

Научная статья
УДК 62-835
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>
EDN: TLWSIM



МЕТОД БОРТОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПО СПЕКТРУ ТОКОВ СТАТОРА

Е.А. Двоеглазов^{1,2} ✉, О.А. Козелков¹, Ф.К. Дьяков³

¹Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия

²ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»,
г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
egor11022d@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Надёжность тягового электропривода является ключевым фактором, определяющим эксплуатационную эффективность городского электрического транспорта. Подшипниковые узлы электродвигателей остаются одной из самых частых причин отказов, приводящих к простоям транспортного средства.

Материалы и методы. Разработан метод бортовой диагностики дефектов подшипников качения тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) на основе анализа спектра токов статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA) с использованием эквивалентного действующего тока трёхфазной системы для нормализации диагностических признаков. Исследование проведено с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink, охватывающего диапазон угловых протяжённостей дефектов от 0° до 8° и скоростей от 1500 до 8000 об/мин.

Результаты. Предложенный метод устанавливает чёткие границы эффективности: максимальная скорость для надёжного обнаружения дефектов составляет 5000 об/мин. На этой и более низких скоростях в спектре тока статора наблюдается пик на механической частоте вращения ротора (f_r), амплитуда которого коррелирует с угловой протяжённостью дефекта. Нормализация по эквивалентному действующему току повышает точность диагностики.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод позволяет внедрять систему бортовой диагностики без установки дополнительных датчиков, что особенно актуально для городских электробусов, эксплуатируемых преимущественно в диапазоне 2000–5000 об/мин. Разработан новый метод, впервые интегрирующий нормализацию по эквивалентному действующему току для количественной зависимости диагностической чувствительности анализа спектра тока статора от скорости вращения ротора в синхронном двигателе с постоянными магнитами и определяющий критический порог скорости 5000 об/мин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бортовая диагностика, тяговый электропривод, городской электротранспорт, подшипник качения, синхронный двигатель с постоянными магнитами, анализ спектра токов статора, спектральный анализ, математическое моделирование, момент сопротивления, предиктивное обслуживание, ток статора, механическая частота вращения ротора, эквивалентный действующий ток трёхфазной системы

Статья поступила в редакцию 20.01.2026; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 17.04.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Двоеглазов Е.А., Козелков О.А., Дьяков Ф.К., 2026



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Двоглазов Е.А., Козелков О.А., Дьяков Ф.К. Метод бортовой диагностики дефектов подшипников тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами по спектру токов статора // Вестник СибАДИ. 2026. Т. 23, № 2. С. 334-348. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

EDN: TLWSIM

ON-BOARD DIAGNOSTICS METHOD FOR DETECTING BEARING DEFECTS IN TRACTION SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTORS BASED ON STATOR CURRENT SPECTRUM

Egor A. Dvoeglazov^{1, 2} ✉, Oleg A. Kozelkov¹, Philip K. Dyakov³

¹Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

²KAMAZ Innovation Center LLC,
Moscow, Russia

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
egor11022d@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The reliability of traction electric drive is a key factor determining the operational efficiency of urban electric transport. Bearing assemblies of electric motors remain one of the most common causes of failures leading to vehicle downtime.

Materials and methods. A method has been developed for on-board diagnostics of rolling bearing defects in a traction synchronous motor with permanent magnets (SDM) based on the analysis of stator current spectrum (MCSA) with equivalent three-phase current used to normalize diagnostic features. In the study simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment was carried out, covering the range of defect angular dimension from 0° to 8° and speeds from 1500 to 8000 rpm.

Results. The method proposed sets clear limits to efficiency: the maximum speed for reliable defect detection is 5,000 rpm. At these and lower speeds in the stator current spectrum, a peak is observed of the mechanical rotor speed (ω_r), the amplitude of which correlates with the defect angular dimension. Normalization by equivalent operating current increases diagnostic accuracy.

Discussion and conclusions. The proposed method makes it possible to implement an on-board diagnostic system without installing additional sensors, which is especially important for urban electric buses operating mainly in the range of 2000-5000 rpm. A new method has been developed that integrates normalization by equivalent operating current to quantify the diagnostic sensitivity of the analysis of the stator current spectrum depending on the rotor rotation speed in a permanent magnet synchronous motor and determines the critical speed threshold of 5000 rpm.

KEYWORDS: on-board diagnostics, traction electric drive, urban electric transport, rolling bearing, permanent magnet synchronous motor, stator current spectrum analysis, spectral analysis, mathematical modeling, moment of resistance, predictive maintenance, stator current, mechanical rotor speed, equivalent operating current of a three-phase system

The article was submitted: January 20, 2025; approved after reviewing: March 18, 2026; accepted for publication: April 17, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Dvoeglazov E.A., Kozelkov O.A., Dyakov Ph.K. On-board diagnostics method for detecting bearing defects in traction synchronous permanent magnet motors based on stator current spectrum. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (2): 334-348. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-2-334-348>

© Dvoeglazov Egor A., Kozelkov Oleg A., Dyakov Philip K., 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность тягового электропривода является ключевым фактором, определяющим эксплуатационную эффективность городского электротранспорта [1]. Анализ статистики отказов показывает, что до 40% механических неисправностей вращающихся электрических машин связаны с повреждениями подшипниковых узлов [2]. Особенно актуальна эта проблема для городских электробусов, где частые пуски и торможения создают интенсивные циклические нагрузки на подшипники [3].

Как свидетельствуют данные ремонтной практики (рисунки 1, 2), развитие дефекта, начавшееся с микроразрушения, может привести к полному разрушению подшипника и выводу из строя всего тягового двигателя.

Традиционные методы диагностики – виброакустический анализ и ультразвуковая диагностика – требуют установки специализированных датчиков на корпус двигателя и, как правило, реализуются только в стационарных условиях [4, 5]. Это делает их неприменимыми для непрерывного мониторинга в процессе эксплуатации.

В этой связи перспективным является метод анализа спектра токов статора (Motor Current Signature Analysis, MCSA). Он использует уже доступные в системе управления сигналы и не требует модификации конструкции привода [6].

Как показали исследования М. Блэда и соавт. [7], дефект подшипника вызывает периодические колебания момента сопротивления, приводящие к фазовой модуляции тока статора. В работах У.Т. Томсона, Р.Дж. Гилмора [8] и П.Дж. Тавнера [1] продемонстрирована возможность обнаружения подшипниковых дефектов по боковым гармоникам в спектре тока. Однако большинство исследований сосредоточено на асинхронных двигателях, тогда как современные городские электробусы всё чаще оснащаются синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) [9].

В последнее время наблюдается переход от реактивного обслуживания (ремонт после поломки) к стратегии предиктивного обслуживания (прогнозирование и управление состоянием, Prognostics and Health Management, PHM) [10], что повышает актуальность развития методов бортовой диагностики. В российских исследованиях также наблюдается рост интереса к бесконтактным методам. В.Л. Кодкин и соавт. показали, что спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя

является показателем его эффективности [11], а М.М. Жилейкин и соавт. разработали алгоритмы для энергоэффективного управления тяговым приводом [12]. Аналогичные подходы с использованием нормализации остаточных гармоник токов для диагностики дефектов подтверждают эффективность в 90% случаев [13].

