

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2026-52-46-53>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН С ДВУХСЛОЙНЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МОРСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Конева С.А., Пронина А.К., Нагирняк А.А., Цыганов А.С., Цалоева Е.В.
Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

Ключевые слова: асинхронный двигатель с двухслойным ротором, пусковые и рабочие характеристики, магнитная проницаемость, магнитная анизотропия, нейросети, методика градиентного спуска, оптимальные параметры, оптимизация процесса проектирования.

Аннотация. Статья посвящена обзору и анализу перспектив использования нейросетей на этапе проектирования, определения и расчёта оптимальных параметров асинхронных двигателей с двухслойным ротором: определение толщины внешнего слоя ротора, определение оптимальных рабочих режимов и типов нагрузок. Необходимые расчеты для решения задач проектирования асинхронного электропривода с двигателем с двухслойным ротором могут быть реализованы с помощью применения существующих методик и алгоритмов нейронных сетей применительно для морской промышленности.

RESEARCH OF THE PROSPECTS OF USING NEURAL NETWORKS IN THE DESIGN OF MACHINES WITH A TWO-LAYER ROTOR FOR ELECTRIC DRIVES IN THE MARINE INDUSTRY

*Koneva S.A., Pronina A.K., Nagirnyak A.A., Tsyganov A.S., Tsaloeva E.V.
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

Keywords: asynchronous motor with a two-layer rotor, starting and operating characteristics, magnetic permeability, magnetic anisotropy, neural networks, gradient descent method, optimal parameters, design process optimization.

Abstract. This article reviews and analyzes the potential for using neural networks in the design, determination, and calculation of optimal parameters for double-layer rotor induction motors. This includes determining the rotor's outer layer thickness and identifying optimal operating modes and load types. The necessary calculations for solving the design problems of double-layer rotor induction motors can be implemented using existing neural network methods and algorithms for the marine industry.

Введение

Асинхронные двигатели с двухслойным ротором (АДДР) широко применяются в морской промышленности, в области добычи и транспорта углеводородов с морского дна, в качестве приводных двигателей для газо и нефтеперекачивающих аппаратов, в том числе на судах морского и речного флота в широком ассортименте вспомогательных механизмов и обеспечивают высокие показатели энергоэффективности в режимах с частыми пусками и реверсами [2]. Но в продолжительных режимах работы КПД, существующих АДДР несколько хуже, чем у АДКР, что накладывает некоторые ограничения на повсеместное применение машин с двухслойным ротором в качестве приводных двигателей.

Для достижения максимальной эффективности работы привода с АДДР в различных режимах эксплуатации требуется индивидуализация на этапе разработки приводного двигателя, в том числе в вопросах расчёта толщины массивного цилиндра, подбора сплава из которого он будет изготовлен, определения оптимальной магнитной проницаемости используемого материала, а также определения и контроля магнитной анизотропии ротора. Современное программное обеспечение позволяет определить лишь ограниченный ряд параметров, проектируемых электрической машины или электропривода. Поэтому для решения комплекса сложных задач, возникающих на этапе проектирования привода с АДДР, предлагается использовать нейросети. Существует несколько типов нейросетей, а также различные методики, которые могут работать с широким спектром данных, и на их основе проводить все необходимые расчёты, касательно поставленных задач.

Постановка задачи

Рассматривается перспектива применения нейросетей для определения толщины внешнего слоя двухслойного ротора, а также оптимальных рабочих режимов эксплуатации АДДР.

АДДР, по аналогии с машинами с массивным ротором, отличаются лучшими пусковыми характеристиками по сравнению с АДКЗ, однако, значительно уступают последним в эффективности работы при номинальных режимах, что обуславливает невозможность эксплуатации АДДР в приводах с продолжительным режимом работы. Модернизация массивного ротора до двухслойного, существенно повышает эффективность работы двигателя в продолжительных режимах работы, сохраняя при этом пусковые преимущества в кратковременных и повторно-кратковременных режимах.

Высокие пусковые характеристики обеспечиваются применением в качестве второго слоя на роторе массивного цилиндра из магнитомягких сплавов, таких как СМ20 (сталь-медь 20), СМ25 (сталь-медь 25), который одновременно является магнитопроводом и проводящим контуром для электрического тока в роторе, создаваемого воздействием переменных магнитных полей статора асинхронной машины. В то же время, сохраняя параметры магнитного поля, растёт сопротивление проводящего контура ротора за счёт наличия стали в сплаве слоя, что в итоге ограничивает пусковые токи в роторе.

