

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ МЕЖВИТКОВОМ ЗАМЫКАНИИ

Д. В. Мирош

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь
dimamiroshheat@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Средства технической диагностики, применяемые на сегодняшний день при ремонте и обслуживании асинхронных двигателей, являются значимым аспектом функционирования важнейших устройств на предприятиях. Асинхронный привод применяется во многих сферах жизнедеятельности человека: как в промышленности, так и в быту. *Материалы и методы.* Приведена технология применения сверточных нейронных сетей для диагностики межвитковых замыканий в трехфазных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, основанная на использовании графического изображения отношений энергетических характеристик. *Результаты.* В качестве материала для проверки возможностей и отработки нейронной сети использовались данные по исследованиям вибрации тяговых электродвигателей тепловозов, а также непосредственные измерения тока исследуемых асинхронных электродвигателей. *Выводы.* Применение разработанных нейронных сетей позволяет: совершенствовать диагностические исследования для асинхронных машин различных мощностей, легко адаптировать их под различное габаритное исполнение, повысить качество предоставляемых диагностических услуг и снизить трудозатраты специалистов диагностической области при исследовании параметров состояния электрической машины.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, асинхронный электродвигатель, диагностика, межвитковое замыкание, обмотка статора, искусственное замыкание, тяговый подвижной состав, схема подключения электродвигателя, эффективность диагностики, энергоэффективность

Благодарности: выражаю слова благодарности в адрес редакции журнала «Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе» за предоставленную возможность поделиться результатами исследований, а также благодарю своего научного руководителя Галушко Виктора Николаевича за его бесценный вклад в развитие исследования и Монарховича Илью Евгеньевича, чьи навыки и знания позволили реализовать идеи функционирования нейронной сети.

Для цитирования: Мирош Д. В. Нейросетевая обработка параметров состояния асинхронных двигателей при межвитковом замыкании // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 3. С. 105–115. doi: 10.21685/2227-8486-2024-3-9

NEURAL NETWORK PROCESSING OF ASYNCHRONOUS MOTOR STATE PARAMETERS IN CASE OF INTER-TURN CLOSURE

D.V. Mirosh

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus
dimamiroshheat@gmail.com

Abstract. *Background.* The technical diagnostic tools used today in the repair and maintenance of asynchronous motors are an important aspect of the functioning of the most important devices in enterprises. Asynchronous drive is used in many areas of human activity, in industry as well as in everyday life. *Materials and methods.* The materials of this article present the technology of using convolutional neural networks for the diagnosis of inter-turn circuits in three-phase asynchronous motors with a short-circuited rotor, based on the use of a graphical representation of the relations of energy characteristics. *Results.* Data on vibration studies of traction electric motors of diesel locomotives, as well as direct measurements of the current of the studied asynchronous electric motors, were used as material for testing the capabilities and testing of the neural network. *Conclusions.* The use of the developed neural networks allows to improve diagnostic studies for asynchronous machines of various capacities, easily adapt them to different dimensional designs, improve the quality of diagnostic services provided and reduce the labor costs of diagnostic specialists in the study of the parameters of the state of an electric machine.

Keywords: convolutional neural network, asynchronous electric motor, diagnostics, inter-turn closure, stator winding, artificial closure, traction rolling stock, electric motor connection scheme, diagnostic efficiency, energy efficiency

Acknowledgements: I would like to express my gratitude to the editorial board of the journal «Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society» for the opportunity to share the research results. I would like to thank my supervisor, Viktor Nikolaevich Galushko, for his invaluable contribution to the development of the study, as well as Ilya Evgenievich Monarchovich, whose skills and knowledge made it possible to implement the ideas of the functioning of a neural network.

