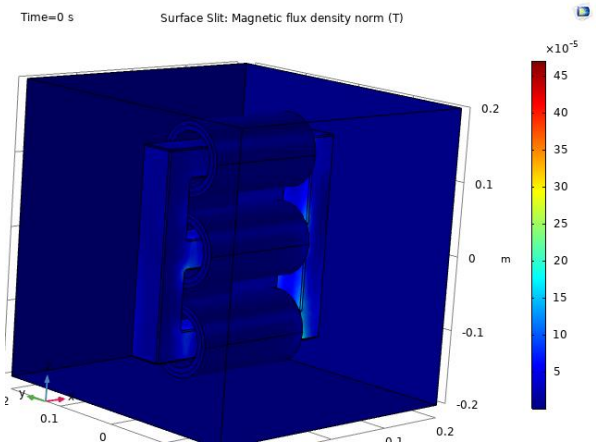

Рис. 8. Распределение магнитного потока в начальный момент времени

Fig.8. Magnetic flux distribution at the initial moment of time

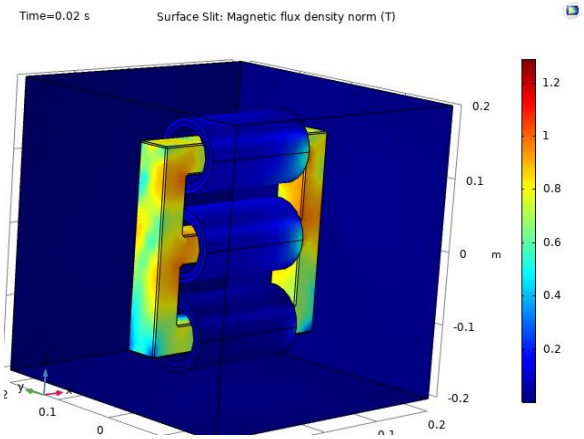

Рис. 9. Распределение магнитного потока в момент времени 0,02 с

Fig. 9. Magnetic flux distribution at time 0.02 s

Из рисунков 8 и 9 видно, что магнитопровод намагничен неравномерно, так как имеют место нелинейные процессы магнитного насыщения, которые связаны с параметрами 3-х фазного электромагнитного поля. Максимальное значение магнитной индукции получено в среднем стержне и ярме магнитопровода на уровне 1,35 Тл, показанной красной областью на рисунке 9.

Проведено два расчета механических колебаний магнитопровода под действием магнитного поля. При этом менялось одно условие – задание механического момента, которое имитирует прессовочное усилие на магнитопровод. Первый расчет был для бездефектного магнитопровода с механическим моментом 40 Н/м в области магнитопровода в плоскости XZ. Второй расчет моделировал дефектный трансформатор с механическим моментом 0 Н/м для магнитопровода. То есть для второго расчета отсутствовало внешнее давление на магнитопровод, также как при распрессовке, и механика магнитопровода рассчитывалась только под влиянием внутренних сил упругости. Результаты данных расчетов представлены на рисунках 10 и 11.

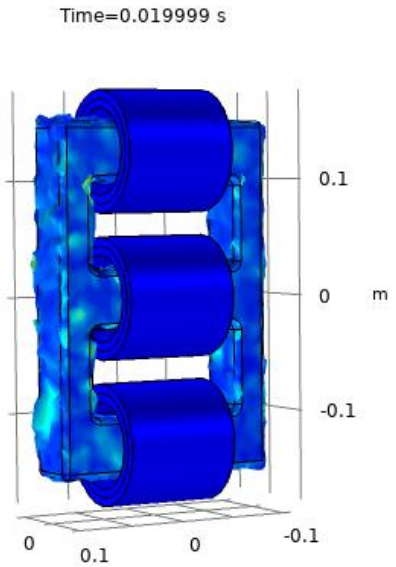

Рис. 10. Форма механических колебаний бездефектного магнитопровода

Fig. 10. The form of mechanical oscillations of a defect-free magnetic circuit

Из рисунков 10 и 11 видны изменения форм и направления колебаний магнитопровода. Видно, что при распрессовке магнитопровода, колебания становятся больше по амплитуде и приводят к более серьезным деформациям. Для более детального анализа построены амплитудные спектры вибрации магнитопровода.

Рассмотрим амплитудный спектр бездефектного магнитопровода в диапазоне от 0 до 1500 Гц, показанного на рисунке 12.

