

ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ ОТКАЗОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Л. А. Паюк¹, Н. А. Воронина¹, А. В. Глазачев¹,
А. Д. Умурзакова², К. В. Хацевский³✉

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
Республика Казахстан, 010011, г. Астана, пр. Женис, 62

³Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

✉ xkv-post@rambler.ru

В работе рассмотрен актуальный вопрос применения нейросетевой диагностики как вспомогательного элемента комплекса мер по выявлению отказов асинхронного электропривода виброщековой дробилки для дробления минеральных удобрений. Особенностью данного оборудования является способность создавать мощные вибрационные нагрузки, необходимые для эффективного разрушения материала, при этом сохраняя надёжность и простоту конструкции.

Согласно статистическим данным, до 95 % асинхронных двигателей, устанавливаемых в виброщековых дробилках для дробления минеральных удобрений, составляют машины мощностью от 75 до 250 кВт. Эти двигатели наиболее подвержены действию агрессивной среды, влажности и перепадам температур и повышенным вибрационным нагрузкам, что приводит к выходу из строя в первую очередь механической части оборудования и стержней обмоток статора.

Обозначены основные проблемы применения метода нейросетевой диагностики оборудования, разработан алгоритм прогнозирования отказов исполнительного двигателя, а именно обрыв стержней в фазах статора асинхронного двигателя, который работает, как приводной для виброщековой дробилки минеральных удобрений. Приведена методика их оценки, а также развернутый алгоритм, который позволяет исключить ряд характерных отказов для данного оборудования, повысив эффективность использования асинхронного электропривода в данной отрасли.

В ходе исследования были получены рекомендации по работе и настройке рассматриваемого нейросетевого алгоритма диагностики асинхронного двигателя на предмет наличия обрыва стержней статора.

Ключевые слова: отказ, аварийный режим, электропривод переменного тока, асинхронный двигатель, диагностика неисправностей, комбинированный метод, алгоритм, нейросеть

Для цитирования: Паюк Л. А., Воронина Н. А., Глазачев А. В., Умурзакова А. Д., Хацевский К. В. Проблемы цифровизации отказов асинхронного электропривода в сельском хозяйстве. Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 97–105. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-97-105>. EDN: BEMXLJ.



© Паюк Л. А., Воронина Н. А., Глазачев А. В.,
Умурзакова А. Д., Хацевский К. В., 2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROBLEMS OF DIGITALIZING FAILURE ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES IN AGRICULTURE

L. A. Payuk¹, N. A. Voronina¹, A. V. Glazachev¹,
A. D. Umurzakova², K. V. Khatsevskiy³✉

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Lenina Ave., 30, Tomsk, 634050, Russia

²S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University,
Zhenis Ave., 62, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan

³Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ xkv-post@rambler.ru

The paper examines the relevant issue of using neural network diagnostics as an auxiliary element of a set of measures to detect failures of the asynchronous electric drive of a vibratory jaw crusher used for crushing mineral fertilizers. A distinctive feature of this equipment is its ability to generate powerful vibration loads necessary for the effective destruction of the material, while maintaining the reliability and simplicity of the design.

According to statistical data, up to 95 % of asynchronous motors installed in vibratory jaw crushers for crushing mineral fertilizers are machines with a power output ranging from 75 to 250 kW. These motors are most susceptible to the effects of aggressive environments, humidity, temperature fluctuations and increased vibration loads, which primarily leads to the failure of the mechanical parts of the equipment and the stator winding bars.

The authors demonstrate the main problems of applying the method of neural network diagnostics of equipment and develop an algorithm for predicting failures of the actuator, namely, rod breakage in the phases of the stator of an asynchronous motor that operates as a drive for a vibrating jaw crusher of mineral fertilizers. Moreover, the research presents the assessment methodology with an expanded algorithm that allows eliminating a number of typical failures for this equipment, thereby increasing the efficiency of using an asynchronous electric drive in this industry.

The research produced guidelines for operating and configuring the neural network algorithm designed to detect broken stator bars in an asynchronous motor.

Keywords: failure, emergency mode, AC electric drive, asynchronous motor, fault diagnosis, combined method, algorithm, network model

For citation: Payuk L. A., Voronina N. A., Glazachev A. V., Umurzakova A. D., Khatsevskiy K. V. Problems of digitalizing failure analysis of asynchronous electric drives in agriculture. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):97–105. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-97-105>. EDN: BEMXLJ.



© Payuk L. A., Voronina N. A., Glazachev A. V.,
Umurzakova A. D., Khatsevskiy K. V., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Повсеместно заметна тенденция внедрение современных цифровых технологий, таких как нейронные сети (НС), виртуальная реальность (VR) и искусственный интеллект (ИИ) и в повседневной жизни, и в отдельных отраслях промышленности [1]. Исключением не стала и отрасль сельского хозяйства [2, 3]. Например, в Японии внедрение НС и цифрового сельского хозяйства идёт последние 15–20 лет [4].

