

УДК 621.313.04

## МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВОВ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА МОДУЛЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА ТОКА СТАТОРА

**Баннов Дмитрий Михайлович,**  
bannov.dm@samgtu.ru

Самарский государственный технический университет,  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 224.

**Актуальность** исследования обусловлена большой зависимостью бесперебойной работы ответственных механизмов, приводимых во вращение высоковольтным асинхронным двигателем, работающих в нефтегазовой и химической промышленности, металлургии, электроэнергетике и других стратегически значимых отраслях страны. Особо остро вопрос надежности непрерывной работы стоит при эксплуатации тепловых электрических станций. Практически все электроприводы ответственных механизмов собственных нужд тепловых электрических станций выполняются на базе мощных высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Как правило, спецификой работы этих двигателей являются тяжелые условия пуска под нагрузкой при повышенных температурах и загрязнении окружающей среды. Аварийные остановы асинхронных двигателей совместно с ответственными механизмами на тепловых электрических станциях в конечном результате вызывают отключение энергоблока, приводят к недоотпуску электроэнергии и пересмотру режима работы электроэнергетической системы. Несмотря на такие последствия, в частности от повреждений короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтного асинхронного двигателя, до сих пор не разработана защита, обладающая чувствительностью, способной выявить этот дефект. Повреждение роторной цепи носит скрытый характер, может существовать достаточно длительное время, не оказывая критического влияния на режим работы машины, тем не менее факт наличия обрыва можно считать аварийным состоянием машины в комплексе с механизмом. По данным ремонтов и ревизий высоковольтных асинхронных двигателей имеют место случаи, когда одновременно повреждены до 30 % стержней всего ротора. При нарушении целостности соединения стержня и короткозамыкающего кольца его деформация может произойти только в сторону воздушного зазора, безвозвратно повреждая активную часть статора. Эксплуатация асинхронного двигателя с обрывом стержня сопровождается рядом дополнительных побочных негативных явлений, например, таких как повышенное потребление электрической энергии, общее снижение характеристик и КПД машины, выделение дополнительного тепла, повышенный износ подшипников. В случае диагностирования дефекта короткозамкнутой обмотки на ранней стадии его развития возможен ремонт ротора силами самого предприятия. Ранее диагностирование обрывов стержней ротора высоковольтных двигателей собственных нужд тепловых электрических станций являлось трудноразрешимой и вместе с тем крайне актуальной задачей.

**Цель:** разработка и экспериментальное апробирование метода диагностики обрыва стержней ротора высоковольтного асинхронного двигателя, основанного на математической обработке сигналов от датчиков токов статора.

**Методы:** теория электрических машин, методы цифровой обработки сигналов, статистические методы обработки данных, методы аппроксимации экспериментальных данных, метод регрессионного анализа. Представленные исследования проводились на экспериментальной установке, специально созданной для целей диагностики обрыва стержней ротора.

**Результаты.** Предложен метод диагностики обрывов стержней ротора, основанный на аппроксимации сигналов токов статора. Выявлен критерий повреждаемости роторной цепи, и получена зависимость этого критерия от степени повреждения «беличьей клетки» асинхронного двигателя.

### Ключевые слова:

Надежность электропривода, собственные нужды электростанции, асинхронный двигатель, «беличья клетка», обрыв стержня ротора, диагностика, регрессионный анализ.

### Введение

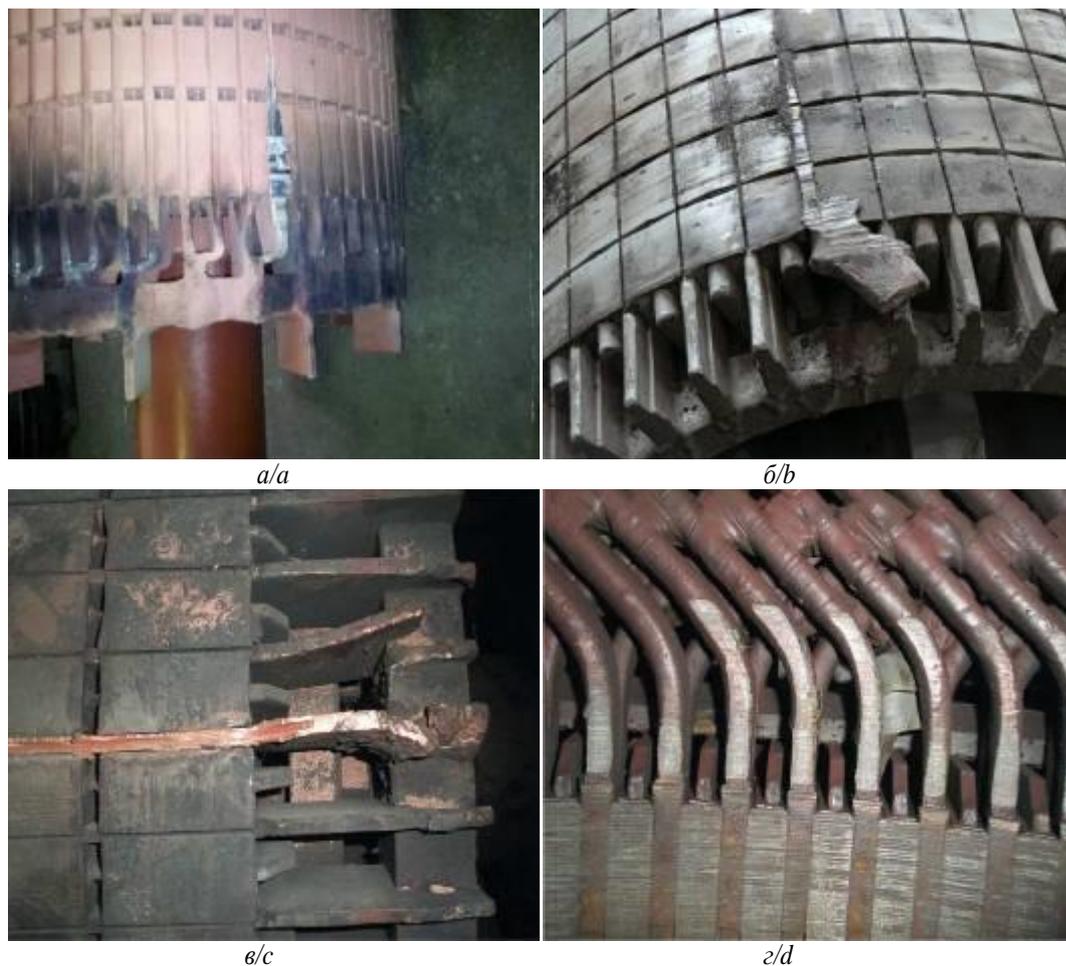
Во всем мире на тепловых электрических станциях в приводах практически всех ответственных механизмов собственных нужд используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АДКР), и от их надежной работы существенно зависит надежная работа станции в целом.

На тепловых электрических станциях высоковольтные АДКР обеспечивают работу ответственных механизмов собственных нужд и, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях пуска и продолжительной нагрузки, носящей резкопеременный характер. В таких режимах работы и тяжелых условиях окружающей среды (повышенная температура, запыленность и прочие) ротор подвержен воздействию электродинамических, центробежных, температурных нагрузок, приводящих к деформированию токоведущих частей (стержни, короткозамыкающие кольца) и износу сварных соединений.