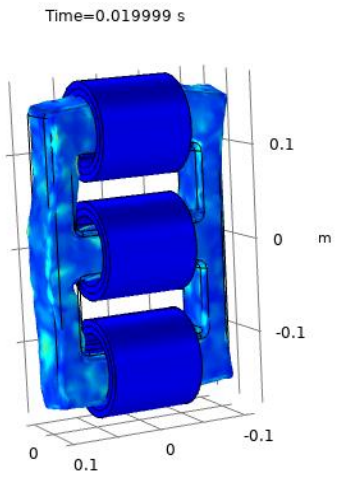

Рис. 11. Форма механических колебаний дефектного магнитопровода

Fig. 11. The form of mechanical oscillations of a defective magnetic circuit

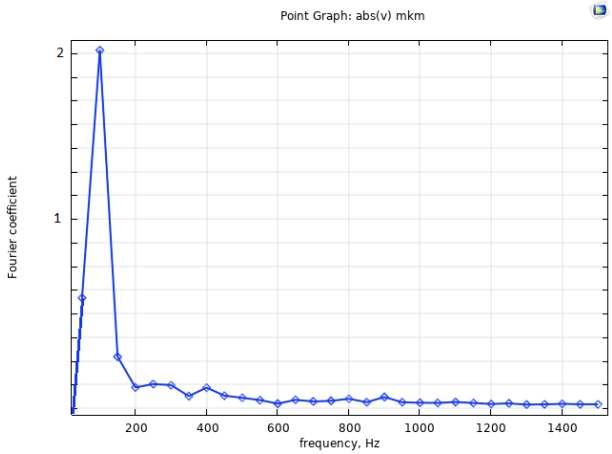

Рис. 12. Амплитудный спектр бездефектного магнитопровода до 1500 Гц

Fig. 12. Amplitude spectrum of a defect-free magnetic circuit up to 1500 Hz

На рисунке 12 видно, что основная амплитуда сосредоточена на частоте 100 Гц. Известно [8], что частоты выше 700 Гц не являются информативными для определения уровня технического состояния магнитопровода трансформатора, что также и подтверждает рисунок 12, так как в данном спектре на частотах выше 700 Гц отсутствует какое-либо возрастание амплитуд. Проведен анализ амплитудных спектров для дефектного и бездефектного магнитопровода в диапазоне от 0 до 700 Гц, изображенных на рисунках 13 - 15.

