Рузил Ахнафович Сафиуллин
Ruzil A. Safiullin

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технических дисциплин, Башкирский государственный университет, филиал, Нефтекамск, Россия

Ильгиз Флюсович Янгиров
Ilgiz F. Yangirov

доктор технических наук, доцент кафедры электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

УДК 531.768

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-41-54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Актуальность

В наши дни вибродиагностика является одним из эффективных инструментов для решения широкого круга задач обнаружения дефектов электрических машин, предотвращения выхода из строя деталей, продления срока службы и увеличения межремонтных периодов их эксплуатации. Одновременно протекающие электромагнитные и механические процессы во время работы существенно усложняют сбор и анализ параметров вибрации из-за присутствия большого числа гармонических и случайных составляющих в сигнале экспериментальных данных. Для разработки эффективной системы вибродиагностики необходимо создать многофункциональные системы вибрационной диагностики повреждений электрических машин. Сохранение электробезопасности, надежности и долговечности эксплуатации электромеханического оборудования электроприводов на базе асинхронных двигателей в производственных процессах предприятий отраслей промышленности остаются актуальными задачами электротехнических систем.

Цель исследования

Провести теоретические расчеты по исследованию параметров вибрации асинхронных электродвигателей и сопоставить их с экспериментальными данными.

Методы исследования

В работе использованы методы функциональной диагностики по обработке и анализу вибрационных параметров технического состояния электродвигателя.

Результаты

Представлены результаты разработки параметров и применения программно-аппаратного комплекса для анализа сигналов вибрационной диагностики асинхронного двигателя, которая учитывает перемещения ротора относительно статора. Проведены теоретические расчеты, описывающие зависимость изменения токов статора от наличия дефектов в асинхронных электродвигателях. Зависимость позволяет провести моделирование сигналов датчиков вибрации в режиме реального времени и получить

вибрационные новые показатели на основе экспериментальных данных. По результатам измерений статистических данных токов статора были получены кривые виброускорений в режимах холостого хода и выбега ротора во времени. Исследована зависимость развития дефектов от характера короткого замыкания витков обмотки статора. Результаты экспериментального исследования модели получены с использованием физического стенда на базе асинхронного многоскоростного двухобмоточного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,7 кВт.

Ключевые слова: вибрация, асинхронный двигатель, короткое замыкание витков статора, экспериментальные исследования

INVESTIGATION OF INDUCTION ELECTROMOTOR VIBRATION

Relevance

Nowadays, vibration diagnostics is one of the most effective tools for solving a wide range of problems of detecting defects in electrical machines, preventing the failure of parts, extending the service life and increasing the repair periods in their operation. Simultaneously occurring electromagnetic and mechanical processes during their operation significantly complicate the collection and analysis of vibration parameters due to the presence of a large number of harmonic and random components in the experimental data signal. To develop an effective vibration diagnostics system, it is necessary to create multifunctional vibration diagnostics systems for damage to electric machines. The preservation of electrical safety, reliability and durability of operation of electromechanical equipment of electric drives based on induction motors in the production processes of industrial enterprises remains an urgent task of electrical systems.

Aim of research

To carry out theoretical calculations on the study of vibration parameters of induction electric motors and compare them with experimental data.

Research methods

The paper uses methods of functional diagnostics for processing and analyzing the vibration parameters of the technical condition of the electric motor.

Results

The results of the development of parameters and the application of a software and hardware complex for analyzing the signals of vibration diagnostics of an induction motor, which takes into account the movements of the rotor relative to the stator, are presented. Theoretical calculations describing the dependence of changes in stator currents on the presence of defects in induction electric motors are carried out. It allows you to simulate the signals of vibration sensors in real time and get new vibration indicators based on experimental data. According to the results of measurements of statistical data of stator currents, curves of vibration displacements in the idle and run-out modes of the rotor in time were obtained. The dependence of the development of defects on the nature of the short circuit of the stator winding turns is investigated. The results of the experimental study of the model were obtained using a physical stand based on an induction multi-speed two-winding motor with a closed-loop rotor with a power of 1.7 kW.

Keywords: vibration, induction motor, short circuit of stator turns, experimental studies

Введение

На сегодняшний день нет ни одной сферы жизнедеятельности людей, где бы ни применялись электрические машины — от отраслей промышленности,

сельского хозяйства и бытовых условий.