Более 95 % оборудования для данной отрасли построено на базе асинхронного электропривода. Мощность применяемых в сельском хозяйстве электродвигателей находится в диапазоне от 0,18 до 160 кВт [2].

Для эффективного использования рассматриваемых электроприводов применяют энергоэффективные асинхронные двигатели (АД) серии 7А, отличительной особенностью которых является увеличенный КПД при тех же условиях эксплуатации. Следует отметить, что условия эксплуатации сельхозоборудования разнятся в нашей

стране как по влажности, так и по температурным показателям. Объединяют их одни проблемы, а именно перекося фаз (зачастую вследствие пониженного напряжения сети до 168 В — напряжение одной фазы), несимметрия, изношенность сетей, периодические отключения электроэнергии [5–10]. Всё это сказывается на скорости внедрения указанных технологий в сельхозоборудовании. Следовательно, НС и ИИ должны быть вспомогательными инструментами в создании технологичного сельхозоборудования наравне с традиционными способами диагностики неисправностей, такими как анализ звука; контроль температуры; вибродиагностика (дисбаланс ротора, поломка подшипников или нарушение соосности); измерение электрических параметров (напряжение и ток, наличие дисбаланса между фазами, коэффициент мощности $\cos \varphi$ — низкий может указывать на проблемы с нагрузкой); визуальный или тепловизионный осмотр (повреждение корпуса, состояние кабельных соединений, чистота системы охлаждения; воздуховоды и вентилятор) [11].

Анализ показал, что основные причины неисправностей, которые возникают в асинхронном электроприводе, можно разделить на следующие группы:

- качество электроэнергии;
- механическая часть;
- преобразователь частоты ПЧ;
- внутренние повреждения АД;
- неправильная установка.

О качестве электроэнергии говорилось выше. Отметим, что большинство явлений, связанных с данной группой (переходное напряжение, асимметрия, гармонические искажения) приводят к нарушению изоляции исполнительного двигателя, перегреву и дополнительным расходам, так как требуют дополнительного диагностирующего оборудования.

Механическая часть электропривода сельхозоборудования также существенно влияет на причины неисправности в системе, особенно на нарушение центрирования; дисбаланс и расшатанность вала; износ подшипников; рабочие перегрузки ввиду большого износа оборудования, что влечёт за собой простои и дополнительные расходы.

Электроприводы по системе ПЧ–АД широко распространены в различном оборудовании сельскохозяйственного назначения, в частности в дробилках, ситах, сушках, конвейерах, системах микроклимата для хранения овощей и зерна и т. д. Преобразователь частоты влияет на работу привода и может привести к неисправности асинхронного двигателя, например, отражения на выходных ШИМ-сигналах электропривода, которые возникают при несогласованности полных сопротивлений источника и нагрузки (неправильная установка, неправильный выбор компонентов и продолжительная работа); среднеквадратичное отклонение тока — паразитные токи, влияющие на произвольное замыкание цепи из-за прохождения тока по защитному заземлению, но влияние последнего незначительное.

Следует отметить, что неправильная установка электрооборудования тоже может привести к неисправности и простоям электропривода. Напри-

мер, неплотно прилегающее оборудование приводит к нарушению центрирования и, как следствие, к простоям. Если напряжение на валу электродвигателя превышает изолирующие характеристики смазки подшипника, то это приводит к локальному пробою и перегреву внешнего подшипника, появляются канавки на дорожке качения подшипника. Указанные неполадки возникают в результате подачи напряжения и при работе исполнительного двигателя.

В табл. 1 представлен краткий анализ сравнения методов диагностики неисправностей в АД.

Методика

Классификаций НС существует множество: по способу обучения, по типологии, по модели НС, по способу настройки весовых коэффициентов и т. д. [12]. В данном исследовании считаем, что наиболее полную информацию несет классификация по типу решаемых задач, которые ставятся перед НС, так как указанная классификация отражает обозначенные выше особенности.

На рис. 1 представлен вариант классификации НС по моделям и решаемым задачам. Отметим, что первые попытки применения НС в области диагностики неисправностей АД были сделаны в 1993 г. группой ученых из Италии [13]. У НС была задача сравнения исправных АД (данные лабораторных исследований) и неисправных, получаемых в результате моделирования.