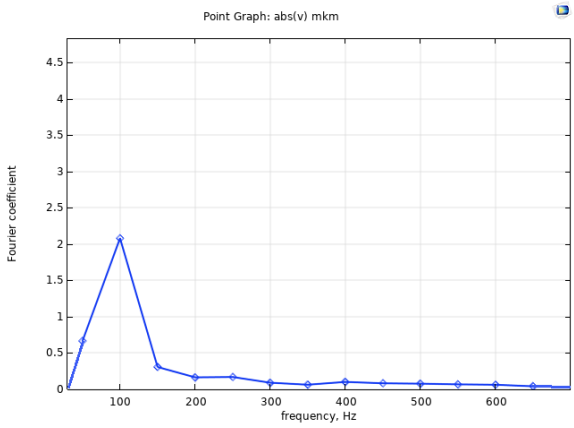

Рис. 13. Амплитудный спектр бездефектного магнитопровода

Fig. 13. Amplitude spectrum of a defect-free magnetic circuit

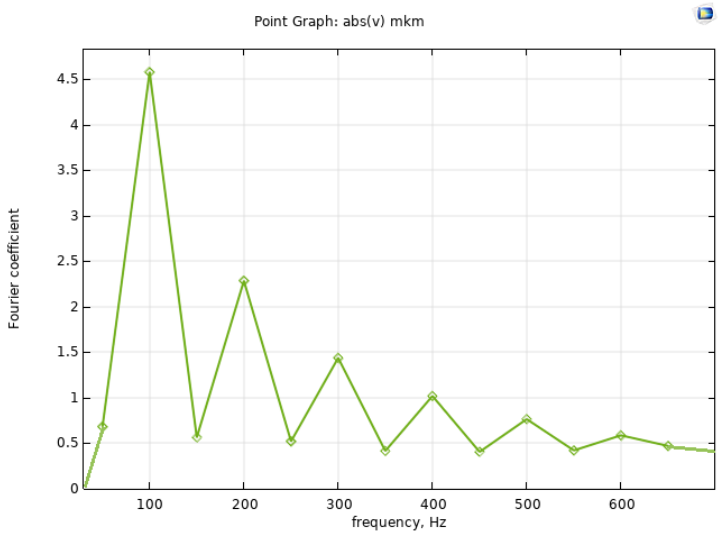

Рис. 14. Амплитудный спектр дефектного магнитопровода

Fig. 14. Amplitude spectrum of a defective magnetic circuit

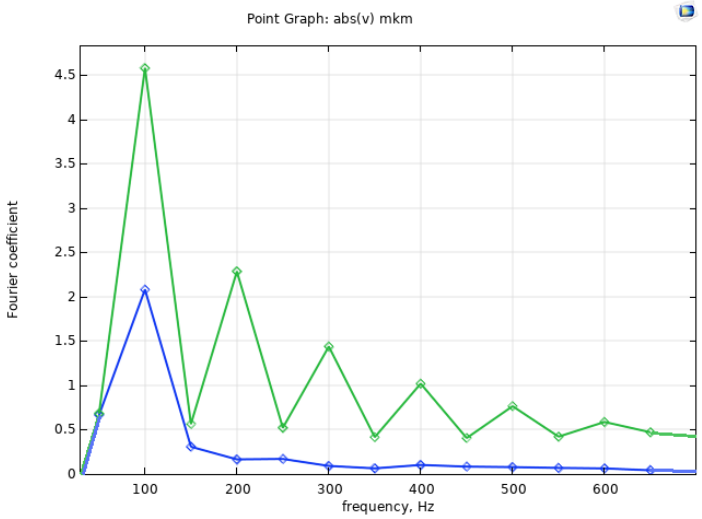

Рис. 15. Совмещенный амплитудный спектр дефектного и бездефектного магнитопровода

Fig. 15. Combined amplitude spectrum of defective and defect-free magnetic circuit

Из рисунка 15 видно, что при распрессовке возникает увеличение амплитуды виброперемещения на частотах кратных 100 Гц, в диапазоне от 100 Гц до 700 Гц, что вызвано снижением механического момента креплений магнитопровода, так как данное снижение вызывает колебания магнитопровода в дополнительной плоскости, в которой снизились механические усилия.

Результаты

Апробация результатов моделирования экспериментальными исследованиями

Для подтверждения результатов моделирования проведены экспериментальные исследования параметров вибрации магнитопровода работающего трансформатора. Измерения проводились с помощью бесконтактного лазерного контрольно – измерительного комплекса (ЛКИК) [1]. Схема ЛКИК представлена на рисунке 16.

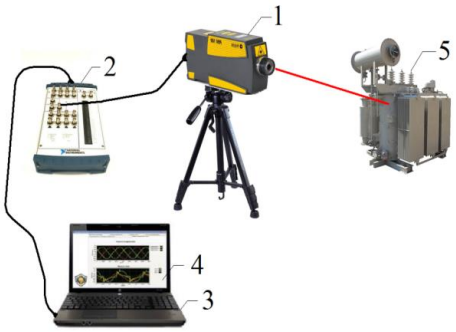

Рис. 16. Схема ЛКИК: *1* – лазерный виброметр PDV - 100; *2* – АЦП NI USB – 6251; *3* – персональный компьютер; *4* – программное обеспечение LabVIEW; *5* – силовой трансформатор

Fig.16. Scheme LCMC: 1 - laser vibrometer PDV - 100; 2 - ADC NI USB - 6251; 3 - personal computer; 4 - LabVIEW software; 5 - power transformer

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

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 3 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были заданы следующие параметры измерений:

- частотный диапазон 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.

Эксперимент заключался в измерении параметров вибрации магнитопровода трансформатора ТСЗ на холостом ходу и состоял из двух этапов. Первый этап заключался в измерении вибрации трансформатора, магнитопровод которого нормально запрессован. Во втором этапе измерений магнитопровод трансформатора был распрессован (снижены осевые усилия на стержни на 40 Н\м). Результаты трансформатора ТСЗ обработаны в программном обеспечении LabVIEW и представлены на рисунках 17 и 18.

На рисунке 17 построен амплитудный спектр для трансформатора ТСЗ с нормально запрессованным магнитопроводом.

