

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



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Абдурашитов С.Ф., Басенко В.Р., Петров Т.И., Ившин И.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
abdurashitov.samir@gmail.com

**Резюме:** **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Обеспечение надежной и эффективной работы электрооборудования является критически важным для функционирования различных отраслей промышленности. В связи с этим, разработка методов и средств контроля технического состояния электротехнических комплексов приобретает особую актуальность. Использование лазерных технологий в данном контексте открывает новые возможности для неразрушающей диагностики и мониторинга состояния оборудования. Предлагаемая имитационная модель синхронного двигателя в составе электротехнических комплексов будет базироваться на современных программных платформах, позволяющих проводить многопараметрическое моделирование электромагнитных, тепловых и механических процессов, протекающих в электрооборудовании. Это обеспечит высокую степень соответствия виртуальной модели реальному объекту и, следовательно, достоверность результатов контроля. **ЦЕЛЬ.** Цель исследования – разработать имитационную модель, которая позволит изменять параметры синхронного двигателя для имитации различных типов неисправностей и отклонений от нормального состояния, в частности для подшипниковой системы. **МЕТОДЫ.** Для точного анализа динамического поведения подшипниковых узлов синхронного двигателя, входящего в электротехнический комплекс, применяется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий дискретизировать сложную геометрию двигателя и учитывать неоднородность материалов. В данной работе используются коммерческие пакеты программного обеспечения COMSOL Multiphysics, обладающие широкими возможностями для моделирования твердотельной механики и динамики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Создание имитационной модели позволяет воссоздать поведение подшипника в различных условиях эксплуатации, а также исследовать его реакцию на наличие дефектов. Это дает возможность выявить закономерности, описывающие связь между параметрами вибрации, акустическими сигналами и характером повреждений. В данном исследовании при повреждении внутреннего кольца, которое задано как небольшой дефект (глубина 1 мм) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 133,84 Гц. При повреждении наружного кольца, которое задано как небольшой скос (1 мм глубиной) в геометрической модели, во

всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 106,16 Гц. При повреждении тел качения, которое задано как небольшой дефект (глубина 0,2 мм) одного шарика в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 3,7908 Гц. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований показывают, что наибольшее влияние на возникновение колебаний в подшипнике оказывает состояние его кольцевых элементов (наружного и внутреннего). Изменение конфигурации поверхностного слоя наружных и внутренних колец, такое как образование минимальных углублений (например, глубиной 1 мкм), вызывает резкое возрастание виброактивности. Экспериментально подтверждено, что диагностирование и моделирование процессов износа и повреждений подшипников должно уделять особое внимание состоянию кольцевых элементов, поскольку их деградация оказывает решающее влияние на общую работоспособность механизма. Создание точной имитационной модели, способной анализировать степень изношенности колец и тел качения, позволит повысить эффективность диагностики неисправностей и своевременно выявлять потенциальные проблемы, влияющие на надежность и долговечность подшипниковых узлов синхронных электродвигателей.

**Ключевые слова:** имитационная модель; синхронные двигатели; лазерные технологии; электротехнический комплекс; техническое состояние.

**Благодарности:** Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2026-543 от 16.01.2026 по теме "Разработка инновационных компонентов для электромобилей различного климатического исполнения с использованием технологии цифрового двойника".

**Для цитирования:** Абдурашитов С.Ф., Басенко В.Р., Петров Т.И., Ившин И.В. Разработка имитационной модели синхронного двигателя в составе электротехнических комплексов при проведении контроля технического состояния с применением лазерных технологий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15.

