

УДК 621.313.04

Дмитрий Михайлович Баннов

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций, Россия, Самара, e-mail: bannov.dm@samgtu.ru

Владимир Иосифович Полищук

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Барнаул, e-mail: polischuk_vi@mail.ru

Метод обработки сигналов токов статора асинхронного двигателя для диагностики обрыва стержня ротора

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальность исследования обусловлена высокими требованиями к надежности работы ответственных механизмов собственных нужд тепловых электрических станций. Главным источником механической мощности механизмов собственных нужд тепловых электрических станций являются высоковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Одной из сложнейших для раннего обнаружения причин аварийного останова является обрыв стержня ротора. Обрыв стержня асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором носит скрытый характер, может существовать продолжительное время, не оказывая значительного влияния на режим работы машины, тем не менее факт наличия обрыва можно считать аварийным состоянием асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а последствия выхода из паза магнитопровода необратимыми. Раннее диагностирование обрывов стержней асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором собственных нужд тепловых электрических станций с научной точки зрения является трудноразрешимой и вместе с тем крайне актуальной задачей. Существующие методы диагностики такого рода повреждений основаны на измерении и анализе вибрационных и акустических физических величин. Самым распространенным электрическим параметром, используемым в качестве источника информации, как правило, выступает потребляемый ток, а большинство способов диагностики внутренних повреждений электрических машин базируются на Фурье-анализе. Целью исследования является разработка математического алгоритма обработки оцифрованных кривых токов фаз статора для диагностирования высоковольтного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Материалы и методы. Решение поставленной задачи осуществлено с применением теории электрических машин, метода аналитической аппроксимации экспериментальных данных, метода регрессионного анализа. Получение экспериментальных данных и апробация алгоритма проведены на экспериментальной установке с асинхронным двигателем 0,4 кВ с измененной конструкцией активной части ротора, разработанной непосредственно для физической имитации обрыва стержня асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Результаты. Предлагается новый способ цифровой обработки сигналов токов статора на основе метода регрессионного анализа для диагностирования обмотки ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Получен алгоритм математической обработки оцифрованных кривых токов статора на основе регрессионного анализа в косинусно-синусном базисе для выявления диагностического признака обрыва одного стержня ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Определено количество гармонических составляющих, наилучшим образом с точки зрения баланса между экономией вычислительных ресурсов и точностью аппроксимации описывающих исходный сигнал.

Выводы. Разработанный и апробированный математический алгоритм выявления обрыва стержня ротора асинхронного двигателя на основе регрессионного анализа токов статора позволяет с точностью до 97 % определять повреждение роторной цепи, при этом диагностический признак меняет свой уровень при обрыве одного стержня на 5 %. Алгоритм рекомендуется адаптировать к языкам программирования микропроцессорных блоков РЗА.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, обрыв стержня ротора, регрессионный анализ, техническая диагностика, анализ токов статора

Dmitriy Mikhailovich Bannov

Samara State Technical University, Candidate of Engineering Science (PhD), Senior Lecture of Electric Power Plants Department, Russia, Samara, e-mail: bannov.dm@samgtu.ru

Vladimir Iosifovich Polishchuk

Polzunov Altai State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Industrial Power Supply Department, Russia, Barnaul, e-mail: polishchuk_vi@mail.ru

Method of processing signals of stator currents of induction motor to diagnose broken rotor bar

Abstract

Background. The study is relevant due to high requirements to the reliability of the operation of auxiliary mechanisms of thermal power plants (TPP). The main source of mechanical power of auxiliary mechanisms of TPPs is high-voltage induction motor with squirrel cage rotor (IMSC). One of the most difficult causes of emergency shutdown to detect early is a broken rotor bar. The breakage of IMSC rotor bar is of latent character. It can be for a long time without considerable influence on the machine operation mode. Nevertheless, the fact of the breakage can be considered as an emergency condition of IMSC, and the consequences of leaving the groove of the magnetic core are irreversible. Scientifically, early diagnostics of IMSC rotor bars breakage of TPP auxiliary needs is both a difficult and extremely urgent task. The existing methods of diagnostics of such damage are based on measurement and analysis of vibration and acoustic physical quantities. The most common electrical parameter, used as a source of information, as a rule, is current consumption. And most of methods are based on Fourier analysis. The purpose of the study is to develop a mathematical algorithm to process digitized curves of stator phase currents to diagnose high-voltage IMSC.

Materials and methods. The theory of electric machines, the method of analytical approximation of experimental data, the method of regression analysis have been used to solve the problem. Experimental data is obtained, and testing of the algorithm is conducted on an experimental installation with a 0,4 kV induction motor with a modified design of the active part of the rotor developed for physical simulation of IMSC broken rotor bar.