Как известно, при эксплуатации электрической машины происходит преобразование электрической энергии в механическую, т.е. совершение полезной работы.

Например, электродвигатели применяются в бытовой технике (маломощные синхронные и асинхронные двигатели), в промышленности (турбогенераторы, станки и оборудование, автоматика, краны и лебедки общепромышленного значения, телемеханика), в сельском хозяйстве (машинотракторные электроагрегаты, дизельные генераторы и маломощные электростанции) и т.д. [1–3].

Наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные электродвигатели, отличающиеся простотой эксплуатации, надежностью, удачными массогабаритными размерами. Электродвигатели этой серии с короткозамкнутым ротором используются в электроприводах разных станков (металлообрабатывающих, грузоподъемных, ткацких, деревообрабатывающих), в вентиляторах, землеройных машинах, в лифтах, насосах, бытовых приборах и т.д. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором позволяет значительно снизить энергопотребление оборудованием, которое он питает, обеспечить высокий уровень его надежности, увеличить срок службы. Совокупность этих электромеханических характеристик положительно отражается на модернизации всех технологических процессов производства предприятия.

В настоящее время главными потребителями электрической энергии в различных отраслях промышленности, ЖКХ, сельском хозяйстве экономики страны являются устройства электропривода, в основе которых используются электрические машины — электродвигатели постоянного или переменного токов [2].

Асинхронные двигатели (АД) — это электрические машины, которые работают на больших скоростях вращения и применяются в системах энергосберегающего электропривода благодаря частотному управлению. Данный тип двигателей с короткозамкнутым ротором, которые управляются от преобразователя

частоты с частотой напряжения питания до 400 Гц, имеют скорости вращения до 30000 об/мин и выше. Во вращающихся электрических машинах происходит интенсивное электромеханическое преобразование энергии, а также при таких скоростях возникают значительные вибрации и шумы, как при пуске, так и при их эксплуатации. Высокий уровень вибраций приводит к разрушению подшипников качения за короткий срок, а интенсивность шума достигает критического уровня для человека [3].

Отсюда следует, что обеспечение нормальной эксплуатации асинхронных двигателей является важной научно-практической задачей, так как сфера их эксплуатации в производственных процессах гораздо шире по сравнению с другими электрическими машинами. Поэтому создание системы производственной безопасности актуализует необходимость выбора эффективной системы диагностики их дефектов и повреждений.

Современные методы, средства и информационные технологии диагностики и мониторинга асинхронных двигателей имеют ряд недостатков вследствие ограниченности используемых приемов и алгоритмов, устарелости стандартных технологий.

В данном контексте не подлежит сомнению тот факт, что актуальной является необходимость усовершенствования и развития существующих, а также разработка новых методов мониторинга и диагностики асинхронных двигателей.

Целью исследований является *получение параметров, обеспечивающих высокое быстродействие и качество их обработки для обоснования своевременных и достоверных результатов*. В связи с этим особую значимость приобретает мониторинг текущего состояния асинхронных электродвигателей путем использования передовых информационных технологий в целях предупреждения аварийного

состояния и их полного выхода из строя. Анализ литературных источников показывает, что на сегодняшний день практически отсутствуют эффективные научные подходы в этом направлении [4, 5].

По мнению авторов, определяющим фактором эффективного функционирования систем диагностики является установление взаимно однозначного соответствия между параметрами диагностических признаков, определяемых по результатам текущих измерений характеристик машины, и видом возникших дефектов. Таковыми могут быть ошибки конструирования, нарушения технологического процесса производства, технического обслуживания и ремонта электрических машин, а также интенсивная безремонтная эксплуатация в производственных процессах, все это приводит к возникновению дефектов различного рода.

В системах вибрационной диагностики параметрами, которые анализируются, являются суммарный уровень и спектральные характеристики вибраций электрической машины. Учитывая большое разнообразие электрических машин и огромное количество возможных вариантов их повреждений, проблема установления такого соответствия является сложной теоретической и практической задачей. Ее невозможно решить только путем накопления и анализа экспериментальных данных, а также обобщения существующего опыта их эксплуатации в производстве. Поэтому для решения проблемы надёжной эксплуатации АД в производстве необходимо внедрять различные способы и средства контроля состояния электрооборудования [4–7].