Несмотря на прогресс в диагностике электрических машин, для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) остаются нерешёнными ключевые вопросы, связанные с анализом спектра токов статора:

1. Зависимость чувствительности диагностики от скорости вращения ротора, учитывая специфику проявления дефектов (пик на механической частоте f_r).

2. Количественная корреляция между угловой протяжённостью дефекта и амплитудой диагностических признаков при нормализации по эквивалентному действующему току.

3. Границы эффективности бортовой диагностики в реальных эксплуатационных условиях, включая влияние шума, нагрузки и критического порога скорости.

Цель настоящей работы – создать метод бортовой диагностики дефектов подшипников тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе анализа спектра токов статора с интеграцией нормализации по эквивалентному действующему току для определения границ применимости и специфики диагностических признаков, с учётом эффективности подхода в реальных условиях эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанный метод основан на имитационном моделировании в среде MATLAB R2020b/Simulink с использованием блоков Simscape Electrical (библиотека для моделирования электрических систем) и Signal Processing Toolbox (инструментарий для обработки сигналов). Модель тягового привода представляет собой систему «синхронный двигатель с постоянными магнитами + инвертор + управляющий контур с векторным управлением по полю», как описано в работах М. Kumar и Е.А. Двоеглазова [14, 15].

Параметры привода соответствуют типовому тяговому двигателю городского электробуса:

- номинальная мощность: 120 кВт;
- номинальная скорость: 5000 об/мин;
- число пар полюсов: $p = 5$;
- номинальный ток: 250 А.



Рисунок 1 – Разрез шестерни: выкрашивание (питтинг) на внутренней беговой дорожке, выполняющее роль внешнего кольца подшипника
 Источник: авторские фотографии, сделанные в рамках научно-исследовательской работы по диагностике тяговых электроприводов.

Figure 1 – Split gear: pitting on the inner treadmill acting as a bearing outer ring
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 2 – Разрушение тягового привода вследствие усталостного выкрашивания (питтинга) беговой дорожки, интегрированной в тело шестерни
 Источник: авторские фотографии, сделанные в рамках научно-исследовательской работы по диагностике тяговых электроприводов.

Figure 2 – Destruction of the traction drive due to fatigue pitting of the treadmill integrated into the gear body
 Source: compiled by the authors.

На основе указанных параметров разработана комплексная математическая модель, описывающая влияние дефектов подшипников на спектральные характеристики токов статора. Модель интегрирует механические и электромагнитные процессы в единую систему уравнений, с добавлением нормализации по эквивалентному действующему току трёхфазной системы для учета дисбаланса фаз

и вариаций нагрузки, что повышает устойчивость метода к внешним помехам.

Ключевым параметром модели является угловая протяженность дефекта α , которая задается как константа для каждого режима моделирования ($\alpha=0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$). При прохождении шарика подшипника через зону дефекта с угловой протяженностью α происходит локальное снижение несущей способности,

что приводит к периодическим возмущениям момента сопротивления.

Распределение радиальной нагрузки между шариками описывается выражением [15]:

$$P_{ri} = m \frac{R \cos \varphi}{z_T \sin \alpha}, \quad \frac{3\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2},$$

где P_{ri} – радиальная нагрузка на i -й шарик, воспринимающий нагрузку; m – коэффициент максимальной нагрузки; R – суммарная радиальная нагрузка; φ – угловая координата шарика, воспринимающего радиальную нагрузку; α – угол контакта; z_T – число тел качения, воспринимающих радиальную нагрузку.

Сила сопротивления качению определяется по формуле

$$P_{si} = K P_{ri},$$

где $K = 0,001$ – коэффициент сопротивлению качению.

Суммарный момент сопротивления на валу электродвигателя рассчитывается по формуле

$$M_s = \frac{d_0}{2} K \sum_{i=1}^{z_T} P_{ri},$$

где d_0 – диаметр кольца подшипника, на котором появился дефект.

Для синхронного двигателя с постоянными магнитами электромагнитные процессы описываются системой уравнений в координатах $d - q$:

$$\begin{cases} U_d = L_d \frac{dI_d}{dt} + R_s I_d - \omega_e L_q I_q \\ U_q = L_q \frac{dI_q}{dt} + \psi_f \omega_e + R_s I_q + \omega_e L_d I_d \end{cases},$$

где U_d, U_q – напряжения по осям d и q соответственно; I_d, I_q – токи статора по осям d и q ; R_s – активное сопротивление статора; L_d, L_q – индуктивности по осям d и q ; ψ_f – поток постоянных магнитов; ω_e – электрическая угловая скорость.

Электромагнитный момент определяется как

$$M_{эл} = \frac{3p}{2} (\psi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q),$$

где $M_{эл}$ – электромагнитный момент; p – число пар полюсов двигателя.

Механическая скорость связана с электрическим соотношением

$$\omega = \frac{p \cdot n}{60},$$

где n – механическая скорость вращения в об/мин.

Эквивалентный действующий ток вводится как

$$I_{eff} = \sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)},$$

где I_a, I_b, I_c – мгновенные значения фазных токов. Это значение используется для нормализации амплитуды пика в спектре, что повышает устойчивость метода к вариациям нагрузки и шуму, аналогично подходам в [16, 17].

Угловая протяжённость дефекта α варьировалась от 0° (исправный) до 8° , что соответствует начальной ($1-2^\circ$), развитой ($3-5^\circ$) и поздней ($6-8^\circ$) стадиям усталостного разрушения.

Серия вычислительных экспериментов проведена при фиксированных скоростях вращения: 1500, 3000, 3700, 5000 и 8000 об/мин. На каждой скорости моделировались 5 состояний подшипника: $\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$. Серия экспериментов проведена на фиксированных скоростях вращения ротора: 1500, 3000, 3700, 5000 и 8000 об/мин. Для анализа токов статора применялся спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) с использованием окна Хэмминга для уменьшения эффекта растекания спектра. Длительность записи сигнала составляла 13 сек с частотой дискретизации 800 кГц. Сигнал фазного тока был предварительно отфильтрован с помощью аналогового фильтра Баттерворта нижних частот с полосой пропускания от 1 до 150 Гц, что позволило подавить высокочастотные помехи, обусловленные коммутацией инвертора, и выделить диагностические значимые низкочастотные компоненты, связанные с механическими дефектами подшипника.

Эффективность имитационного подхода подтверждена в работах:

А.В. Климова – виртуальное моделирование городских циклов [18];

Р.О. Максимова – виртуальные стендовые испытания для анализа совместимости подсистем [19];