Results. This paper proposes a new method of digital processing of stator current signals based on the regression analysis method for diagnostics of IMSC rotor winding. The authors have developed an algorithm for mathematical processing of digitized stator current curves based on regression analysis in the cosine-sine basis to identify the diagnostic sign of failure of one rotor bar of IMSC rotor. The authors have determined the number of harmonic components that best describe the initial signal from the point of view of the balance between saving computational resources and accuracy of approximation.

Conclusions. A mathematical algorithm to detect the rotor bar breakage of an induction motor based on regression analysis of stator currents has been obtained and tested. It allows to detect rotor circuit damage with 97 % accuracy. At the same time the diagnostic sign changes its level when one bar breaks by 5 %. It is recommended to adapt the algorithm to the programming languages of microprocessor relay protection units.

Key words: induction motor, squirrel cage rotor, broken rotor bar, regression analysis, technical diagnostics, stator current analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.064-072

Введение. Высоковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР) (например, серии ДАЗО, ДАМСО) являются одним из ключевых элементов систем функционирования и поддержания рабочего режима ответственных систем на объектах энергетики и промышленности первой и особой категории электроснабжения. К таким АДКР предъявляются повышенные требования по эксплуатационной надежности. Вибрационный контроль, тепловой контроль, акустический контроль при этом выступают одними из основных средств мониторинга в процессе эксплуатации. Наряду с физическими величинами, в процессе работы АДКР контроли-

руются и его электрические параметры, такие как напряжение и ток. Считается, что обрыв одного стержня в короткозамкнутой обмотке приводит к незначительному изменению симметрии магнитного поля ротора, а следовательно, и к влиянию на форму сигнала потребляемых статором токов. Действительно, обрыв стержня АДКР носит неявно выраженный характер, существуя достаточно длительное время, не оказывая критического влияния на режим работы машины, тем не менее факт наличия обрыва можно считать предаварийным состоянием АДКР. При нарушении целостности соединения стержня и короткозамыкающего кольца его дальнейшая деформация может

произойти только в сторону воздушного зазора, безвозвратно повреждая лобовую часть статорной обмотки. Как правило, проверка на данный вид повреждений, выполняется только при проведении капитального ремонта двигателя. Эксплуатация АДКР с обрывом стержня сопровождается рядом дополнительных побочных негативных явлений, например таких как повышенное потребление электрической энергии, общее снижение мощностных характеристик и КПД, выделение дополнительного тепла, повышенный износ подшипников.

Техническая диагностика – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика (ТД) необходима для адекватного предупреждения о надвигающихся отказах и планирования профилактических и ремонтных работ. Непрерывная ТД повышает производительность машин и электротехнических комплексов за счет своевременного прогнозирования отказов АДКР.

Вопросы ТД АДКР регулируются межгосударственным стандартом ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015¹. При проведении настоящего исследования мы руководствовались главными требованиями этого стандарта по непрерывному усовершенствованию диагностических устройств и определению наиболее перспективных направлений развития: «... прогресс в методах проектирования и технологии производства электрических машин выражается в увеличении их надежности, однако полностью избежать отказов не удастся. Поскольку требования к надежности постоянно растут, важно определить дефекты на ранней стадии, определить источник и серьезность неисправности с целью оценки риска развития процесса...»². В ГОСТ имеется указание о целесообразности применения анализа токов статора: «... достоверное обнаружение неисправностей беличьей клетки ротора (разрушение стержней и колец) возможно путем анализа токов статора ...»³.

Общепризнано, что с научной точки зрения диагностирование и изучение явлений, происходящих в АДКР при обрыве

стержня ротора и в ненормальных (аварийных) режимах работы ротора, является сложной задачей. На сегодняшний день контроль и диагностирование данного вида повреждения АДКР осуществляется с помощью мониторинга вибрации подшипников и температуры металла, контроля акустической эмиссии и некоторыми другими способами. Но все эти методы требуют установки дорогостоящих датчиков и использования специальных нестандартных технических средств и инструментов. Например, в [1–3] предложены методы контроля неисправности роторных цепей электрических машин, основанные на анализе магнитного поля.

Проведенные нами исследования по разработке метода непрерывной ТД, основанного на измерении основных электрических величин (тока и напряжения), потребляемых двигателем, показали, что такой подход является технически и экономически наиболее выгодным, так как не требует установки дополнительных (нестандартных) датчиков.