Задача исследования и ее решение

Согласно поставленной задаче, для построения системы вибрационной диагностики асинхронных двигателей необходимо использование результатов математического моделирования, полученных

на адекватных моделях, которые позволяют определить параметры вибрации электрической машины при различных возможных вариантах ее повреждения (небаланс ротора, короткое замыкание (КЗ), дефекты подшипников и т.д.). Соответственно, разработка таких моделей является важной составляющей создания систем диагностики дефектов и повреждений машин, что и обуславливает выбор темы данной статьи, а также подтверждает ее актуальность, теоретическую и практическую значимость.

На сегодняшний день существуют государственные и международные стандарты электрических вращающихся машин, посвященные вопросам безопасной их эксплуатации и циклограмм технического обслуживания и проведения ремонтных работ [8–10]. Несмотря на это вопросам совершенствования методов определения их качества, поиску критериев, которые наиболее широко описывают состояние электродвигателя, и разработке способов их диагностики уделяется большое внимание учеными и инженерами сообществами всего мира. Наиболее известными отечественными авторами в данной области являются Д.В. Полковниченко, Л.Г. Сидельникова, Д.О. Афанасьев, О.М. Большунова, А.М. Камышьян, Н.П. Воробьева, Г.В. Суханкина, Н.Т. Герцен и др. [3–7].

Из систематизации работ вышеперечисленных авторов следует, что к основным дефектам электромагнитной системы асинхронного электродвигателя, обнаруживаемым по вибрации, относятся:

- динамический (вращающийся) эксцентриситет воздушного зазора;
- статический эксцентриситет воздушного зазора;
- электрические дефекты (обрывы в беличьей клетке, КЗ в активном железе ротора);
- электрические дефекты (КЗ в обмотках и активном железе статора).

К внешним дефектам (источников питания электродвигателей), обнаруживаемым по вибрации, можно отнести:

— несимметрия питания машин переменного тока;

— искажения формы напряжения машин постоянного и переменного токов.

При решении данной проблемы американскими исследователями разработана модель на основе системы обнаружения неисправностей электродвигателя, которая представлена в патенте [11]. Преимуществом этого изобретения является то, что способ и система данного диагностирования неисправностей основаны на программном обеспечении и используют данные, полученные благодаря неинтрузивным измерениям и контролю.

Китайскими учеными Cheng Jiatang, Xiong Yan [12], L.H. Wang [13] разработана модель диагностики технического

состояния асинхронного двигателя с использованием нейросетевых технологий. Показана возможность выборочного контроля диагностических частот при использовании вейвлет-анализа.

Однако несмотря на большое количество исследований и их интенсификацию в последнее время, на сегодняшний день существует потребность детального анализа вибропроцессов для определения технического состояния асинхронных двигателей с использованием методов математического моделирования, что и обуславливает целевую направленность статьи.

Основные источники вибрации электромагнитного, механического и аэродинамического происхождения асинхронного электродвигателя представлены в таблице 1. В вибрационном сигнале содержится вся необходимая информация об изменении всех компонентов, опреде-

Таблица 1. Причины и источники вибрации АД

Table 1. Causes and sources of IM vibration

Магнитные источники	Механические источники	Аэродинамические источники
1. Высшие гармонические поля 2. Зубцовые поля 3. Обмоточные поля 4. Неравномерность распределения обмотки в пазах 5. Нестабильность напряжения питания 6. Несимметричность напряжения питания 7. Неравномерность воздушного зазора 8. Отклонение поверхности статора и ротора от правильной геометрической формы 9. Динамические режимы эксплуатации 10. Магнитострикция 11. Магнитные силы 12. Собственные колебания магнитопровода 13. Разрушение магнитопровода 14. Динамический режим эксплуатации механических напряжений	1. Ротор с дисбалансом 2. Геометрические ошибки вала 3. Прогиб вала 4. Тепловая деформация при нагреве 5. Асимметрия конструкции машин 6. Предварительное натяжение подшипников в узлах 7. Несоосность — перекося посадочных мест 8. Отклонение форм внешнего и внутреннего колец 9. Разноразмерность шариков 10. Геометрические ошибки размеров посадок подшипников на вал и в корпус	1. Вентилятор 2. Ротор, который вращается в воздушной среде

ляющих техническое состояние электродвигателя в реальном времени на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации [14, 15].