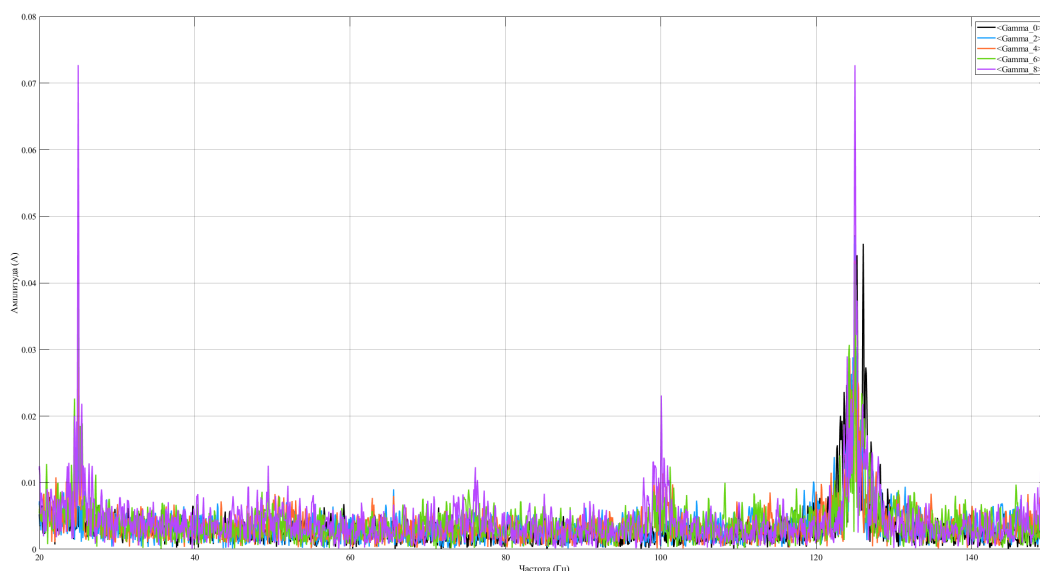
Qian D., Zhai X., Wei J. – технология распределенного моделирования сложных электро-механических систем электрических летательных аппаратов [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

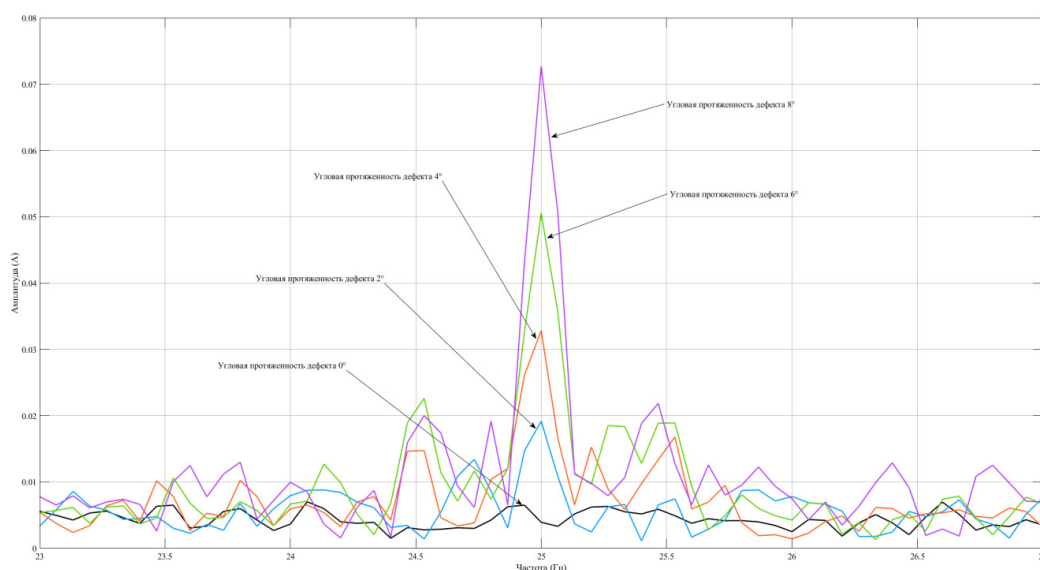
Результаты демонстрируют четкую частотную зависимость возникновения диагностических признаков дефектов подшипников. На

рисунке 3 представлен спектральный анализ тока статора при скорости вращения 1500 об/мин ($f_r = 25$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° . В полных спектрах (рисунк 3, а) четко наблюдается увеличение нормализованной амплитуды пика на механической частоте вращения ротора

с ростом угловой протяжённости дефекта. В увеличенной области спектра (рисунк 3, б) можно увидеть количественную зависимость: нормализованная амплитуда пика для дефекта 8° в 7,3 раза превышает амплитуду для исправного подшипника.



а



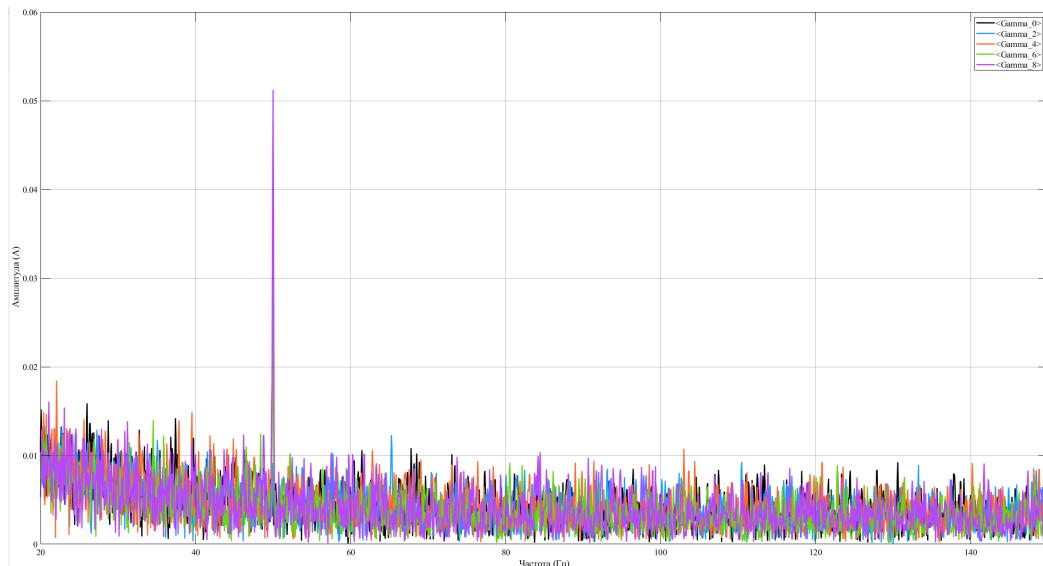
б

Рисунок 3 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 1500 об/мин ($f_r = 25$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц; б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
Источник: составлено авторами.

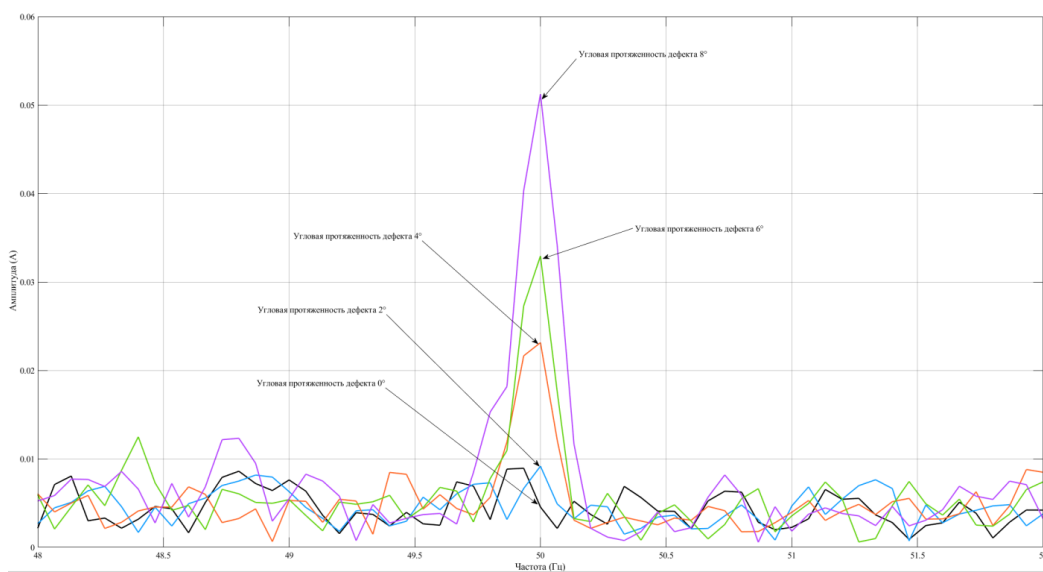
Figure 3 – Stator current spectral analysis at 1500 rpm ($f_r = 25$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
(a) Full spectra in 0–150 Hz range. (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
Source: compiled by the authors.