На повреждение роторной цепи АДКР приходится от 11 до 17 % всех аварийных отказов в зависимости от типа машин, из которых около 80 % приходится на обрыв стержней ротора «беличьей клетки» [1]. Выявить обрыв стержней ротора в рабочих режимах без применения специальных средств диагностики не представляется возможным, поскольку данный дефект носит скрытый характер и проявляет себя только в конечной стадии своего развития. Из-за большой периодичности проведения планово-предупредительных работ и капитальных ремонтов

АДКР своевременно обнаружить трещины или иные дефекты роторной цепи, приводящие к обрыву стержней, также затруднительно. Известны случаи, когда при проведении ревизии и планово-предупредительных работ было выявлено, что на рабочем двигателе порядка 30 % всех стержней ротора повреждены [2]. При эксплуатации таких АДКР возрастает потребляемая ими мощность, растет уровень вибрации, ухудшаются механические свойства машины и сокращается межремонтный период, что характерно и для других типов технологических процессов

с использованием асинхронных машин [3]. Конечная стадия развития обрыва стержня заключается в ослаблении паза магнитопровода ротора и вылета в сторону магнитопровода статора. Как видно из рис. 1, для магнитопровода статора и статорной обмотки обрыв стержня ротора несет такие последствия, при которых невозможно обойтись профилактическим ремонтом. Обрыв стержня способен нанести повреждения изоляции, способствующие замыканию токопроводящих частей статора между собой, как это показано на рис. 1, а [4, 5].



**Рис. 1.** Последствия обрыва стержня ротора высоковольтного АДКР: а) выход стержня из паза ротора АДКР АДЧР-1600 с последующим коротким замыканием между фазами и на землю статорной обмотки; б) выход стержня из паза ротора АДКР типа ДАЗО; в) выход стержня из паза ротора АДКР типа АНЗ; г) повреждение активной части статора высоковольтного АДКР типа АНЗ

**Fig. 1.** Effects of damage of the rotor bar of high-voltage induction motor: а) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor squirrel cage induction motor (SCIM) type ADChR-1600 followed by a short circuit line to line and line to ground of the stator winding; б) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor SCIM type DAZO; в) rotor bar exit from the rotor slot of the rotor SCIM type AMZ; д) damage of stator winding and magnetic core high-voltage SCIM type AMZ

В развитии теории методов диагностирования обрыва стержня АДКР регулярно ведутся исследования не только российских, но и зарубежных ученых. Например, в работах [6–11] авторы используют нейронные сети в сочетании с дискретными преобразованиями Фурье, вейвлет анализа, что усложняет их программную реализацию. В [12] авторы описывают способ определения ложных выявлений обрыва стержня ротора. Из-за низ-

кой чувствительности и селективности указанных методов диагностики они на сегодняшний день широкого применения не нашли. В [13–15] показаны методы, основанные на фиксации и последующем анализе различного рода физических явлений, вызванных обрывом стержня (повышение температуры, аномальная вибрация и прочие), обладают узкой областью применимости, зачастую требуют дополнительных экспериментов.

Например, ГОСТ ISO 20958-2015, посвященный применению сигнатурного анализа контроля состояния и диагностики электрических машин, прямо указывает, что «если механическая нагрузка двигателя изменяется со временем, то ... появление одних и тех же частотных составляющих может быть вызвано разными причинами...» и «для точного определения причин появления данного диагностического признака может потребоваться привлечение дополнительной информации» [16. С. 3].

ГОСТ ИЕС/TS 60034-24-2015, в свою очередь, констатирует, что «Достоверное обнаружение неисправностей беличьей клетки ротора (разрушение стержней и колец) возможно путем анализа токов статора» [17. С. 4]. Там же дается определение идеального диагностического сигнала: «нулевое значение» при штатном состоянии двигателя и «рост при возникновении дефектов всех категорий» [17. С. 5]. В качестве решения здесь предлагается конструктивная доработка двигателя, связанная с размещением дополнительной измерительной обмотки в пазах машины, что очевидно снижает надежность и усложняет конструкцию.

#### Задачи работы

- создать специализированную установку для изучения особенностей функционирования АДКР при обрыве стержней ротора;
- путём регрессионного анализа токов фаз статора искусственно поврежденного асинхронного двигателя извлечь диагностический признак повреждения стержня ротора АДКР и определить критерий повреждаемости обрыва стержня в «беличьей клетке»;
- разработать методы, алгоритмы и программы, обеспечивающие контроль и диагностику функционирования АДКР в процессе эксплуатации при обрыве стержней ротора в составе рабочих комплексов.

#### Экспериментальная установка

Для разработки и апробации основных теоретических положений по исследованию работы АДКР в неисправном состоянии с обрывом стержня в обмотке короткозамкнутого ротора необходима экспериментальная установка, отвечающая следующим требованиям:

- установка должна иметь цифровую систему сбора данных с частотой дискретизации, достаточной для качественной обработки информации с помощью современных интеллектуальных методов;
- установка должна быть обеспечена возможностью воздействия механической нагрузки на вал испытуемого АДКР для исследования работы в режиме эксплуатации;
- обрыв стержня ротора испытуемого АДКР должен происходить без повреждения целостности конструкции и магнитопровода, с возможностью восстановления исходного состояния.

При проведении испытаний сигналы токов статора получали методом электронного преобразования в

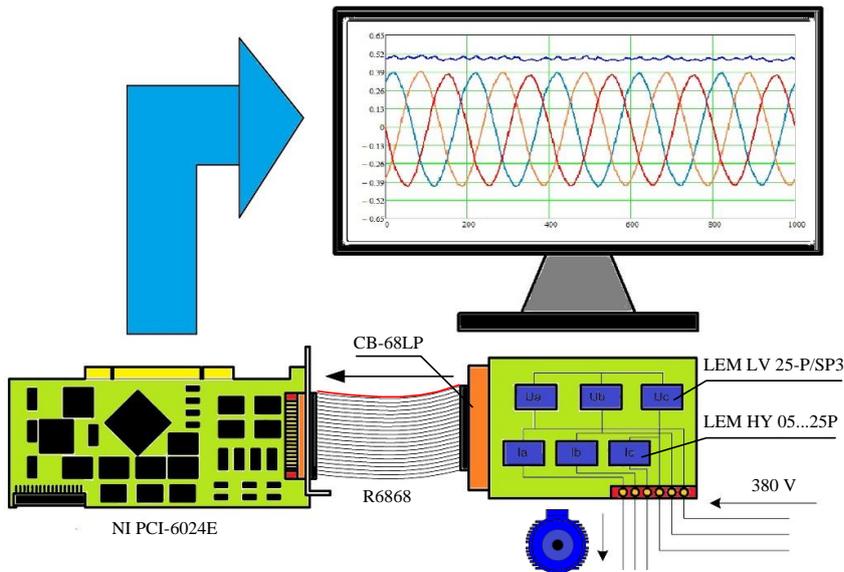
пропорциональный выходной сигнал при помощи датчиков тока на эффекте Холла LEM HY 05...25 P и напряжения LEM LV 25-P/SP3, с гальванической развязкой между силовой и измерительной цепями. Аналого-цифровым преобразователем (АЦП) была выбрана плата от производителя National Instruments PCI-6024E. Плата имеет 16 однопроводных или 8 дифференциальных аналоговых входов с программируемым диапазоном от  $\pm 0,05$  до  $\pm 10$  В, 12-битным процессором, 200 кГц, 8 дискретных линий ввода/вывода и два таймер-счетчика по 24 бит. Составление алгоритма получения сигналов и настройка проводились в программном пакете LabVIEW, поскольку в него интегрирован терминал ввода DAQ Assistant, связывающий АЦП с программой виртуального прибора. При помощи него настраиваются все подключения, приходящие по кабелю R6868 от коннектора ввода CB-68LP, и выбираются требуемые параметры ввода данных. Там же настраивается частота дискретизации и продолжительность измерений. Структурная схема электронной части экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Для имитации нагрузки на валу испытуемого АДКР в качестве элемента, создающего тормозящий момент, выбран аналогичный по мощности АДКР, который использовался в режиме электродинамического торможения. Опытным путем, основываясь на исходных данных двигателя-тормоза, был разработан выпрямительный элемент, подключаемый к нему в режиме работы (торможения) и позволяющий регулировать нагрузочный момент на валу испытуемого АДКР. На рис. 3 представлена принципиальная схема подключения к обмоткам статора испытуемого АДКР и асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения.

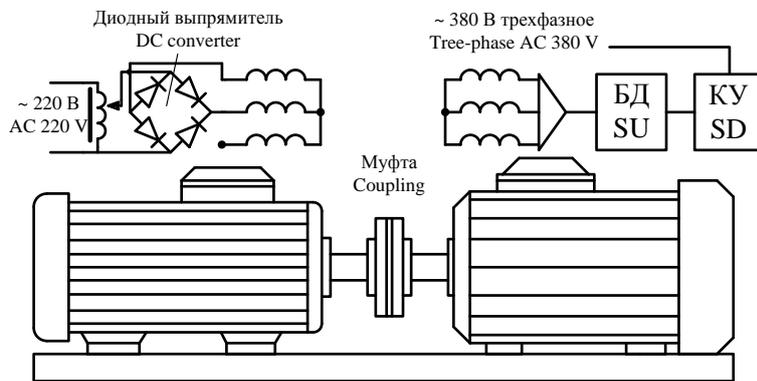
С целью приближения к реальным условиям и получения дополнительных возможностей в рамках поставленных задач принято решение спроектировать и изготовить новый магнитопровод, учитывающий габариты, количество стержней и прочие характеристики активной части заводского ротора. Статор данного АДКР оставлен без изменений. Для возможности свободного регулирования количества оборванных стержней в качестве материала «беличьей клетки» была выбрана медь, что обусловлено хорошо отлаженной технологией пайки. Активная часть разработанного специализированного ротора собрана на валу исходного АДКР. На рис. 4 представлен ротор испытуемого АДКР.

Как видно из рис. 4, новая конструкция ротора позволяет путем пайки отделять от короткозамыкающего кольца или присоединять к нему требуемое количество стержней, тем самым обеспечивая повторяемость экспериментов. На рис. 5 показан пример имитации аварийного состояния роторной обмотки АДКР с обрывом одного или двух стержней.

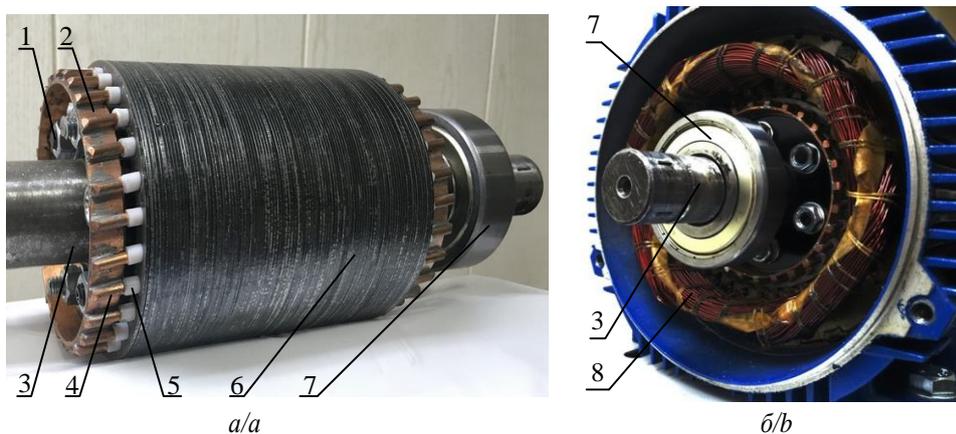
На данной экспериментальной установке получены временные ряды значений токов фаз, потребляемых АДКР при различных сочетаниях оборванных стержней ротора в установившемся режиме. Фрагмент исследования приведен на рис. 6.



**Рис. 2.** Структурная схема экспериментальной установки  
**Fig. 2.** Block diagram of the workbench



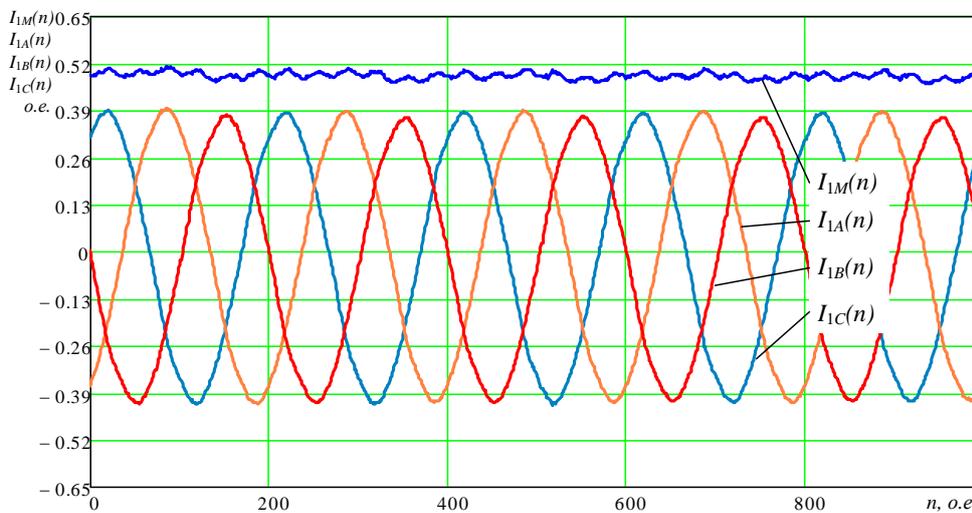
**Рис. 3.** Принципиальная схема подключения обмоток испытуемого АДКР (БД – блок датчиков, КУ – коммутационное устройство) и двигателя, работающего в режиме динамического торможения, подключенного через диодный выпрямитель  
**Fig. 3.** Electric circuit of the connection of the windings of the tested SCIM (SU – sensor unit, SD – switching device) and the motor operating in the dynamic braking mode, connected through a diode rectifier



**Рис. 4.** Испытуемый АДКР: а) ротор испытуемого АДКР; б) испытуемый АДКР в сборе. 1 – диэлектрический крепеж, стягивающий пластины магнитопровода, 2 – короткозамыкающее кольцо, 3 – вал ротора, 4 – стержни «беличьей клетки», 5 – изоляция из фторопласта, 6 – магнитопровод, 7 – подшипники, 8 – статорная обмотка  
**Fig. 4.** Tested SCIM: a) rotor of the tested SCIM; б) tested SCIM assembly. 1 – dielectric fasteners tightening the magnetic circuit plates, 2 – end-ring, 3 – rotor shaft, 4 – «squirrel cage» rotor bar, 5 – temperature resistant insulation, 6 – magnetic core, 7 – bearings, 8 – stator winding



**Рис. 5.** Обрыв стержней ротора асинхронного двигателя – одного стержня, двух стержней  
**Fig. 5.** Breakage of the rotor bar of an induction motor – one rotor bar, two rotor bars



**Рис. 6.** Временные диаграммы установившихся процессов в статорных обмотках исследуемого АДКР:  $I_{1A}(n)$ ,  $I_{1B}(n)$ ,  $I_{1C}(n)$  – мгновенные значения измеренных фазных токов статора в дискретном времени ( $n$ ),  $I_{1M}(n)$  – временная диаграмма обобщающего модуля вектора тока статора в дискретном времени ( $n$ ),  $n$  – номер отсчета

**Fig. 6.** Diagrams of steady-state processes in the stator windings of the investigated SCIM:  $I_{1A}(n)$ ,  $I_{1B}(n)$ ,  $I_{1C}(n)$  – instantaneous values of the measured stator phase currents in discrete time ( $n$ ),  $I_{1M}(n)$  – time diagram of the resultant stator current vector in discrete time ( $n$ ),  $n$  – reference number

#### Метод обработки полученных сигналов

Ранее применительно к задачам диагностики обрыва стержней ротора в АДКР была теоретически обоснована необходимость анализировать токовые сигналы трех фаз статорной обмотки путем преобразования их в один временной ряд модуля результирующего вектора токов статора [18]:

$$I_{1M}(n) = \sqrt{I_{1A}^2(n) + I_{1B}^2(n) + I_{1C}^2(n)}, \quad (1)$$

где  $I_{1M}(n)$  – модуль результирующего вектора токов статора;  $I_{1A}(n)$  – ток статора фазы А;  $I_{1B}(n)$  – ток статора фазы В;  $I_{1C}(n)$  – ток статора фазы С;  $n$  – номер отсчета.

Отметим, что АДКР, как и любой электромеханический преобразователь, имеет электрическую и магнитную несимметрию, порождаемую неидеальностью производственных процессов при укладке обмоток в пазы магнитопровода, при производстве роторной цепи и неизбежным эксцентриситетом воздушного

зазора. При математическом моделировании данные обстоятельства не учитываются [18], а питание машины моделируется симметричным источником ЭДС, следовательно, теоретический модуль обобщающего вектора токов статора  $I_{1M}(n)$  будет постоянен во времени. При натурном эксперименте из-за отмеченных выше несимметричных воздействий на временную зависимость вектора  $I_{1M}(n)$  будут накладываться хаотические колебания малой амплитуды. На рис. 6 показаны мгновенные значения фазных токов статора АДКР и модуля обобщающего вектора токов статора (1). Приведенный фрагмент соответствует установившемуся режиму холостого хода при исправном состоянии ротора (рис. 4). Кривые  $I_{1A}(n)$ ,  $I_{1B}(n)$ ,  $I_{1C}(n)$  содержат признаки несимметрии питающего напряжения.

При отмеченных выше обстоятельствах натурного эксперимента, характерных и для реальных режимов эксплуатации, дальнейший анализ полученного экспериментально временного ряда  $I_{1M}(n)$  целесообразно

проводить с применением теоретических подходов регрессионного анализа.

Наиболее прост, с точки зрения вычислений, и пригоден для математического описания метод линейной регрессии общего вида, представляющий собой линейную комбинацию функций от параметров. Описываемая функция имеет вид:

$$Y(X) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n,$$

где  $\beta_{1...n}$  – базисные функции, задающие ее размерность;  $X_{1...n}$  – весовые коэффициенты, определяющие значимость этой функции. Весовые коэффициенты находятся по критерию минимума квадрата расстояний от исходного сигнала к его математической модели по методу наименьших квадратов.

Полученный от датчиков токов статора сигнал имеет дискретный вид и является периодическим, поэтому выбранная модель должна быть линейно независимой и характеризоваться отсутствием мультиколлинеарности, приводящей к неустойчивости оценок. Также необходимо описать экспериментальные данные, не привязывая функцию к узловым точкам, а оптимально приближая ее к ним, используя свойство компенсации ошибки квантования в определенных пределах, обусловленных разрядностью АЦП. Отметим, что, поскольку период дискретизации АЦП в данной работе составляет 10 кГц, при  $n=200$  продолжительность сигнала будет 0,02 секунды, что является одним периодом частоты сети 50 Гц.

Одним из главных вопросов при выполнении данного исследования является выбор функционального базиса, определяющего вид регрессии. В математическом аппарате регрессионного анализа имеются различные виды уравнений регрессии: полиномиальная, гребневая (ридж-регрессия), гиперболическая, экспо-

ненциальная, степенная, Байесовская, квантильная и многие другие [19]. Для корректного выбора базисных функций используемой модели аналитического описания исходного сигнала необходимо, чтобы описываемая функция и сам сигнал максимально совпадали по форме. Поскольку получаемые сигналы имеют периодический и гармонический характер, для решения поставленных задач наиболее подходящим представляется базис, состоящий из косинусо-синусных функций (Фурье-базис). Получаемая модель имеет вид:

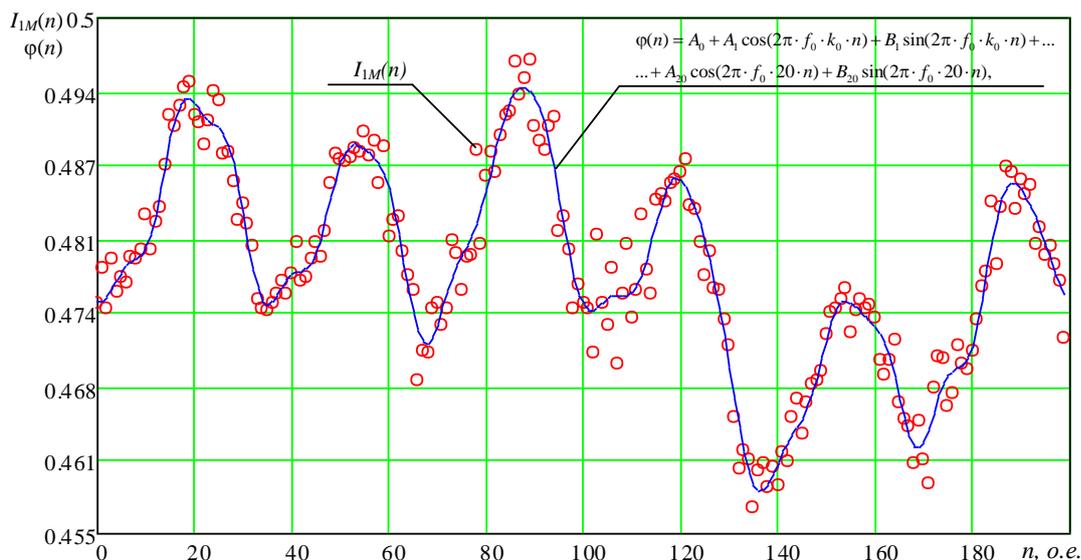
$$\varphi(x) = A_0 + A_1 \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot x) + B_1 \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_0 \cdot x) + \dots + A_n \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot k_n \cdot x) + B_n \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot k_n \cdot x),$$

где  $A, B$  – весовые коэффициенты при базисных функциях;  $f_0$  – базовая частота;  $k$  – параметр, регулирующий величину базиса.

Фурье-базис 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 [20].

Таким свойством аппроксимации экспериментальных данных обладает регрессионный анализ. Известно, что, в отличие от интерполяции, регрессия описывает исходные сигналы функцией, не накладывая ее на точки измерения. Полученная по 200 измерениям (1 период 50 Гц) модель и сами точки представлены на рис. 7.

Среди всего многообразия способов получения весовых коэффициентов был выбран оптимальный с точки зрения аппаратной реализации и точности метод наименьших квадратов.