Для максимальной эффективности подбора и применения АДДР в качестве приводного двигателя для каждого конкретного случая, имея характеристики приводного механизма, проводить расчёт конструктивных параметров ротора требуемой машины. К таким параметрам, прежде всего, относятся толщина внешнего массивного цилиндра h , его магнитная проницаемость μ , а также картина распределения магнитных полей по всему телу ротора. Решая поставленные задачи, появляется возможность определить все параметры будущей электрической машины.

Возникает необходимость подбора программного обеспечения, которое сможет решить поставленную задачу в комплексе.

Актуальность проблемы

На сегодняшний день актуальной задачей является поиск и создание энергоэффективных надёжных систем электропривода в ряде отраслей морской промышленности, а также проектирование приводных двигателей, соответствующих требованиям к эксплуатации [1].

В настоящее время существует широкий ассортимент программного обеспечения (ПО), позволяющий решить задачи проектирования асинхронных электродвигателей. Тем не менее, ряд специфических задач проектирования не может быть ими разрешён в полной мере. В связи с этим возникает необходимость рассмотреть инструменты, предлагаемые нейросетями для расчёта и проектирования электрических машин с двухслойным ротором и электроприводов морской транспортной и добывающей промышленности использующих данный тип электромеханических преобразователей.

Основная часть

Ротор АДДР обладает двумя слоями проводников, что улучшает технические характеристики асинхронной электрической машины, такие как КПД, пусковой момент, пусковые токи, коэффициент мощности.

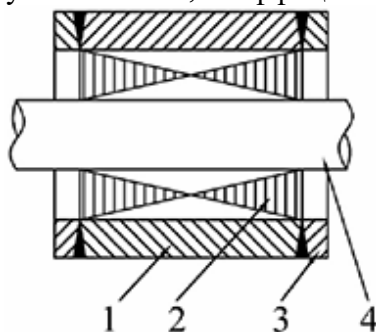


Рис. 1. Двухслойный ротор АДДР: 1 – рабочий массивный цилиндр; 2 – сердечник из шихтованной стали; 3 – короткозамыкающие кольца; 4 – вал

Замена короткозамкнутого ротора на двухслойный (рис. 1) приводит к повышению надёжности работы двигателя и снижает величину потерь мощности в металле ротора.

АДДР находит применение в различных электроприводах морской промышленности, в том числе насосных, грузоподъёмных, вентиляторных и компрессорных системах [2].

В решении задач проектирования АДДР нейросеть может быть использована в качестве обучающей модели, предлагая конструктивные и электроэнергетические характеристики и параметры машины, ее массогабаритные размеры и конструкционные материалы. Нейросеть подбирает и создает необходимый алгоритм, вводит данные об уже существующих приводах с АДДР, в том числе их конструктивные характеристики, а также данные о результатах продолжительной работы на основе практического применения. В то же время нейронная сеть обладает возможностью оптимизировать процесс проектирования электродвигателя с

двухслойным ротором. К примеру, нейросеть обладает возможностью определения оптимальных величин конструктивных и механических параметров электродвигателя с двухслойным ротором, в т.ч. эффективной величины внешнего слоя, магнитной проницаемости и магнитной анизотропии, что позволяет достичь лучших показателей энергоэффективности и надёжности. Нейросети можно применить как непосредственно и в процессе конструирования электрических машин, так и в качестве ПО для обучаемой конвейерной робототехники [3].

В настоящее время действуют и могут быть использованы для оптимизации параметров асинхронных двигателей с двухслойным ротором и могут быть применены для решения задач проектирования следующие типы нейросетей:

1. Свёрточные нейросети (CNN) – показали эффективность при работе с данными, имеющими пространственную структуру, такими, как изображения. Подойдут для построения моделей электропривода с АДПР на основе чертежей и прочей конструкторской документации, в том числе созданной ранее в широко применяемых САПР.

2. Рекуррентные нейросети (RNN) – предназначены для взаимодействия с данными, имеющими последовательную структуру, например, временными рядами. Подойдут для определения режимов работы электроприводов морской промышленности и допустимой частоты пусков реверсов

3. Глубокие нейросети (DNN) – как правило, используются для обучения при помощи решения комплексных задач и обработки «больших данных». Подойдут для составления статистики неполадок и выходов из строя электроприводов с АДПР.

4. Генеративно-сопоставительные нейросети (GAN) – применимы для создания иных моделей и концептов двигателей, принимая за основу уже собранные данные.

5. Автоэнкодерные нейросети (АЕ) – извлекают признаки из данных для оптимизации характеристик и конструктивных параметров двигателя. Следует отметить, что есть и другие типы нейросетей и их выбор будет зависеть от сложившихся условий и обстоятельств.