## **DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF A SYNCHRONOUS MOTOR AS PART OF ELECTRICAL COMPLEXES WHEN CONDUCTING TECHNICAL CONDITION CONTROL USING LASER TECHNOLOGIES**

**Abdurashitov S.F., Basenko V.R., Petrov T.I., Ivshin I.V.**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

*abdurashitov.samir@gmail.com*

**Abstract:** *RELEVANCE. Ensuring the reliable and efficient operation of electrical equipment is critical to the functioning of various industries. Therefore, the development of methods and means for monitoring the technical condition of electrical systems is particularly relevant. The use of laser technologies in this context opens up new possibilities for non-destructive diagnostics and monitoring of equipment condition. The proposed simulation model of a synchronous motor in electrical systems will be based on modern software platforms enabling multiparameter modeling of electromagnetic, thermal, and mechanical processes occurring in electrical equipment. This*

will ensure a high degree of correspondence between the virtual model and the actual object and, consequently, the reliability of the testing results. **OBJECTIVE.** The objective of the study is to develop a simulation model that will allow for varying the parameters of a synchronous motor to simulate various types of faults and deviations from the normal state, particularly for the bearing system. **METHODS.** To accurately analyze the dynamic behavior of the bearing assemblies of a synchronous motor, part of an electrical system, we used the finite element method (FEM). This method allows us to discretize the complex geometry of the motor and account for material heterogeneity. This study utilizes the commercial COMSOL Multiphysics software package, which offers extensive capabilities for modeling solid-state mechanics and dynamics. **RESULTS:** Creating a simulation model allows us to recreate the behavior of the bearing under various operating conditions and study its response to defects. This makes it possible to identify patterns describing the relationship between vibration parameters, acoustic signals, and the nature of damage. In this study, damage to the inner ring, defined as a small defect (1 mm deep) in the geometric model, resulted in a change in the oscillation frequency in all eight experiments, with the average value obtained being 133.84 Hz. In the case of damage to the outer ring, which is defined as a small chamfer (1 mm deep) in the geometric model, a change in the oscillation frequency occurred in all 8 experiments, and the average value obtained was 106.16 Hz. In the case of damage to the rolling elements, which is defined as a small defect (0.2 mm deep) of one ball in the geometric model, a change in the oscillation frequency occurred in all 8 experiments, and the average value obtained was 3.7908 Hz. **CONCLUSION.** The results of the conducted studies show that the condition of the annular elements (outer and inner) has the greatest influence on the occurrence of vibrations in a bearing. Changes in the configuration of the surface layer of the outer and inner rings, such as the formation of minimal depressions (e.g., 1 mm deep), cause a sharp increase in vibration activity. It has been experimentally confirmed that the diagnosis and modeling of bearing wear and damage processes should pay special attention to the condition of the annular elements, since their degradation has a decisive impact on the overall performance of the mechanism. The development of an accurate simulation model capable of analyzing the degree of wear on rings and rolling elements will improve the efficiency of fault diagnostics and promptly identify potential problems affecting the reliability and durability of synchronous electric motor bearing assemblies.

**Key words:** simulation model; synchronous motors; laser technologies; electrical engineering complex; technical condition.

**Acknowledgments:** The results of the study were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under state assignment No. 075-03-2026-543 dated January 16, 2026, on the topic "Development of innovative components for electric vehicles of various climates using digital twin technology."

**For citation:** Abdurashitov S.F., Basenko V.R., Petrov T.I., Ivshin I.V. Development of a simulation model of a synchronous motor as part of electrical complexes when conducting technical condition control using laser technologies. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 3-15. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-3-15.

### **Введение (Introduction)**

В современном мире возрастающие требования к надежности и безопасности функционирования электротехнических комплексов (ЭТК) выдвигают на первый план задачи эффективного контроля технического состояния электрооборудования. Традиционные методы диагностики, основанные на периодических осмотрах и измерениях, зачастую не позволяют выявить скрытые дефекты на ранних стадиях их развития, что

может приводить к аварийным ситуациям и значительным экономическим потерям. В этой связи актуальным становится разработка и внедрение автоматизированных систем контроля технического состояния, основанных на применении современных технологий, в частности, лазерных методов. Лазерные системы обладают рядом преимуществ, таких как высокая точность измерений, возможность бесконтактной диагностики, а также способность обнаруживать дефекты на микроскопическом уровне. Целью исследования является разработка имитационной модели для проведения контроля технического состояния электрооборудования в составе электротехнического комплекса с применением лазерных технологий. Имитационная модель позволит исследовать эффективность различных алгоритмов диагностики, оптимизировать параметры лазерных систем, а также оценить надежность и безопасность функционирования ЭТК в целом.