**Рис. 7.**  $I_{1M}(n)$  – временная диаграмма модуля результирующего вектора тока статора, полученная по сигналам токов статора при исправном состоянии;  $\varphi(n)$  – временная диаграмма выходного сигнала настраиваемой регрессионной модели, построенная с размерностью базиса  $k=20$

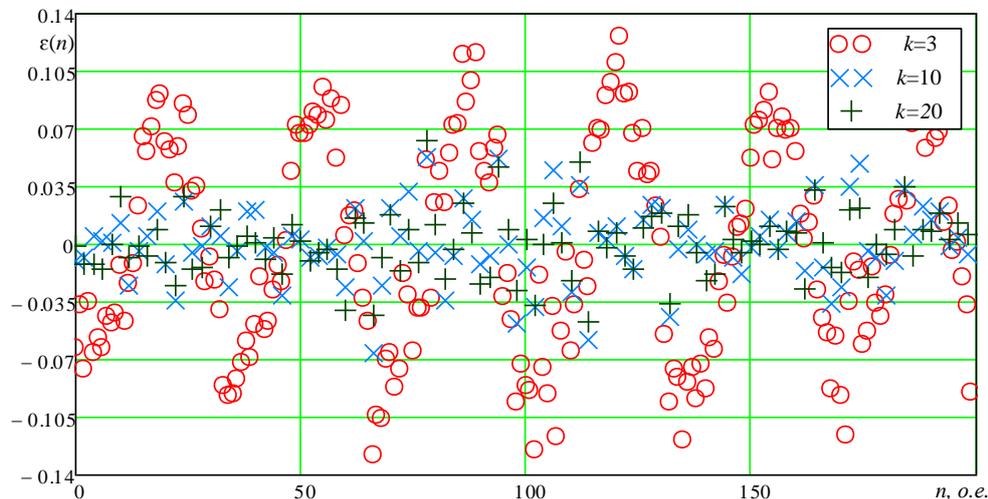
**Fig. 7.**  $I_{1M}(n)$  – time diagram of the module of the resulting stator current vector, obtained from experimental data on stator current signals when the stator currents are in healthy condition;  $\varphi(n)$  – time diagram of the output signal of a custom regression model constructed with a basis dimension  $k=20$

Такой способ описания экспериментальных данных позволяет регулировать точность описываемой функции путем прибавления и убавления составляющих базисного функционала. При этом ряд Фурье сходится к исходному экспериментальному сигналу по известной теории тригонометрических рядов при количестве гармоник, стремящихся к бесконечности. Это положительное свойство позволяет адаптировать математическую часть разраба-

тываемого метода к аппаратной части микропроцессорного контроллера, находя оптимальный баланс между точностью и вычислительными возможностями [21].

Оценить адекватность составленной модели можно визуально по регрессионным остаткам  $\varepsilon$ , представленным на рис. 8:

$$\varepsilon(n) = I_{IM}(n) - \varphi(n).$$



**Рис. 8.** Временные диаграммы регрессионных остатков  $\varepsilon(n)$  настраиваемой модели при различной размерности гармонического базиса (3, 10 и 20)

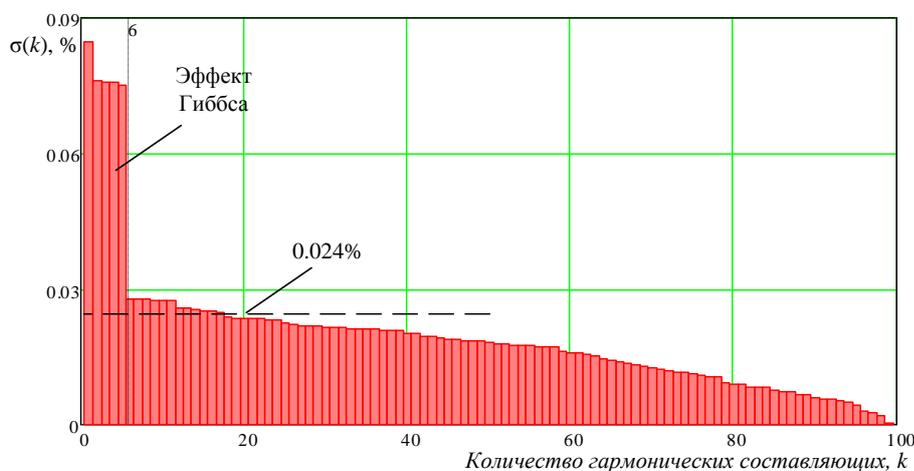
**Fig. 8.** Timing diagrams of the regression residuals  $\varepsilon(n)$  of the tuned model for different dimensions of the harmonic basis (3, 10 and 20)

Поскольку исследуемые сигналы порождаются одним и тем же объектом и являются достаточно однородными, становится оправданным применение в качестве критерия оценки адекватности модели одного из основных условий методов регрессионного анализа о том, что регрессионные остатки не коррелированы между собой и имеют постоянную дисперсию [22]. Такое обстоятельство позволяет использовать для решения поставленных задач наиболее простой и практичный метод визуального анализа, сводящийся к оценке

математического ожидания и дисперсии остатков. Дисперсия для выборки данных находится по:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}},$$

где  $S$  – разница между экспериментальным значением и описывающей функцией;  $N$  – количество точек выборки.



**Рис. 9.** Зависимость оценки дисперсии регрессионных остатков  $\sigma$  модели от размерности гармонического базиса настраиваемой модели,  $k$

**Fig. 9.** Dependence of the estimate of the variance of the regression residuals  $\sigma$  of the model on the dimension of the harmonic basis of the adjusted model,  $k$

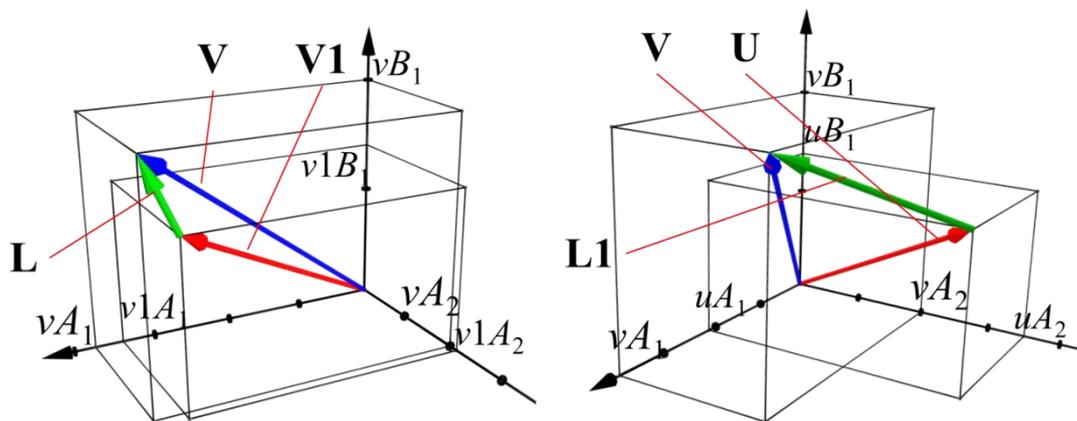
На рис. 9 показана зависимость дисперсии  $\sigma$  от количества гармонических составляющих используемого ортогонального базиса  $k$ , полученная путем обработки одних и тех же экспериментальных данных с разной точностью описывающей функции от 3 до 99 составляющих базиса.

Как видно из рис. 9, выбирать размерность базиса  $k$  ниже шести составляющих нецелесообразно, поскольку описываемый сигнал и получаемая модель имеют значительную гетероскедантность и высокий разброс. Это обусловлено искажениями сигнала, полученными в результате влияния эффекта Гиббса. Увеличение размерности базиса до 45  $k$  не приводит к значительному повышению качества описывающей функции и исчерпывает вычислительные ресурсы. При 18 и более гармонических составляющих преодолевается значение относительной погрешности 0,024 % для АЦП с разрешающей способностью 12 бит.

#### Получение диагностического признака

Как говорилось ранее, выбранный базисный функционал является ортогональным и обладает свойствами, которые дают возможность представлять весовые коэффициенты ( $A_{1...k}$  и  $B_{1...k}$ ) как координаты изображающего вектора в  $k$ -мерном ортогональном

гиперпространстве. В связи с этим положением полученные результаты можно представлять как векторы и проводить над ними действия по законам векторной алгебры и аналитической геометрии [23]. Сначала определяется изображающий вектор неповрежденного АДКР  $\mathbf{V}$  и изображающие векторы АДКР с повреждением 1, 2, 3 и 4 стержней, затем находится их модуль. Найдя вектор-разницу  $\mathbf{L}$  между изображающими векторами неповрежденного АДКР и с повреждением  $\mathbf{L1}=\mathbf{V}-\mathbf{U}$ ;  $\mathbf{L2}=\mathbf{V}-\mathbf{U2}$ ;  $\mathbf{L3}=\mathbf{V}-\mathbf{U3}$ ;  $\mathbf{L4}=\mathbf{V}-\mathbf{U4}$ , необходимо найти их длину, и она будет тем больше, чем больше повреждение ротора АДКР. В качестве примера демонстрации предлагаемых решений метода диагностирования на рис. 10 представлен трехмерный фрагмент  $k$ -мерного гиперпространства, на котором построен изображающий вектор исправного состояния АДКР  $\mathbf{V}[vA_1, vB_1, vA_2]$ , а также изображающий вектор исправного состояния АДКР  $\mathbf{V1}[v1A_1, v1B_1, v1A_2]$ , полученный по результатам анализа другой выборки этого же сигнала, в том же режиме работы. Изображающий вектор  $\mathbf{U}[uA_1, uB_1, uA_2]$  характеризует неисправное состояние роторной цепи АДКР, изображающие вектора  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{L1}$  – геометрическая разница изображающих векторов неповрежденного состояния ( $\mathbf{V}$ ) и исследуемого состояния ( $\mathbf{V1}, \mathbf{U}$ ).



**Рис. 10.** Семейство изображающих векторов, геометрически интерпретирующее выделение диагностического признака:  $\mathbf{V}$  – изображающий вектор для неповрежденного АДКР;  $\mathbf{V1}$  – изображающий вектор для неповрежденного АДКР, полученный при исследовании другого временного участка;  $\mathbf{U}$  – изображающий вектор для поврежденного АДКР;  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{L1}$  – вектор-разница для выделения диагностического признака

**Fig. 10.** Family of depicting vectors explaining the process of identifying a diagnostic feature:  $\mathbf{V}$  – depicting vector for undamaged SCIM;  $\mathbf{V1}$  – imaging vector for an intact SCIM obtained by examining another time section;  $\mathbf{U}$  – depicting vector for damaged SCIM;  $\mathbf{L}$  and  $\mathbf{L1}$  – vector-substraction for highlighting a diagnostic sign

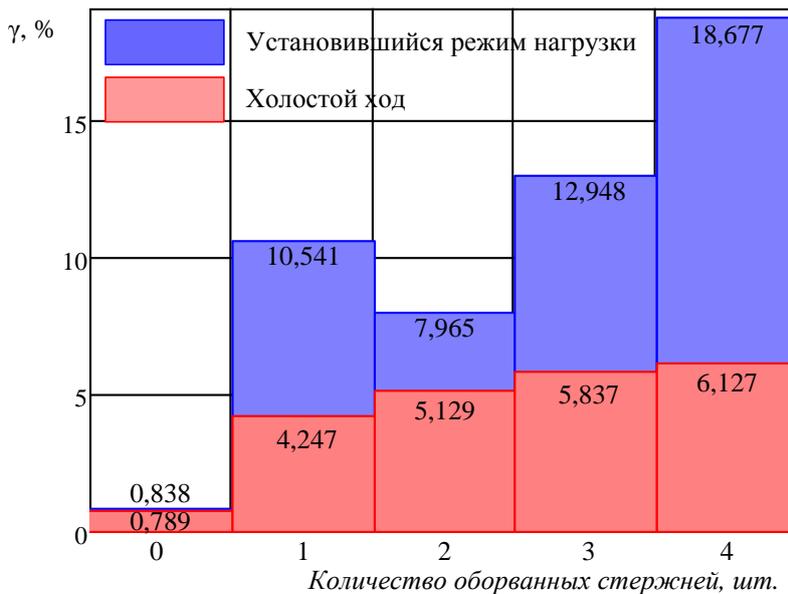
Выходной сигнал диагностической системы  $\gamma$  определяется как отношение модуля вектора-разницы к длине изображающего вектора неповрежденного состояния АДКР.

$$\gamma = \frac{|\mathbf{L}|}{|\mathbf{V}|} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $|\mathbf{L}|$  – модуль вектора-разницы между изображающими векторами неповрежденного и поврежденного состояния АДКР;  $|\mathbf{V}|$  – модуль изображающего вектора исследуемого состояния АДКР.

Результаты, полученные по (2) после построения всех векторов  $\mathbf{L}$  для каждого состояния (целый ротор, оборван 1, 2, 3, 4 стержня) АДКР, представлены на рис. 11 в виде гистограммы. При этом значение векторов  $\mathbf{L}$  для неповрежденного ротора определялось по двум разным временным участкам холостого хода АДКР.

Как видно из рис. 11, диагностический признак имеет зависимость от степени повреждения короткозамкнутой роторной цепи АДКР и с возрастанием количества оборванных стержней «беличьей клетки» возрастает его величина.



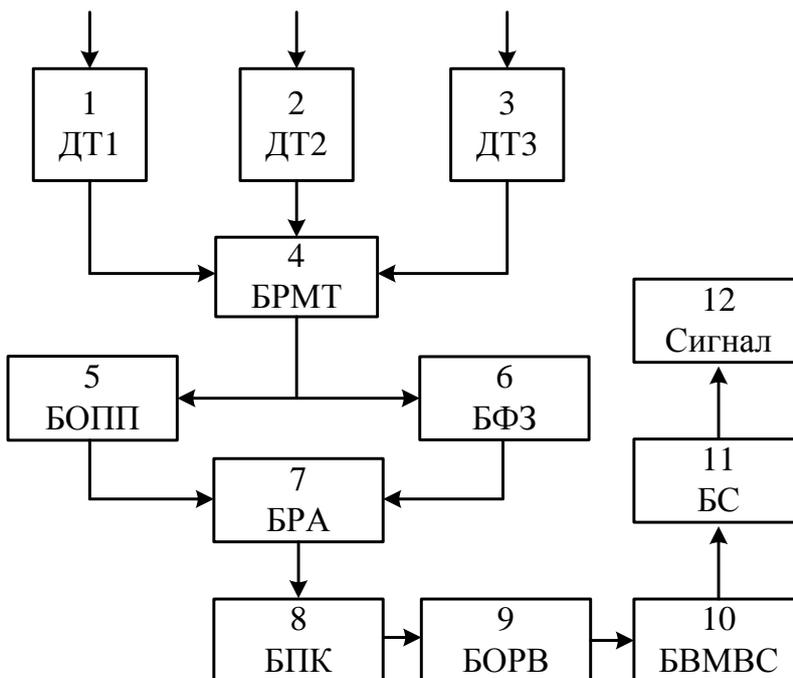
**Рис. 11.** Гистограмма зависимости выходного диагностического сигнала  $\gamma$  от количества оборванных стержней при работе АДКР на холостом ходу и при установившемся режиме под нагрузкой

**Fig. 11.** Histogram of the output diagnostic signal  $\gamma$  dependence on the number of broken rotor bars when the SCIM is idling and in steady state under load

Полученный в натурном эксперименте результат подтверждает теоретическое обоснование влияния обрыва стержня ротора на модуль результирующего вектора токов статора [18]. В дальнейшем предложенный подход может быть распространен на решение задач идентификации, моделирования и диагностики АДКР в других отраслях промышленности, например в нефтедобыче [24], а также при решении задач управления качеством электрической энергии в изолированных системах электроснабжения [25].

Здесь обрывы стержней ротора АДКР могут приводить к серьезным нарушениям технологического режима.

Разработанный метод диагностики обрыва стержней ротора применим на практике как в составе отдельного диагностического устройства, так и в качестве дополнения к штатным средствам автоматики, защиты и управления асинхронными двигателями, основанном на микропроцессорной элементной базе.



**Рис. 12.** Блок-схема устройства для диагностики состояния асинхронного двигателя

**Fig. 12.** Block diagram of a device for diagnosing induction motor conditions

### Устройство для диагностики обрыва стержней ротора

На основе разработанного метода предложено устройство диагностики обрыва стержней ротора АДКР, которое можно реализовать аппаратно при помощи стандартной элементной базы, используя встроенные в большинство программных языков операторы. Согласно описанному ранее алгоритму оцифрованные сигналы токов статора подвергаются анализу на основе линейной регрессии общего вида.

Способ определения обрыва стержня ротора асинхронного электродвигателя осуществлен с помощью устройства (рис. 12), содержащего датчики токов – 1 (ДТ1), 2 (ДТ2), 3 (ДТ3), которые подключены к фазам питания асинхронного электродвигателя. Выходы датчиков токов подключены к блоку вычисления результирующего модуля тока – 4 (БРМТ), к которому подключены блок отстройки от переходного процесса – 5 (БОПП) и блок формирования задержки – 6 (БФЗ), которые соединены с блоком регрессионного анализа – 7 (БРА). К блоку регрессионного анализа – 7 (БРА) последовательно подключены блок памяти коэффициентов – 8 (БПК), блок определения геометрической разницы векторов – 9 (БОРВ), блок выделения модуля вектора состояния – 10 (БВМВС), блок сравнения диагностических сигналов – 11 (БС) и устройство сигнализации – 12 (Сигнал) [26].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2017. – 152 с.
2. Собственные нужды тепловых электростанций / под ред. Ю.М. Голоднова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
3. Лавренов Е.О. Методы компенсации влияния электрической несимметрии на механический момент индукционного двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 72–78.
4. Зюзев А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 60–67. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1\(34\)-60-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67)
5. Новоселов Е.Н. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2018. – 234 с.
6. Hamza Sabir, Mohammed Ouassaid, Nabil Ngote. An experimental method for diagnostic of incipient broken rotor bar fault in induction machines // Heliyon. – 2022. – V. 8. – Issue 3. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09136>. (дата обращения 15.02.2022).
7. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM // ISA Transactions. – 2021. – V. 111. – P. 350–359. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.052>. (дата обращения 15.02.2022).
8. Rajvardhan Jigyasu, Vivek Shrivastava, Sachin Singh. Smart classifier based prognostics and health management of induction motor // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 43. – Part 1. – P. 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.677>. (дата обращения 15.02.2022).
9. Yunkai Wu, Bin Jiang, Yulong Wang. Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains // ISA Transactions. – 2020. – V. 99. – P. 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.09.020>. (дата обращения 15.02.2022).
10. Efficient feature extraction technique for diagnosing broken bars in three-phase induction machines / L.H.V. Liboni, R.A. Flauzino,

### Выводы

1. На основе известного принципа физического подобию для отладки диагностической системы разработана и создана экспериментальная установка, позволяющая проводить настройку диагностической системы, повышающую чувствительность, вплоть до распознавания обрыва одного стержня.
2. Предложен метод диагностики обрыва стержней ротора АДКР и устройство, основанное на выделении с помощью регрессионного анализа в гармоническом базисе диагностического признака из модуля результирующего вектора токов статора асинхронного двигателя в установившемся режиме работы.
3. Принцип формирования диагностического признака основан на выделении модуля разницы двух изображающих векторов, образованных в многомерном пространстве по координатам, которые являются весовыми коэффициентами при базисных функциях в неповрежденном и поврежденном состоянии ротора.
4. Определены максимальные и минимальные размерности регрессионной модели, согласованные с 12-ти разрядным АЦП в измерительном канале диагностической системы.

- I.N. da Silva, E.C.M. Costa // Measurement. – 2019. – V. 134. – P. 825–834. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.005>. (дата обращения 15.02.2022).
11. Detection and quantification of bar breakage harmonics evolutions in inverter-fed motors through the dragon transform / V. Fernandez-Cavero, J. Pons-Llinares, O. Duque-Perez, D. Morinigo-Sotelo // ISA Transactions. – 2021. – V. 109. – P. 352–367. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.020>. (дата обращения 15.02.2022).
12. Elimination of broken rotor bars false indications in induction machines / O. Guellout, A. Rezig, S. Touati, A. Djerdir // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. V. 167. – P. 250–266. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.06.010>.
13. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Dilated convolutional neural network based model for bearing faults and broken rotor bar detection in squirrel cage induction motors // Expert Systems with Applications. – 2022. – V. 191. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116290>. (дата обращения 15.02.2022).
14. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health monitoring of induction motors through embedded systems-simulation of broken rotor bar fault and abnormal gear teeth fault // Microprocessors and Microsystems. – 2020. – V. 76. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077>. (дата обращения 15.02.2022).
15. Ying Xie, Peng Chen, Fei Li, Haisong Liu. Electromagnetic forces signature and vibration characteristic for diagnosis broken bars in squirrel cage induction motors // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – V. 123. – P. 554–572. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.030>. (дата обращения 15.02.2022).
16. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
17. 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.

18. Математическая модель асинхронного двигателя в мультифазной системе координат при несимметрии роторных цепей / А.С. Глазырин, В.И. Полищук, В.В. Тимошкин, Д.М. Баннов, Ю.Н. Исаев, Д.И. Антяскин, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, С.В. Ланграф, Д.А. Котин, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 213–227. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3404> (дата обращения 15.02.2022).
19. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 813 с.
20. 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.
21. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Пер. с англ. изд. 2-е. – М.: Изд-во «БИНОМ», 2015. – 704 с.
22. Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 212 с.
23. Бортаковский А.С., Пантелеев А.В. Аналитическая геометрия в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 2005. – 496 с.
24. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний / С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 204–214. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3013> (дата обращения 15.02.2022).
25. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes / V.Z. Kovalev, O.V. Arhipova, S.S. Esin, A.A. Tatevosyan, A.G. Scherbakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1260. – Iss. 5. – P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014> (дата обращения 15.02.2022).
26. Устройство для диагностики состояния асинхронного электродвигателя: пат. 2763849 Рос. Федерация. № 2021114881; заявл. 26.05.2021; опубл. 11.01.2022, Бюл. № 2.

*Поступила 16.05.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Баннов Д.М.**, инженер кафедры электрических станций Электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

UDC 621.313.04

## METHOD OF DIAGNOSING BROKEN ROTOR BARS OF INDUCTION MOTORS BASED ON REGRESSION ANALYSIS OF THE STATOR CURRENT RESULTANT VECTOR MODULE

Dmitriy M. Bannov,  
bannov.dm@samgtu.ru

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

**The relevance** of the research is conditioned by great dependence of uninterrupted operation of critical mechanisms driven by high-voltage induction motor, providing operation of oil and gas and chemical industry, metallurgy, electric power industry and other strategically important branches of the country. The issue of reliability of continuous operation is particularly acute in the operation of thermal power plants. Almost all electric drives of critical auxiliary mechanisms of thermal power plants are based on powerful high-voltage induction motors with squirrel-cage rotor. As a rule, specifics of operation of these motors are severe conditions of starting under load at increased temperatures and environmental pollution. Emergency stops of induction motors together with the responsible mechanisms at thermal power plants eventually cause power unit shutdown or lead to under-release of electricity and revision of the operating mode of the power system. Despite such consequences, in particular from damage to the short-circuited rotor winding of a high-voltage induction motor, a protection with sensitivity capable of detecting this defect has not yet been developed or introduced. Damage of rotor circuit has latent character, can exist for a long enough time, not critically affecting the operation of the machine, nevertheless, the fact of presence of breakage can be considered as an emergency condition of the machine in complex with the mechanism. According to the data of repairs and revisions of high-voltage induction motors, there are cases when up to 30 % of bars of the whole rotor were damaged simultaneously. When the integrity of the connection between the bar and the short-circuiting ring is broken, its deformation can occur only in the direction of the air gap, irreversibly damaging the active part of the stator. Operation of inductions motor with a broken core is accompanied by a number of additional negative side effects, such as increased power consumption, general reduction of machine performance and efficiency, generation of additional heat, increased wear of bearings. In case of diagnosing a short-circuited winding defect at an early stage of its development, it is possible to repair the rotor by the company itself. Early diagnosis of rotor core breaks of high-voltage auxiliary motors of thermal power plants is a difficult and at the same time extremely relevant purpose.

**The main aim** of the research is the development and experimental testing of a method for diagnosing broken rotor bar in a high-voltage induction motor based on mathematical processing of signals from stator current sensors.

**Methods:** theory of electrical machines, methods of digital signal processing, statistical methods of data processing, methods of approximation of experimental data, method of regression analysis. Presented studies were carried out on the experimental workbench, specially created for the purpose of diagnostics of broken rotor bars.

**Results.** The paper introduces the method of diagnostics of broken rotor bars based on approximation of stator current signals. The criterion of rotor circuit damageability was revealed and the dependence of this criterion on the degree of damage to the «squirrel cage» of an induction motor was obtained.

### Key words:

Reliability of electric drive, auxiliary needs of a power plant, induction motor, «squirrel cage», broken rotor bar, diagnostics, regression analysis.

### REFERENCES

- Safin N.R. *Sovershenstvovanie metodiki tokovoy diagnostiki asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom*. Dis. Kand. nauk [Improvement of current diagnostics methods for induction motors with squirrel-cage rotor. Cand. Diss.]. Ekaterinburg, 2017. 152 p.
- Sobstvennye nuzhdy teplovykh elektrostantsy* [Auxiliary supplies of thermal power plants]. Ed. by Yu.M. Golodnov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 272 p.
- Lavrenov E.O. Compensation methods of electrical asymmetry effect on induction motor moment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 72–78. In Rus.
- Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Analytical method for evaluation of high-voltage induction motor rotor winding heating at start-up mode. *Electrotechnical systems and complexes*, 2017, no. 1 (34), pp. 60–67. In Rus. DOI: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1\(34\)-60-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67).
- Novoselov E.N. *Razrabotka metoda funktsionalnoy diagnostiki obmotki rotora asinkhronnykh elektrodvigateley sobstvennykh nuzhd elektrostantsy po vneshnemu magnitnomu polyu*. Dis. Kand. nauk [Development of the method of functional diagnostics of rotor winding of induction electric auxiliary motors of power plants by external magnetic field. Cand. Diss.]. Ivanovo, 2018. 234 p.
- Hamza Sabir, Mohammed Ouassaid, Nabil Ngote. An experimental method for diagnostic of incipient broken rotor bar fault in induction machines. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09136> (accessed 15 February 2022).
- Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Deep convolutional neural network based on adaptive gradient optimizer for fault detection in SCIM. *ISA Transactions*, 2021, vol. 111, pp. 350–359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.052> (accessed 15 February 2022).
- Rajvardhan Jigyasu, Vivek Shrivastava, Sachin Singh. Smart classifier based prognostics and health management of induction motor. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 43, P. 1, pp. 355–361. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.677> (accessed 15 February 2022).
- Yunkai Wu, Bin Jiang, Yulong Wang. Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains. *ISA Transactions*, 2020, vol. 99, pp. 488–495. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.09.020> (accessed 15 February 2022).
- Liboni L.H.B., Flauzino R.A., Nunes da Silva I., Marques Costa E.C. Efficient feature extraction technique for diagnosing broken bars in three-phase induction machines. *Measurement*, 2019, vol. 134, pp. 825–834. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.005> (accessed 15 February 2022).
- Fernandez-Cavero V., Pons-Llinares J., Duque-Perez O., Morinigo-Sotelo D. Detection and quantification of bar breakage harmonics evolutions in inverter-fed motors through the dragon transform. *ISA Transactions*, 2021, vol. 109, pp. 352–367. Available at:

- <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.10.020> (accessed 15 February 2022).
12. Guellout O., Rezig A., Touati S., Djerdir A. Elimination of broken rotor bars false indications in induction machines. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, pp. 250–266. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.06.010> (accessed 15 February 2022).
  13. Prashant Kumar, Ananda Shankar Hati. Dilated convolutional neural network based model for bearing faults and broken rotor bar detection in squirrel cage induction motors. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 191, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116290> (accessed 15 February 2022).
  14. Priyanka Gandhi, Dr Neelam Turk, Dr Ratna Dahiya. Health monitoring of induction motors through embedded systems-simulation of broken rotor bar fault and abnormal gear teeth fault. *Microprocessors and Microsystems*, 2020, vol. 76, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103077> (accessed 15 February 2022).
  15. Ying Xie, Peng Chen, Fei Li, Haisong Liu. Electromagnetic forces signature and vibration characteristic for diagnosis broken bars in squirrel cage induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 123, pp. 554–572. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.030> (accessed 15 February 2022).
  16. GOST ISO 20958-2015. *Kontrol sostoyaniya i diagnostika mashin. Signaturny analiz elektricheskikh signalov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya* [Condition monitoring and diagnostics of machines. Signature analysis of electrical signals of a three-phase induction motor]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 28 p.
  17. GOST IEC/TS 60034-24-2015. *Mashiny elektricheskies vrashchayushchiesya. Ch. 24. Onlaynovoe obnaruzhenie i diagnostika potentsialnykh otkazov aktivnykh detaley vrashchayushchikhsya elektromashin i detaley s podshipnikovym tokom. Rukovodstvo po primeneniyu* [Rotating electrical machines. P. 24. Online detection and diagnosis of potential failures of active parts of rotating electrical machines and parts with bearing current. Application guide]. Moscow, StandardInform Publ., 2017. 16 p.
  18. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V., Bannov D.M., Isaev Yu.N., Antyaskin D.I., Kladiyev S.N., Filipas A.A., Langraf S.V., Kotin D.A., Kovalev V.Z. Modelling of induction motor in multi-phase coordinate system for asymmetry rotor cage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 213–227. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3404> (accessed 15 February 2022).
  19. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012. 813 p.
  20. Dedus F.F., Kulikova L.I., Pankratov A.N., Tetuev R.K. *Klasicheskie ortogonalnye bazisy v zadachakh analiticheskogo opisaniya i obrabotki informatsionnykh signalov* [Classical orthogonal basics in the problems of analytical description and processing of information signals]. Moscow, M.V. Lomonosov MGU Publ., 2004. 141 p.
  21. Horovic P., Hill U. *Iskusstvo skhemitotekhniki* [Art of circuitry]. 2<sup>nd</sup> ed. Translated from English. Moscow, BINOM Publ., 2015. 704 p.
  22. Vadutov O.S. *Matematicheskie osnovy obrabotki signalov* [Mathematical Fundamentals of signal processing]. Tomsk, Tomsk polytechnic university Publ. house, 2011. 212 p.
  23. Bortakovskiy A.S., Panteleev A.V. *Analiticheskaya geometriya v primerakh i zadachakh* [Analytic geometry in examples and tasks]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 496 p.
  24. Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiyev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N. Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 204–214. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3013> (accessed 15 February 2022).
  25. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Esin S.S., Tatevosyan A.A., Scherbakov A.G. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electro-technical complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260, Iss. 5, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/5/052014> (accessed 15 February 2022).
  26. Glazyrin A.S., Nabunskiy I.A., Bannov D.M., Antyaskin D.I., Bunkov D.S., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kladiyev S.N., Polishchuk V.I. *Ustroystvo dlya diagnostiki sostoyaniya asinkhronnogo elektrodvigateleya* [Device for diagnostics of induction electric motor condition]. Patent RF, no. 2763849, 2022.

Received: 16 May 2022.

#### Information about the authors

**Dmitriy M. Bannov**, engineer, Samara State Technical University.