For citation: Mirosh D.V. Neural network processing of asynchronous motor state parameters in case of inter-turn closure. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(3):105–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-3-9

Введение

По некоторым оценкам, количество электроэнергии, приходящейся на долю потребления асинхронным приводом, составляет около 50 % от всех электродвигателей. Доля асинхронного привода среди всех электрических машин может достигать 80 % [1]. Данное обстоятельство свидетельствует о высокой степени использования асинхронного двигателя. Это вызвано относительно малой стоимостью, небольшим количеством узлов и, как следствие, высокой надежностью. Применение асинхронного двигателя получило дополнительный подъем в связи с развитием техники по преобразованию частоты питающей сети. В связи с этим есть основание полагать, что развитие методов диагностики асинхронных электродвигателей с применением в них современных технологий позволит предотвращать развитие неисправностей, т.е.

использовать упреждающий характер эксплуатации этого распространенного оборудования.

Анализ существующих диагностических комплексов указывает на все большее их усложнение, что предъявляет массу требований к разработчикам. Например, в работе [2] авторы используют комплекс измерительного оборудования, что позволяет достоверно оценивать состояние асинхронных электродвигателей, отправляемых в ремонт и уже прошедших цикл ремонтных операций. Предлагаемый подход позволяет добиться разносторонней оценки технического состояния и снизить человеческий фактор при принятии решений. Однако представленный стенд имеет высокую стоимость применяемого оборудования и большую длительность времени испытаний, что обусловлено поочередной диагностикой по целому списку требований, предъявляемых нормативными документами. К тому же, насколько можно судить, комплекс нацелен на оценку соответствия рабочему состоянию, что только косвенно позволяет оценить возможные неисправности.

В работе [3] авторы рассматривают большое количество применяемых методов, а также диагностический комплекс. Используемая система слияния данных, которая обрабатывает информацию на основе анализа тока, уровня вибрации и теплового поля, является весьма действенным техническим решением. Основное преимущество заключается в снижении количества применяемых измерительных устройств с указанием вида неисправности, что может благоприятно сказаться на конечной стоимости и габаритах стенда. Упор на вычислительную обработку программного обеспечения позволяет получать максимальное количество информации из минимума задействованных устройств.

Учитывая вышеприведенный краткий обзор применяемых комплексов, можно сделать предположение о дальнейшем перераспределении основной роли с источников информации на способы ее обработки. Данное заключение особенно уместно в связи с возрастающей ролью нейронных сетей, постоянным развитием искусственного интеллекта, а также стремительным их внедрением.

Нейронная сеть используется из-за возможности улучшить эффективность диагностики. Она легко расширяется, совершенствуется и адаптируется путем включения новых данных по мере их поступления. Перед нейронной сетью может ставиться масса задач, одна из которых – классификация. Например, использование нейронной сети позволяет классифицировать большой объем данных при анализе тока в обмотках статора асинхронной машины. Для выполнения классификации необходимо прикрепить к каждому образцу схему, описывающую рабочее состояние двигателя на момент сбора данных. Входным сигналом служит шаблон, а выходным – метка присвоения определенной категории [4]. При этом технология обработки информации должна учитывать такую важную составляющую, как влияние изменяющейся во времени нагрузки, что несколько увеличивает сложность разработки нейронной сети.

Исследования показывают, что нейронные сети успешно применяются для диагностики межвитковых замыканий. В одном из исследований, представленном в работе [5], авторы предложили метод диагностики межвитковых замыканий в трансформаторах на основе глубоких нейронных сетей. Этот

метод показал высокую точность и надежность в обнаружении замыканий даже при наличии шума и других помех. Другие исследования в работе [6] подтверждают эффективность нейронных сетей при диагностике в асинхронных двигателях. Авторы предложили метод на основе сверточных нейронных сетей для обнаружения и классификации различных дефектов в асинхронных двигателях, включая межвитковые замыкания.

В работах [7] и [8] авторы указывают на возможность применения современных технологий на предприятиях железнодорожной отрасли как наиболее энергоэффективного сектора транспорта. Приводится количественный анализ по факту выхода из строя асинхронных двигателей, использующихся в качестве тяговых и вспомогательных машин на электровозах серии ВЛ-80^С, БКГ1 и БКГ2, что вносит некоторый поправочный коэффициент по наиболее часто встречающимся неисправностям. Дополнительно прорабатывается расширение возможностей работы сверточной нейронной сети с различными входными данными: температурой, током, вибрацией и др.