На рисунке 4 показаны результаты для скорости 3000 об/мин ($f_r = 50$ Гц). Здесь также наблюдается устойчивая корреляция между угловой протяжённостью дефекта и нормализованной амплитудой пика на частоте враще-

ния. Однако абсолютная амплитуда приращения сигнала меньше, чем при 1500 об/мин, что указывает на снижение диагностической чувствительности с ростом скорости.



а



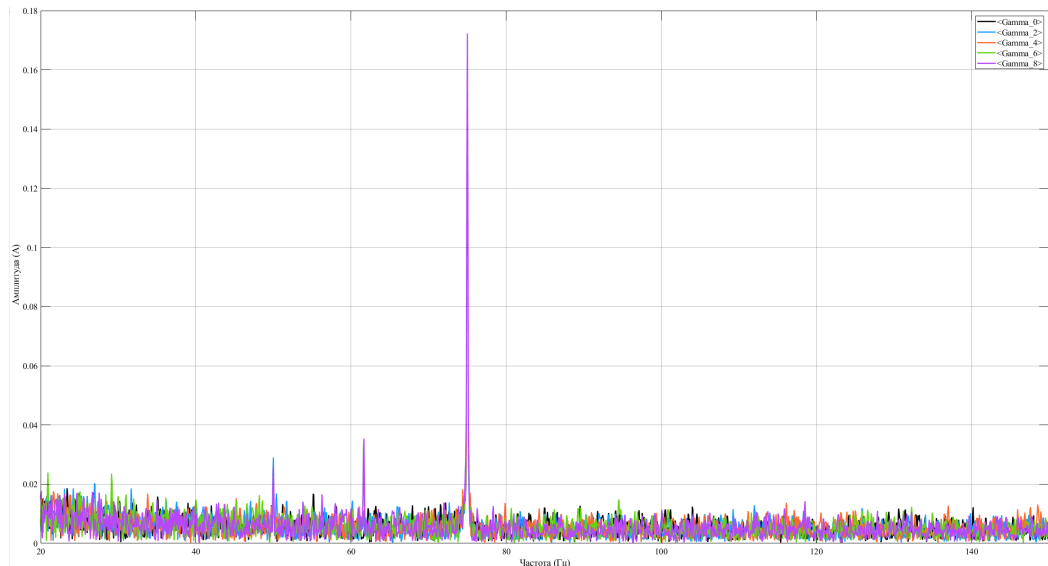
б

Рисунок 4 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 3000 об/мин ($f_r = 50$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
 а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
 б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
 Источник: составлено авторами.

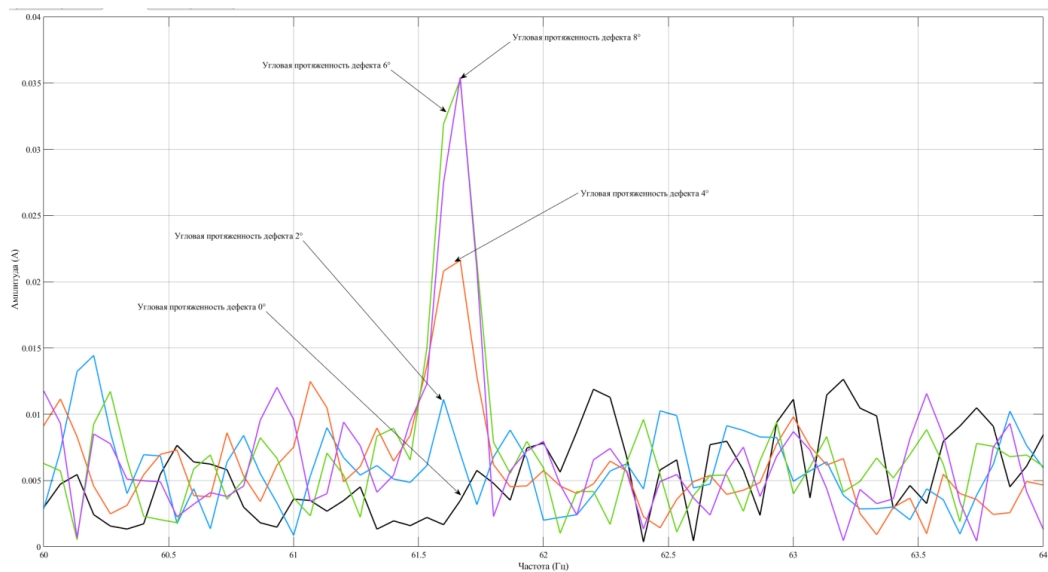
Figure 4 – Stator current spectral analysis at 3000 rpm ($f_r = 50$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
 (a) Full spectra in 0–150 Hz range.
 (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
 Source: compiled by the authors.

При анализе спектра на скорости 3700 об/мин ($f_r = 61,67$ Гц), как показано на рисунке 5, диагностика дефектов остаётся осуществимой: наблюдается корреляция между угловой протяжённостью дефекта и амплитудой пика,

с относительным увеличением для дефекта 8° в 2,8 раза по сравнению с исправным состоянием. Это подтверждает устойчивость метода в промежуточных режимах скорости.



а



б

Рисунок 5 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 3700 об/мин ($f_r = 61,67$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :

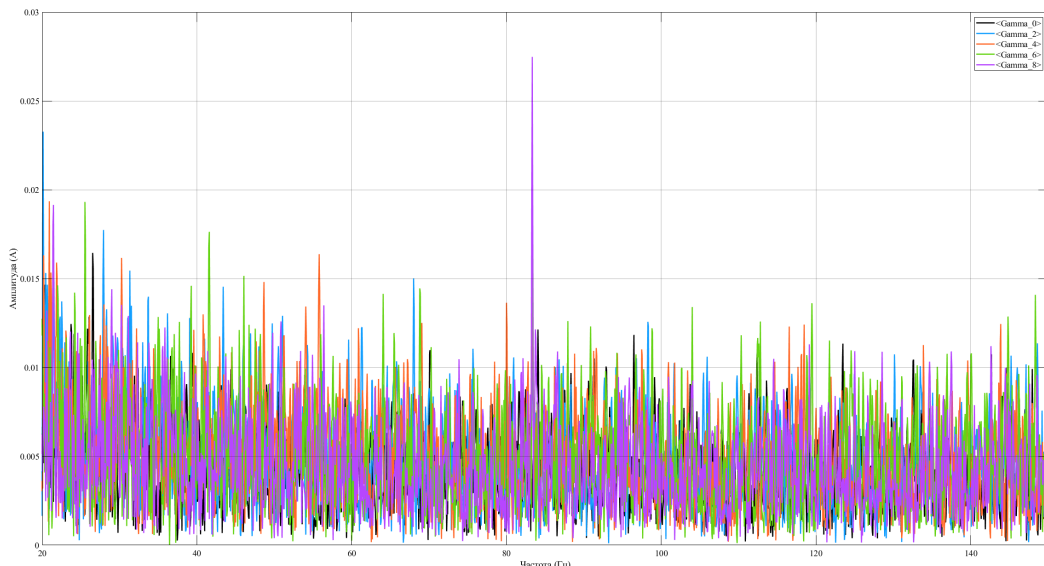
а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Stator current spectral analysis at 3700 rpm ($f_r = 61.67$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° and 8° .