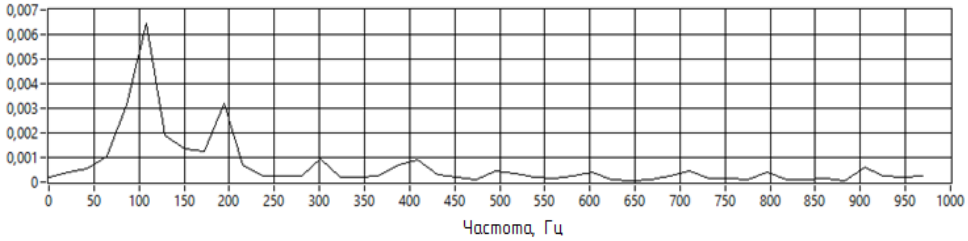

Рис. 17. Амплитудный спектр ТСЗ с нормально запрессованным магнитопроводом

Fig. 17. Amplitude spectrum of TSZ with a normally pressed magnetic circuit

На рисунке 18 построен амплитудный спектр вибрации после внесения дефекта (распрессовки) в стержень магнитопровода.

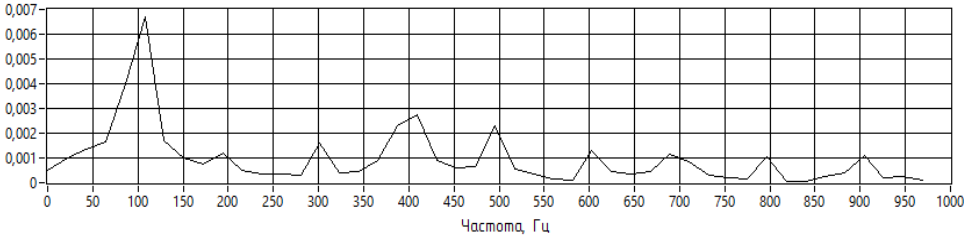

Рис. 18. Амплитудный спектр ТСЗ с распрессованным магнитопроводом

Fig.18. Amplitude spectrum of TSZ with pressed magnetic core

Из рисунков 17 и 18 видно, что экспериментально полученные амплитудные спектры параметров вибрации трансофрматора ТСЗ имеют аналогичную структуру, как и амплитудные спектры (рисунки 13-15), полученные в результате конечно – элементного моделирования. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтверждают правильность проведенных расчетов по исследованию параметров вибрации 3 D модели трансформатора.

Выводы

1. По результатам проведенного расчета частот механических колебаний магнитопровода трансформатора в программной среде COMSOL Multiphysics были определены информативные частотные диапазоны для определения уровня опрессовки силового трансформатора. Анализ полученных результатов показал, что информативным частотным диапазонам, характеризующие возникновение распрессовки, является частотный интервал от 150 до 700 Гц.

2. Возникновение распрессовки в балках трансформатора приводит к увеличению амплитуды вибрации на информативном частотном диапазоне.

3. По результатам компьютерного моделирования механических колебаний магнитопровода предлагается использовать полученный информативный диапазон для создания нового метода контроля технического состояния силового трансформатора по параметрам вибрации.

4. Достоверность результатов компьютерного моделирования подтверждена экспериментальными исследованиями параметров вибрации магнитопровода трансформатора, проведенными с помощью ЛКИК.

Заключение

Известные из литературы исследования вибрационных характеристик объектов сложной формы посвящены, в основном, определению информативно-частотного диапазона вращающихся объектов, или же объектов сложной формы, но без наличия постоянного воздействия внешних сил. В работе [2] авторы исследовали влияние конфигурации вращающихся элементов энергетических установок их на вибрационные характеристики. В работе [6] исследовано влияние дефектов турбокомпрессора на изменение его собственных частот колебаний. В работе [9] автор исследовал влияние топологии объектов сложной формы на изменение информативно-частотного диапазона исследуемых объектов. Автор пришел к выводу, что амплитудные спектры имеют прямую зависиомть от массогабаритных и конструкционных особенностей изделий сложной формы. В работе [10] рассматривалось влияние наличия повреждений в опорно-стержневых изоляторах на их вибрационный сигнал. Таким образом, в известной литературе вопрос определения информативно-частотного диапазона трансформатора рассматривался только косвенно, ввиду сложности проведения экспериментальных исследований. Научное приращение результатов данного исследования заключается в законченности теоретического определения информативно-частотного диапазона механических колебаний силового трансформатора и экспериментальном подтверждении теоретических исследований с помощью разработанного ЛКИК [1].

Литература

1. 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

2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В.. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №3-4. С. 108-113.

3. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика 2015. №6. С.18-25.