#### **Литературный обзор** (*Literary review*)

Для реализации математической модели, описывающей процессы деградации электрооборудования, целесообразно использовать аппарат теории случайных процессов [1,2]. Это позволит учесть случайный характер изменения параметров оборудования во времени, а также влияние различных факторов, таких как температура, влажность и механические нагрузки. В качестве базовых моделей могут быть использованы модели экспоненциального, линейного и степенного износа, параметры которых определяются на основе статистических данных и результатов экспертных оценок [3]. Модель лазерной системы контроля технического состояния должна включать в себя описание процесса взаимодействия лазерного излучения с поверхностью электрооборудования, а также характеристики приемной системы. Необходимо учитывать такие факторы, как отражательная способность материала, форма поверхности, наличие загрязнений и вибраций. Для повышения точности моделирования целесообразно использовать методы геометрической оптики и дифракционной теории. Алгоритм обработки данных, получаемых от лазерной системы, должен обеспечивать выделение полезного сигнала из шума, а также идентификацию дефектов на основе анализа полученных данных [4,5]. Для этого могут быть использованы методы цифровой фильтрации, спектрального анализа и машинного обучения. Важным этапом является разработка критериев оценки технического состояния оборудования на основе данных лазерного контроля. Имитационное моделирование процесса контроля технического состояния электрооборудования позволит оценить эффективность разработанных моделей и алгоритмов, а также оптимизировать параметры лазерной системы [6]. Использование имитационного моделирования предоставляет возможность всестороннего анализа влияния различных факторов на процесс контроля. Например, моделирование можно использовать для оценки эффективности различных методов диагностики, определения оптимальной периодичности технического обслуживания и прогнозирования остаточного ресурса оборудования. Кроме того, такой подход позволяет учитывать влияние случайных факторов, таких как колебания напряжения, температуры и вибрации, на техническое состояние электрооборудования [7]. В ходе моделирования необходимо учитывать различные сценарии развития дефектов, а также варьировать параметры лазерной системы и алгоритма обработки данных. Результаты моделирования позволят определить оптимальные параметры системы контроля и оценить ее влияние на надежность и безопасность функционирования ЭТК. В последние годы для решения задач диагностики активно применяются методы компьютерного моделирования.

Создание точной 3D-модели и проведение модального анализа методом конечных элементов (МКЭ) является эффективным инструментом для проектирования электродвигателей и прогнозирования их вибрационных характеристик [8]. Точность 3D-моделирования играет ключевую роль в успешности модального анализа. Детализированное воспроизведение геометрии двигателя, включая ротор, статор, обмотки и корпус, позволяет учесть все важные конструктивные особенности, влияющие на его вибрационное поведение. Для создания 3D-моделей применяются различные САД-системы,

такие как SolidWorks, AutoCAD, CATIA, каждая из которых обладает своими преимуществами в плане функциональности и удобства работы. Выбор конкретной CAD-системы зависит от сложности конструкции двигателя, требуемой точности моделирования и личных предпочтений инженера [9]. Одним из самых уязвимых узлов синхронных двигателей являются подшипники. Их исправная работа критически важна для обеспечения надежной эксплуатации оборудования. Такие дефекты, как износ, сколы и трещины, приводят к вибрациям, шумам, повышению температуры и, в конечном итоге, к аварийной остановке двигателя [10, 11]. В связи с этим своевременное выявление и локализация дефектов подшипниковых узлов является ключевой задачей диагностики. Алгоритм обработки данных, получаемых от лазерной системы, должен обеспечивать выделение полезного сигнала на фоне шума и идентификацию дефектов. Дефекты, как правило, проявляются в виде отклонений от ожидаемой формы сигнала, таких как пики, провалы или искажения. Важным аспектом является применение методов машинного обучения, в частности обучение для классификации дефектов по их характерным признакам. Для этого необходима предварительная подготовка обучающей выборки, содержащей данные о различных типах дефектов и соответствующих им параметрах сигнала [12]. Таким образом, имитационное моделирование процесса контроля технического состояния электрооборудования позволяет оценить эффективность разработанных моделей и алгоритмов, а также оптимизировать параметры лазерной системы [13,14]. Вариация сценариев развития дефектов, параметров лазерной системы и алгоритмов обработки данных в ходе моделирования позволяет определить оптимальные настройки системы контроля и оценить ее влияние на надежность и безопасность функционирования ЭТК.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

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 синхронного двигателя и его подшипникового узла. Блок-схема алгоритма расчета частот колебаний синхронного двигателя представлена на рисунке 1.