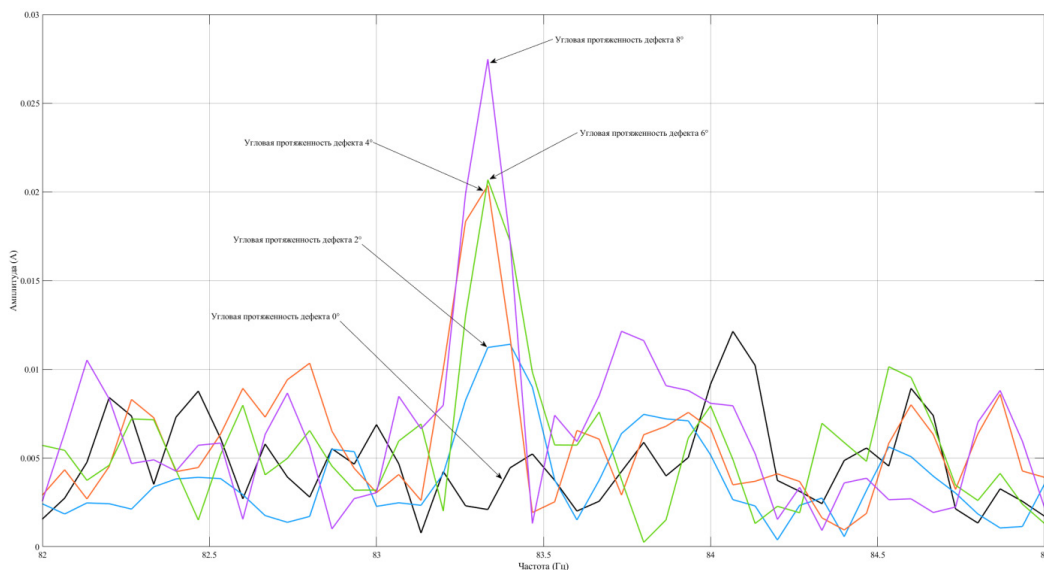
(a) Full spectra in 0–150 Hz range.
(b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
Source: compiled by the authors.

Критическая граница эффективности метода демонстрируется на рисунке 6, где представлены результаты при скорости 5000 об/мин ($f_r = 83,33$ Гц). Как видно из спектров, нормализованный пик на частоте вращения еще

можно идентифицировать, его относительная амплитуда для максимально исследованного дефекта (8°) в 7 раз превышает амплитуду исправного подшипника.



а



б

Рисунок 6 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 5000 об/мин ($f_r = 83,33$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8° :
 а – полные спектры в диапазоне 0–150 Гц;
 б – увеличенная область спектра вблизи частоты вращения ротора
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Stator current spectral analysis at 5000 rpm ($f_r = 83.33$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8° .
 (a) Full spectra in 0–150 Hz range.
 (b) Zoomed-in spectrum near the rotor rotation frequency
 Source: compiled by the authors.

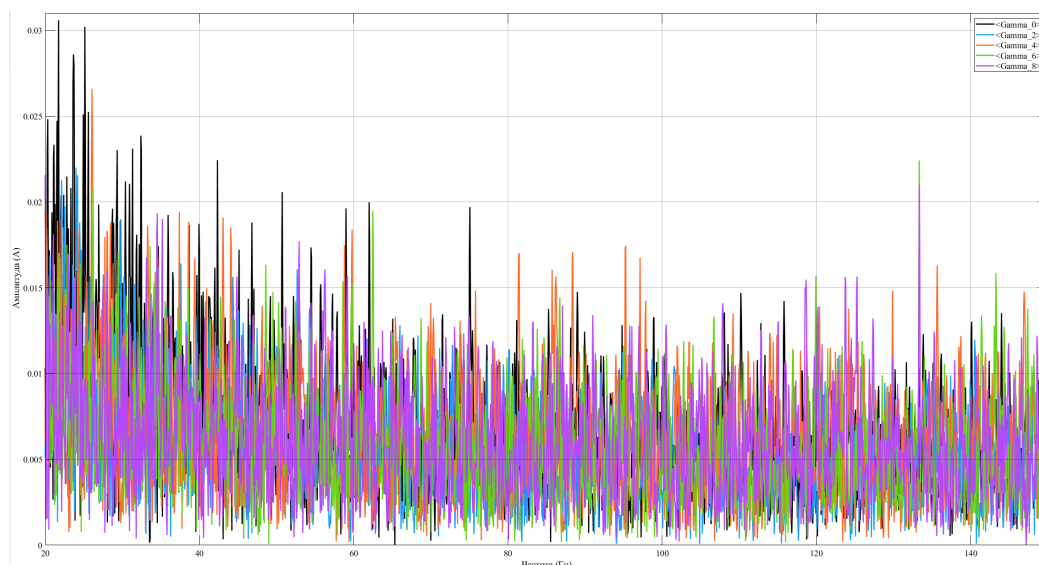


Рисунок 7 – Спектральный анализ тока статора при скорости вращения 8000 об/мин ($f_r = 133,33$ Гц) для дефектов с угловой протяжённостью 0° , 2° , 4° , 6° и 8°
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Stator current spectral analysis at 8000 rpm ($f_r = 133.33$ Hz) for defects with angular dimensions of 0° , 2° , 4° , 6° , and 8°
Source: compiled by the authors.

Полная потеря диагностической эффективности метода при высоких скоростях показана на рисунке 7, где представлен спектральный анализ при скорости 8000 об/мин ($f_r = 133,33$ Гц). В спектрах токов статора отсутствуют какие-либо диагностические признаки, позволяющие отличить дефектные подшипники от исправных. Спектральные характеристики всех режимов становятся статистически неразличимыми. Это согласуется с выводами Р.Б. Рэндалла и Дж. Антони [4]: при высоких скоростях отношение сигнал/шум падает, и дефект маскируется фоновым спектром.

Обнаруженная закономерность имеет физическое объяснение. На высоких скоростях вращения время контакта шарика подшипника с дефектом значительно сокращается. Инерционные эффекты меняются, и возмущения, вызываемые дефектом, не успевают сформировать выраженный низкочастотный компонент в спектре фазных токов, сравнимый по

амплитуде с шумами и другими гармониками системы управления [21, 22]. В отличие от классических подходов анализа спектра токов статора, где акцент на гармониках частоты прохождения шариков по наружной дорожке и частоты прохождения шариков по внутренней дорожке, в синхронном двигателе с постоянными магнитами с развитыми дефектами основной пик возникает именно на механической частоте вращения ротора (f_r) из-за сильной периодической модуляции момента сопротивления один раз за оборот. Нормализация по I_{eff} усиливает различимость признаков, повышая общую эффективность метода в низкочастотной области [23].