4. Иголкин А.А., Сафин А.И., Макарьянц Г.М., Крючков А.Н., Шахматов Е.В.. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трехкомпонентного лазерного виброметра / Прикладная Физика.2013. №4. С.49-53

5. Низамиев М.Ф., Загретдинов А.Р., Измайлова Е.В.. Программный комплекс для экспресс - контроля корпуса турбокопрессора газового двигателя КАМАЗ // Материалы докладов X международной научно-технической конференции молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин». – Казань: ООО «Ремарк», 2014. С. 94-95.

6. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов: руководство по эксплуатации // Димрус. Пермь: 2015. 60 с.

7. 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. 2020. Сборник материалов конференции. .Т.3. С.26

8. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы // IX конференция «Тинчуринские чтения». 2014. №Т.1 С. 151-152.

9. Низамиев М.Ф., Гибадуллин Р.Р.. Применение лазерных виброметров для контроля технического состояния стержневых опорных изоляторов // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 2014 г.: в 5 т. Т. 4. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. С. 335-339.

10. Низамиев М.Ф., Ваньков Ю.В., Ившин И.В., Загретдинов А.Р. Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №5. С. 141-143.

11. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Сахапов А.А. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния деталей перспективного газового двигателя КАМАЗ // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences 9th International scientific conference. 2015. С. 19-25.

12. Ившин И.В., Владимиров О.В., Загретдинов А.Р., Низамиев М.Ф. Исследование влияния дефектов на собственные частоты колебаний деталей энергетических установок // Известие вузов. Проблемы энергетики № 5-6. Казань: КГЭУ, 2015, С. 66-74

13. 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.

14. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Gibadullin R.R., Denisova N.V. 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, Volum 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

15. Ившин И.В., Гимадеев Р.А., Мухортов И.С., Билалов Ф.Ф., Валиуллин Р.Р. Способ диагностики силовых трансформаторов / Патент на изобретение № 2638129 от 09.03.2016.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

References

1. Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin I., Nizamiev M.F. 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

2. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Vladimirov O.V, Vankov Yu.V. Measuring and diagnostic complex for diagnostics of power plants. *News of higher educational institutions. Energy*

problems. 2014;3-4:108-113.

3. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Maksimov V.V., et al. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. Electrical. 2015;6:18-25

4. Igolkin A.A., Safin A.I., Makaryants G.M., Kryuchkov A.N., Non-contact registration and analysis of vibration of mechanical engineering products using a three-component laser vibrometer. *V. Chess Applied Physics*. 2013;4:49-53

5. Nizamiev M.F, Zagretdinov A.R, Izmailova E.V. Software package for express control of the turbocharger housing of a gas engine KAMAZ. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference of Young Specialists «Research, design and manufacturing technology of compressor machines». Kazan: Remark LLC, 2014. P. 94-95.

6. The quality control system for pressing windings and steel of transformers by measuring vibration, monitoring the condition of oil pumps: operation manual. Dimrus. Perm: 2015. 60 p.

7. Basenko V.R, 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. Collection of conference materials. 2020;3 - P.26

8. Nizamiyev M.F. Analysis of methods for studying vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape. IX conference "Tinchurin Readings". 2014;1:151-152.

9. Nizamiev M.F, Gibadullin R.R. Application of laser vibrometers for monitoring the technical condition of rod support insulators. *Collection of materials of reports of the National Energy Congress.* Kazan: Kazan. state energy un-t, 2014:5(4):335-339.

10. Nizamiev M.F, Vankov Yu.V, Ivshin I.V, et al. Software and algorithmic support for express control of the KAMAZ engine turbocharger housing. *Bulletin of the Technological University.* 2015;18(5):141-143.

11. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Vladimirov O.V, Sakhapov A.A. *Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of parts of a promising gas engine KAMAZ.* European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences 9th International scientific conference. 2015. P. 19-25.

12. Ivshin I.V., Vladimirov O.V., Zagretdinov A.R., Nizamiyev M.F. Study of the influence of defects on the natural frequencies of oscillations of parts of power plants / Izvestiya vuzov. Energy Problems No. 5-6 - Kazan: KSEU, 2015, pp. 66-74

13. 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 / 14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 44894 Proceedings. Novosibirsk 2018. P. 320-325.

14. 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*. 2018;8(1);3:322-333.

15. Ivshin I.V, Gimadeev R.A, Mukhortov I.S, et al. Method for diagnosing power transformers. Patent for invention No. 2638129 dated 03/09/2016.

Authors of the publication

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

Marat F. Nizamiev – 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.

Получено ***25.05.2022г.***

Отредактировано ***30.05.2022г.***

Принято ***30.05.2022г.***