Применение НС связано с трудностью диагностики в связи с большим числом дополнительного измерительного и регистрирующего оборудования, которое с легкостью заменяется на анализ косвенных параметров, таких как мгновенные значения токов, электромагнитного момента, угловой скорости вращения, амплитуды вибрации по осям (виброускорение) и т. д. Труднодиагностируемыми считаются задачи целостности обмоток, стержней, возникновение крутовой дуги и т. д. Диагностирование неполадок в стержнях АД является наиболее трудно определяемой неполадкой при стандартном осмотре неисправностей приводного двигателя. Учитывая особенности работы вибрационных

Таблица 1. Сравнение методов диагностирования неисправностей в АД
Table 1. Comparison of fault diagnosis methods in asynchronous motors

Метод диагностики	Достоинства	Недостатки	Стоимость тыс. руб.
Спектральный анализ	Точность до 85 %	1. Частота дискретизации от 1500 до 3000 Гц, для каждого отдельного узла АД определенная рабочая частота. 2. Невозможность использования во всех условиях работы оборудования	60 – 400
Вибродиагностика	Точность до 70 %	1. Диагностика только механических повреждений отдельных деталей электропривода. 2. Прямой доступ для установки вибродатчиков	80 – 500
Тепловизионная диагностика	1. Точность прогноза до 95 % и дистанционность. 2. Простота монтажа теплового реле (датчика)	1. Требуется установки датчика сразу при изготовлении АД. 2. Для АД закрытого исполнения неприменим. 3. Ограниченный перечень неисправностей для их установления	70 – 180
Визуальный осмотр	Простота	Точность менее 30 %	—
Методы диагностики параметров магнитного поля	Возможность определять как электрические, так и механические повреждения	Высокая чувствительность устройства к внешним электромагнитным полям	50 – 200
Диагностика с НС	Выявляет широкий спектр неисправностей	1. Сложность аппаратной части. 2. Необходимость наличия БД для корректного обучения НС	50 – 300

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

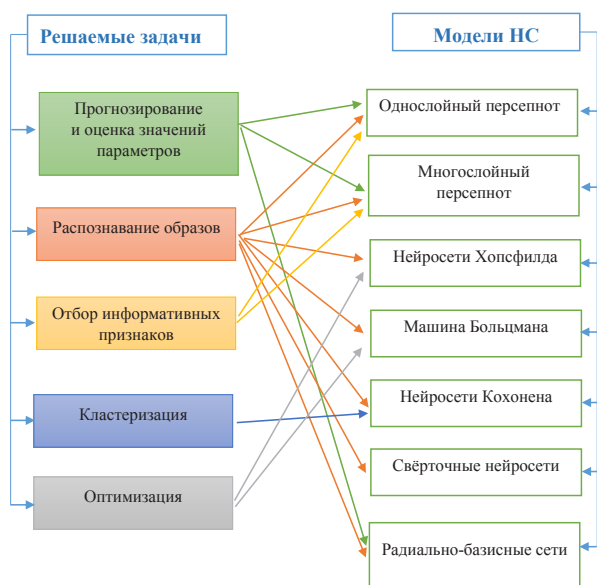


Рис. 1. Классификация моделей НС
Fig. 1. Classification of neural network models
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

щековых дробилок для дробления минеральных удобрений, где основные нагрузки — это ударные и вибрационные, возникает увеличение риска выхода из строя именно стержней АД (более 20 %, при 5 % общепромышленной эксплуатации) [6, 7, 14]. Обозначенные выше задачи решаются при помощи однослойных или многослойных моделей. Группой исследователей [15–17] была создана модель НС, которая обнаруживала в стержнях обрыв и межвитковое короткое замыкание за счёт сравнения текущего значения тока и его среднеквадратичного значения. На первом этапе первичная НС выполняет роль анализатора, сравнивая два тока, на основе анализа которых и предполагался неисправный стержень в АД. Пример сверточной НС представлен в работе [18], где реализован механизм обнаружения неисправностей путем сопоставления сигналов статора, записанных с трехфазного АД в установившемся режиме. Указанные сигналы используются для определения исправного состояния, а также состояний, требующих ремонта, которые отображаются в виде облака точек в трёхмерном пространстве с помощью вокселизации. Предложенный метод превосходит классический метод диагностики на основе глубокого обучения, поскольку он проецирует токи статора на двумерные RGB-изображения, что предотвращает коллапс данных.

НС для оптимизации задач, связанных с неисправностями в роторе АД, также применяются, но с более сложной структурой, возможностью обучения в процессе работы НС, наличием обратных связей между обучающей и обучаемой системами через буфер накопленной информации с вычленением необходимой НС, построенной по алгоритму Хопсфилда [19, 20].

Методы и средства НС диагностики параметров асинхронных двигателей и электроприводов на их основе достаточно обширны [21–27], но имеют общие недостатки:

— разная чувствительность к изменениям основных рабочих параметров и режимов работы АД;

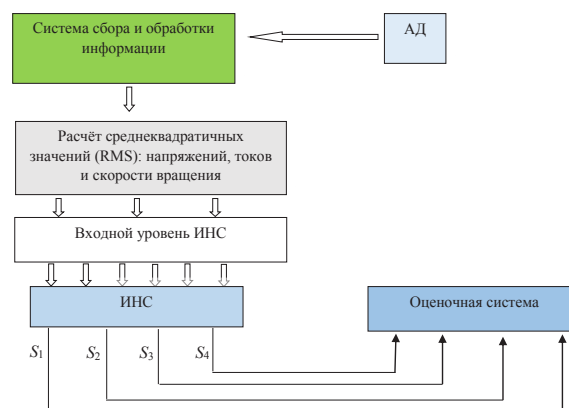


Рис. 2. Общий алгоритм диагностики неисправности при помощи НС

Fig. 2. General algorithm for fault diagnosis using neural networks

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

— невозможность своевременно отследить энергетические показатели исполнительного двигателя;

— сложность реализации при наличии большого числа контролируемых параметров в АД, в силовой и механических частях;

— наличие рассогласованности между частями блока анализа и оценки;

— отсутствие унификации;

— постоянное обучение;

— наличие серверного узла с большой оперативной памятью.