Применение нейронных сетей для диагностики целого ряда неисправностей в целом и межвитковых замыканий в частности в асинхронных двигателях является перспективным направлением исследований. Нейронная сеть представляет собой распределенный параллельный процессор, состоящий из элементарных единиц обработки информации, накапливающих экспериментальные знания и предоставляющих их для последующей обработки [9]. Нейронная сеть сходна с мозгом как минимум с двух точек зрения:

– знания поступают в сеть из окружающей среды и используются в процессе обучения;

– накопление знаний обеспечивается при помощи связей между нейронами, называемыми синаптическими весами (синапсами).

Широкое освещение тематики нейронных сетей в научном сообществе может свидетельствовать о высокой эффективности и возрастающей роли данного инструмента.

Обсуждение

При исследовании неисправностей электродвигателей было задействовано различное оборудование, куда входят амперметры, осциллограф, вибронализаторы и другие измерительные приборы. Так, при использовании вибронализаторов и виброколлекторов можно косвенно судить об имеющейся неисправности подшипникового узла и отчасти о неисправности электрической части. Предварительные данные по вибродиагностике были получены в локомотивном депо Гомель Белорусской железной дороги при исследовании возможностей обучения сверточной нейронной сети по сложным изображениям. Контроль вибрации производился для диагностирования подшипников колесно-моторных блоков локомотивов при помощи вибронализатора СД-21. Пример диаграмм представлен на рис. 1 [8].

Обучающая выборка была сформирована согласно заключениям, выданным программным обеспечением DREAM32, которое входит в комплект поставки с вибронализатором СД-21. Встроенный ресурс распределения программой различных неисправностей (например, дефект наружного кольца, излом сепаратора, повышенный шум) позволил условно выделить несколько уровней дефекта: незначительный и критический. Для обучающей выборки

было вручную отобрано около 600 изображений диаграмм и преобразовано до уменьшенных масштабов, что способствует повышению скорости обучения.

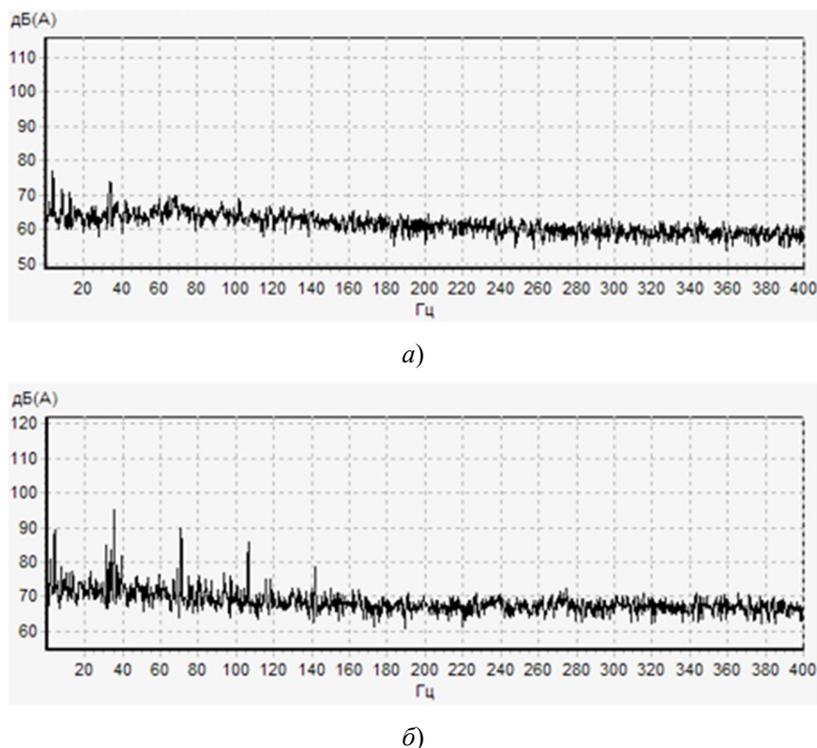


Рис. 1. Пример вибродиаграмм для подшипников колесно-моторных блоков тепловозов:

а – дефекты отсутствуют или незначительны; б – требуется разборка узла с оценкой текущего состояния и объема обслуживания или ремонта

Точность разработанной и обученной сверточной нейронной сети (метрика *accuracy*) составила 0,9904. Это позволяет с высокой достоверностью определять дефектное состояние подшипникового узла по вибродиаграмме. Изучение качества нейронной сети по другим метрикам требует дополнительных исследований и в данный момент не является значимым. Использование сверточной нейронной сети, которая работает с изображением, было обусловлено несколькими весомыми причинами:

- невозможность использования в ходе исследования дорогостоящего оборудования, находящегося в собственности подразделения организации Белорусской железной дороги, для получения иного вида данных, нежели изображения;

- использование, к примеру, недорогих датчиков вибрации является более рациональным с точки зрения затрат на конечный диагностический продукт, но потребовало бы больше времени на получение и обработку сигналов, отладку программного обеспечения, что в данный момент исследования является недопустимым;

- исследование графика, а именно формы сигнала, может позволить отвлечься от конкретных цифровых значений, которые будут различными в

зависимости от типа рассматриваемого электродвигателя, что является более универсальным способом оценки состояния электрической машины.

Примеры реализации и преимущества работы со сверточной нейронной сетью при исследовании неисправностей электрических машин переменного тока рассмотрены авторами в различных публикациях [7, 9–11].

В данном исследовании разработанная сверточная нейронная сеть реализована в библиотеке *Tensor Flow* для языка *Python 3.10*. Она имеет два сверточных слоя с пулингом, за которыми следуют два полносвязных слоя и выходной слой для классификации на три степени тяжести дефектов.

Для получения исходных данных при межвитковом замыкании в качестве испытуемых электродвигателей были использованы трехфазные с однослойной всыпной обмоткой и классом изоляции обмоток статора – *B*. Искусственно созданные повреждения изоляции для различного числа витков представлены на рис. 2. Контролируемое управление режимом замыкания осуществлялось с помощью реле (включение, отключение, переключение на различное число короткозамкнутых витков обмотки фазы статора), закрепленной на подшипниковой крышке.



Рис. 2. Искусственное повреждение обмотки статора с выводами для управления режимом межвиткового замыкания

В ходе экспериментов было замечено, что при разных схемах подключения изменение токов в обмотках распределяется по-разному. Для схемы подключения «треугольник» (также характерно и для схемы «звезда с заземленной нейтралью») при замыкании возрастает значение тока в поврежденной обмотке, а ток в двух других обмотках остается без существенных изменений (рис. 3).

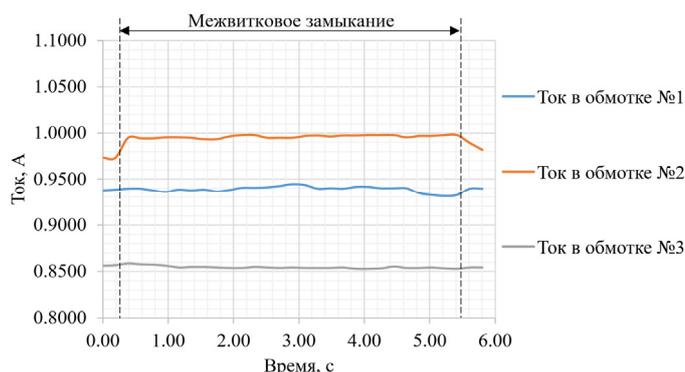


Рис. 3. Изменение тока в обмотках статора при межвитковом замыкании; схема подключения «треугольник»

При подключении обмотки по схеме «звезда с изолированной нейтралью», когда нулевая точка соединена внутри двигателя и не выведена наружу, характер изменений отличается: ток возрастает в поврежденной обмотке и в одной из неповрежденных. На рис. 4 представлен характер протекания тока при межвитковом замыкании.

