

Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра

А.Э. Бирюков¹✉, Д.Г. Сорокин¹, Н.В. Лысов², М.С. Ситников¹

¹ООО «Синара Алгоритм», г. Москва, Российская Федерация

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉BirukovAE@sinara-group.com

Резюме

В статье рассмотрен диагностический алгоритм для анализа технического состояния асинхронного электродвигателя на основе сигналов потребляемого линейного тока. Цель разработки данного алгоритма – своевременное выявление дефектов асинхронных электродвигателей в режиме их эксплуатации. Проведен литературный обзор по статистике наиболее распространенных неисправностей и методам их диагностики. Среди неисправностей выделяются: обрыв фазы, межвитковое замыкание, замыкание фазы на корпус, дефект ротора и эксцентриситет ротора. Недостатки существующих подходов, основанных на стендовых испытаниях, могут привести к несвоевременной диагностике и, следовательно, развитию нарушений до критического уровня и повреждению смежных с электродвигателем узлов. В связи с этим требуется производить диагностику в режиме эксплуатации, что позволит вовремя предупредить развитие дефектов асинхронного электродвигателя. Методы диагностики можно разделить на четыре типа: анализ тока во временной области, анализ тока при помощи нейронных сетей, анализ тока в частотной области и анализ годографа обобщенного вектора тока. Для разработанного алгоритма были выбраны последние две методики. Они позволяют надежно классифицировать конкретные типы неисправностей, а параллельное их использование повышает робастность системы. Для тестирования работы алгоритма был изготовлен испытательный стенд, а также искусственно воссозданы следующие неисправности: межвитковое замыкание и дефект ротора. После испытаний на стенде и настройки чувствительности срабатывания, алгоритм проходит тестирование на трех электродвигателях реального электропоезда. Данный алгоритм приспособлен для диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, с типом соединения «звезда». Однако в будущем планируется масштабировать его на двигатели с фазным ротором и двигатели, соединенные «треугольником».

Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, диагностика технического состояния, межвитковое замыкание, дефект ротора, годограф тока, спектральный анализ тока

Для цитирования

Диагностический алгоритм анализа тока асинхронных электродвигателей, основанный на методиках оценки годографа и частотного спектра / А.Э. Бирюков, Д.Г. Сорокин, Н.В. Лысов, М.С. Ситников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 88–101. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101.

Информация о статье

поступила в редакцию: 21.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 04.12.2023 г.; принята к публикации: 05.12.2023 г.

Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra

A.E. Biryukov¹✉, D.G. Sorokin¹, N.V. Lysov², M.S. Sitnikov¹

¹LTD «Sinara Algorithm», Moscow, the Russian Federation

²Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉BirukovAE@sinara-group.com

Abstract

The article considers a diagnostic algorithm for analyzing the technical condition of an asynchronous electric motor based on the signals of the consumed linear current. The purpose of the development of this algorithm is the timely detection of defects of asynchronous electric motors in their operation mode. A literature review on the statistics of the most common malfunctions and methods of their diagnosis is carried out. These include phase breakage, inter-turn closure, phase closure to the core, rotor defect and rotor eccentricity. The disadvantages of existing approaches based on bench tests can lead to untimely diagnosis and, consequently, the development of a malfunction to a critical level and damage to the nodes adjacent to the electric motor. In this re-

gard, diagnostics in operation mode is required, which will prevent beforehand the development of defects in the asynchronous electric motor. Diagnostic methods can be divided into four types: time domain current analysis, neural network current analysis, frequency domain current analysis, and generalized current vector hodograph analysis. The last two methods were chosen for the developed algorithm. They allow you to reliably classify specific types of faults, and the parallel use of the both increases the robustness of the system. To test the operation of the algorithm, a test bench was made, as well as the following malfunctions were artificially recreated: inter-turn locking and a rotor defect. After testing on the stand and setting the response sensitivity, the algorithm is tested on three electric motors of a real electric train. This algorithm is adapted for the diagnosis of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor and the «star» type connection. However, in the future it is planned to scale it on motors with a phase rotor and motors with a «triangle» connection.

Keywords

induction machine, diagnosis of technical condition, turn-to-turn short circuit, rotor defect, hodograph of current, spectral current analysis

For citation

Biryukov A.E., Sorokin D.G., Lysov N.V., Sitnikov M.S. Diagnosticheskiy algoritm analiza toka asinkhronnykh ehlektrodvigateli, osnovannyi na metodikakh otsenki godografa i chastotnogo spektra [Diagnostic algorithm for analysis of induction motors current based on a hodograph estimation of the generalized current vector and frequency spectra]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 88–101. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).88-101.

Article info

Received: October 21, 2023; Revised: December 4, 2023; Accepted: December 5, 2023.

Введение

Объектом исследования статьи является асинхронный электродвигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Он получил широкое распространение в отрасли железнодорожной техники благодаря своим характеристикам [1–3]. К его основным достоинствам относятся:

- достижение номинальной мощности на широком диапазоне скоростей;
- высокое отношение мощности к габаритам электродвигателя;
- низкое содержание дорогостоящих и экологически вредных материалов;
- относительно низкая стоимость сервисного обслуживания [1].

Также данный тип электродвигателей отличается высокой надежностью. Это обусловлено отсутствием механического контакта между статором и ротором, что исключает трение.

АД используются в составе тяговых приводов электропоездов, электромобилей [4, 5], в качестве генераторов на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях [2, 6] и в другой технике. Ее работоспособность зависит от технического состояния входящего в нее оборудования, включая АД. В эксплуатации они неизбежно выходят из строя и могут ремонтироваться несколько раз в течение своего срока службы. В связи с этим требуется регулярно проводить процедуры технической диагностики. В большинстве случаев для этого используются спе-

циальные стенды, на которые устанавливается двигатель и тестируется в различных режимах с применением датчиков тока, напряжения, температуры, оборотов двигателя и момента. Несмотря на комплексный анализ, данный подход имеет существенные недостатки: остановка оборудования, необходимость переноса двигателя на стенд, а также редкая периодичность процедуры, выполняемая согласно руководству по эксплуатации. Последний недостаток может привести к развитию неисправности до критического уровня и повреждению смежных с электродвигателем узлов. Задача своевременной диагностики электродвигателей в режиме эксплуатации и недопущения развития отказов на данный момент остро стоит в транспортной промышленности. Поэтому в данной работе поставлена цель – разработка алгоритма анализа токов для своевременного обнаружения наиболее распространенных неисправностей АД, работоспособного в эксплуатационном режиме диагностируемого оборудования.

Конструкция асинхронного электродвигателя

Для понимания причин развития дефектов и методов их диагностики, требуется знать конструкцию АД. Двигатель с короткозамкнутым ротором состоит из трех основных частей (рис. 1): неподвижного статора с трехфазной обмоткой 1, вращающегося ротора с короткозамкнутой обмоткой 2 и станины 3, выполня-

ющей только конструктивные функции [6]. Между статором и ротором находится воздушный зазор, через который осуществляется электромагнитное взаимодействие.