Необходимые алгоритмы расчета могут быть реализованы с помощью применения методики, включающей в себя генетические алгоритмы с установленными базовыми критериями энергоэффективности, которые позволят обнаруживать оптимальные величины характеристик АДПР. Нельзя исключать и методику градиентного спуска, обладающую всем необходимым для оптимизации параметров и характеристик АДПР, через пошаговую смену значений в векторе снижения функционала по качеству (ошибок или потерь).

Методики, включающие в себя мултимерную оптимизацию или обучающийся искусственный интеллект, также могут быть применены для проектирования судовых электроприводов с АДПР. Они помогут в будущем генерировать рабочие модели электроприводов в морской промышленности самых разнообразных компоновок, например, погружных машин с внешним

ротором и охлаждаемых потоком рабочей жидкости в нефтеперекачивающих агрегатах. При этом важно собрать данные с как можно большего числа вариантов компоновок электропривода для максимально эффективного результата, а также включить в нейросеть целевую функцию, подлежащую оптимизации.

Расчёт магнитной проницаемости, магнитной анизотропии, распределение магнитного поля при работе машины ранее требовала использования дорогих программных пакетов, таких как Abaqus, ANSYS Maxwell, COMSOL, к тому же отличающихся высокими системными требованиями к вычислительным мощностям. Применение же нейронных сетей снижает как финансовые, так и мощностные затраты. Следует отметить, что на сегодняшний день интенсивно развивается и становится достаточно конкурентоспособным отечественный сегмент интеллектуальных технологий в этой области.

Для улучшения пусковых и рабочих характеристик АДДР необходимо подобрать магнитную анизотропию материала тела ротора, что позволит достичь оптимального распределения токов, и как следствие магнитных полей, в массивном цилиндре, как во время пуска, так и при номинальных оборотах.

Чтобы рассчитать магнитную анизотропию, являющую собой неоднородность распределения магнитной проводимости в теле ротора асинхронной машины с двухслойным ротором, необходимо учитывать направленность магнитных свойств стали, применяемой при его изготовлении.

Направления кристаллических осей в железе ротора, напрямую влияет на его магнитные свойства, векторы которых могут иметь различное направление, что и приведёт к влиянию на энергоэффективность работы электромеханического преобразователя.

К определению магнитной анизотропии при проектировании морского привода с АДДР можно применять уже существующие методики и алгоритмы нейронных сетей, учитывающие векторы магнитных свойств стали двухслойного ротора:

1. Метод гиперболического синуса (HS). Данная методика используется, чтобы совершить поиск влияния напряженности магнитных полей на магнитную индукцию при магнитной анизотропии стали ротора. При помощи данной методики есть возможность принимать в расчёт как векторы магнитных свойств, так и смену их направления под воздействием колебаний температуры с учётом и токов индуцируемых и протекающих в роторе.

Расчёт магнитной индукции стали с магнитной анизотропией, используя метод гиперболического синуса, предлагается проводить по формуле:

$$B = B_{sat} \cdot \sinh(K \cdot H / H_k),$$

где B – магнитная индукция, B_{sat} – магнитная индукция при насыщении петли гистерезиса, H – напряженность магнитного поля, K – коэффициент, используемый для расчёта гиперболического синуса, H_k – коэрцитивная сила стали.

Коэффициент, используемый для расчёта гиперболического синуса, вычисляется как:

$$K = \left(\ln \left(\frac{B_{sat}}{B_c} \right) + \ln \left(\frac{B_{sat}}{B_r} \right) \right) / 2,$$

где B_c и B_r – представляют собой критические значения индукции магнитного поля (МП) во время изменении направления МП вдоль осей материала.

2. Способ конечных элементов (FEM). Применяется в численном моделировании электрических и магнитных полей асинхронных машин с двухслойным ротором. Даёт возможность принимать в расчёт магнитную анизотропию стали ротора, чтобы проводить совершенствование его конструкции для достижения максимальной энергоэффективности.

Построение анизотропии двухслойного ротора с использованием методик конечных элементов происходит путём, связывающим индукцию магнитного поля с его напряженностью и с тензором (вектором) магнитной проницаемости стали ротора.

Расчёт производится по формуле:

$$B = \mu \cdot H,$$

где B – индукция магнитного поля, H – напряженность соответственно, μ – тензор (вектор) магнитной проницаемости стали.

Вектор магнитной проницаемости для анизотропных сталей имеет возможность быть представленным в качестве матрицы, включающей в себя коэффициенты проницаемости задействованных векторов магнитного поля. При помощи нейросетей такая матрица может быть рассчитана теоретически, опираясь на свойства стали, определённые экспериментально.