Установлено существование критического порога скорости более 5000 об/мин, из-за которого метод теряет диагностическую эффективность для данного типа дефектов, хотя в целевом диапазоне он показывает высокую надёжность.

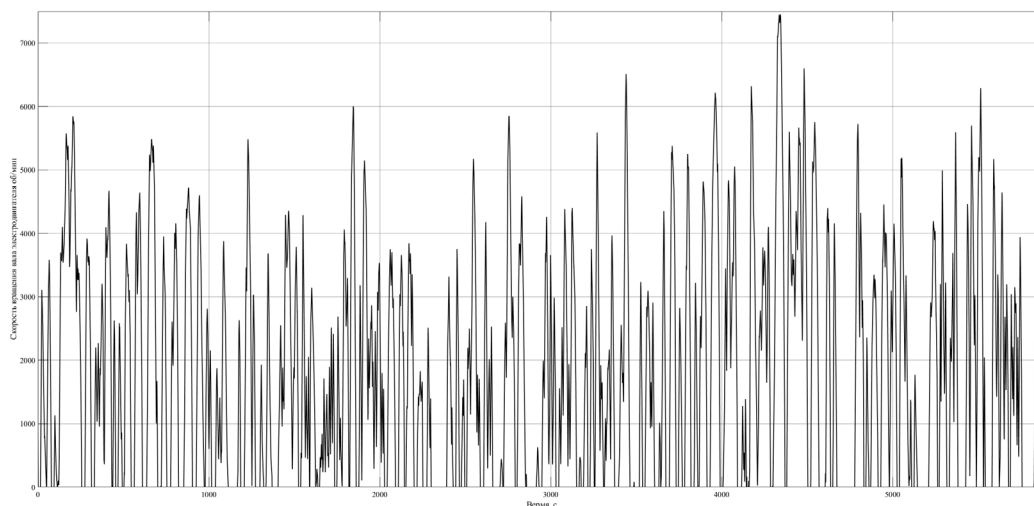


Рисунок 8 – Экспериментальные данные скорости вращения тягового электродвигателя городского электробуса большого класса, полученные в реальных условиях эксплуатации
Источник: данные, полученные авторами в ходе натурных испытаний.

Figure 8 – Experimental data on the rotational speed of a traction electric motor of a large-class urban electric bus obtained under real operating conditions.
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод эффективен до 5000 об/мин, что полностью покрывает городской цикл эксплуатации, где 95% времени движения приходится на диапазон 2000–5000 об/мин (рисунок 8).

Результаты согласуются с данными [2] о стадийности разрушения подшипников: на ранних стадиях дефект проявляется чётко, но на высоких скоростях его признаки маскируются. Специфика синхронного двигателя с постоянными магнитами заключается в том, что при развитых дефектах диагностический пик смещается на механическую частоту вращения ротора, а интеграция нормализации по эквивалентному действующему току делает метод более чувствительным к угловой протяжённости дефекта в низкочастотной области спектра аналогично подходам с использованием огибающей спектра [24].

Предложенный метод соответствует концепциям мехатронного проектирования [25] и стратегии прогнозирования и управления состоянием [10], с потенциалом интеграции с искусственным интеллектом для дальнейшего повышения точности [26, 27].

Сравнение с вибродиагностикой показывает, что последняя обладает большей чувствительностью, но требует стационарных условий и квалифицированного персонала. Разработанный метод анализа спектра токов статора

с нормализацией по I_{eff} , используя штатные датчики тока системы векторного управления по полю двигателем, обеспечивает возможность непрерывного мониторинга состояния подшипников непосредственно в процессе эксплуатации транспортного средства, что является ключевым преимуществом для городского электротранспорта [28, 29].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разработанный метод наиболее эффективен в диапазоне скоростей до 5000 об/мин, что полностью соответствует городскому циклу эксплуатации электробусов, где основное время движения происходит при 2000–5000 об/мин. Как показано на рисунках 3, 4, 5, 6, в этом диапазоне скоростей метод обеспечивает надёжное обнаружение дефектов с угловой протяжённостью от 2° и позволяет оценивать степень развития дефекта по нормализованной амплитуде пика на механической частоте вращения ротора.

В ходе исследования были получены следующие основные результаты:

1. Разработана комплексная математическая модель влияния дефектов подшипниковых узлов на спектральные характеристики токов статора тягового электропривода при угловых протяженностях дефектов в диапазоне $0^\circ - 8^\circ$, с интеграцией нормализации по эквивалентному действующему току.

2. Установлены четкие границы эффективности разработанного метода для бортовой

диагностики: метод обеспечивает надежное обнаружение дефектов подшипников на скоростях до 5000 об/мин, что полностью соответствует городскому циклу движения электротранспорта. На рисунках 3, 4, 5, 6 наглядно продемонстрирована возможность диагностики в этом диапазоне скоростей, тогда как на рисунке 7 показана полная потеря диагностической способности при 8000 об/мин.

Выявлены и обоснованы диагностические признаки для оценки степени развития дефектов на основе анализа спектра токов статора с нормализацией по эквивалентному действующему току. Как видно из увеличенных областей спектров на рисунках 3,б – 6,б, нормализованная амплитуда пика на механической частоте вращения ротора коррелирует с угловой протяженностью дефекта, что отличает метод от фокуса на гармониках частоты прохождения шариков по наружной дорожке/частоты прохождения шариков по внутренней дорожке в асинхронных машинах.

Показаны преимущества бортовой диагностики по сравнению со стационарными методами контроля, включая отсутствие необходимости в дополнительных датчиках, возможность непрерывного мониторинга и адаптацию к режимам эксплуатации с учетом нормализации.

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки адаптивных диагностических систем городского электротранспорта и могут служить основой для перехода от реактивного обслуживания к прогнозирующему подходу, что обеспечивает повышение функциональной надежности тяговых электроприводов и снижение эксплуатационных затрат. Разработанный метод впервые количественно устанавливает зависимость диагностической чувствительности анализа спектра токов статора от скорости вращения ротора в синхронных двигателях с постоянными магнитами с использованием нормализации по эквивалентному действующему току и определяет критический порог скорости 5000 об/мин, с акцентом на пик на механической частоте вращения, подтверждая эффективность в сравнении с аналогичными работами [3, 16].