Следовательно, попытаемся создать искусственную нейронную сеть (ИНС) для прогнозирования неисправностей в АД вибрационных щековых дробилок для дробления минеральных удобрений, который является наибольшим источником неисправностей в рассматриваемом оборудовании [6, 12, 28, 29].

Более 80 % неисправностей в сельхозоборудовании АД приходится на повреждение обмотки статора и возникновение коротких замыканий. Для решения данной задачи воспользуемся наработками в данной области и разработаем алгоритм создания НС (рис. 2) для определения дефектов и неисправностей в статоре АД.

Особенностью НС будем считать наличие базы данных (БД), которая будет задавать эталонное значение (ток в фазах статора при нормальной работе), и блок оценки, где будет происходить сравнение текущего среднеквадратичного значения тока фазы статора с последующим обучением НС (в случае возникновения обрыва стержня от 1 до l). На входной уровень нейронной сети поступают среднеквадратичные значения параметров.

Аналитически такой подход можно описать выражениями (1) и (2) для определения среднеквадратичного значения (RMS):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}, \quad (1)$$

то есть RMS — корень из суммы квадратов действительных значений синусоидального напряжения или тока:

$$RMS \cong \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} u_i^2}. \quad (2)$$

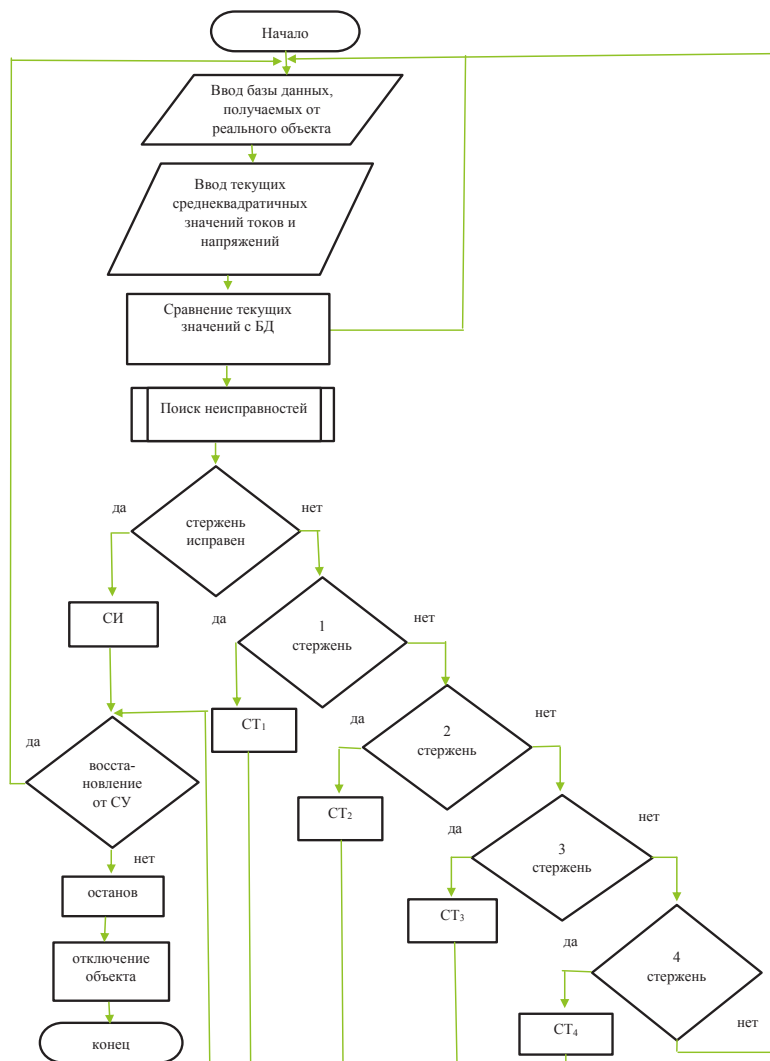


Рис. 3. Развёрнутый алгоритм диагностики неисправности при помощи НС

Fig. 3. Detailed fault diagnosis algorithm using neural networks

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Таблица 2. Классификация режимов работы
Table 2. Classification of operating modes

Состояние двигателя	Символ	Код			
		S_1	S_2	S_3	S_4
Исправное	СИ	0	0	0	0
Сломан 1 стержень	СТ ₁	1	0	0	0
Сломано 2 стержня	СТ ₂	0	1	0	0
Сломано 3 стержня	СТ ₃	0	0	1	0
Сломано 4 стержня	СТ ₄	0	0	0	1

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

При оцифровывании сигнал разбивается на шаги и аппроксимируется с шагом N .