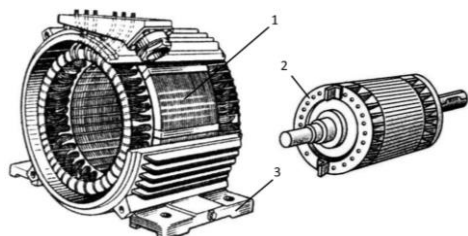


Рис. 1. Конструкция асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – станина

Fig. 1. Structure of an induction squirrel-cage rotor:

1 – stator; 2 – rotor; 3 – bedplate

Статором также иногда называют всю неподвижную часть, в которую входят сердечник, набранный из листов электротехнической стали, статорной обмотки и станины (рис. 2).

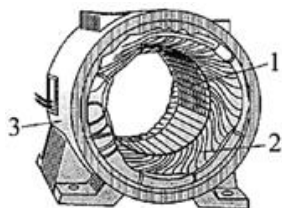


Рис. 2. Конструкция статора:

1 – сердечник; 2 – обмотка; 3 – станина

Fig. 2. Structure of the stator:

1 – core; 2 – winding; 3 – bedplate

В свою очередь сердечник ротора также собран из листов электротехнической стали, в который укладываются стержни, ограниченные с торцов кольцами ротора (рис. 3). Отсюда и происходит название «короткозамкнутый ротор», поскольку стержни замкнуты накоротко.

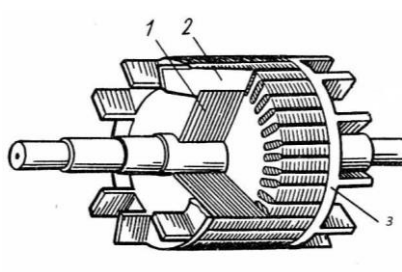


Рис. 3. Конструкция ротора:

1 – сердечник; 2 – стержни; 3 – кольца

Fig. 3. Structure of the rotor:

1 – core; 2 – bars; 3 – rings

Обмотка статора подключается к трехфазному источнику напряжения для создания вращающегося магнитного поля. Изменение магнитного потока через контуры, образованные стержнями ротора, возбуждает в них электродвижущую силу (ЭДС) согласно закону об электромагнитной индукции Фарадея. На рис. 4 представлено характерное распределение магнитного поля в плоскости разреза АД. Темный синий цвет обозначает участки с максимальной магнитной индукцией, оранжево-желтый цвет – участки с максимальной плотностью тока. Количество полюсов зависит от типа подключения обмотки и влияет на скорость вращения поля. Его можно рассчитать по формуле:

$$n_s = 60f_1 / 2p,$$

где n_s – скорость вращения поля статора; f_1 – частота питающего напряжения; $2p$ – количество пар полюсов.

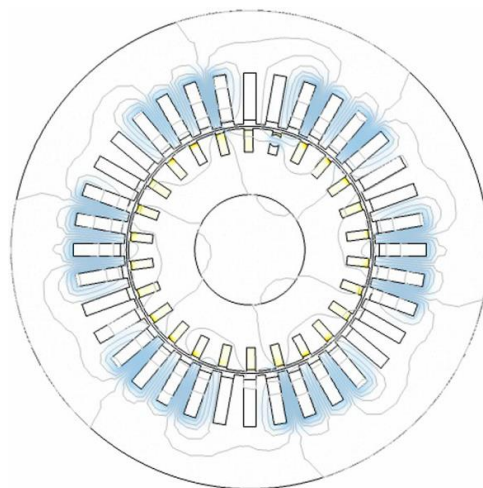


Рис. 4. Распределение магнитного поля внутри асинхронного двигателя

Fig. 4. Distribution of a magnetic field inside the asynchronous motor

Возникающая ЭДС возбуждает ток в стержнях ротора, на который действует сила Ампера со стороны магнитного поля статора. Это приводит ротор во вращение с собственной частотой n_r . Частота вращения ротора не может совпадать с частотой вращения поля статора в установившемся режиме. Разность между ними определяется частотой скольжения n_{slip} . Скольжение также может иметь безразмерный вид и вычисляться по формуле:

$$s = 100\% \cdot (n_s - n_r) / n_s.$$

При разгоне скольжение имеет положи-

тельное значение, а при торможении – отрицательное. Таким образом, изменение потока через стержни ротора происходит с частотой скольжения. Из-за малой индуктивности ротора его ток также имеет частоту скольжения. Причина, по которой ротор отстает от поля статора, проста: при совпадении их скоростей вращения, скольжение снизилось бы до нуля и перестал возбуждаться ток в стержнях ротора. В то же время ротор имеет собственное электромагнитное поле, скорость вращения которого совпадает с n_s , а его вектор направлен перпендикулярно полю статора.

Дефекты асинхронных электродвигателей

Точной статистической информации по неисправностям АД нет. Эти данные в большинстве случаев являются конфиденциальными и составляют коммерческую тайну эксплуатирующей организации. Тем не менее несколько исследований было проведено с целью определения приближенного значения [7, 8]. Результаты работы [7] приведены на рис. 5.



Рис. 5. Статистические данные по неисправностям асинхронных двигателей

Fig. 5. Statistical data on malfunctions of asynchronous motor

Видно, что большинство неисправностей относятся к повреждению подшипников и элементов статора. Поскольку для диагностики подшипников преимущественно используется вибродиагностика, в данной работе их неисправности будут рассмотрены кратко. Более подробную информацию по контролю их технического состояния можно найти в [9, 10]. Часть неисправностей электродвигателей можно условно отнести к критическим, а другие – к некритическим. Первый случай приводит к затратам на ремонт и простоя оборудования;

второй случай не менее серьезен, поскольку последующий плановый ремонт электродвигателя удорожается, а также значительно сокращается срок его службы.

Анализ литературы показал, что среди остальных неисправностей в основном выделяют: обрыв фазы, межвитковое замыкание [9, 11–16], замыкание фазы на корпус, дефект ротора [9, 12–14, 16] и эксцентриситет ротора [17, 18]. Также в [19] приведены подробные методы по контролю изоляции. Снижение сопротивления изоляции приводит к межвитковым замыканиям, а в предельном случае – к короткому замыканию одной из фаз АД на корпус. Это естественный процесс деградации изоляции при отсутствии корректирующих мероприятий. Нарушение температурного режима АД значительно ускоряет этот процесс.

При обрыве фазы нагрузка увеличивается на неповрежденные обмотки двигателя, что показано на рис. 6.



Рис. 6. Обрыв фазы
Fig. 6. Phase loss

При межвитковом замыкании активное сопротивление обмотки и ее индуктивность изменяются в небольших пределах (рис. 7). Это может долго оставаться скрытым, поскольку не приводит к явным изменениям в работе АД. Однако протекающий в месте замыкания ток со временем разрушает изоляцию и соседних проводов, что может привести к более серьезным последствиям. Межвитковые замыкания могут быть определены при помощи измерения межфазных сопротивлений. В случае повреждения одной обмотки измерительное оборудование покажет одно сниженное межфазное сопротивление при подключении «треугольником», и два сниженных при подключении «звездой».