Математическая модель и основные уравнения

В рамках проводимого исследования рассмотрим детерминированную математическую модель вибрации электромагнитного происхождения, которая базируется на положениях теории электромагнитного поля.

Математические модели электромагнитного поля в асинхронных двигателях рассмотрены в работах многих ученых [1–3, 12–14]. Но в большинстве таких моделей используется предположение об условной неподвижности ротора, которое позволяет провести вибрационный анализ на основе неизменной геометрии расчетной области, что упрощает численную реализацию моделей, и поэтому на сегодня они широко применяются при решении такого типа задач.

Представленная в этой статье модель отличается тем, что в ней в режиме реального времени учитывается изменение геометрии расчетной области в результате перемещения ротора относительно статора. Это позволяет провести моделирование сигналов датчиков вибрации во времени и получить ряд новых результатов.

Основу разрабатываемой математической модели составляет уравнение электромагнитного поля в активной зоне асинхронного двигателя [15–17]. Рассматриваемые процессы являются устойчивыми. Предположим, что все полевые функции изменяются во времени согласно гармоническому закону. Для двумерных полей в поперечном сечении АД уравнение электромагнитного поля относительно комплексной амплитуды единой осевой составляющей векторного маг-

нитного потенциала $\dot{A}_z$ в статорной системе координат имеет следующий вид:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega\mu\gamma\dot{A}_z + \mu\gamma\omega_R(R \times \text{rot}\dot{A}_z) = -\mu j_{zi},$$

где ω — угловая частота изменения во времени векторного магнитного потенциала, рад/с;

ω_R — угловая скорость вращения ротора, рад/с;

μ — магнитная проницаемость, Гн/м;

γ — электропроводность, См;

j_{zi} — плотность сторонних токов (плотность токов в пазах статора, согласно схеме обмотки статора), А/м²;

R — радиус-вектор произвольной точки ротора, м.

Для такой задачи целесообразно использовать роторную систему координат, в которой уравнение принимает более простой вид:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu j_{zi},$$

где $s = (n_1 - n)/n_1$ — скольжение АД, о.е. или %;

$n_1 = 60 \times f/p$ — скорость вращения ротора АД, об/мин;

n_1 — скорость циклического изменения магнитного потока статора, об/мин;

f — частота сети переменного тока, Гц;

p — число пар полюсов обмотки статора или число пар катушек на фазу.

Целесообразность использования роторной системы координат обусловлена тем, что вихревые электромагнитные токи возникают только в элементах массивного ротора, а все элементы конструкции статора асинхронного двигателя можно считать неэлектропроводными (магнитопровод статора — шихтованный, в пазах статора задаются только сторонние токи) [18–20].

Источниками электромагнитного поля являются плотности сторонних токов трех фаз обмоток статора:

$$j_{Ai} = \frac{I_m u_{\Pi}}{S_{\Pi}};$$

$$j_{Bi} = \frac{I_m u_{\Pi} \left[\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \right]}{S_{\Pi}};$$

$$j_{Ci} = \frac{I_m u_{\Pi} \left[\cos\left(-\frac{4\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{4\pi}{3}\right) \right]}{S_{\Pi}},$$

где I_m — амплитуда тока в фазе обмотки статора, А;

u_{Π} — число последовательно соединенных проводников в пазах статора;

S_{Π} — площадь сечения паза статора, м².

Вышеприведенные уравнения дополняются однородными граничными условиями первого рода $A_z|G = 0$ на линии G внешней поверхности ярма статора, которые ограничивают расчетную область. Величина μ в каждой точке расчетной области, где находятся ферромагнитные материалы, определяется по соответствующим кривым намагничивания.

Составляющие вектора магнитной индукции в декартовой системе координат определяются следующим образом:

$$\dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y \dot{B}_y} = -\frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x}.$$

По известным проекциям $\dot{B}_x$, $\dot{B}_y$ на внутренней поверхности статора легко найти составляющие вектора магнитной индукции: $\dot{B}_n$ — нормальную (направленную вдоль вектора нормали к поверхности в заданной точке с координатами x, y) и $\dot{B}_\tau$ — тангенциальную (направленную вдоль касательной к поверхности в этой же точке) проекции вектора магнитной индукции:

$$\dot{B}_n = \frac{(y \dot{B}_y + x \dot{B}_x)}{R_\delta}; \quad \dot{B}_\tau = \frac{(y \dot{B}_x - x \dot{B}_y)}{R_\delta},$$

где $\vec{B}$ — комплексный вектор магнитной индукции, Тл;

R_δ — радиус расточки статора, м.