Интеграция 3D моделирования с методами МКЭ представляет собой мощный инструмент для проектирования надежных и эффективных синхронных двигателей с минимальным уровнем вибраций. Одним из самых уязвимых узлов синхронных двигателей являются подшипники. Их исправная работа критически важна для обеспечения надежной и долговечной эксплуатации оборудования. Дефекты подшипников, такие как износ, сколы, трещины, приводят к вибрациям, шумам, повышению температуры и, в конечном итоге, к аварийной остановке двигателя. Своевременное выявление и локализация дефектов – задача, требующая применения современных методов диагностики.

Моделирование механических колебаний элементов синхронного двигателя осуществляется через понятия механических напряжений и тензора напряжений, описанных в уравнении (1).

$$\rho \frac{d^2u}{dt^2} = \nabla \times s + F_v \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала ( $\text{кг/м}^3$ );

$u$  – величина механического напряжения (Па);

$s$  – смещение (мкм);

$F_v$  – воздействие на подшипник (Н).

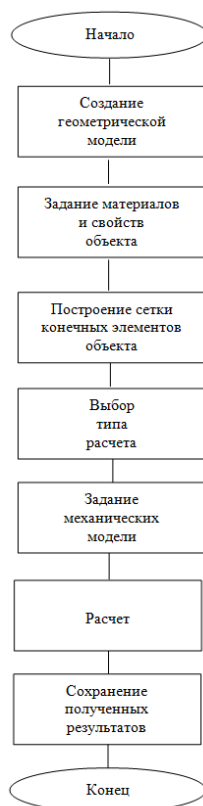


Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследования при создании имитационной модели

Fig.1. Flowchart of the research algorithm for creating a simulation model

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

### **Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

*Результаты исследования вибрационных характеристик на основе разработанной имитационной модели.*

Создание 3D модели синхронного двигателя для определения вибрационных параметров – это сложный, но крайне важный процесс, играющий ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности электромеханического оборудования. Точная 3D модель позволяет инженерам детально изучить структуру двигателя, выявить потенциальные источники вибраций и оптимизировать конструкцию для минимизации этих нежелательных явлений [8,9]. Первым этапом является геометрическое моделирование всех компонентов двигателя, включая статор, ротор, обмотки, подшипники и корпус. Необходимо учитывать мельчайшие детали, такие как пазовые структуры, вентиляционные каналы и сварные швы, поскольку каждый из них может оказывать влияние на вибрационные характеристики. Использование САД-системы КОМПАС 3D позволяет создавать высокоточные модели, отражающие реальную геометрию двигателя.

Далее следует этап определения физических свойств материалов, используемых в конструкции двигателя. Для этого применялось программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Необходимо учитывать плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и демпфирующие характеристики каждого материала. Эти параметры необходимы для точного моделирования поведения двигателя под воздействием электромагнитных сил и механических нагрузок. На рисунке 2 представлена синхронного двигателя серии ВМ 1418 для построения имитационной модели.

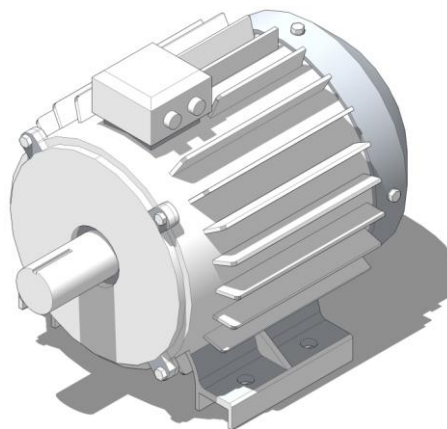


Рис. 2. 3D модель синхронного двигателя для построения имитационной модели  
*Fig.2. 3D model of a synchronous motor for building a simulation model*  
Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors*

Технические характеристики представленного двигателя:

1. Тип двигателя: синхронный, с постоянными магнитами.
2. Номинальное напряжение: Зависит от модели (380/220 Вольт переменного тока; 24 Вольт, 36 Вольт или 48 Вольт постоянного тока).
3. Номинальный ток: Зависит от модели и напряжения.
4. Номинальная скорость: Варьируется в зависимости от исполнения (данная модель 2750 об/мин).