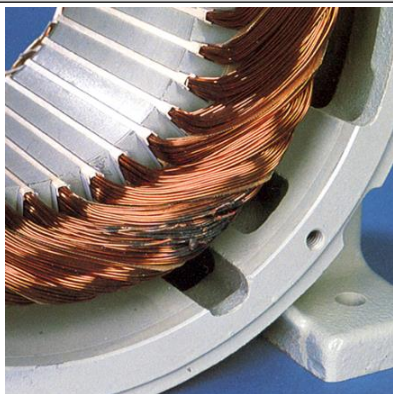


Рис. 7. Межвитковое замыкание
Fig. 7. Turn-to-turn short circuit

При замыкании фазы на корпус значительно снижается индуктивность и сопротивление одной из обмоток. При этом сумма токов, питающих двигатель (линейных токов), перестает быть близкой к нулю. Резко возрастающий при этом ток повреждает изоляцию и сами провода, что требует замены обмотки (рис. 8).

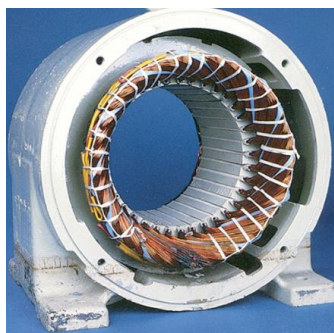


Рис. 8. Замыкание фазы на землю
Fig. 8. Phase-to-ground short circuit

Под дефектом ротора понимается повреждение его стержней. Во время протекания то-

ка они расширяются вследствие нагрева, а после отключения двигателя сжимаются. Подобные циклические нагрузки приводят к излому стержня. Как правило, это происходит во время старта движения, когда стержни еще не нагрелись, и по ним протекает максимальный ток. Под эксцентриситетом ротора понимается смещение оси его вращения. Это приводит к неоднородности магнитного поля в зазоре. Эксцентриситет дополнительно классифицируется на три типа: статический, динамический и смешанный (см. рис. 9).

Существующие методы диагностики технического состояния АД по статорному току можно разделить на четыре типа: анализ тока во временной области, анализ тока в частотной области, анализ годографа обобщенного вектора тока и анализ тока при помощи нейронных сетей.

Нейронные сети находят скрытые признаки изменения статорного тока, поэтому могут быть использованы для определения неочевидных неисправностей. Однако это требует использования большого объема данных для обучения алгоритма. К тому же на данный момент лучше себя показали методы прямого анализа, имеющие под собой конкретное теоретическое обоснование. Возможно, по мере накопления базы признаков конкретных отказов, нейросетевые методы получат большее распространение.

В данной работе будут рассмотрены «прямые» методы диагностики АД. Классическая схема экспериментального стенда приведена на рис. 10. В нее входят датчики линейного тока, потребляемого АД, а также датчик оборотов ротора, о необходимости которого будет сказано позже. Сигналы с датчиков приходят на алгоритмический блок, который осу-

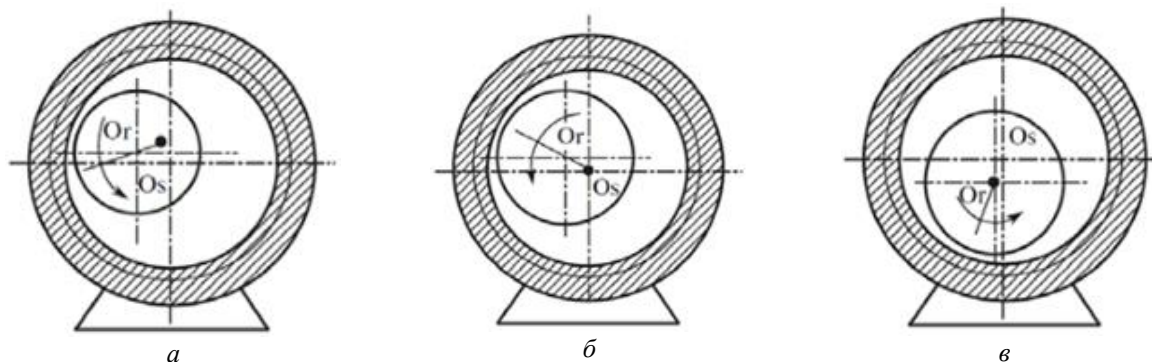


Рис. 9. Виды эксцентриситета ротора:
a – статический; *b* – динамический; *c* – смешанный

Fig. 9. Types of rotor's eccentricity:
a – static; *b* – dynamic; *c* – mixed

ществляет дискретизацию и анализ.

Как правило, анализ тока во временной области используется для нахождения явных отклонений. Например, при обрыве фазы или замыкании фазы на корпус, фазный ток значительно изменяет свою амплитуду по отношению к другим. Это возможно оценить даже по графику на осциллографе. Неисправности обмотки статора связаны с конкретной фазой, поэтому удобно анализировать электродвигатель, соединенный по типу «звезда», поскольку в нем линейный ток равен фазному. В случае соединения обмоток «треугольником», например, при обрыве одной из фаз линейный ток не будет близким нулю. Тем не менее диагностика АД, соединенного «треугольником» также возможна, хотя и требует учета распределения тока между обмотками.

Наиболее надежными методами считаются анализ линейного тока в частотной области и анализ годографа его обобщенного вектора. В составе транспортных средств, тяговый асинхронный электродвигатель питается, как правило, от частотного регулятора. Он осуществляет регулирование скорости вращения АД в широком диапазоне за счет векторного управления. При этом на вход АД подается широтно-импульсно модулированное (ШИМ) напряжение. Это отражается на частотном спектре тока, в котором появляются более выраженные гармоники основной частоты и пики, связанные с частотами ШИМ. Характерный спектр тока АД при питании от автономного инвертора напряжения (АИН) приведен на рис. 11.

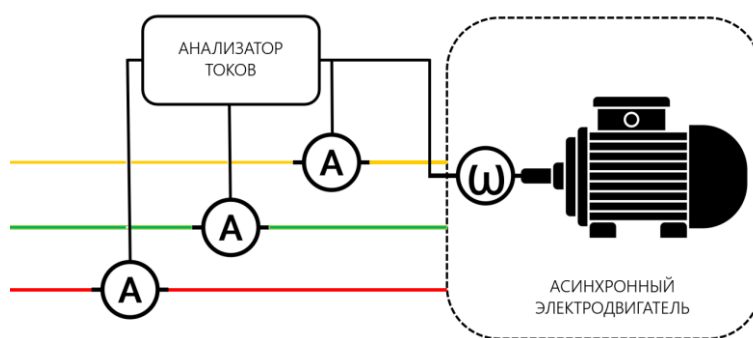


Рис. 10. Классическая схема испытательного стенда
Fig. 10. Typical scheme of a testing bench

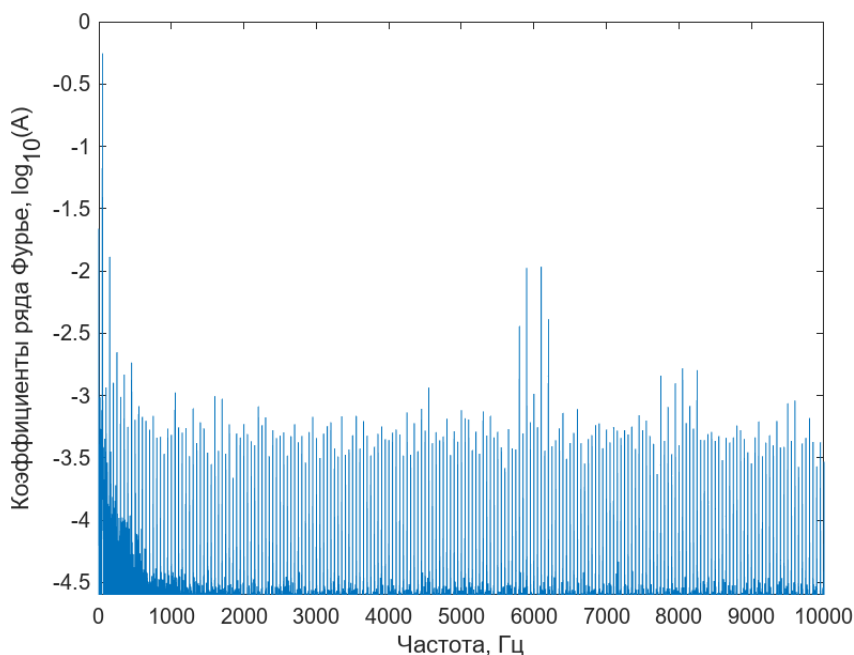


Рис. 11. Характерный спектр тока при питании от автономного инвертора напряжений
Fig. 11. Typical current spectrum when powered by an autonomous voltage inverter

Наибольший пик соответствует основной частоте напряжения f_1 . В спектре также присутствуют кратные гармоники ($2f_1, 3f_1, \dots$); комбинационные частоты, обусловленные выпрямленным напряжением и пульсациями тока инвертора; высокие частоты ШИМ инвертора; пазовые гармоники (рис. 12), определяемые по формуле:

$$f_{\text{паз}} = f_1 \left(N_R \frac{(1-s)}{2p} \pm k \right),$$

где $k = 1, 3, 5 \dots$ – порядок гармоник (в основном, $k = 1$); N_R – число пазов ротора и др. Более подробный анализ спектрального состава тока и напряжения на выходе преобразователя частоты приведен в [20].

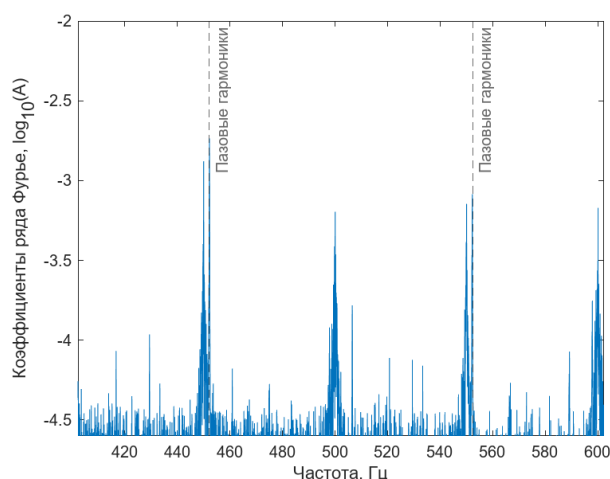


Рис. 12. Пазовые гармоники статорного тока асинхронного двигателя

Fig. 12. Groove harmonics of asynchronous motor stator current

Их наличие в спектре сигнала связано со следующим физическим процессом. Магнитный поток протекает через магнитопровод статора сквозь воздушный зазор между ротором и статором, далее через магнитопровод ротора и возвращается через зазор обратно в статор. Из-за того, что воздух и материал сердечника ротора имеют разные магнитные проницаемости, сопротивление магнитному потоку в зазоре является неоднородным. Оно изменяется при прохождении пазов ротора над пазами статора, что ведет к модуляции главной гармоники тока с частотой $f_{\text{паз}}$, зависящей от количества пазов ротора [12].

Более наглядное понятие о пазовых гармониках можно получить при помощи математического моделирования. Для идеализированного двигателя без повреждений, питаемого синусоидальным напряжением, спектр тока будет выглядеть как на рис. 13.

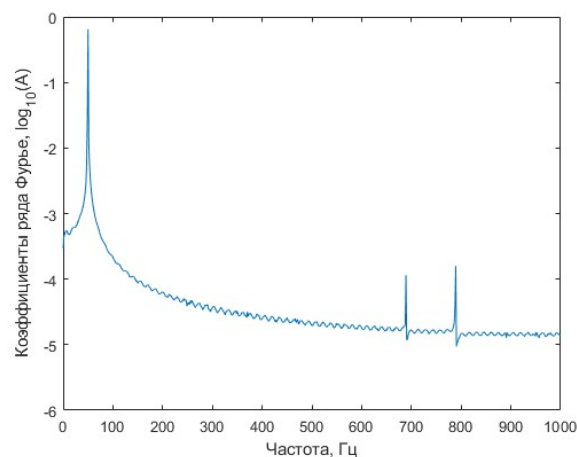


Рис. 13. Спектр идеализированного двигателя

Fig. 13. Frequency spectrum of an idealized motor

Таблица 1. Формулы для расчета частот, соответствующих дефектам

Table 1. Equations for calculation of frequencies in accordance to the defects

Название дефекта Defect name	Формула частот Frequency formula
Дефект ротора Rotor defect	$f_{\text{ротор}} = f_1(1 \pm 2ks)$
Межвитковое замыкание Turn-to-turn short circuit	$f_{\text{МВЗ}} = f_1[k \pm n/p \cdot (1-s)]$
Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity	$f_{\text{экс}} = f_1 \left((n_r N_R \pm n_d) \cdot \frac{(1-s)}{p} \pm n_{\text{вс}} \right)$
Статический эксцентриситет ротора Rotor static eccentricity	$f_{\text{ст. экс.}} = f_1 \cdot (k \pm 1/p)$
Дефект подшипника Bearing defect	$f_{\text{подшипника}} = f_1 \pm kf_v$
Ослабление крепления на фундаменте Loosening of the fastening on the foundation	$f_{\text{крепление}} = f_1 \pm kf_r / 2$

Анализ частотного спектра позволяет однозначно идентифицировать конкретные неисправности, поскольку они по-разному влияют на частотные составляющие тока. В табл. 1 приведены формулы для расчета частот, соответствующих определенным неисправностям АД [12, 17].

В табл. 1 использованы следующие обозначения: $k, n = 1, 3, \dots$; $n_r, n_d = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа (порядок эксцентриситета ($n_d = 0$ при статическом эксцентриситете)); $n_{ws} = 1, 3, \dots$ – порядок магнитодвижущей силы статора; f_v – характеристическая частота подшипника; f_r – частота вращения ротора в Гц.

Амплитуда тока в каждой из обмоток является проекцией обобщенного вектора тока. Диаграмма этого вращающегося вектора называется годографом тока. Для его построения удобнее перейти от трехфазной системы координат в двусосную систему. В разной литературе используются различные обозначения этих осей: I_{qs}^S, I_{ds}^S в [4], I_d, I_q в [9] или I_α, I_β в [21]. Последний вариант является более распространенным и поэтому предпочтительным. Для перехода к осям α и β используется преобразование Кларка по следующей формуле:

$$\begin{cases} I_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}I_A - \sqrt{\frac{1}{6}}I_B - \sqrt{\frac{1}{6}}I_C; \\ I_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}I_B - \sqrt{\frac{1}{2}}I_C, \end{cases}$$

где I_A, I_B, I_C – измеренные линейные токи.

Характерный вид годографа двигателя без повреждений приведен на рис. 14. Его форма симметрична, что свидетельствует о балансе линейных токов, а амплитуда почти неизменна.

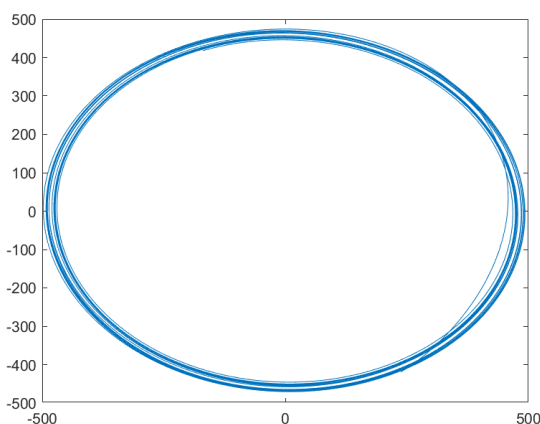


Рис. 14. Годограф электродвигателя без повреждений
Fig. 14. The hodograph of the electric motor with no damage

Такие критические дефекты как обрыв фазы или замыкание фазы на корпус легко отследить по годографу, поскольку они значительно изменяют баланс токов. Форма годографа демонстрирует изменение магнитного поля во времени. Обрыв фазы приведет к тому, что поле станет пульсирующим: окружность вырождается в отрезок, а замыкание фазы на корпус сделает окружность эллипсом.

Разработка и испытания диагностического алгоритма

К разрабатываемому диагностическому алгоритму предъявляется несколько требований. Он должен точно определять развитие неисправности во время эксплуатации АД с достаточным быстродействием для принятия решений по дальнейшему использованию оборудования. Также алгоритм не должен быть слишком чувствителен, что увеличит риск ложных срабатываний. Дополнительно не должны анализироваться заведомо некорректные данные, что может произойти, например, вследствие отказа одного из токовых датчиков. Для соответствия всем перечисленным требованиям было принято решение о параллельном использовании нескольких методик диагностики и срабатывания только при выполнении условий каждой из них.

Основной сложностью в диагностике в режиме эксплуатации является изменение частоты вращения АД в широком диапазоне, а также изменение коэффициента кратности коммутации инвертора. Первая особенность приводит к тому, что анализ частотного спектра становится невозможным: пики, соответствующие неисправностям, проявляются на интервале частот. Вторая особенность может проявляться во внесении дополнительных возмущений в спектр. Годограф также может изменять свою форму в зависимости от частоты питающего напряжения, поскольку АИН не только меняет амплитуду напряжения, но и вид модуляции. Для этого алгоритм был настроен на поиск участка постоянной скорости. При отсутствии подобного, алгоритм ищет участок разгона в интервале постоянной амплитуды тока. Это позволяет произвести диагностику очевидных неисправностей, а также анализ годографа. В табл. 2 перечислены методики, которые используются в алгоритме для конкретных дефектов. Дополнительно осуществляется анализ на адекватность загружае-

мых данных, основанный на известном диапазоне амплитуды тока для диагностируемого электродвигателя.

Тестирование алгоритма было произведено на испытательном стенде, приведенном на

рис. 15. В состав стенда входят: АИН, двигатель, генератор, блок питания, три токовых датчика, датчик оборотов и плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Таблица 2. Методики, используемые для диагностики дефектов
Table 2. Techniques used for diagnosis of the defects

Дефект Defect	Участок диагностики Diagnostic area	Используемые методики Techniques used
Обрыв фазы Phase loss	Весь интервал записи Entire recording interval	Анализ во временной области Time domain analysis
Замыкание фазы на корпус Phase-to-boxing short circuit		
Межвитковое замыкание Turn-to-turn short circuit	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis
	Весь интервал записи Entire recording interval	Анализ годографа Hodograph analysis
Дефект ротора Rotor defect	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ во временной области Time domain analysis
	Участок разгона Acceleration section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis
Эксцентриситет ротора Rotor eccentricity	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ годографа Hodograph analysis
	Участок постоянной скорости Constant speed section	Анализ в частотной области Frequency domain analysis



Рис. 15. Стенд для тестирования алгоритма
Fig. 15. Setup for testing the algorithm

Объектом испытания были выбраны асинхронные электродвигатели 5IK60W-S2 мощностью 60 Вт. Три двигателя выступали в качестве тестируемых, а один как генератор, подключенный к резистивной нагрузке. Нагружаемым двигателям были присвоены номера 1,

2 и 3. Двигатели № 1 и 3 разобрали при помощи гидравлического пресса для имитации распространенных неисправностей. У двигателя № 1 были пропилены четыре стержня ротора, а у двигателя № 3 – нарушена изоляция и спаяны соседние витки (рис. 16). Измеренные межфаз-

ные сопротивления двигателя № 3 равны 68, 64 и 68 Ом, в то время как у двигателей № 2 и 3 каждое равно 70 Ом.



Рис. 16. Межвитковое замыкание на двигателе №3
Fig. 16. Turn-to-turn short-circuit on the motor №3

Алгоритм считывает файлы с записанными показаниями датчиков тока и оборотов и выдает результат диагностики по каждой из фаз. Состояние фазы может иметь значения: 0 – без повреждений, 1 – развивающийся дефект; 2 –

развитый дефект. Степень развития дефекта определяется отклонением наблюдаемого параметра от целевого значения.

В процессе настройки чувствительности срабатывания были построены графики частотного спектра и годографы. Спектр двигателя № 1 приведен на рис. 17. На данном графике присутствуют явно выраженные пики на частотах, соответствующих дефекту ротора. При его наличии ротор замедляется, когда магнитное поле проходит через сломанный стержень. Поскольку ток по нему не течет, сила Ампера равна нулю. Позже ротор ускоряется, так как скольжение возросло и увеличило силу Ампера, действующую на последующий за сломанным стержень. В связи с этим возникают пики рядом с основной частотой тока, при этом левый пик всегда выше.

На рис. 18 приведен спектр двигателя № 3. Также было подтверждено наличие пиков на соответствующих дефекту частотах.

При этом межвитковое замыкание более наглядно определяется по годографу. Сравнение годографов приведено на рис. 19.

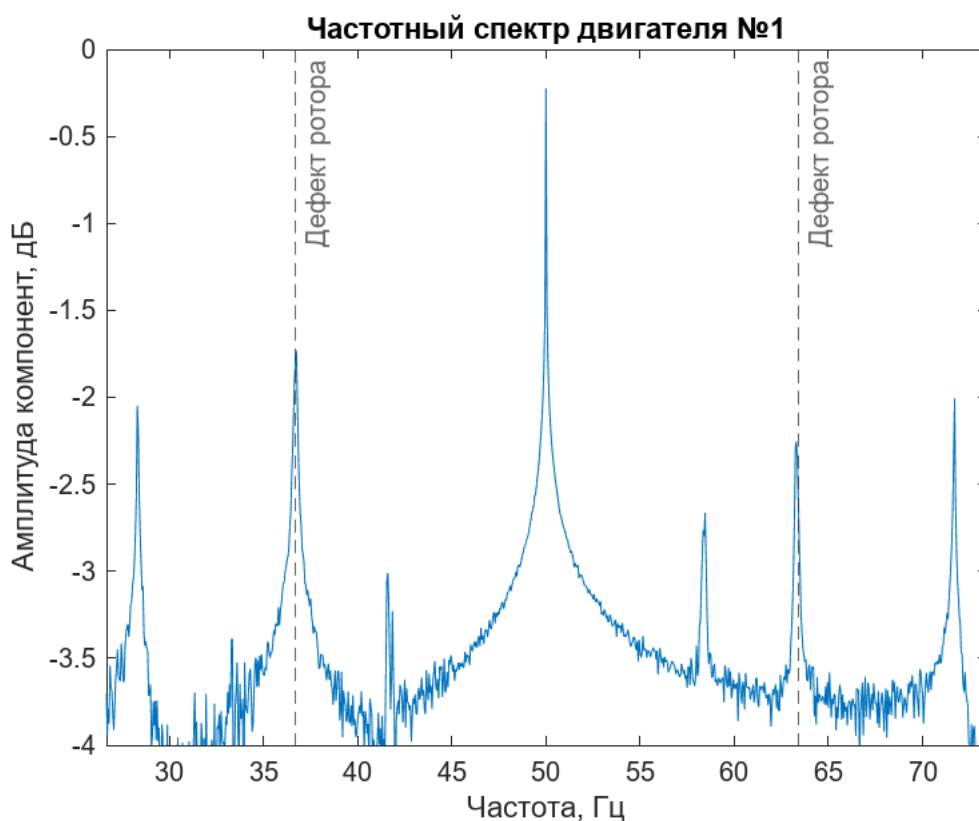


Рис. 17. Частотный спектр двигателя №1
Fig. 17. Frequency spectrum of the motor No 1

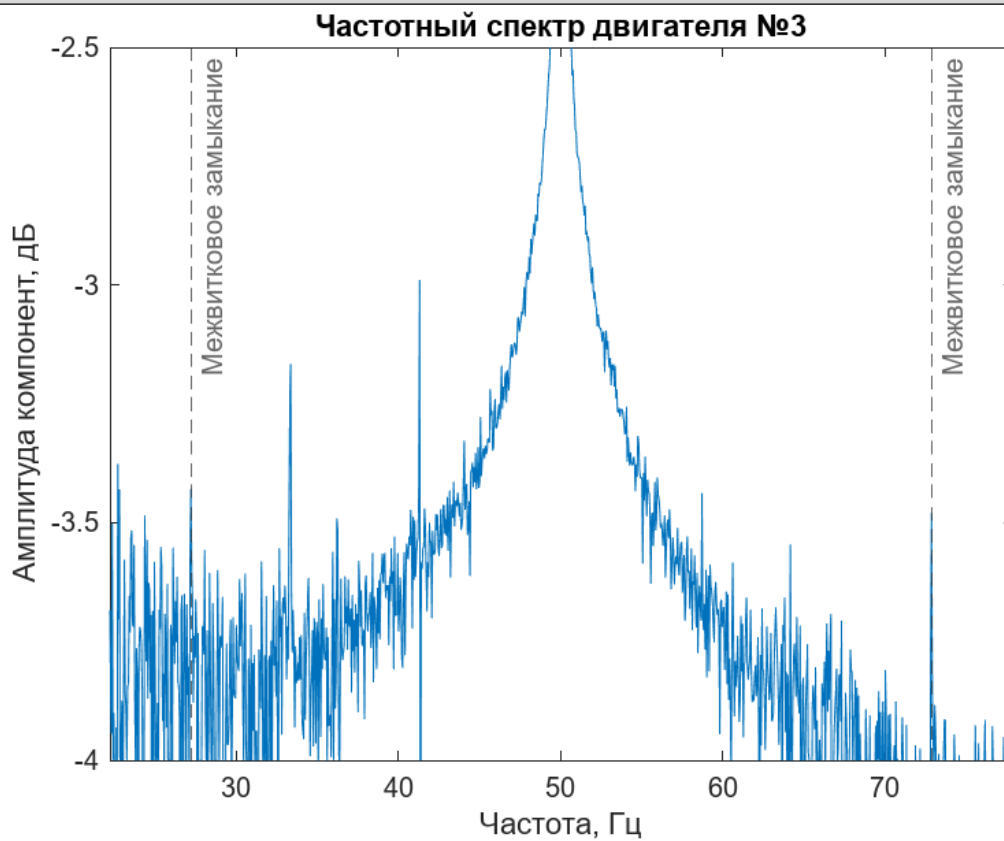


Рис. 18. Частотный спектр двигателя №3
Fig. 18. Frequency spectrum of the motor No 3

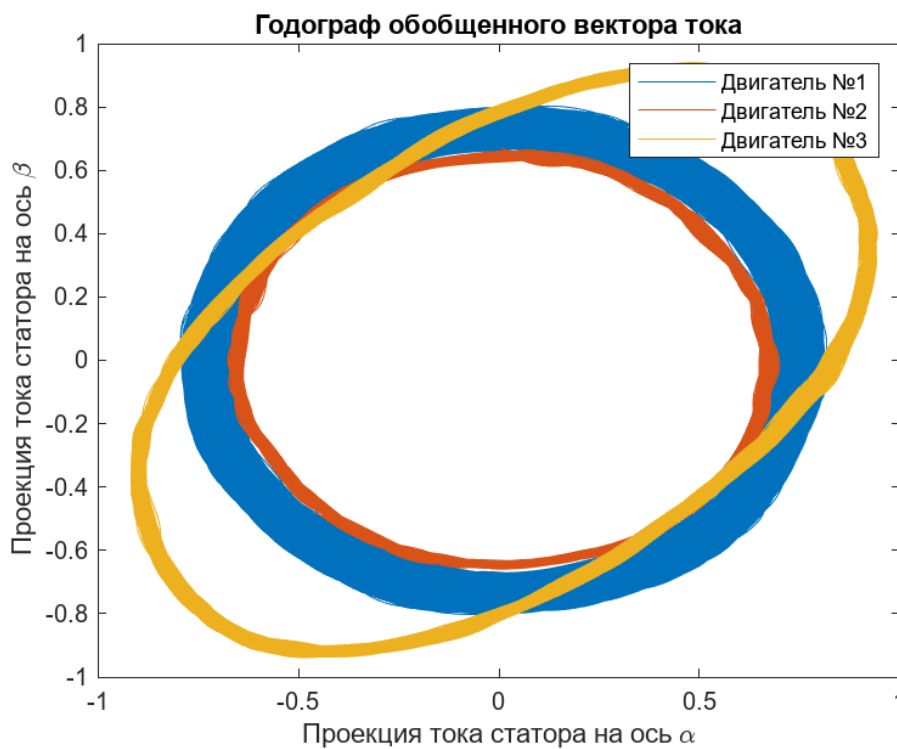


Рис. 19. Годограф обобщенного вектора тока
Fig. 19. Hodograph of the generalized current vector

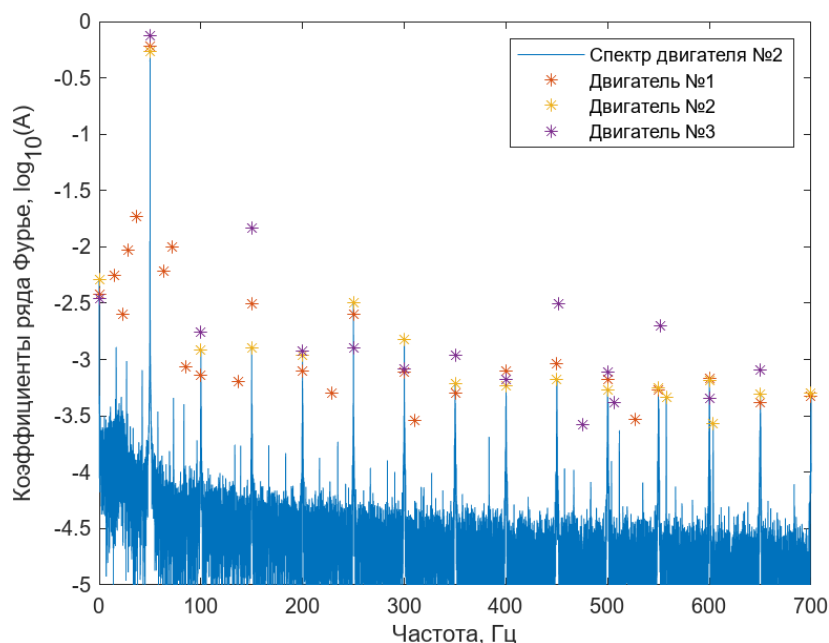


Рис. 20. Спектр неповрежденного двигателя и амплитуда гармоник основной частоты тока
Fig. 20. Frequency spectrum of the undamaged motor and amplitude of harmonics of the main current frequency

Среди актуальных задач диагностики АД стоит предсказание развития дефектов в будущем, что также называется предиктивной диагностикой. Для этого в данный алгоритм была добавлена функция сохранения амплитуды гармоник основной частоты тока. Это позволяет отслеживать состояние изоляции обмотки и собирать статистику за длительное время работы двигателя. На рис. 20 показаны значения амплитуды на частотах с пиковыми величинами. Видно, что при наличии межвиткового замыкания ощутимо возрастают 3-я, 9-я, 11-я и 13-я гармоники.

Часть маркеров относится к пикам, не связанным с гармониками тока. Также нужно помнить о том, что повышение амплитуды гармоник может быть связано с другими дефектами, например замыканием на корпус.

Заключение

В данной статье представлен алгоритм анализа тока АД для своевременной диагностики неисправностей. На основе показателя критичности и статистических данных по частоте появления были выбраны следующие дефекты: обрыв фазы, замыкание фазы на корпус, межвитковое замыкание, дефект ротора и эксцентриситет ротора. Разработанный алгоритм позволяет осуществлять диагностику наиболее критичных дефектов на всем участке записи.

Для определения скрытых дефектов используются непродолжительные участки разгона и постоянной скорости, которые позволяют оценивать годограф и спектр тока.

Алгоритм обладает рядом преимуществ. К ним относится параллельное использование двух методик: анализ тока в частотной области и анализ годографа обобщенного вектора тока. Это снижает риск ложного срабатывания и повышает надежность системы, использующей алгоритм. Диагностика производится во время эксплуатации оборудования и не требует переноса АД на специальный стенд. Анализируемые дефекты имеют классификацию по степени развития: 0 (ноль) – нормальное состояние, 1 (один) – развивающийся дефект и 2 (два) – развитый дефект. Это позволяет оператору АД принимать более объективное решение о продолжении использования оборудования. Также вычисляется амплитуда гармоник основной частоты тока, что может быть использовано для предиктивной диагностики и накопления статистических данных о техническом состоянии электродвигателя.

Чувствительность срабатывания, а также адекватность работы алгоритма были настроены при помощи испытательного стенда. На данный момент система, использующая предложенный алгоритм, проходит тестирование на трех тяговых АД реального электропоезда.

Список литературы

1. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А.А. Андрущенко, Ю.В. Бабков, А.А. Зарифьян и др. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2014. 412 с.
2. Increasing the Performance of Electric Traction in the Long Term on the Next-Generation Technological Horizon / A.T. Burkov, A.N. Marikin, A.V. Mizintsev et al. // *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89, № 10. P. 588–591.
3. Ronanki D., Singh S.A., Williamson S.S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. Vol. 3. Iss. 3. P. 724–738. DOI 10.1109/TTE.2017.2703583.
4. Bose B.K. *Modern power electronics & AC drives*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 2001. 327 с.
6. Фролов Ю.М. Электрический привод. СПб. : Лань, 2021. 236 с.
7. Прудников А.Э., Боннет В.В., Логинов А.Э. Метод определения эксцентриситета ротора асинхронного двигателя // *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 5 (104). С. 68–72.
8. Induction Motor's Bearing Condition Motoring and Diagnosis Applying Cloud Services and Artificial Neural Networks / K. Dambrauskas, J. Vanagas, T. Zimnickas et al. // *7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. Liepaja, 2019. P. 1–5. DOI 10.1109/AIEEE48629.2019.8977096
9. Королёв Н.А., Жуковский Ю.Л., Котелева Н.И. Наблюдатель состояния подшипников асинхронного двигателя по компонентам векторов парка тока и напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 2 (55). С. 62–70.
10. An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines / E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, Y. Amirat et al. // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017. Vol. 32. Iss. 2. P. 401–413. DOI 10.1109/TEC.2017.2661541.
11. Солодкий Е.М., Сальников С.В., Даденков Д.А. Диагностика межвиткового замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращения вектора тока статора // *Вестн. ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020. № 34. С. 114–127.
12. Скляр А.В. О влиянии дефектов электромагнитной системы асинхронного двигателя на пазовые гармоники стартового тока // *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148). С. 109–114.
13. Скляр А.В., Чижма С.Н. Спектральный метод оценки частоты пазовых гармоник асинхронного двигателя // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2017. Т. 60. № 2. С. 21–26.
14. Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправностей различного типа / В.В. Харламов, А.В. Скляр, Д.И. Попов и др. // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 55–58.
15. Жежеленко И.В., Кривоносос В.Е., Василенко С.В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ*. 2021. Т. 64. № 3. С. 202–218.
16. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский и др. // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2014. № 3. С. 34–39.
17. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2008. 19 с.
18. Новожилов А.Н., Крюкова Е.В., Исупова Н.А., Новожилов Т.А., Никитин К.И. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронного двигателя по среднеквадратичной величине дополнительных гармонических токов статора // *Технические науки – от теории к практике*. 2013. № 27-1. С. 132–138.
19. Бабичев А.С. Применение наложенного тока для селективного контроля изоляции группы электродвигателей // *Релейная защита и автоматизация*. 2019. № 2. С. 32–35.
20. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков и др. М. : Транспорт, 1991. 334 с.
21. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 72 с.

References

1. Andryushchenko A.A., Babkov Yu.V., Zarif'yan A.A., Kashnikov G.F., Kolpakhch'yan P.G., Perfil'ev K.S., Yanov V.P. *Asinkhronnyi tyagovyi privod lokomotivov [Asynchronous traction drive of locomotives]*. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2014. 412 p.
2. Burkov A.T., Marikin A.N., Mizintsev A.V., Seronov V.V. Increasing the Performance of Electric Traction in the Long Term on the Next-Generation Technological Horizon. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89, no. 10, pp. 588–591.
3. Ronanki D., Singh S.A., Williamson S.S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 724–738.
4. Bose B.K. *Modern power electronics & AC drives*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 738 p.
5. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electric machines]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. 327 p.
6. Frolov Yu.M. *Elektricheskii privod [Electric drive]*. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2021. 236 p.
7. Prudnikov A.E., Bonnet V.V., Loginov A.E. Metod opredeleniya eksentsisiteteta rotora asinkhronnogo dvigatelya [Method for determining the eccentricity of the rotor of an asynchronous motor]. *Vestnik KrasGAU [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, 2015, no. 5 (140), pp. 68–72.
8. Dambrauskas K., Vanagas J., Zimnickas T., Kalvaitis A., Bizimavičius T. Induction Motor's Bearing Condition Motoring and Diagnosis Applying Cloud Services and Artificial Neural Networks. *7th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*. Liepaja, 2019, pp. 1–5.

9. Korolev N.A., Zhukovskii Yu.L., Koteleva N.I. Nablyudatel' sostoyaniya podshipnikov asinkhronnogo dvigatelya po komponentam vektorov parka toka i napryazheniya [Observer of the state of asynchronous motor bearings by components of current and voltage park vectors]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2022, no. 2 (55), pp. 62–70.

10. Elbouchikhi E., Choqueuse V., Amirat Y., Benbouzid M. E. H., Turri S. An Efficient Hilbert–Huang Transform-Based Bearing Faults Detection in Induction Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 401–413.

11. Solodkii E.M., Sal'nikov S.V., Dadenkov D.A. Diagnostika mezhvitkovogo замыкания обмотки статора асинхронного двигателя на основе анализа траектории вращающегося вектора тока статора [Diagnostics of inter-turn closure of the stator winding of an asynchronous motor based on the analysis of the rotation trajectory of the stator current vector]. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm' National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems], 2020, no. 34, pp. 114–127.

12. Sklyar A.V. O vliyaniy defektov elektromagnitnoi sistemy asinkhronnogo dvigatelya na pazovye garmoniki statornogo toka [On the influence of defects in the electromagnetic system of an asynchronous motor on the groove harmonics of the stator current]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 4 (148), pp. 109–114.

13. Sklyar A.V., Chizhma S.N. Spektral'nyi metod otsenki chastoty pazovykh garmonik asinkhronnogo dvigatelya [Spectral method for estimating the frequency of the groove harmonics of an asynchronous motor]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletins of High Educational Organizations. Electromechanics], 2017, vol. 60, no. 2, pp. 21–26.

14. Kharlamov V.V., Sklyar A.V., Popov D.I., Eroshenko A.V. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya s uchedom pazovykh garmonik v induksii magnitnogo polya i neispravnosti razlichnogo tipa [Mathematical model of an asynchronous motor taking into account the groove harmonics in magnetic field induction and malfunctions of various types]. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 4 (160), pp. 55–58.

15. Zhezhenko I.V., Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Kriterii vyyavleniya mezhvitkovykh замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя [Criteria for detecting inter-turn closures in stator windings using vector analysis of phase currents of an electric motor]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG* [Energy. Bulletins of higher educational organizations and energy associations of the Commonwealth of Independent States], 2021, vol. 64, no. 3, pp. 202–218.

16. Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievskii V.A., Dmitrievskii A.A., Kazakbaev V.M. Diagnostika neispravnosti asinkhronnykh dvigatelei na osnove spektral'nogo analiza tokov statora [Diagnostics of asynchronous motors malfunctions based on spectral analysis of stator currents]. *Energobezopasnost' i ehnergoberezhenie* [Energy security and energy conservation], 2014, no. 3, pp. 34–39.

17. Rogachev V.A. Diagnostirovanie eksstentsiteta rotora asinkhronnykh elektrodvigatelei po garmonicheskomu sostavu toka statora [Diagnosing the eccentricity of the rotor of asynchronous electric motors by the harmonic composition of the stator current]. Ph.D's thesis. Novocherkassk, 2008. 19 p.

18. Novozhilov A.N., Kryukova E.V., Isupova N.A., Novozhilov T.A., Nikitin K.I. Diagnostirovanie eksstentsiteta rotora asinkhronnogo dvigatelya po srednekvadratichnoi velichine dopolnitel'nykh garmonicheskikh tokov statora [Diagnostics of the eccentricity of the rotor of an asynchronous motor by the RMS value of additional harmonic stator currents]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Technical sciences – from theory to practice], 2013, no. 27-1, pp. 132–138.

19. Babichev A.S. Primenenie nalozhennogo toka dlya selektivnogo kontrolya izolyatsii gruppy elektrodvigatelei [Application of superimposed current for selective isolation control of a group of electric motors]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2019, no. 2 (35), pp. 32–35.

20. Rotanov N.A., Kurbasov A.S., Bykov Yu.G., Litovchenko V.V. Elektropodvizhnoi sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Electric rolling stock with asynchronous traction motors]. Moscow: Transport Publ., 1991. 334 p.

21. Kalachev Yu.N. Vektornoe regulirovanie (zametki praktika) [Vector regulation (notes of practice)]. Moscow: EFO Publ., 2013. 72 p.

Информация об авторах

Бирюков Антон Эдуардович, инженер отдела математического моделирования и теоретических исследований, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: BirukovAE@sinara-group.com.

Сорокин Дмитрий Геннадьевич, руководитель отдела математического моделирования и теоретических исследований, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: SorokinDG@sinara-group.com.

Лысов Николай Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической тяги, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: lysov.nikolay@vsmervice.ru.

Ситников Михаил Сергеевич, руководитель направления по науке и развитию, ООО «Синара Алгоритм», г. Москва; e-mail: SitnikovMS@sinara-group.com.

Information about the authors

Anton E. Biryukov, Engineer of the Department of Mathematical Modelling and Research, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: BirukovAE@sinara-group.com.

Dmitrii G. Sorokin, Head of the Department of Mathematical Modelling and Research, LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: SorokinDG@sinara-group.com.

Nikolai V. Lysov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Electric Traction, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: lysov.nikolay@vsmervice.ru.

Mikhail S. Sitnikov, Head of the direction of science and development at LTD «Sinara Algorithm», Moscow; e-mail: SitnikovMS@sinara-group.com.