Зачастую, когда стержень фазы статора АД повреждён, в данной области ослабевает магнитное поле, что приводит к ослаблению тока, проходящего через стержень и, как следствие, происходит формирование неоднородного поля ротора (колебания тока статора), которое может привести к падению электромагнитного момента. Отметим, что амплитуда колебаний тока в фазе статора тем выше, чем больше количество неисправных стержней. БД формировалась из открытых источников [28, 29].

Представим базу для обучения НС в виде класса векторов (матрица) (табл. 1), где каждый класс отображает состояние асинхронного двигателя, а вектора — эффективные значения параметров $I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ и ω и, как следствие, обеспечивают входной уровень НС (рис. 2).

В табл. 2 показана классификация, которую получили в случае исправного и неисправного состояний. Отметим, что каждому состоянию двигателя соответствует определённый код ($S_1 - S_4$) и символ для обозначения уровня НС. Состояние системы «Исправно» — «СИ» (система исправна) имеет зна-

чение «0» под каждым номером стержня, а обозначение «СТ_л = 1» говорит о том, что стержень с соответствующим номером — сломан.

Результаты

На рис. 3 представлен развернутый алгоритм комплексного диагностирования неисправностей электродвигателя по среднеквадратичному значению токов и напряжений, построенный на основе табл. 2.

С помощью спектрального анализа питающего тока и данных по вибрации проводим комплексную диагностику электродвигателя и определяем значения параметров токов и напряжений для базы данных. Имеющиеся параметры разделяются на классы, которые отличаются друг от друга значениями исследуемых параметров в пределах от рабочих до критических с шагом в 15 % (например, ток фазы обмотки статора).

Процедура многопараметрического диагностирования электродвигателя включает в себя классификацию технического состояния и поиск неисправностей в случае, если текущие параметры достигают критических значений.

Работу алгоритма можно разделить на несколько этапов:

1. Начало алгоритма — сбор информации о данных по спектральному анализу и вибрации; ввод текущих среднеквадратичных значений токов и напряжений в фазы АД.

2. Процедура сравнения — выявление отклонений текущих параметров от значений в БД.

3. Поиск неисправностей в стержнях статора асинхронного двигателя, который ведется с согласованием работы оборудования и системы управления. Если стержень 1 исправен, то система переходит в состояние «СИ» в начало алгоритма, если неисправность подтвердилась и нет возможности восстановить от системы управления работу оборудования, то происходит «останов» и отключение объекта. Аналогичным образом происходит анализ неисправностей при выходе из строя стержня 2, 3 или 4 (режимы «СТ₂», «СТ₃» и «СТ₄», соответственно) при анализе параметров и отрицательном ответе на запрос при обработке алгоритма.

По представленному алгоритму (рис. 3) разрабатываются технические устройства, в состав которых должны входить первичные датчики, осуществляющие измерение диагностируемых параметров, и оборудование для обработки информации, обеспечивающее работу алгоритмов диагностирования и преобразующее результаты диагностики объекта.

Обязательным условием применения данного алгоритма оценки технического состояния электрооборудования на практике является наличие устройства сопряжения, на которое поступают данные с датчиков, а также достаточно мощный ноутбук с возможностью выхода в Интернет. В памяти носителя регистрируются данные с датчиков предварительно обработанного сигнала (перевод его в цифровой вид), который проходит программную обработку для контроля технического состояния объекта и выявления дефектов в режиме реального времени. При выявлении предаварийного технического состояния система диагностирования производит отключение поврежденного АД посредством блока управления.

Выводы

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

— применение НС в сочетании с традиционными способами диагностики неисправностей, возникающих в АД сельхозоборудования, позволяет увеличить срок службы оборудования;

— наиболее эффективно использование НС в системах ПЧ—АД, так как есть каналы управления и мониторинга в данных системах, что позволяет минимизировать дополнительную аппаратную часть, а следовательно, сэкономить финансовые средства предприятий.

Список источников / References

1. Балашов А. М. Цифровизация и использование искусственного интеллекта в производственных процессах современных предприятий // Теоретическая экономика. 2024. № 11. С. 34—41. <https://doi.org/10.52957/2221-3260-2024-11-34-41> EDN: UKMLFE.

Balashov A. M. Digitalization and the use of artificial intelligence in the production processes of modern enterprises. *Theoretical Economics*. 2024;11:34—41. <https://doi.org/10.52957/2221-3260-2024-11-34-41>. EDN: UKMLFE. (In Russ.).