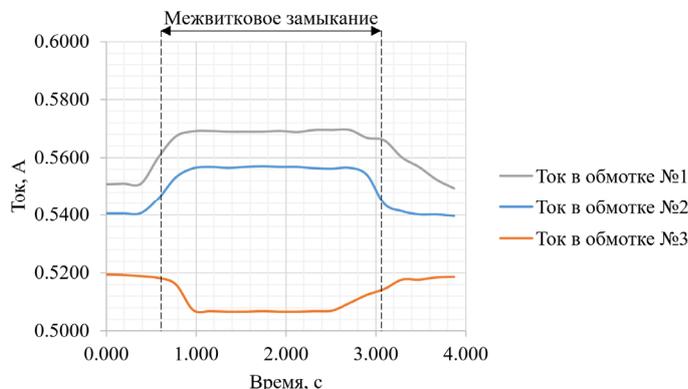


Рис. 4. Изменение тока в обмотках статора при межвитковом замыкании; схема подключения «звезда с изолированной нейтралью»

На основании экспериментов и результатов аналитического моделирования был составлен обобщенный алгоритм определения межвитковых замыканий для трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при различных нижеуказанных схемах подключения обмоток.

Схема «звезда с нейтральным проводом» приводит к увеличению отношений фазного тока по отношению к двум оставшимся фазным токам, при этом остается неизменным линейное напряжение во время всех измерений. Схема «звезда с изолированной нейтралью» приводит к увеличению двухфазных токов (для однослойной всыпной обмотки), одним из которых является ток в поврежденной обмотке, ток в третьей фазе снижается. При схеме «треугольник» происходит увеличение линейного тока по отношению к двум оставшимся линейным токам.

Для входных параметров нейронной сети при межвитковом замыкании предполагается использовать токовые датчики и информацию с них. Это позволит оценивать изменение отношений токов и напряжений, потребляемой мощности и коэффициента мощности. Установление зависимостей, при которых четко прослеживается возникновение межвиткового замыкания, а также границ допусков, при которых отсеиваются колебания в питающей сети, является основной задачей будущих исследований. Основным преимуществом такого подхода является использование сравнительно недорогого оборудования, позволяющего с большой точностью определить один из самых распространенных дефектов электродвигателей. К тому же отслеживание неисправности позволяет постепенно отходить от системы планово-предупредительных ремонтов, широко распространенных в локомотивных депо, к системе оценки оборудования по фактическому техническому состоянию.

К преимуществам использования нейронной сети касательно обнаружения межвиткового замыкания можно отнести следующие [12]:

- универсальность, так как не нужно в дальнейшем привязываться к конкретному оборудованию;
- высокая вероятность распознавания, особенно зашумленных сигналов;
- высокое быстродействие.

Искусственное межвитковое замыкание решает важную задачу получения данных на основе реального образца электродвигателя, что позволяет изучить характер протекания неисправности для разных видов подключения и обучить соответствующей выборкой нейронную сеть. Кроме того, была исследована зависимость числа витков (от нескольких единиц до десятков) от величины изменения тока в обмотке статора и изменения уровня шума (вибрации) для различных образцов электродвигателей.

Была усовершенствована структура имеющейся нейронной сети. Ее целью являлась большая адаптивность под различный масштаб исходных данных, увеличение числа влияющих факторов, а также снижение влияния переобучения. Для достижения этих результатов была использована комбинация сверточных слоев, пулинга, полносвязных слоев и слоев объединения. Приведем краткое описание полученной усовершенствованной нейронной сети.

Входной слой принимает изображения размером 67×88 пикселей с одним каналом (черно-белые изображения). Первый блок свертки (*Conv2D*) используется для извлечения признаков из изображения. Используется несколько слоев с разными параметрами (размер ядра, количество фильтров), чтобы захватить различные уровни абстракции. Пулинг применяется после первого блока свертки для уменьшения размерности и улучшения вычислительной эффективности. Два параллельных (второй и третий) блока нейронной сети начинаются с разделения выходного слоя первого блока пулинга, и затем применяются различные сверточные слои для извлечения дополнительных признаков. Выходные данные из всех трех блоков объединяются в один вектор. Слой *Dropout* с коэффициентом 0,5 нацелен на уменьшение переобучения. Выходной полносвязный слой с функцией активации *softmax* генерирует вероятности принадлежности к каждому из трех классов.

Отличие этой модели от других заключается в том, что три параллельных блока рассмотренной нейронной сети позволяют ей получать различные характеристики изображения в разных масштабах и с разной глубиной. Такой подход может улучшить способность модели к обобщению и ее производительность на разных типах данных.

Использование различных комбинаций сверток и пулинга в каждом из параллельных блоков позволяет модели захватывать различные аспекты изображения, что может быть полезно в задачах компьютерного зрения.

Заключение

Рост энергоэффективности является важной составляющей в современных реалиях промышленного развития. На сегодняшний день уже недостаточно делать упор только на качество или на массовое распространение продукции на рынке товаров и услуг. Снижение потребления энергоресурсов, будь то электроэнергия, тепло или горючие полезные ископаемые, свидетельствует о своевременном обновлении производственных фондов: зданий и сооружений, станков, оборудования; следовательно, и о высокой культуре производства, безопасности на предприятии.

Диагностирование способно радикально изменить уровень осведомленности о техническом состоянии электрических машин, которые обеспечивают работу оборудования различной степени сложности. Распространенный на железнодорожном транспорте Белорусской железной дороги метод планово-предупредительных ремонтов при всех его достоинствах имеет ряд серьезных недостатков. Здесь можно привести значительные материальные и временные затраты, трудозатраты работников, что в совокупности не способно в полной мере гарантировать бесперебойную работу эксплуатируемого узла.

Тенденции в области диагностирования неисправностей таковы, что роль глубокой и всесторонней обработки информации увеличивается. Современные методы, включающие использование нейронных сетей, позволяют добиться этого результата, а также находить новые закономерности, которые ранее были упущены. Нейронная сеть является серьезным инструментом математической обработки информации, результатом которой могут послужить данные об уже имеющихся неисправностях, а также информация о возникновении паттернов, связанных с зарождением неисправности. В совокупности это позволяет более точно оценивать срок службы оборудования и быть во всеоружии до момента возникновения аварий и критических отказов.

Список литературы

1. Галушко В. Н., Пацкевич В. А. Электрические машины : учеб.-метод. пособие. Гомель : БелГУТ, 2020. 242 с.
2. Владимиров О. В., Ившин И. В., Низамиев М. Ф. [и др.]. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 3-4. С. 58–66.
3. Осорио-Риос Р. А., Самудио-Рамирес И., Хаэн-Куэльяр А. Я. [и др.]. Система объединения данных для мониторинга состояния электродвигателей: инновационное решение // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2023. Т. 17, № 4. С. 4–16.
4. Онел И., Бенбузид М. Обнаружение и диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей: сравнительное исследование подходов преобразований Парка и Concordia // Труды IEEE/ASME по мехатронике. 2008. Т. 13, № 2. С. 257–262.
5. Чжан Ю., Ли К., Ма У. [и др.]. Глубокое обучение для диагностики межвитковых неисправностей в трансформаторах // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. Т. 66, № 3. С. 2240–2249.
6. Цзян С., Хан Л., Ван Х. [и др.]. Анализ сигнатур тока двигателя на основе сверточных нейронных сетей для диагностики неисправностей асинхронных двигателей // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Т. 67, № 2. С. 1317–1326.
7. Мирош Д. В., Галушко В. Н., Громыко И. Л. Нейронные сети в диагностике. Анализ неисправностей асинхронных двигателей железнодорожной отрасли и их диагностика на базе искусственного интеллекта // Энергоэффективность. 2023. № 4. С. 30–32.
8. Дробов А. В., Мирош Д. В., Галушко В. Н. Диагностика асинхронных электродвигателей с применением виброанализатора и сверточной нейронной сети // Энергетическая стратегия. 2024. № 1. С. 38–41.
9. Громыко И. Л., Мирош Д. В., Галушко В. Н., Белькин В. О. Анализ и совершенствование существующей системы диагностирования неисправностей трансформаторов железнодорожной отрасли // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2023. № 1. С. 15–20.
10. Дробов А. В., Галушко В. Н., Громыко И. Л. Система диагностирования неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей // Энергетическая стратегия. 2023. № 4. С. 49–53.

11. Громько И. Л., Мирош Д. В., Галушко В. Н., Евдасев И. С. Диагностирование параметров качества изоляции обмоток трансформаторов при ее увлажнении // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2022. № 2. С. 15–19.
12. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс : пер. с англ. 2-е изд. М. : Издательский дом Уильямс, 2006. 1104 с.

References

1. Galushko V.N., Patskevich V.A. *Elektricheskie mashiny: ucheb.-metod. posobie = Electric machines : an educational and methodical manual*. Gomel': BelGUT, 2020:242. (In Russ.)
2. Vladimirov O.V., Ivshin I.V., Nizamiev M.F. et al. Stand for post-repair tests of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2019;21(3-4):58–66. (In Russ.)
3. Osorio-Rios R.A., Samudio-Ramires I., Khaen-Kuel'yar A.Ya. et al. Data integration system for monitoring the condition of electric motors: an innovative solution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2023;17(4):4–16. (In Russ.)
4. Onel I., Benbuzid M. Detection and diagnostics of asynchronous motor bearing failures: a comparative study of Park and Concordia transformation approaches. *Trudy IEEE/ASME po mekhatronike = Proceedings of IEEE/ASME on Mechatronics*. 2008;13(2):257–262. (In Russ.)
5. Chzhan Yu., Li K., Ma U. et al. Deep learning for the diagnosis of inter-turn faults in transformers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(3):2240–2249. (In Russ.)
6. Tszyan S., Khan L., Van Kh. et al. Analysis of motor current signatures based on convolutional neural networks for troubleshooting asynchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020;67(2):1317–1326. (In Russ.)
7. Mirosh D.V., Galushko V.N., Gromyko I.L. Neural networks in diagnostics. Malfunction analysis of asynchronous motors in the railway industry and their diagnostics based on artificial intelligence. *Energoeffektivnost' = Energy efficiency*. 2023;(4):30–32. (In Russ.)
8. Drobov A.V., Mirosh D.V., Galushko V.N. Diagnostics of asynchronous electric motors using a vibration analyzer and a convolutional neural network. *Energeticheskaya strategiya = Energy strategy*. 2024;(1):38–41. (In Russ.)
9. Gromyko I.L., Mirosh D.V., Galushko V.N., Bel'kin V.O. Analysis and improvement of the existing fault diagnosis system for transformers in the railway industry. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport = Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2023;(1): 15–20. (In Russ.)
10. Drobov A.V., Galushko V.N., Gromyko I.L. Transformer fault diagnosis system based on convolutional neural networks. *Energeticheskaya strategiya = Energy strategy*. 2023;(4):49–53. (In Russ.)
11. Gromyko I.L., Mirosh D.V., Galushko V.N., Evdasev I.S. Diagnostics of insulation quality parameters of transformer windings during its humidification. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport = Bulletin of the Belarusian State University of Transport: science and Transport*. 2022;(2):15–19. (In Russ.)
12. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs: per. s angl. 2-e izd. = Neural networks: complete course: trans. from English. 2nd ed.* Moscow: Izdatel'skiy dom Uil'yams, 2006:1104. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Валерьевич Мирош
магистр технических наук,
аспирант кафедры локомотивов,
Белорусский государственный
университет транспорта
(Республика Беларусь, г. Гомель,
ул. Кирова, 34)
E-mail: dimamiroshheat@gmail.com

Dmitry V. Mirosch
Master of engineering,
postgraduate student
of the sub-department of locomotives,
Belarusian State University of Transport
(34 Kirova street, Gomel,
Republic of Belarus)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 04.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 15.09.2024

Принята к публикации/Accepted 17.09.2024