В расчёте индукции магнитного поля и его напряженности в стали ротора АДДР, используя методики конечных элементов, за основу будут взяты уравнения Максвелла, объединяющие магнитные и электрические поля в стали с прочими его электромагнитными свойствами. Распределение напряженности и индукции магнитного поля в стали ротора, и его анизотропия будет зависеть от решения нейросетью данных уравнений.

3. Методики магнитной анизотропии (МА). Используются в нейросетях для анализа и определения магнитной анизотропии в сталях массивных цилиндров электромеханических преобразователей с двухслойным ротором. Обладают возможностью вычислить векторы магнитных характеристик стали и провести оценку их воздействия на рабочие характеристики двигателя, что является ключевым моментом в определении параметров морских электроприводов с динамическими режимами работы.

4. Методики магнитной визуализации (MV). Дают проектировщикам возможность визуализации магнитных полей в сталях электромеханических преобразователей с двухслойным ротором и позволяют провести оценку их векторов и распределения. Нельзя не отметить и широкие перспективы их применения в вопросах оптимизации конструктивных параметров ротора и построения картины магнитной анизотропии с использованием её в дальнейших расчётах [4].

Заключение

Применение нейросетей при проектировании электропривода с асинхронной машиной с двухслойным ротором позволит заметно усовершенствовать, как сам процесс проектирования, так и повысить показатели энергоэффективности и надежности работы ключевого узла электропривода – приводного двигателя.

Существует несколько типов нейросетей, а также методик, реализуемых при их использовании. Каждая из них может быть по-своему реализована с наибольшей эффективностью в процессе проектирования в зависимости от поставленной задачи.

Следует отметить, что применение нейронных сетей должно привести к улучшению и ускорению процесса проектирования привода с АДДР, а также увеличить показатели энергоэффективности и надежности электродвигателей, получаемых на выходе.

Также применение нейросетей должно существенно снизить стоимость расчётов специфических параметров двигателя по сравнению с ранее применяемыми программными пакетами, а также уменьшить требования к вычислительным мощностям, используемых для проектирования ЭВМ.

Список источников

1. Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Динамические режимы асинхронных двигателей в приводах энергетических систем и комплексов // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, №4. – С. 95-101.
2. Могильников В.С., Олейников А.М. Теория, технология и режим работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – 350 с.
3. Высоцкий В.Е., Марков И.Ю., Матвеев Ю.В. Синтез скалярной системы автоматического управления вентильного двигателя с управлением по полю для гребных электрических установок с движительно-рулевым комплексом AZIPOD // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2021. – Т. 64, №6. – С. 29-35.
4. Высоцкий В.Е., Олейников А.М., Нагирняк А.А. Анализ работы асинхронного двигателя с двухслойным ротором в электроприводе насосов // Труды 16-й Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электроматериалы и компоненты (Крым. Алушта, 19-24 сентября 2016 г.). – М.: МКЭЭЭ, 2016. – С. 94-96.

References

1. Shaitor N.M., Gorpichenko A.V. Dynamic modes of asynchronous motors in drives of energy systems and complexes // Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 95-101.
2. Mogilnikov V.S., Oleynikov A.M. Theory, technology and operating mode of asynchronous motors with a two-layer rotor. – Sevastopol: Publ. house of SevNTU, 2008. – 350 p.
3. Vysotsky V.E., Markov I.Yu., Matveyev Yu.V. Synthesis of a scalar automatic control system for a permanent magnet motor with field control for propulsion electric plants

with the AZIPOD propulsion and steering complex // News of higher educational institutions. Electromechanics. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 29-35.

4. Vysotsky V.E., Oleynikov A.M., Nagirnyak A.A. Analysis of the operation of an asynchronous motor with a two-layer rotor in an electric drive of pumps // Proceedings of the 16th International Conference "Electromechanics, Electrical Technologies, Electrical Materials and Components (Crimea. Alushta, September 19-24, 2016). – M.: MKEEE, 2016. – P. 94-96.

Конева Светлана Андреевна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Судовое электрооборудование»	Koneva Svetlana Andreevna – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department «Ship's electric equipment»
Пронина Анна Константиновна – доцент кафедры «Судовое электрооборудование»	Pronina Anna Konstantinovna – associate professor of the Department «Ship's electric equipment»
Нагирняк Александр Анатольевич – старший преподаватель кафедры «Судовое электрооборудование»	Nagirnyak Aleksandr Anatolyevich – senior lecturer of the Department «Ship's electric equipment»
Цыганов Александр Сергеевич – доцент кафедры «Социально-философские и политические науки»	Tsyganov Aleksandr Sergeevich – associate professor Department of «social, philosophical and political sciences»
Цалоева Елизавета Владимировна – студентка pronina-a@bk.ru	Tsaloeva Elizaveta Vladimirovna – student

Received 05.02.2026