2. Черникова Т. М., Дабаров В. В., Каченков А. К. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей // Техника и технология горного дела. 2024. № 1 (24). С. 77—86. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2024-1-77-86>. EDN: EVEQUJ.

Chemikova T. M., Dabarov V. V., Kachenkov A. K. Increasing the energy efficiency of asynchronous motors. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2024;1(24):77—86. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2024-1-77-86>. EDN: EVEQUJ. (In Russ.).

3. Kujawa S., Niedbala G. Artificial neural networks in agriculture. *Agriculture*. 2021;11(6):497. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060497>. EDN: ARJYSG.

4. Воробьева Н. А., Колесников М. В. Трансформации аграрного сектора Японии в рамках полномасштабной цифровизации // Известия Восточного института. 2022. № 3 (55). С. 144—158. <https://doi.org/10.24866/2542-1611/2022-3/144-158>. EDN: JOCIEK.

Vorobeva N. A., Kolesnikov M. V. Transformation of the agricultural sector in Japan as part of full-scale digitalization. *Oriental Institute Journal*. 2022;3(55):144—158. <https://doi.org/10.24866/2542-1611/2022-3/144-158>. EDN: JOCIEK. (In Russ.).

5. Коробков И. Ф., Шилова Т. В. Особенности эксплуатации электродвигателей в сельском хозяйстве // Вестник НГИЭИ. 2011. № 3 (4). С. 122—132. EDN: PVEWSJ.

Korobkov N. F., Shilova T. V. The peculiarities of exploitation of the electric engines in agriculture. *Bulletin NGIEI*. 2011;3(4):122—132. EDN: PVEWSJ. (In Russ.).

6. Кожухов В. А., Стрижнев С. А. Обзор технологических отказов асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве // Вестник КрасГАУ. 2006. № 11. С. 199—202. EDN: KYHUIP.

Kozhukhov V. A., Strizhnev S. A. Obzor tekhnologicheskikh otkazov asinkhronnykh dvigateley v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. *Bulletin of KSAU*. 2006;11:199—202. EDN: KYHUIP. (In Russ.).

7. Устинов М. А. Обзор существующих методов диагностирования электродвигателей // Форум молодых ученых. 2020. № 5 (45). С. 481—486. EDN: VINYRT.

Ustinov M. A. Review of existing diagnostic methods of electric motors. *Forum of Young Scientists*. 2020;5(45):481—486. EDN: VINYRT. (In Russ.).

8. Zapparoli I. O., Júnior A. M. G., Rossa A. J. [et al.]. Electrical current analysis for non-invasive early inter-turn short-circuit detection in FOC driven induction motors. *Measurement Science and Technology*. 2025;4(36):046117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/adc1e9>. EDN: PPCCOW.

9. Iglesias Martínez M. E., Antonino-Daviu J. A., Dunai L. [et al.]. Higher-order spectral analysis and artificial intelligence

for diagnosing faults in electrical machines: An overview. *Mathematics*. 2024;12(24):4032. <https://doi.org/10.3390/math12244032>. EDN: IWOWMY.

10. Боннет Я. В., Логинов А. Ю., Прудников А. Ю. Особенности эксплуатации электродвигателей на птицефабрике // Актуальные вопросы аграрной науки. 2023. № 47. С. 8–17. [https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-\(2\)47-8-17](https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-(2)47-8-17). EDN: EHQBVC.

Bonnet Ya. V., Loginov A. Yu., Prudnikov A. Yu. Features of operation of electric motors at a poultry farm. *Electronic scientific-Practical journal "Actual issues of agrarian science"*. 2023;47:8–17. [https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-\(2\)47-8-17](https://doi.org/10.51215/2411-6483-2023-(2)47-8-17). EDN: EHQBVC. (In Russ.).

11. Хацевский К. В., Умурзакова А. Д., Воронина Н. А., Ичева Ю. Б. Анализ методов диагностирования неисправностей трехфазного асинхронного электродвигателя // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 42–46. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>. EDN: URHUMD.

Khatsevskiy K. V., Umurzakova A. D., Voronina N. A., Icheva Yu. B. The analysis of method for diagnosing faults of three-phase asynchronous motor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020;2(170):42–46. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>. EDN: URHUMD. (In Russ.).

12. Чичков Б. А., Раков П. И. Классификация искусственных нейронных сетей // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 85. С. 82–87. EDN: JWVRCN.

Chichkov B. A., Rakov P. I. Klassifikatsiya iskusstvennykh neyronnykh setey. *Civil Aviation High Technologies*. 2005;85:82–87. EDN: JWVRCN. (In Russ.).

13. Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults. *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. 1993;1:316–323.

14. Мугалимов Р. Г., Мугалимова А. Р., Калугин Ю. А., Одинцов К. Э. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 70–78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78). EDN: YARKIX.

Mugalimov R. G., Mugalimova A. R., Kalugin Yu. A., Odintsov K. E. Method of inductions motor malfunction diagnostics and identification during operation. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018;3(40):70–78. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-70-78](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-70-78). EDN: YARKIX. (In Russ.).