Методы исследования. Для разработки и обоснования основных теоретических положений по исследованию работы АДКР в условиях обрыва стержней в обмотках короткозамкнутых роторов необходима экспериментальная установка, отвечающая следующим требованиям:

- выход из строя стержня ротора испытуемого АДКР должен происходить с возможностью его многократного восстановления до исходного состояния без нарушения целостности конструкции и магнитопровода;
- экспериментальная установка должна быть оснащена цифровой системой сбора данных с частотой дискретизации, достаточной для качественной и интеллектуальной обработки информации;
- в экспериментальной установке должна быть предусмотрена система торможения, позволяющая эксплуатировать испытуемый АДКР в номинальном режиме с регулируемой нагрузкой на валу.

Сигналы токов и напряжений статора собирались с датчиков тока, основанных на эффекте Холла LEM HY 05 ... 25P и датчиков напряжения LEM LV 25-P/SP3 с гальванической развязкой между цепями питания

¹ ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Ч. 24. Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.

² Там же.

³ Там же.

и измерения. Аналого-цифровым преобразователем была выбрана плата National Instruments PCI-6024E. Плата имеет 16 одноканальных или 8 дифференциальных аналоговых входов (программируемых от $\pm 0,05$ В до ± 10 В), 12-битный процессор, частоту 200 кГц, 8 дискретных линий ввода/вывода и 2 24-битных таймера-счетчика. Программной средой исследования выбрана LabVIEW, в которую интегрирован входной терминал DAQ Assistant, соединяющий АЦП с виртуальной программой виртуального прибора.

Для создания нагрузки на вал испытуемых АДКР в качестве электродинамического тормоза, создающего тормозной момент, был выбран АДКР аналогичной мощности. Экспериментально был определен и подключен к нему коммутационный элемент, позволяющий регулировать тормозной момент нагрузки на валу испытуемого АДКР. На рис. 1 представлена схема подключения испытуемого АДКР к электродинамическому тормозу, питаемому от выпрямленного напряжения через ЛАТР 220 В.

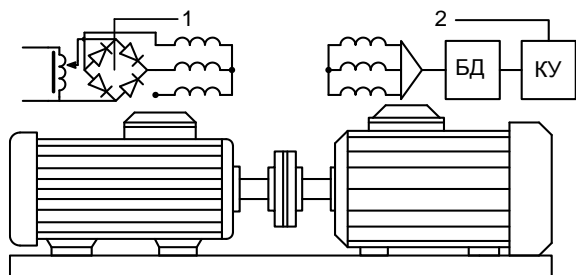


Рис. 1. Схема подключения АДКР, спаренного с испытуемым АДКР, в режиме электродинамического торможения: 1 – выпрямительный агрегат, питаемый от сети 220 В; 2 – трехфазная сеть, подключаемая к АДКР через коммутационное устройство (КУ) и блок датчиков (БД)

Поскольку требовалось, чтобы экспериментальная машина имела максимально конструктивно схожий с высоковольтными АДКР ротор и возможность многократного повторения режима работы с обрывом стержня, то было решено изготовить новый магнитопровод с учетом размеров рабочих частей заводского ротора, количества стержней и других характеристик. В качестве материала для «беличьей клетки» была выбрана медь, чтобы можно было свободно регулировать количество сломанных стержней. Сняв старый магнитопровод с вала предварительно испытанного АДКР и

установив на него активную часть новой конструкции, был получен экспериментальный ротор, удовлетворяющий требованиям исследования по диагностированию разрушения стержней АДКР [4]. Для проведения корректных и полноценных экспериментов были использованы два АДКР разных мощностей (3 и 0,16 кВт).

Экспериментальный ротор АДКР мощностью 3 кВт и 0,16 кВт показан на рис. 2 и 3 соответственно. В конструкцию экспериментального ротора включена изоляция стержней от магнитопровода, для того чтобы исключить возможность протекания токов оборванного стержня по стали ротора. Также данное решение было принято исходя из допущений, принимаемых при математическом моделировании асинхронных машин.

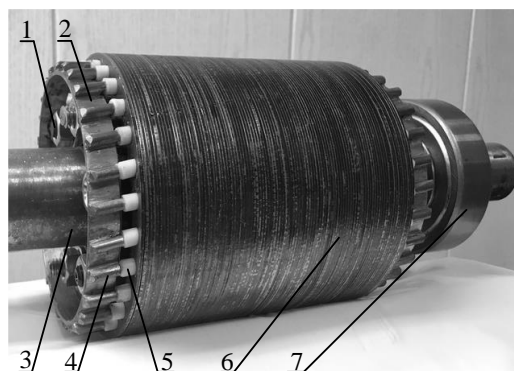


Рис. 2. Ротор испытуемого АДКР 3 кВт: 1 – диэлектрический крепеж, стягивающий пластины магнитопровода; 2 – короткозамыкающее кольцо; 3 – вал ротора; 4 – стержни «беличьей клетки»; 5 – изоляция из фторопласта; 6 – магнитопровод; 7 – подшипники

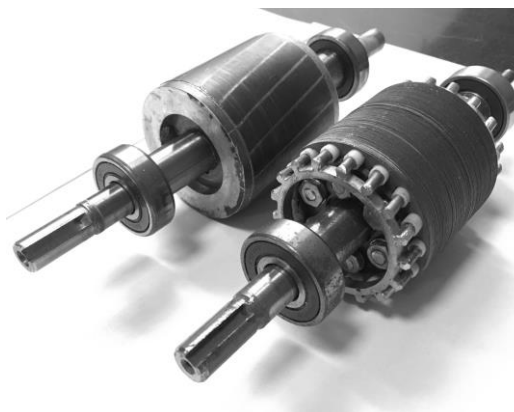


Рис. 3. Ротор испытуемого АДКР 0,16 кВт

Имитация обрыва стержня ротора (рис. 2) производится путем отпаивания стержня от короткозамыкающего кольца с

последующей изоляцией. Данную процедуру возможно выполнять для любого сочетания повреждений роторной цепи, например: отпаян один стержень; отпаяны два соседних стержня; отпаяны два противоположных стержня и так далее в зависимости от требований. Также очевидна возможность восстановления обмотки ротора в исходное состояние для обеспечения повторяемости эксперимента.

Такая конструкция экспериментального АДКР дает широкий спектр возможностей получения цифровых сигналов токов статора в различных технических состояниях ротора, не исключая и частичного нарушения целостности (намеренное уменьшение площади контакта одного стержня с короткозамыкающим кольцом).

Результаты исследования. Для анализа оцифрованных сигналов токов трех фаз исследуемых АДКР на представленном оборудовании был проведен целый ряд экспериментов. Первоначально регистрировались оцифрованные сигналы в неповрежденном состоянии АДКР. Затем после разбора двигателя имитировался обрыв стержня путем отпайки его от короткозамыкающего кольца. В результате проведения ряда экспериментов с обрывом двух, трех и четырех стержней были получены временные ряды различных режимов работы испытуемых АДКР, таких как переходный пусковой режим, установившийся холостой ход, переходный режим включения нагрузки, установившийся режим нагрузки, переходный режим снятия нагрузки.

Пример регистрируемых сигналов фазных токов статора АДКР 3 кВт представлен на рис. 4.

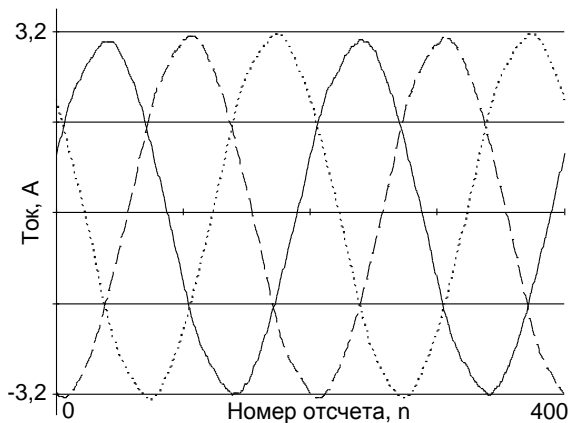


Рис. 4. Кривые токов трех фаз статора испытуемого АДКР мощностью 3 кВт в режиме холостого хода

Для оптимизации и облегчения последующей математической обработки получаемых сигналов токи всех трех фаз преобразованы в модуль результирующего вектора токов статора (РВТС) по следующей формуле:

$$I_M(n) = \sqrt{I_A^2(n) + I_B^2(n) + I_C^2(n)}, \quad (1)$$

где $I_M(n)$ – модуль результирующего вектора токов статора; $I_A(n)$ – ток статора фазы А; $I_B(n)$ – ток статора фазы В; $I_C(n)$ – ток статора фазы С; n – номер отсчета.

Алгоритм получения данного сигнала прописан в программе виртуального прибора и получен в непрерывном режиме параллельно токовым сигналам. Его значения сохраняются программой LabVIEW вместе со всем пакетом данных (токов, напряжений). Он содержит в себе информацию непосредственно от всех трех фаз.

На рис. 5 представлен фрагмент данных размером 200 отсчетов (один период частоты питающей сети 50 Гц), непосредственно используемый при проведении расчетов и построении алгоритма выделения диагностического признака обрыва стержня ротора. В данном случае сигналы не преобразовывались в амперы в целях упрощения работы с данными и минимизации потерь информации.

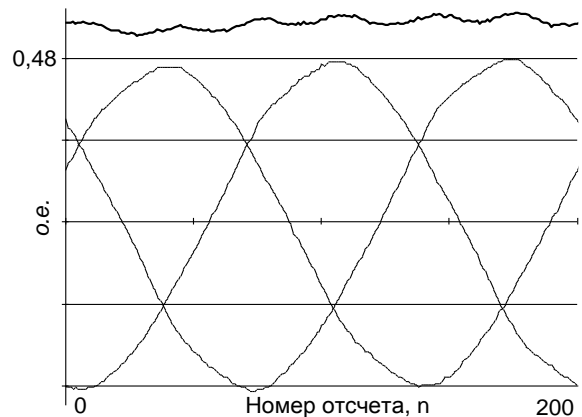


Рис. 5. Кривые цифрового информационного сигнала трех фаз статора и полученный по (1) сигнал модуля результирующего вектора токов статора испытуемого АДКР мощностью 3 кВт

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что кривая модуля РВТС имеет некоторые периодические временные зависимости. Тогда как вполне очевидно, что при абсолютно симметричных токовых кривых (например, полученных от математической модели) она должна быть совершенно

«ровной» линией. С нашей точки зрения, именно из этого сигнала целесообразно выявлять зависимости электрической несимметрии роторной цепи АДКР в установившемся режиме. Это обстоятельство было теоретически обосновано в [5], где наблюдалось увеличение амплитуды и изменение гармонического состава модуля РВТС, а в настоящем исследовании применено практически. Кривая сигнала модуля РВТС всего диапазона замеров представлена на рис. 6.

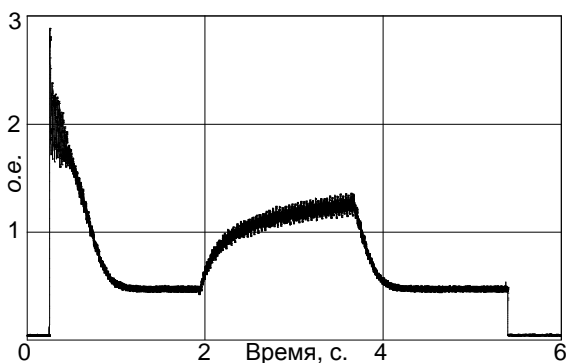


Рис. 6. Кривая модуля результирующего вектора токов статора полного цикла работы испытуемого АДКР

На рис. 6 представлена кривая модуля РВТС, характеризующая работу испытуемого АДКР 3 кВт во всех режимах работы: пуск, холостой ход, нагрузка.

На рис. 7 показан ротор АДКР в сборе со статором перед проведением эксперимента с обрывом одного стержня (слева) и двух стержней (справа) отдельно от статора. Аналогично этому проводились и последующие эксперименты с обрывом двух, трех и четырех стержней на обоих испытуемых АДКР (3 и 0,16 кВт).



Рис. 7. Проведение эксперимента с обрывом стержня АДКР 3 кВт на экспериментальном роторе

После получения всех экспериментальных данных их анализ и преобразование в предмет исследования решался мето-

дом статистической обработки – регрессионным анализом. Линейная регрессия общего вида представляет собой комбинацию базисных функций при весовых коэффициентах, получаемых по критерию минимума квадрата расстояний от исходного сигнала до его математической модели методом наименьших квадратов [6].

Базисные функции при таком методе математической обработки экспериментальных данных играют ключевую роль в адекватности их описания. По визуальной оценке кривой модуля результирующего вектора токов статора в установившемся режиме (см. рис. 5) можно сделать вывод о периодическом характере описываемого сигнала. В связи с этим целесообразно применение косинусно-синусного базиса Фурье, он обладает свойствами ортогональности и ортонормированности, что позволяет получить функцию аналитического описания заданной точности наиболее коротким отрезком экспериментальных данных, а также способствует успешному решению обратных некорректно поставленных задач [7]. Применяемая функция математического описания имеет вид

$$\varphi(n) = A_0 + A_1 \cos(2\pi f_0 k_0 n) + B_1(2\pi f_0 k_0 n) + \dots \quad (2)$$

$$\dots + A_N \cos(2\pi f_0 k_N n) + B_1(2\pi f_0 k_N n),$$

где A_0 – базовый коэффициент; $A_{1...N}$, $B_{1...N}$ – весовые коэффициенты при базисных функциях косинус и синус; f_0 – базовая частота (50 Гц); k – параметр, регулирующий величину базиса до N .

Точность описания исходных цифровых экспериментальных данных зависит от количества гармонических составляющих и влияет на качество получаемой аналитической модели. Оптимальный спектральный состав получаемой модели определяется исходя из аппаратных возможностей и точности применяемого оборудования таким образом, чтобы компенсировать его шум квантования и помехи в каналах связи. Нижний порог количества гармонических составляющих ограничен влиянием эффекта Гиббса [8, 9].

Оценить адекватность описания экспериментальных данных позволяет оценка дисперсии регрессионных остатков, определяемая по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}}, \quad (3)$$

где S – регрессионные остатки; N – количество отсчетов выборки.

На рис. 8 показана оценка дисперсии регрессионных остатков (ошибок, невязок), полученная по (3), при всем диапазоне гармонических составляющих (от 50 до 5000 Гц).

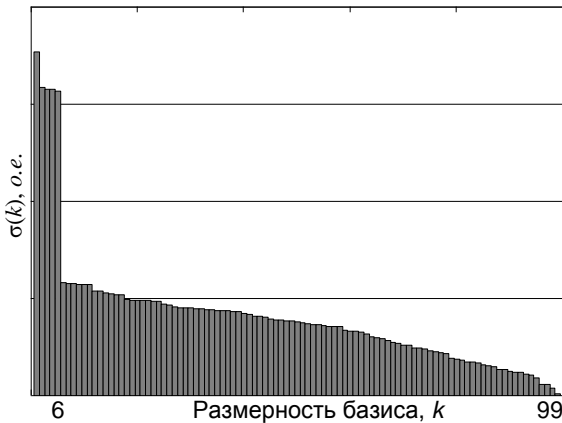


Рис. 8. Оценка дисперсии регрессионных остатков для определения нижнего порога гармонических составляющих

Анализ полученных данных (рис. 8) показывает, что после шести гармонических составляющих (300 Гц) точность описания значительно увеличивается (уменьшается разница между полученной от АЦП кривой РВТС и его аппроксимационной моделью), преодолев влияние эффекта Гиббса.

Предел применения выбранного базиса по верхней границе определяется исходя из погрешности АЦП 12 бит, что составляет 0,024 % (–72 dB, 244 ppm, 2,44 мВ). Увеличивать количество гармонических составляющих, преодолев данный порог точности описания, не имеет смысла, поскольку это приведет только к увеличению вычислительных операций.

На рис. 9 изображена оценка дисперсии регрессионных остатков и отложен предел точности АЦП в 0,024 %.

Анализ полученных данных (рис. 9) показывает, что граница погрешности АЦП пересекает кривую оценки дисперсии регрессионных остатков при 24 гармонических составляющих (1200 Гц). При дальнейшем исследовании и аппроксимации цифрового сигнала модуля РВТС применялся базисный функционал размерностью 24 гармонических составляющих.

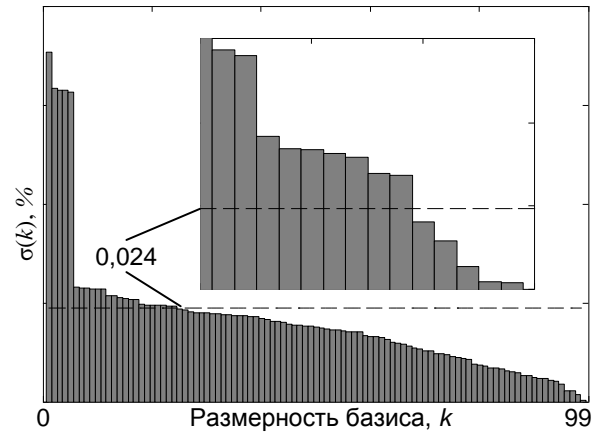


Рис. 9. Оценка дисперсии регрессионных остатков для определения верхнего порога гармонических составляющих

При проведении математической обработки экспериментальных данных описанным выше способом на двух испытуемых АДКР (3 и 0,16 кВт) были получены десять сигналов разных состояний (без повреждений и с повреждениями). На рис. 10 представлен фрагмент цифрового сигнала РВТС и его математическая модель, полученная регрессионным анализом в Фурье базисе при 24 гармонических составляющих.

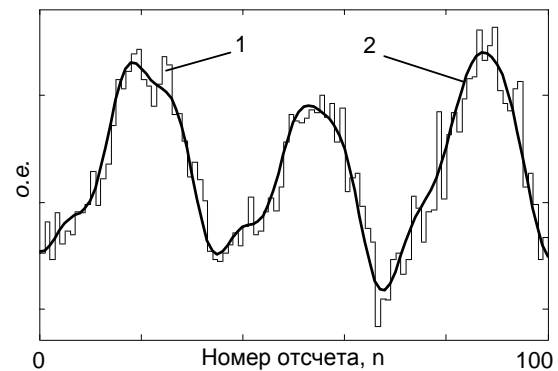


Рис. 10. Функция (2) для РВТС при 24 гармонических составляющих: 1 – кривая цифрового сигнала модуля результирующего вектора токов статора, полученная по (1); 2 – аппроксимационная модель сигнала 1, полученная по (2)

Для представления получаемых данных в виде объекта исследования при сравнении сигналов с повреждением и без оценивались весовые коэффициенты при базисных функциях. Коэффициенты представлены как координаты многомерного пространства. В результате каждого проведенного эксперимента были получены вектора, определяющие то или иное состояние испытуемых АДКР.

Для сравнения векторов и выделения диагностического признака были применены математические операции, характерные для векторной алгебры. Был введен вектор коэффициентов неповрежденного состояния \mathbf{H}_1 , вектор коэффициентов неповрежденного состояния другого фрагмента исследуемого сигнала \mathbf{H}_2 , вектор коэффициентов с повреждением ротора (один, два, три и четыре стержня) $\mathbf{D}_{1...4}$ и вектор $\mathbf{L}_{0...4}$, который является вектором-разницей между сравниваемыми векторами неповрежденного и рассматриваемого состояний. При этом диагностический признак γ определяется как отношение модулей вектора-разницы $|\mathbf{L}|$ и модуль вектора исправного состояния $|\mathbf{H}|$ в процентах:

$$\gamma = \frac{|\mathbf{L}_{0...4}|}{|\mathbf{H}_1|} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Проведя по (4) расчет векторов были получены векторы $\mathbf{L}_{0...4}$ в числовой форме и в комбинациях (табл. 1).

Таблица 1. Расчет диагностического признака для каждой стадии эксперимента

Состояние АДКР	Вектор	Вектор-разница	Диагностический признак γ
Без обрыва стержня	$\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$	$\mathbf{L}_0 = \mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2$	$ \mathbf{L}_0 / \mathbf{H}_1 \cdot 100\%$
Обрыв 1 стержня	\mathbf{D}_1	$\mathbf{L}_1 = \mathbf{H}_1 - \mathbf{D}_1$	$ \mathbf{L}_1 / \mathbf{H}_1 \cdot 100\%$
Обрыв 2 стержней	\mathbf{D}_2	$\mathbf{L}_2 = \mathbf{H}_1 - \mathbf{D}_2$	$ \mathbf{L}_2 / \mathbf{H}_1 \cdot 100\%$
Обрыв 3 стержней	\mathbf{D}_3	$\mathbf{L}_3 = \mathbf{H}_1 - \mathbf{D}_3$	$ \mathbf{L}_3 / \mathbf{H}_1 \cdot 100\%$
Обрыв 4 стержней	\mathbf{D}_4	$\mathbf{L}_4 = \mathbf{H}_1 - \mathbf{D}_4$	$ \mathbf{L}_4 / \mathbf{H}_1 \cdot 100\%$

Результаты проведенных экспериментов на испытуемых АДКР разных мощностей представлены в табл. 2.

Их анализ показывает, что полученный диагностический признак наличия электромагнитной несимметрии, вызванной обрывом стержня, возрастает в разы при исключении из работы одного стержня, что можно трактовать как положительный результат. При этом общее количество стержней ротора АДКР мощностью 3 кВт 28 штук, что при обрыве одного стержня составляет примерно 3 %. Для АДКР 0,16 кВт количество стержней составляет 17 штук, следовательно, для данного типа машины предлагаемый метод дает возможность определять примерно 6 % от всей электромагнитной системы роторной цепи.

Таблица 2. Диагностический признак для разного типа АДКР

Состояние АДКР	Диагностический признак γ , %	
	АДКР 3 кВт	АДКР 0,16 кВт
Без обрыва стержня	0,789	0,898
Обрыв 1 стержня	4,246	6,426
Обрыв 2 стержней	5,125	7,892
Обрыв 3 стержней	5,836	8,124
Обрыв 4 стержней	6,126	8,327

Выводы. Предложенный высокочувствительный метод обнаружения повреждения обмотки ротора АДКР, основанный на регрессионном анализе модуля РВТС, гарантировано диагностирует обрыв одного стержня. Метод апробирован и подтвердил свою дееспособность на двух типах АДКР, разной мощности и с разным количеством стержней «беличьей клетки».