Плотность вибровозмущающих сил пропорциональна тензору магнитного натяжения, который имеет физическую размерность давления (Н/м²).

Модули нормальной и тангенциальной составляющих тензора магнитного натяжения выражаются в виде:

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \cdot (\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2) \right|, T_\tau = \left| \frac{\dot{B}_n^2 \cdot \dot{B}_\tau^2}{\mu} \right|.$$

В дальнейшем рассматриваются радиальные вибрации, которые происходят за счет действия нормальной составляющей тензора магнитного натяжения. Вибрации исследовались в заданной точке на коронке зубца статора, которая соответствует месту условного размещения датчика вибрации.

Для экспериментального исследования предложенной модели использовался физический стенд на базе асинхронного многоскоростного двухобмоточного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1,7 кВт, на котором моделировались дефекты [17]. Многочисленные эксперименты в режимах холостого хода и на выбеге ротора проводились для условно бездефектного состояния и при моделировании наличия дефектов.

Интервал времени, на котором осуществлялся анализ сигнала, соответствует одному периоду процесса — одному полному обороту ротора АД. При номинальном скольжении $s = 0,044$ о.е. расчетный интервал времени равен $T = 0...0,0418$ с. Количество расчетных шагов составляло $N = 360$, то есть за один шаг по времени $\Delta t = T/N = 1,16 \cdot 10^{-4}$ с ротор поворачивался на угол 1° , что удовлетворяет условиям точности.

Таким образом, полный расчет процесса на одном обороте ротора содержит в себе N расчетов поля при различных положениях вращающегося ротора [18].

Экспериментальные исследования

Две виброизмерительные пьезоэлектрические преобразователи (датчики вибраций) типа ДН-3-М1 были закреплены на корпусе в точках измерения.

Датчики имеют рабочий диапазон частот 5–4800 Гц и превращают механические колебания корпуса датчика в электрические сигналы, пропорциональные его ускорению. Принцип действия датчиков вибрации основан на пьезоэлектрическом эффекте [16–18].

На рисунке 1 представлена общая картина протекания вибрационных процессов для условно бездефектного состояния АД в режимах холостого хода (при 750 об/мин) и выбега ротора. Здесь кривые 1, 2 — это зависимости, которые построены по статистическим данным за время вибросмещений в режимах холостого хода и выбега ротора.

Далее в процессе эксперимента рассматривались:

- вертикальная составляющая амплитуды вибрации в режиме выбега ротора (мкм, мм/с) (A_{xx});
- вертикальная составляющая амплитуды вибрации при нагрузке или холостом ходу (мкм, мм/с) (A_R),
- а также учитывалось предельное значение амплитуды вибрации, выше которого эксплуатация асинхронного двигателя не допускается (A_{lim}).

Эти показатели в совокупности позволяют рассчитать диагностический параметр, который характеризует наличие дефектов в статоре, что соответствует значению критериальной функции при определенном состоянии АД:

$$D = \frac{A_{xx}}{A_R} \left(\frac{A_{lim} - A_{lim}}{A_R} \right).$$

В режиме выбега ротора вертикальная составляющая вибросмещений выбиралась в пределах 500–400 об/мин, что составляло 60–70 % от номинальной нагрузки, когда электромагнитное поле уже не влияло на вибропроцессы.

В эксперименте также моделировались дефекты, возникающие при замыкании разного количества витков, рассматривалась степень их накоплений, возникающих в обмотке статора АД. Были рассмотрены три варианта: замыкание 9, 22, 32 витков, при общем количестве витков в фазе 702.

На рисунке 2 изображены графики зависимостей по времени вибросмещений при витковом замыкании обмотки статора. Обозначение кривых 1, 2 на всех рисунках одни и те же.