Крутящий момент: Зависит от скорости и напряжения.

Эффективность: Высокая, КПД 85%.

Вес: 4 кг.

Конструктивные особенности двигателя заключаются в конструкции, обеспечивающую долговечность и надежную работу. Корпус обычно изготавливается из алюминиевого сплава для улучшения теплоотвода. Встроенные подшипники обеспечивают плавное и бесшумное вращение.

После создания 3D модели и определения свойств материалов, ее можно использовать для проведения модального анализа методом конечных элементов (МКЭ). Такой анализ позволяет определить собственные частоты и формы колебаний двигателя, что крайне важно для избегания резонансных явлений, которые могут привести к разрушению конструкции. На рисунке 2 представлена 3D синхронного двигателя для дальнейшего ее применения, в рамках создания имитационной модели. Результаты модального анализа используются для оптимизации конструкции двигателя. Путем изменения геометрии компонентов, использования демпфирующих материалов или изменения способов крепления можно значительно снизить уровень вибраций и тем самым увеличить срок службы двигателя.

Для локализации дефектов в рамках данного исследования принято рассматривать имитационную модель подшипника и определения ее имитационных параметров. Имитационное моделирование позволяет воссоздать поведение подшипника в различных условиях эксплуатации, а также исследовать его реакцию на наличие дефектов. Это дает возможность выявить закономерности, описывающие связь между параметрами вибрации, акустическими сигналами и характером повреждений. В качестве основы для имитационной модели используются математические уравнения, описывающие динамику качения тел качения, работу смазочного слоя, а также свойства материалов подшипника. Модель учитывает факторы, такие как геометрические параметры, нагрузки и температуры, влияющие на вибрационное состояние. Введение в модель имитации дефектов

осуществляется путем изменения параметров, характеризующих геометрию и жесткость элементов подшипника. На рисунке 3 представлена геометрическая модель подшипника синхронного двигателя серии ВМ 1418 для построения имитационной модели и определения частотных характеристик данного подшипника.

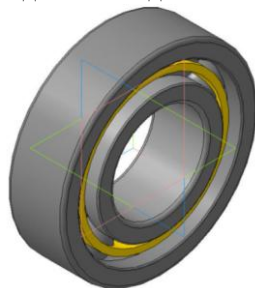


Рис. 3. 3D модель подшипника синхронного двигателя для построения имитационной модели *Fig. 3. 3D model of synchronous motor bearing for building a simulation model*

Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors*

Для дальнейшей верификации и определения повреждений синхронных двигателей, а именно их подшипниковых систем произведены расчёты основной собственной частоты подшипников для 3 типов повреждений при различных размерах тел качения. Одними из самых распространённых повреждений подшипников синхронных двигателей с постоянными магнитами являются:

- неровности наружного кольца;
- неровности внутреннего кольца;
- неровности тел качения.

С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics рассчитаны собственные колебаний и выделена частота первой моды колебаний, имеющая наибольшее значение амплитуды колебаний. Результаты представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1  
*Table 1*

Частота первой моды колебаний при различных размерах тел качения (без дефектов)  
*Frequency of the first mode of oscillations for different sizes of rolling elements (without defects)*

№	Фвр (Гц)	Ртк (мм)	Рс (мм)	cos α	Fc (Гц)
1	50	5	20	0,5	21,875
2	40	4	18	0,5	17,77777778
3	30	3	18	0,5	13,75
4	20	6	20	0,5	8,5
5	10	6	22	0,5	4,318181818
6	50	4	20	0,5	22,5
7	40	4	18	0,5	17,77777778
8	30	4	16	0,5	13,125

Источник: составлено авторами. *Source: compiled by the authors*

Проведено 8 численных экспериментов для различных размеров тел качения (Ртк) при различной частоте вращения подшипника (Фвр) с различным диаметров сепаратора (Рс) при одинаковом угле контакта подшипника (cos α). Средняя частота первой моды колебаний получилась 14,95 Гц (среднее значение по столбику Fc)

В полученном выше расчёте при повреждении наружного кольца, которое задано как небольшой скос (1 мм глубиной) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 106,16 Гц.