15. Gana M., Achour H., Belaid K. [et al.]. Non-invasive intelligent monitoring system for fault detection in induction motor based on bio piezoelectric sensor using ANN. *Measurement Science and Technology*. 2022;33(6):065105. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac4b8f>. EDN: TTEDUX.

16. Kerboua A., Kelaiaia R. Fault Diagnosis in an asynchronous motor using three-dimensional convolutional neural network. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;49(3):3467–3485. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08025-y>. EDN: AZIUOJ.

17. Garcia-Calva T., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Caveiro V., Romero-Troncoso R. Early detection of faults in induction motors: A review. *Energies*. 2022;15(21):7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>.

18. Дробов А. В., Мирош Д. В., Галушко В. Н. Диагностика асинхронных электродвигателей с применением виброанализатора и сверточной нейронной сети // Энергетическая стратегия. 2024. № 1 (97). С. 38–41. EDN: SDUYXK.

Drobov A. V., Mirosh D. V., Galushko V. N. Diagnostika asinkhronnykh elektrodvigatelay s primeneniym vibroanalizatora i svertochnoy neyronnoy seti. *Energeticheskaya Strategiya*. 2024;1(97):38–41. EDN: SDUYXK. (In Russ.).

19. Capolino G.-A., Antonino-Daviu J. A., Riera-Guasp M. Modern diagnostics techniques for electrical machines, power electronics, and drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(3):1738–1745. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2391186>.

20. Fournier E., Picot A., Regnier J. [et al.]. Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine using spectral kurtosis with reference. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(3):1879–1887. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2341561>.

21. Баннов Д. М. Анализ методов диагностики обрыва стержня ротора асинхронного двигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 3-4. С. 5–23. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23>. EDN: HGBIQU.

Bannov D. M. Analysis of methods for diagnostics broken rotor bar of induction motor. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2021;17(3-4):5–23. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-5-23>. EDN: HGBIQU. (In Russ.).

22. Белоглазов Д. А. Особенности нейросетевых решений, достоинства и недостатки, перспективы применения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 7 (84). С. 105–110. EDN: KAPCWZ.

Beloglazov D. A. Features neurons decisions, merits and demerits, application prospects. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2008;7(84):105–110. EDN: KAPCWZ. (In Russ.).

23. Гришин Ф. С., Филимонов М. Н., Буганара С. Исследование возможностей создания системы диагностики параметров асинхронного двигателя мехатронного электромеханического модуля на основе искусственных нейронных сетей // Молодой исследователь Дона. 2023. Т. 8, № 3 (42). С. 15–17. EDN: SZKNGP.

Grishin F. S., Filimonov M. N., Bugarara S. Investigation of the possibilities of creating a system for diagnosing the parameters of an asynchronous motor of a mechatronic electromechanical module based on artificial neural networks (ANN). *Young Explorer of the Don*. 2023;8(3):15–17. EDN: SZKNGP. (In Russ.).

24. Середа Е. Г., Соловьев А. С. Определение неисправностей асинхронных двигателей с помощью алгоритмов машинного обучения // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 261–272. <https://doi.org/10.17816/transsyst682000>. EDN: KMVGRF.

Sereda E. G., Solovyov A. S. Asynchronous motor fault detection using machine learning algorithms. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):261–272. <https://doi.org/10.17816/transsyst682000>. EDN: KMVGRF. (In Russ.).

25. Бирюков А. Э., Сорокин Д. Г. Математическая модель асинхронного электродвигателя с учетом насыщения и нагрева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3 (79). С. 58–76. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3\(79\).58-76](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76). EDN: EGQNKJ.

Biryukov A. E., Sorokin D. G. Mathematical model of an induction machine with consideration of saturation and heating. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2023;3(79):58–76. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3\(79\).58-76](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2023.3(79).58-76). EDN: EGQNKJ. (In Russ.).

26. Houili M., Sahraoui M., Cardoso A. J. M., Alloui A. Zero-sequence voltage outperforms MCSA-STFT for a robust inter-turn short-circuit fault diagnosis in three-phase induction motors: A comparative study. *Machines*. 2025;13(6):501. <https://doi.org/10.3390/machines13060501>. EDN: IDCTAT.

27. Мирош Д. В. Нейросетевая обработка параметров состояния асинхронных двигателей при межвитковом замыкании // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 3 (51). С. 105–115. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-9>. EDN: VHQXOB.

Mirosh D. V. Neural network processing of asynchronous motor state parameters in case of inter-turn closure. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;3(51):105–115. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-9>. EDN: VHQXOB. (In Russ.).

28. Кучеренко Д. Е., Сторчак Н. В., Зубков С. С. О способах повышения надёжности электродвигателей сельскохозяй-

ственного назначения // Приднепровский научный вестник. 2025. Т. 6, № 2. С. 88–90. EDN: MLCQAC.