Список литературы

1. **Метод** контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске / Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, В.А. Савельев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 4. – С. 31–44. DOI 10.17588/2072-2672.2019.4.031-044.
2. **Экспериментально-аналитическое** определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / В.А. Савельев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 4. – С. 44–53. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.044-053.
3. **Метод** диагностики дефектов синхронных генераторов по изменениям внешнего электромагнитного поля / Ю.Б. Казаков, А.Н. Морозов, А.П. Океанский, Е.А. Шумилов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 55–61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.055-061.
4. **Баннов Д.М., Крицкий М.В.** Разработка экспериментальной установки для исследований диагностических признаков повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. В 3 т. Т. 3, г. Казань, 01–05 октября 2018 г. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 237–238.
5. **Математическая** модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей / А.С. Глазырин, В.И. Полищук, В.В. Тимошкин и др. // Известия Томского политехнического университета.

Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 10. – С. 213–227.

6. **Дрейпер Г., Смит Д.** Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. – 3-е изд. – М.: Диалектика, 2017. – 912 с.

7. **Классические** ортогональные базисы в задачах аналитического описания и обработки информационных сигналов / Ф.Ф. Дедус, Л.И. Куликова, А.Н. Панкратов, Р.К. Тетуев. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. – 141 с.

8. **Бушнев Д.В., Романов А.В.** Теоретические основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – 116 с.

9. **Вадутов О.С.** Математические основы обработки сигналов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 212 с.

References

1. Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Savel'ev, V.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A. Metod kontrolya sostoyaniya obmotok rotorov vysokovol'tnykh elektrodvigateley sobstvennykh nuzhd elektrostantsiy pri puske [Method for monitoring the condition of rotor windings of high-voltage electric motors for in-house needs of power plants during startup]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 4, pp. 31–44. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.031-044.

2. Savel'ev, V.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A., Sulynenkov, I.N. Eksperimental'no-analiticheskoe opredelenie diagnosticheskogo priznaka defektov obmotki rotora asinkhronnogo elektrodvigateleya [Experimental and analytical determination of the diagnostic sign of defects of the rotor winding of an asynchronous electric motor]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 4, pp. 44–53. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.044-053.

3. Kazakov, Yu.B., Morozov, A.N., Okeanskiy, A.P., Shumilov, E.A. Metod diagnostiki defektov sinkhronnykh generatorov po izmeneniyam vneshnego elektromagnitnogo polya [Method for diagnosing defects of synchronous generators based on changes of the external electromagnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 55–61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.055-061.

4. Bannov, D.M., Kritskiy, M.V. Razrabotka eksperimental'noy ustanovki dlya issledovaniy diagnosticheskikh priznakov povrezhdeniya korotkozamknutoy obmotki rotora asinkhronnogo dvigatelya [Development of experimental plant to study diagnostic signs of damage of the short-circuited rotor winding of an asynchronous motor]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018». V 3 t., t. 3. Kazan', 01–05 oktyabrya 2018 g.* [Proceedings of the IX International youth scientific and technical conference “Electric power industry through the eyes of youth – 2018”. In 3 vols., vol. 3. Kazan, October 01–05, 2018]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2018, pp. 237–238.

5. Glazyrin, A.S., Polishchuk, V.I., Timoshkin, V.V., Kladiyev, S.N., Bannov, D.M., Antyaskin, D.I., Langraf, S.V., Filipas, A.A., Kotin, V.Z., Isaev, Yu.N. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v mul'tifaznoy sisteme koordinat pri nesimmetrii rotornykh tsepey [Mathematical model of an asynchronous motor in a multiphase coordinate system with asymmetry of rotor circuits]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 213–227.

6. Dreyper, G., Smit, D. *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied Regression Analysis]. Moscow: Dialektika, 2017. 912 p.

7. Dedus, F.F., Kulikova, L.I., Pankratov, A.N., Tetuev, R.K. *Klassicheskie ortogonal'nye bazisy v zadachakh analiticheskogo opisaniya i obrabotki informatsionnykh signalov* [Classical orthogonal bases in problems of analytical description and processing of information signals]. Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 2004. 141 p.

8. Bushnev, D.V., Romanov, A.V. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoy obrabotki signalov* [Theoretical foundations of digital signal processing]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2005. 116 p.

9. Vadutov, O.S. *Matematicheskie osnovy obrabotki signalov* [Mathematical foundations of signal processing]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2011. 212 p.