Таблица 2  
Table 2

Частота первой моды колебаний при неровности наружного кольца  
Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of the outer ring

№	Fвр (Гц)	Rтк (мм)	Rс (мм)	cos α	Fс (Гц)
9	50	5	20	0,5	175
10	40	4	18	0,5	124,4444444
11	30	3	18	0,5	82,5
12	20	6	20	0,5	68
13	10	6	22	0,5	30,22727273
14	50	4	20	0,5	135
15	40	4	18	0,5	142,2222222
16	30	4	16	0,5	91,875

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Таблица 3  
Table 3

Частота первой моды колебаний при неровности внутреннего кольца  
Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of the inner ring

№	Fвр (Гц)	Rтк (мм)	Rс (мм)	cos α	Fс (Гц)
17	50	5	20	0,5	175
18	40	4	18	0,5	124,4444444
19	30	3	18	0,5	82,5
20	20	6	20	0,5	68
21	10	6	22	0,5	30,22727273
22	50	4	20	0,5	135
23	40	4	18	0,5	142,2222222
24	30	4	16	0,5	91,875

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

В полученном выше расчёте при повреждении внутреннего кольца, которое задано как небольшой дефект (глубина 1 мм) в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 133,84 Гц.

Таблица 4  
Table 4

Частота первой моды колебаний при неровности тел качения  
Frequency of the first mode of oscillations with unevenness of rolling elements

№	Fвр (Гц)	Rтк (мм)	Rс (мм)	cos α	Fс (Гц)
25	50	5	20	0,5	6,15234375
26	40	4	18	0,5	4,38957476
27	30	3	18	0,5	2,482638889
28	20	6	20	0,5	2,9325
29	10	6	22	0,5	1,338279489
30	50	4	20	0,5	4,95
31	40	4	18	0,5	4,38957476
32	30	4	16	0,5	3,69140625

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

В полученном выше расчёте при повреждении тел качения, которое задано как небольшой дефект (глубина 0,2 мм) одного шарика в геометрической модели, во всех 8 экспериментах произошло изменение частоты колебаний, а среднее значение получено на уровне 3,7908 Гц.

Полученные результаты показывают, что спектр частот колебаний подшипника характеризуется наличием нескольких доминирующих пиков. Анализ показал, что основные частоты колебаний лежат в диапазоне от 3 Гц до 0,2 кГц. Статистическая обработка результатов 32 экспериментов позволила оценить средние значения частот.

Данная информация может быть использована для построения гистограмм распределения частот и определения вероятности появления колебаний в определённых диапазонах. Такой анализ необходим для разработки эффективных методов вибродиагностики и предотвращения повреждений подшипниковых узлов в реальных условиях эксплуатации с помощью лазерных технологий. В дальнейшем предполагается применение лазерного комплекса, представленного на рисунке 5, для верификации полученных результатов.



Рис. 5. Схема лазерного комплекса: 1 – лазерный виброметр; 2 – многофункциональный модуль ввода-вывода; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение

Fig. 5. Laser system diagram: 1 – laser vibrometer; 2 – multifunctional input/output module; 3 – personal computer; 4 – software

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors

Ключевой особенностью предлагаемого лазерного комплекса служит специализированный программный модуль, предназначенный для осуществления фрактального анализа технических параметров.

#### **Заключение (Conclusions)**

В результате реализации исследования по созданию имитационной модели, можно получить инструмент, позволяющий оценивать возможности применения лазерных технологий для контроля технического состояния конкретных электротехнических комплексов; выбирать оптимальное лазерное оборудование и настраивать параметры контроля; разрабатывать и оптимизировать сценарии (алгоритмы) диагностики электрооборудования с применением лазерных технологий. Проведённый эксперимент позволяет сделать ряд выводов относительно влияния дефектов подшипников на частоту колебаний:

1. При наличии небольшого дефекта в форме скошенной поверхности глубиной 1 мм наблюдается значительное изменение частоты колебаний подшипника. Среднее значение составляет 106,16 Гц. Это свидетельствует о том, что даже небольшие дефекты наружной обоймы существенно влияют на динамику вращения подшипника.

2. Дефект внутреннего кольца аналогичной глубины также вызывает существенное повышение частот колебаний до среднего значения 133,84 Гц, что ещё больше подчёркивает влияние состояния внутренних элементов подшипника на стабильность вращательного движения.

3. Небольшое повреждение на одном из шариков глубиной всего 0,2 мм приводит к изменению частоты колебаний, однако значительно меньшему по сравнению с повреждениями колец. Средний показатель составил лишь 3,7908 Гц.

Наиболее значимое влияние на колебания оказывает состояние кольцевых элементов подшипника (наружного и внутреннего). Даже незначительные изменения геометрии внешнего и внутреннего кольца приводят к существенным изменениям характеристик вибрации системы. Хотя наличие небольших дефектов на телах качения также влияет на колебательные процессы, этот эффект намного менее выражен по сравнению с дефектами колец. В то же время дефект тела качения, вызывая лишь

локальное возмущение, оказывает менее выраженное влияние на общую жесткость подшипника. Более высокая чувствительность частоты первой моды к дефектам внутреннего кольца по сравнению с наружным может быть обусловлена тем, что внутреннее кольцо непосредственно связано с валом, который является основным элементом передачи вибраций в системе. Следовательно, дефекты внутреннего кольца сильнее отражаются на вибрационных характеристиках вала, что и проявляется в более значительном сдвиге частоты. Сдвиг частоты первой моды колебаний является индикатором наличия дефекта, а его величина коррелирует с серьезностью повреждения. Полученные результаты позволяют перейти к разработке алгоритмов для количественной оценки размеров и типа дефектов на основе анализа вибрационных характеристик. Предложенный метод может быть интегрирован в системы мониторинга технического состояния оборудования для своевременного выявления дефектов подшипников, что позволит предотвращать аварии и увеличивать срок службы механизмов.

Таким образом, исследование показывает, что создание имитационной модели синхронного двигателя и его элементов, для контроля состояния наружных и внутренних колец, тел качения подшипников синхронных двигателей является критически важным фактором при диагностике и оценке работоспособности подшипникового узла.

### Литература

1. Редников С. Н. и др. Диагностика электротехнических компонентов гидротехнического оборудования: эффективность комплексного подхода //Агроинженерия. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 71-77.
2. Скворцов О. Б., Сташенко В. И. ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ НА ПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ //ББК 22.9 М 39 Редакционная коллегия: д-р физ.-мат. наук, профессор ВЕ Громов, д-р. техн. наук, доцент ДВ Загуляев. – 2023. – Т. 13. – С. 91.
3. Губарев В. А. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ //ИННОВАЦИОННЫЙ ПУТЬ РАЗВИТИЯ КАК ОТВЕТ НА ВЫЗОВЫ НОВОГО ВРЕМЕНИ. – 2021. – С. 23-26.
4. Басенко, В. Р. Создание компьютерной модели синхронного двигателя для реализации проекта "Создание серии электродвигателей с модернизированным ротором для электротранспорта малой мощности" / В. Р. Басенко, Т. И. Петров, А. Р. Ибрагимов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 46-54. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54. – EDN NHHZGX.
5. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта / А. Р. Сафин, В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 55-64. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. – EDN VJTZLX.
6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing //Engineering. – 2022. – Т. 11. – С. 126-137.
7. Пивень И. С. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ: АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И МЕТОДЫ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ //Вестник науки. – 2025. – Т. 4. – №. 1 (82). – С. 1215-1223.
8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. – John Wiley & Sons, 2021.
9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers //Journal of Sound and Vibration. – 2021. – Т. 494. – С. 115883.
10. Jin X. et al. Robust vibration control for active suspension system of in-wheel-motor-

driven electric vehicle via  $\mu$ -synthesis methodology //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2022. – Т. 144. – №. 5. – С. 051007.

11. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

12. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9\_17. – EDN EIGGGZ.

13. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

14. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. – Cham : Springer, 2022. – С. 57.

### **Авторы публикации**

**Абдурашитов Самир Фуадович** - аспирант Казанского государственного энергетического университета.

**Басенко Василий Романович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

**Петров Тимур Игоревич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

**Ившин Игорь Владимирович** – д-р техн. наук, проректор по науке и коммерциализации Казанского государственного энергетического университета.

### **References**

1. Rednikov S. N. et al. Diagnostics of electrical components of hydraulic equipment: the effectiveness of an integrated approach // Agroengineering. - 2024. - Vol. 24. - No. 2. - Pp. 71-77.

2. Skvortsov O. B., Stashenko V. I. DYNAMIC MECHANICAL LOADS ON CONDUCTIVE ELEMENTS OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT ASSOCIATED WITH THE IMPACT OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS // BК 22.9 M 39 Editorial board: Dr. of Phys. and Mathematics, Professor V. E. Gromov, Dr. of Engineering Sciences, Associate Professor D. V. Zagulyaev. – 2023. – Vol. 13. – P. 91.

3. Gubarev V. A. MODERN METHODS OF VIBRATION CONTROL OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS // INNOVATIVE PATH OF DEVELOPMENT AS A RESPONSE TO THE CHALLENGES OF THE NEW TIME. – 2021. – P. 23-26.

4. Basenko, V. R. Creation of a computer model of a synchronous motor for the implementation of the project "Creation of a series of electric motors with a modernized rotor for low-power electric transport" / V. R. Basenko, T. I. Petrov, A. R. Ibragimova // News of higher educational institutions. Problems of power engineering. - 2024. - Vol. 26, No. 2. - P. 46-54. - DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-2-46-54. - EDN NHHZGX.

5. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging stations

for electric transport / A. R. Safin, V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev [et al.] // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2023. - Vol. 25, No. 3. - P. 55-64. - DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64. - EDN BJTZLX.

6. Li J. Y., Zhu S. Self-powered active vibration control: concept, modeling, and testing // Engineering. - 2022. - Vol. 11. - Pp. 126-137.

7. Piven I. S. RELIABILITY ENSURING AND DEFECT DIAGNOSTICS OF HYDROPOWER EQUIPMENT: FAILURE ANALYSIS AND VIBRATION DIAGNOSTICS METHODS // Vestnik nauki. - 2025. - Vol. 4. - No. 1 (82). - P. 1215-1223.

8. Crocker M. J., Arenas J. P. Engineering acoustics: noise and vibration control. - John Wiley & Sons, 2021.

9. Zhao Q. et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers // Journal of Sound and Vibration. - 2021. - Vol. 494. - P. 115883.

10. Jin X. et al. Robust vibration control for the active suspension system of an in-wheel-motor-driven electric vehicle via  $\mu$ -synthesis methodology // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. - 2022. - Vol. 144. - No. 5. - P. 051007.

11. Modeling the operation of a mobile charging station for electric vehicles to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Bulletin of Moscow State Technical University. Proceedings of Murmansk State Technical University. - 2022. - Vol. 25, No. 4. - P. 365-377. - DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. - EDN JILKEG.

12. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2022. - Vol. 190. - P. 157-167. - DOI 10.1007/978-3-030-86047-9\_17. - EDN EIGGGZ.

13. 3D Model of a Power Transformer for Studying its Technical Condition Based on Vibration Parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiyev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. - 2022. - Vol. 24, No. 3. - P. 130-143. - DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. - EDN TTLTLL.

14. Wen B. et al. Vibration utilization engineering. - Cham: Springer, 2022. - P. 57

#### **Authors of the publication**

*Samir F. Abdurashitov* - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

*Timur I. Petrov* - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Igor V. Ivshin* - 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*

**Получено** **12.11.2025 г.**

**Отредактировано** **13.01.2026 г.**

**Принято** **29.01.2026 г.**