Kucherenko D. E., Storchak N. V., Zubkov S. S. O sposobakh povysheniya nadezhnosti elektrodvigately sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya. *Pridneprovskiy Nauchnyy Vestnik*. 2025;6(2):88–90. EDN: MLCQAC. (In Russ.).

29. Сторчевой В. Ф., Ахмедьянова Е. Н., Редников С. Н., Хайретдинова К. Т. Исследование потерь энергии и дефектов в электродвигателях при эксплуатации в АПК // Вестник НГИЭИ. 2025. № 11 (174). С. 56–66. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-11-56-66>. EDN: QQNJBO.

Storchevoy V. F., Akhmedyanova E. N., Rednikov S. N., Khayretdinova K. T. Investigation of energy losses and defects in electric motors during operation in agriculture. *Bulletin NGIEI*. 2025;11(174):56–66. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-11-56-66>. EDN: QQNJBO. (In Russ.).

Вклад авторов:

Л. А. Паюк. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка выводов, формулировка гипотезы о недостаточности существующих методик, выбор направления исследования, общее редактирование текста.

Н. А. Воронина. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования нейросетевых алгоритмов для диагностики асинхронных двигателей, общее редактирование текста.

А. В. Глазачев. Выбор направления исследования, выявление недостатков существующих методик, сравнение с альтернативными подходами решения проблемы моделирования с использованием двухслойного перцептрона для анализа неисправностей асинхронных двигателей сельскохозяйственного оборудования, общее редактирование текста.

А. Д. Умурзакова. Обзор отечественных и зарубежных источников, вывод и адаптация расчетных формул, реализация исследования.

К. В. Хацевский. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, формулировка выводов, формулировка гипотезы о недостаточности существующих методик, выбор и корректировка направления исследования, общее редактирование текста.

Authors' contribution:

Lyubov A. Payuk. Setting the goal, research objectives and the scientific problem, formulating conclusions, formulating a hypothesis about the inadequacy of existing methods, choosing a research direction, general editing of the text.

Nataliya A. Voronina. Choosing the research direction, identifying the shortcomings of existing methods, comparing them with alternative approaches to solving the problem of modeling neural network algorithms for diagnosing asynchronous motors, general text editing.

Alexander V. Glazachev. Choosing the research direction, identifying the shortcomings of existing methods, comparing them with alternative approaches to solving the modeling problem using a two-layer perceptron for analysing faults in asynchronous motors used in agricultural equipment, general text editing.

Anara D. Umurzakova. Reviewing of domestic and foreign sources, derivation and adaptation of calculation formulas, research implementation.

Konstantin V. Khatsevskiy. Formulating the goal, research objectives and the scientific problem, formulating conclusions, formulating a hypothesis

about the inadequacy of existing methods, selecting and adjusting the research direction, general editing of the text.

Информация об авторах:

ПАЮК Любовь Анатольевна, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 3333-1750

AuthorID (РИНЦ): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

e-mail: pla@tpu.ru

ВОРОНИНА Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 3176-9091

AuthorID (РИНЦ): 790645

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9327-6441>

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

e-mail: voronina@tpu.ru

ГЛАЗАЧЕВ Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент отделения «Электроэнергетика и электротехника» ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 4516-6778

AuthorID (РИНЦ): 297842

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-6744>

AuthorID (SCOPUS): 57188629801

ResearcherID: E-6908-2017

e-mail: alexg@tpu.ru

УМУРЗАКОВА Анара Даукеновна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Эксплуатация электрооборудования» Казахского агротехнического исследовательского университета имени С. Сейфуллина, г. Астана.

SPIN-код: 8079-5187

AuthorID (РИНЦ): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

e-mail: granat_72@mail.ru

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9504-1312>

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

e-mail: xkv-post@rambler.ru

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 17.12.2025; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 04.08.2026.

Information about the authors:

PAYUK Lyubov Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department,

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 3333-1750

AuthorID (RSCI): 555556

AuthorID (SCOPUS): 57160434900

e-mail: pla@tpu.ru

VORONINA Nataliya Alekseevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 3176-9091

AuthorID (RSCI): 790645

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9327-6441>

AuthorID (SCOPUS): 57159363700

ResearcherID: I-9992-2018

e-mail: voronina@tpu.ru

GLAZACHEV Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

SPIN-code: 4516-6778

AuthorID (RSCI): 297842

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2174-6744>

AuthorID (SCOPUS): 57188629801

ResearcherID: E-6908-2017

e-mail: alexg@tpu.ru

UMURZAKOVA Anara Daukenovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Electrical Equipment

Operation Department, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan.

SPIN-code: 8079-5187

AuthorID (RSCI): 834837

AuthorID (SCOPUS): 56485976200

e-mail: granat_72@mail.ru

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7219-6033

AuthorID (RSCI): 465857

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9504-1312>

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

e-mail: xkv-post@rambler.ru

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

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 16.03.2026; accepted for publication 04.08.2026.