Для расширения функциональности возможна интеграция с системами распределения мощности между колёсами [30], что позволяет не только улучшить тягово-сцепные свойства, но и снизить динамические нагрузки на подшипники, тем самым замедляя развитие дефектов. Переход от диагностики к прогнози-

рованию остаточного ресурса требует применения подхода прогнозирования и управления состоянием, в частности 5S-методологии (Streamline, Smart Processing, Synchronize & See, Standardize, Sustain), которая обеспечивает связь между обнаружением дефекта и логистикой технического обслуживания, с потенциалом использования искусственного интеллекта для анализа спектров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tavner PJ. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Electric Power Applications*. 2008; 2(4): 215–247. DOI:10.1049/iet-epa:20070280
2. Khan MA, Asad B, Kudelina K, Vaimann T, Kallaste A. The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art. *Energies*. 2023; 16(1): 296. DOI: 10.3390/en16010296
3. Santer P, Reinhard J, Schindler A, Graichen K. Detection of localized bearing faults in PMSMs by means of envelope analysis and wavelet packet transform using motor speed and current signals. *Mechatronics*. 2025;106:103294. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2025.103294
4. Randall RB, Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011;25(2):485–520. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017
5. He X, Liu X, Lin C, Fu M, Wang J, Zhang J. Early bearing fault diagnosis in PMSMs based on HO-VMD and weighted evidence fusion of current–vibration signals. *Sensors*. 2025;25(15):4591. DOI: 10.3390/s25154591
6. Janrao S, Ambekar R. Fault diagnosis of an induction motor using motor current signature analysis. *Int J Appl Eng Res*. 2018; 13(12): 11002–11008.
7. Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008; 55(4): 1813–1822. DOI: 10.1109/TIE.2008.917108
8. Thomson WT, Gilmore RJ. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives. In: *Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium*; 2003. p. 145–156.
9. Ghorbel A, Eddai S, Limam B, Feki N, Haddar M. Bearing fault diagnosis based on artificial intelligence methods: machine learning and deep learning. *Arab J Sci Eng*. 2025;50:13605–13622. DOI: 10.1007/s13369-024-09488-3
10. Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014;42:314–334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004
11. Кодкин В.Л., Аникин А.С., Балденков А.А. Спектральный состав тока ротора асинхронного двигателя – показатель его эффективности // Омский научный вестник. 2019; (5): 39–45. DOI:10.25206/1813-8225-2019-167-39-45

12. Жилейкин М.М., Климов А.В., Масленников И.К. Алгоритм формирования управляющего сигнала со стороны педали акселератора, обеспечивающий энергоэффективное потребление электроэнергии тяговым приводом электробуса // Известия МГТУ «МАМИ». 2022; 16(1): 51–60. DOI:10.17816/2074-0530-100232
13. Allal A, Khechekhouche A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022; 141: 108219. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108219
14. Kumar M, Deosarkar P, Inamdar S, Mahanty RN. Field oriented control of traction PMSM drive using WBG devices for EV application. In: *Proceedings of the 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*; 2023; Bhopal, India. p. 1-8. DOI: 10.1109/RESEM57584.2023.10236344
15. Двоглазов Е.А., Жилейкин М.М., Оспанбеков Б.К., Климов А.В. Диагностирование выкрашивания материала на беговой дорожке кольца подшипника синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Грузовик. 2023; (8): 25–30. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-8-25-30
16. Hosseini N, Toshani H, Abdi S, Sharifzadeh S. Enhanced Bearing Fault Detection in Induction Motors Using Projection-Based SVM. *IEEE Trans Ind Appl*. 2025; PP: 1-13. DOI: 10.1109/TIA.2025.3536425
17. Min TH, Lee JH, Choi BK. CNN-based fault classification in induction motors using feature vector images of symmetrical components. *Electronics*. 2025; 14(8): 1679. DOI: 10.3390/electronics14081679
18. Климов А.В. Исследование методов повышения энергоэффективности с учётом режимов работы тягового электропривода методами виртуального математического моделирования // Тракторы и сельхозмашины. 2024; 91(1): 65–74. DOI: 10.17816/0321-4443-56920
19. Максимов Р.О. Методика проведения виртуальных стендовых испытаний для анализа совместности технических характеристик систем транспортного средства для выявления и предотвращения возможностей возникновения резонансных явлений в подрессоренной кабине // Известия МГТУ «МАМИ». 2023; 17(4): 387–400. DOI: 10.17816/2074-0530-456459
20. Qian D, Zhai X, Wei J. Modeling and Simulation of Complex Electromechanical System of More-Electric Aircraft Based on Distributed Simulation Technology. In: *2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*; 2023; Nanjing, China. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 868-873. DOI:10.1109/ICoPESA56898.2023.10141103
21. Zhang B, Li H, Kong W, Ma J. Early-stage fault diagnosis of motor bearing based on kurtosis weighting and fusion of current–vibration signals. *Sensors (Basel)*. 2024; 24(11): 3373. DOI: 10.3390/s24113373
22. Ye X, Li G. An intelligent fault diagnosis method for rolling bearing using motor stator current signals. *Meas Sci Technol*. 2024; 35(8): 086131. DOI: 10.1088/1361-6501/ad4bfc
23. Mohanty AR, Kar C. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mech Syst Signal Process*. 2006; 20(1): 158-187. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.07.006
24. De las Morenas J, Belmonte LM, Morales R. Streamlined bearing fault detection using artificial intelligence in permanent magnet synchronous motors. *Machines*. 2025; 13(5): 357. DOI: 10.3390/machines13050357
25. Белоусов Б.Н., Келлер А.В., Харитончик С.В., Бахмутов С.В., Бердников А.А. Проблемы прикладной механики при создании тягово-транспортных средств с мехатронными модулями // Автомобильная промышленность. 2020; (1): 8–16.
26. Raouf I, Kumar P, Kim HS. Deep learning-based fault diagnosis of servo motor bearing using the attention-guided feature aggregation network. *Expert Syst Appl*. 2024; 258: 125137. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125137
27. Li D, Wang W, Dong C, Fang T. Motor bearing fault diagnosis based on FFT-CNN-Transformer modeling. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering*; 2025 Jan 10-12; Hefei, China. p. 615-621. DOI: 10.1145/3727648.3727748
28. Kumar MP, Velpula S, Saiprakash C, Sahoo B. Advancements in fault detection and diagnosis methods for electric vehicles: a review. *Discov Appl Sci*. 2025; 7: 1235. DOI: 10.1007/s42452-025-07758-9
29. Zsuga A, Dineva A. Data-driven onboard inter-turn short circuit fault diagnosis for electric vehicles by using real-time simulation environment. *IEEE Access*. 2023; 11: 145447-145466. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3344483
30. Келлер А.В., Попов А.В. Методика синтеза закономерностей распределения мощности между ведущими колёсами полноприводных автомобилей сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2023; 90(6): 505–514. DOI: 10.17816/0321-4443-568209

REFERENCES

1. Tavner PJ. Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Electric Power Applications*. 2008;2(4):215-247. DOI: 10.1049/iet-epa:20070280
2. Khan MA, Asad B, Kudelina K, Vaimann T, Kallaste A. The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—*The State of the Art*. *Energies*. 2023; 16(1): 296. DOI: 10.3390/en16010296
3. Santer P, Reinhard J, Schindler A, Graichen K. Detection of localized bearing faults in PMSMs by means of envelope analysis and wavelet packet transform using motor speed and current signals. *Mechatronics*. 2025; 106: 103294. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2025.103294
4. Randall RB, Antoni J. Rolling element bearing diagnostics – a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011; 25(2): 485-520. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.017
5. He X, Liu X, Lin C, Fu M, Wang J, Zhang J. Early bearing fault diagnosis in PMSMs based on HO-VMD and weighted evidence fusion of current–vibration signals. *Sensors*. 2025; 25(15): 4591. DOI: 10.3390/s25154591