Рисунок 1. Вибрационные процессы в условно-бездефектном состоянии АД

Figure 1. Vibration processes in the conditionally defect-free state of an induction motor

Рисунок 2. Графики зависимостей по времени вибросмещений при витковом замыкании обмотки статора

Figure 2. Graphs of time dependencies of vibration displacements during the winding closure of the stator winding

В первом варианте при замыкании девяти витков значение диагностического параметра D равно 0,59 (рисунок 2, *a*), во втором — при замыкании 22 витков D было около 0,53 (рисунок 2, *b*), а в третьем — при замыкании 32 витков D уже равнялось 0,41 (рисунок 2, *c*). Необходимо отметить, что в последнем случае обмотка нагревалась до недопустимой температуры, что свидетельствовало о том, что работу электродвигателя необходимо останавливать.

Таким образом, для условно бездефектного асинхронного двигателя значение параметра D равно в среднем 1, а при различном количестве замыканий витков в обмотке статора исследуемый параметр находился в пределах 0,41–0,59. Отсюда можно сделать вывод о том, что значение диагностического параметра D меняется в зависимости от степени накопления дефектов в пределах от 4 % до 59 %.

На следующем этапе эксперимента была проведена серия испытаний при различных токах нагрузки обмотки статора, в которых измерялись вибрации АД. В таблице 2 представлены результаты экспериментальных испытаний.

В таблице 2 введены следующие обозначения:

I_l — ток нагрузки, А;

s — экспериментально найденное скольжение ротора, о.е.;

a — экспериментально определенное среднеквадратическое виброускорение, мм/с²;

v — виброскорость, мм/с;

m_e — эквивалентная приведенная масса, кг.

Из полученных экспериментальных данных таблицы 2 видно, что при увеличении тока нагрузки обмотки статора вибрация АД уменьшается. Это объясняется уменьшением магнитного потока (индукции) в зазоре двигателя вследствие увеличения падения напряжения на электрических опорах обмотки статора при увеличении тока. Приведенные данные также показывают, что при изменении тока статора на 53 % эквивалентная приведенная масса меняется всего на 2,1 %, поэтому данную величину можно использовать как обобщенный параметр АД.

Амплитуда сигнала собственных механических колебаний при приближении к номинальной скорости вращения ротора АД равна ~ 20 мм/с², что составляет 15–20 % от амплитуды сигнала электромагнитных колебаний. В режиме номинальной нагрузки АД средняя амплитуда сигнала электромагнитных колебаний первого датчика, который размещен в горизонтальной плоскости (сбоку), составила 130 мм/с², а второго, расположенного в вертикальной плоскости (сверху), составила 110 мм/с². На рисунке 3 показано распределение экспериментального (рисунок 3, *a*) и смоделированного (рисунок 3, *b*) сигналов первого вибродатчика за время одного поворота ротора.

Каждый сигнал, отраженный в терминах виброускорения, содержит по четыре

Таблица 2. Результаты испытаний АД при различных токах нагрузки статора

Table 2. Test results of an induction motor at different stator load currents

№ п/п	I_l, A	s , r.u.	a , mm/s ²	v , mm/s	m_e , kg
1	8,4	0,04	78,7	0,652	36530
2	9,7	0,052	74,1	0,617	36100
3	11,1	0,066	68,6	0,568	36050
4	12,9	0,079	67,4	0,557	35760

Рисунок 3. Распределение экспериментального и смоделированного сигналов первого вибродатчика за время одного поворота ротора

Figure 3. Distribution of experimental and simulated signals of the first vibration sensor during one rotation of the rotor

амплитуды колебаний, что отражает основную частоту электромагнитных вибраций 100 Гц. Полученные числовые значения амплитуд расчетного и экспериментального сигналов близки между собой, что в целом подтверждает достоверность предложенной модели.

Достоинства разработанной модели и ее преимущества по сравнению с уже имеющимися моделями выявлены в процессе сравнения спектрограмм.

Так, полученная в процессе эксперимента постоянная составляющая и гармоника частотой 100 Гц является больше, чем в расчетном сигнале. Однако разница равна соответственно 1 % и 5 %, что является допустимым.

Выводы

При витковых замыканиях обмоток статора АД вибрации на обоях подшипников ротора растут, при этом на выбеге ротора они более стремительно снижаются, чем для случая условно бездефектных машин.

Предложенный в статье диагностический параметр D более чувствителен к витковым замыканиям, а также к значениям вибросмещения. Используя предложенный диагностический параметр, можно построить критерий предельного накопления дефектов и прогнозировать техническое состояние АД по совокупности накопленных дефектов и вовремя его ремонтировать, не допуская существенных повреждений узлов машины и аварийных ситуаций.

Результаты проведенного эксперимента на стенде подтвердили адекватность разработанной математической модели и могут быть использованы при диагностике других электрических машин [19, 20]. В дальнейшем данная модель может быть использована при создании многофункциональных систем вибрационной диагностики повреждений электрических машин.

Список источников

1. Архипцев Ю.Ф., Котеленец Н.Ф. Асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1986. 112 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. М.-СПб.: Питер, 2006. Т. 1: 319 с.; Т. 2: 346 с.
3. Subrahmanyam V. Electric Drives. Concepts and Applications. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2011. 752 p.
4. Баркова Н.А., Дорошев Ю.С. Неразрушающий контроль технического состояния горных машин и оборудования: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 157 с.
5. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors // IEEE Transactions on Magnetics. November, 2011. 47 (11). P. 4650-4659. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157167.
6. Сафиуллин Р.А. Устойчивость композитного ротора электрической машины на подшипниках скольжения // Энергетика, состояние, проблемы, перспективы: тр. X Всеросс. науч.-техн. конф., 2019 г., Оренбург. Оренбург: ОГУ, 2019. С. 275-282.
7. Сафиуллин Р.А., Галеев Р.Ф., Мухаметзянов И.А. Инженерный расчёт характеристик электромеханического преобразователя с композитным вторичным элементом // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. С. 555-561.
8. ГОСТ IEC 60034-14-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
9. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машинных систем. Электросигнатурный анализ трехфазных асинхронных двигателей. М.: Стандартинформ, 2016. 29 с.
10. Standards European UNE EN 60034-14:2004/A1:2007. Rotating Electrical Machines - Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher — Measurement, Evaluation and Limits of Vibration Severity (IEC 60034-14:2003/A1:2007).
11. Patent US6014598A. Model-Based Fault Detection System for Electric Motors / A. Duyar, E. Albas, O.T. Durakbasa, A.H. Serafettinoglu. 2000.
12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor // Procedia Computer Science. 2018. Vol. 131. P. 1275-1281.
13. Wang L.H. Motor Fault Diagnosis Based on Short-time Fourier Transform and Convolutional Neural Network // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30, No. 6. P. 1357-1368.
14. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development // Electrical Systems and Complexes. 2020. Vol. 1 (26). P. 4-9.
15. Александров А.А., Барков А.В., Баркова Н.А., Шафранский В.А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования. Л.: Судостроение, 1986. 273 с.
16. Гордеев О.Я., Захаренко В.А. Диагностика электромеханического оборудования по параметрам потребляемой электроэнергии // Журнал Физики: серия конференций. 1546 (2020), 012014. С. 1-7.
17. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope // Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019 ICOECS), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. Ufa, 2019. P. 616-619.
18. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine // 2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020), National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020. P. 1-5.
19. Сафиуллин Р.А. Управление движением электромеханического микропро-

бота // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020. Т. 63. № 6. С. 57-65.

20. Баширов М.Г., Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: монография. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. 96 с.

References

1. Arkhiptsev Yu.F., Kotelenets N.F. *Asinkhronnye elektrodvigateli* [Asynchronous Electric Motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 112 p. [in Russian].

2. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow-Saint-Petersburg, Piter Publ., 2006. Vol. 1: 319 p.; Vol. 2: 346 p. [in Russian].

3. Subrahmanyam V. *Electric Drives. Concepts and Applications*. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publ., 2011. 752 p.

4. Barkova N.A., Doroshev Yu.S. *Nerazrushayushchii kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya gornyx mashin i oborudovaniya: ucheb. posobie* [Non-Destructive Monitoring of the Technical Condition of Mining Machines and Equipment]. Vladivostok, Izd-vo DVGUTU, 2009. 157 p. [in Russian].

5. Lubin T., Mezani S., Rezzoug A. Analytic Calculation of Eddy Currents in the Slots of Electrical Machines: Application to Cage Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. November, 2011. 47 (11). pp. 4650-4659. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157167.

6. Safiullin R.A. Ustoichivost' kompozitnogo rotora elektricheskoi mashiny na podshipnikakh skol'zheniya [Stability of the Composite Rotor of an Electric Machine on Sliding Bearings]. *Trudy X Vserossiiskoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii «Energetika: sostoyanie, problemy, perspektivy»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference «Power Engineering: State, Problems, Prospects»]. Orenburg, OGU Publ., 2019, pp. 275-282. [in Russian].

7. Safiullin R.A., Galeev R.F., Mukhametzyanov I.A. *Inzhenernyi raschet kharakteristik elektromekhanicheskogo preobrazovatela s kompozitnym vtorichnym*

elementom [Engineering Calculation of the Characteristics of an Electromechanical Converter with a Composite Secondary Element]. *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchnotekhnicheskoi konferentsii «Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov»* [Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference «Energetika: Management, Quality and Efficiency of Energy Resources Use»]. Blagoveshchensk, Amurskii gos. un-t, 2019, pp. 555-561. [in Russian].

8. GOST IEC 60034-14-2014. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Chast' 14. Mekhanicheskaya vibratsiya nekotorykh vidov mashin s vysotami vala 56 mm i bolee. Izmereniya, otsenka i predely zhestkosti vibratsii* [State Standard IEC 60034-14-2014. Rotating Electrical Machines. Part 14. Mechanical Vibration of Some Types of Machines with Shaft Heights of 56 mm or More. Measurements, Evaluation and Limits of Vibration Severity]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 16 p. [in Russian].

9. GOST ISO 20958-2015. *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashinnykh sistem. Elektrosignaturnyi analiz trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei* [State Standard 20958-2015. Condition Monitoring and Diagnostics of Machine Systems. Electrosignature Analysis of Three-Phase Asynchronous Motors]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 29 p. [in Russian].

10. *Standards European UNE EN 60034-14:2004/A1:2007. Rotating Electrical Machines. Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher — Measurement, Evaluation and Limits of Vibration Severity* (IEC 60034-14:2003/A1:2007).

11. Duyar A., Albas E., Durakbasa O.T., Serafettinoglu A.H. *Model-Based Fault Detection System for Electric Motors*. Patent US6014598A, 2000.

12. Cheng Jiatang, Xiong Yan. Application of Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm in Rotor Fault Diagnosis for Asynchronous Motor. *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 131, pp. 1275-1281.

13. Wang L.H. Motor Fault Diagnosis Based on Short-time Fourier Transform and Convolutional Neural Network. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, Vol. 30, No. 6, pp. 1357-1368.
14. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analysis of Existing Methods for Diagnostics of Electric Motors and Perspectives of Their Development. *Electrical Systems and Complexes*, 2020, Vol.1 (26). pp.4–9.
15. Aleksandrov A.A., Barkov A.B., Barkova H.A., Shafranskii B.A. *Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektro-oborudovaniya* [Vibration and Vibration-Based Diagnostics of the Marine Electric Equipment]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986. 273 p. [in Russian].
16. Gordeev O.Ya., Zakharenko V.A. Diagnostika elektromekhanicheskogo oborudovaniya po parametram potrebyaemoi elektroenergii [Diagnostics of electromechanical equipment by electrical power consumption parameters]. *Zhurnal Fiziki: seriya konferentsii — Journal of Physics: Conference Series*, 1546 (2020), 012014, pp. 1-7. [in Russian].
17. Safiullin R.A., Yangirov I.F., Khalikov A.R., Ayupova A.R. Spring Drive for Defectoscope. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (2019 ICOECS)*, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia, October 22-25, 2019. Ufa, 2019, pp. 616-619.
18. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Tachogenerator for processing Signals and Data from Electrical Machine. *2nd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2020)*, National Research University «Moscow Power Engineering Institute». Moscow, Russia, March 12-14, 2020, pp. 1-5.
19. Safiullin R.A. Upravlenie dvizheniem elektromekhanicheskogo mikrorobota [Motion Control of an Electromechanical Microrobot]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika — Russian Electromechanics*, 2020, Vol. 63, No. 6, pp. 57-65. [in Russian].
20. Bashirov M.G., Prakhov I.V. *Otsenka povrezhdennosti nasosnykh agregatov po znacheniyam parametrov garmonik tokov i napryazhenii elektroprivoda* [Assessment of Damage to Pumping Units by the Values of the Parameters of Harmonics of Currents and Voltages of the Electric Drive]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 2013. 96 p. [in Russian].