6. Janrao S, Ambekar R. Fault diagnosis of an induction motor using motor current signature analysis. *Int J Appl Eng Res.* 2018;13(12):11002-11008.
7. Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2008; 55(4): 1813-1822. DOI: 10.1109/TIE.2008.9171108
8. Thomson WT, Gilmore RJ. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives. Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium. 2003: 145-156.
9. Ghorbel A, Eddai S, Limam B, Feki N, Haddar M. Bearing fault diagnosis based on artificial intelligence methods: machine learning and deep learning. *Arab J Sci Eng.* 2025; 50: 13605-13622. DOI: 10.1007/s13369-024-09488-3
10. Lee J, Wu F, Zhao W, Ghaffari M, Liao L, Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2014; 42: 314-334. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.004
11. Kodkin VL, Anikin AS, Baldenkov AA. Spectral composition of induction motor rotor current as an indicator of its efficiency. *Omsk Scientific Bulletin.* 2019; (5): 39-45. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-39-45 (In Russ.)
12. Zhileikin MM, Klimov AV, Maslennikov IK. Algorithm for generating accelerator pedal control signal providing energy-efficient power consumption of electric bus traction drive. *Izvestiya MGTU «MAMI».* 2022; 16(1): 51-60. DOI:10.17816/2074-0530-100232 (In Russ.)
13. Allal A, Khechekhouche A. Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2022; 141: 108219. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108219
14. Kumar M, Deosarkar P, Inamdar S, Mahanty RN. Field oriented control of traction PMSM drive using WBG devices for EV application. In: Proceedings of the 2023 *IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*; 2023; Bhopal, India. p. 1-8. DOI: 10.1109/RESEM57584.2023.10236344
15. Dvoeglazov EA, Zhileikin MM, Ospanbekov BK, Klimov AV. Diagnosis of material spalling on the bearing ring raceway of a permanent magnet synchronous electric motor. *Gruzovik.* 2023; (8): 25-30. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-8-25-30 (In Russ.)
16. Ruiz-Sarrio JE, Antonino-Daviu JA, Martis C. Localized bearing fault analysis for different induction machine start-up modes via vibration time–frequency envelope spectrum. *Sensors.* 2024; 24(21): 6935. DOI: 10.3390/s24216935
17. Min TH, Lee JH, Choi BK. CNN-based fault classification in induction motors using feature vector images of symmetrical components. *Electronics.* 2025; 14(8): 1679. DOI: 10.3390/electronics14081679
18. Klimov AV. Investigation of methods for improving energy efficiency considering operating modes of traction electric drive using virtual mathematical modeling. *Traktory i Selkhoz mashiny.* 2024; 91(1): 65-74. DOI: 10.17816/0321-4443-569208 (In Russ.)
19. Maksimov RO. Methodology of virtual bench testing for analysis of compatibility of vehicle system technical characteristics to detect and prevent resonance phenomena in the sprung cabin. *Izvestiya MGTU «MAMI».* 2023; 17(4): 387-400. DOI: 10.17816/2074-0530-456459 (In Russ.)
20. Qian D, Zhai X, Wei J. Modeling and Simulation of Complex Electromechanical System of More-Electric Aircraft Based on Distributed Simulation Technology. In: 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA); 2023; Nanjing, China. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 868-873. DOI: 10.1109/ICoPESA56898.2023.10141103
21. Zhang B, Li H, Kong W, Ma J. Early-stage fault diagnosis of motor bearing based on kurtosis weighting and fusion of current–vibration signals. *Sensors (Basel).* 2024; 24(11): 3373. DOI: 10.3390/s24113373
22. Ye X, Li G. An intelligent fault diagnosis method for rolling bearing using motor stator current signals. *Meas Sci Technol.* 2024; 35(8): 086131. DOI: 10.1088/1361-6501/ad4bfc
23. Mohanty AR, Kar C. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mech Syst Signal Process.* 2006; 20(1): 158-187. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.02.015
24. de las Morenas J, Belmonte LM, Morales R. Streamlined bearing fault detection using artificial intelligence in permanent magnet synchronous motors. *Machines.* 2025; 13(5): 357. DOI: 10.3390/machines13050357
25. Belousov BN, Keller AV, Kharitonchik SV, Bakhmutov SV, Berdnikov AA. Problems of applied mechanics in the development of traction and transport vehicles with mechatronic modules. *Avtomobilnaya Promyshlennost.* 2020; (1): 8-16. (In Russ.)
26. Raouf I, Kumar P, Kim HS. Deep learning-based fault diagnosis of servo motor bearing using the attention-guided feature aggregation network. *Expert Syst Appl.* 2024; 258: 125137. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125137
27. Li D, Wang W, Dong C, Fang T. Motor bearing fault diagnosis based on FFT-CNN-Transformer modeling. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering; 2025 Jan 10-12; Hefei, China. p. 615-621. DOI: 10.1145/3727648.3727748
28. Kumar MP, Velpula S, Saiprakash C, et al. Advancements in fault detection and diagnosis methods for electric vehicles: a review. *Discov Appl Sci.* 2025; 7: 1235. DOI: 10.1007/s42452-025-07758-9
29. Zsuga A, Dineva A. Data-driven onboard inter-turn short circuit fault diagnosis for electric vehicles by using real-time simulation environment. *IEEE Access.* 2023; 11: 145447-145466. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3344483
30. Keller AV, Popov AV. Methodology for synthesizing power distribution patterns between driving wheels of all-wheel drive agricultural vehicles. *Traktory i Selkhoz mashiny.* 2023; 90(6): 505-514. DOI:10.17816/0321-4443-568209 (In Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Двоеглазов Е.А. Разработал математическую модель, провел имитационное моделирование в MATLAB/Simulink, проанализировал результаты экспериментов, подготовил текст статьи.

Козелков О.А. Сформулировал научную проблему, проанализировал теоретические аспекты, участвовал в обсуждении результатов, внес вклад в редактирование статьи.

Дьяков Ф.К. Провел экспертную оценку результатов, внес вклад в редактирование статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dvoeglazov E.A. Developed the mathematical model, performed simulation modeling in MATLAB/Simulink, analyzed experimental results, prepared the manuscript.

Kozelkov O.A. Formulated the scientific problem, analyzed theoretical aspects, participated in discussion of the results.

Dyakov Ph.K. Provided expert evaluation of results, contributed to manuscript editing.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Двоеглазов Егор Александрович – аспирант Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38), ведущий инженер-программист службы электрифицированных автомобилей ООО «Инновационный центр «КАМАЗ» (121205, г. Москва, территория Инновационного центра Сколково, Большой бульвар, д. 62).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0930-4737>,

SPIN-код: 8538-2559,

e-mail: egor11022d@yandex.ru

Козелков Олег Александрович – д-р техн. наук, проф. Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4163-3721>,

SPIN-код: 8140-1200,

e-mail: kozolkow@mail.ru

Дьяков Филипп Кириллович – канд. техн. наук, доц. Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский просп., д. 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3041-9363>,

SPIN-код: 8439-0655,

e-mail: f.dyakov@madi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dvoeglazov Egor A. – postgraduate student, Moscow polytechnic university (38 B. Semenovskaya St., Moscow, 107023), a leading software engineer at the KAMAZ Innovation Center LLC (62 Bolshoy Boulevard, Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0930-4737>,

SPIN-code: 8538-2559,

e-mail: egor11022d@yandex.ru

Kozelkov Oleg A. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Moscow polytechnic university (38 B. Semenovskaya St., Moscow, 107023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4163-3721>,

SPIN-code: 8140-1200,

e-mail: kozolkow@mail.ru

Dyakov Philip K. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI) (64 Leningradsky ave., Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3041-9363>,

SPIN-code: 8439-0655,

e-mail: f.dyakov@madi.ru

**РАЗДЕЛ III.
СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**



**PART III.
CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE**