CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья
УДК 621.313.333.2
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134
EDN: https://elibrary.ru/fwcqxe

О применении численных методов для анализа магнитного поля в тяговых электрических машинах переменного тока

А. С. Зуев✉, М. Д. Глущенко

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Настоящая статья посвящена изучению современного подхода к проектированию вращающихся электрических машин. Приведен обзор существующих программных пакетов для моделирования электромагнитных и тепловых процессов, использующих численные конечно-элементные методы, призванные прийти на смену анализу сосредоточенных параметров электрических схем замещения. Описан спектр задач, решаемых современными российскими исследователями электрических машин: исследование тягово-энергетических характеристик, анализ электромагнитных помех, шума и вибрации, моделирование и диагностика отказов. Цель исследования — изучить особенности применения современного программного пакета, подходящего для моделирования и визуализации магнитного поля в асинхронном тяговом электродвигателе ДТА-1200А электровоза ЭП20.

Материалы и методы. В исследовании применен численный конечно-элементный метод расчета с помощью прикладного программного пакета, в котором на основе данных из технической литературы, результатов испытаний и справочных материалов была синтезирована двухмерная компьютерная модель тягового двигателя для расчета магнитного поля, и формализован расчет выходных параметров.

Результаты. В результате исследования был успешно апробирован один из существующих программных пакетов. Рассмотрены этапы геометрического построения сечения тягового электродвигателя, принципы задания и измерения физических явлений и возможности программы. Изложены особенности моделирования асинхронных электродвигателей. Исследованы возможности практического применения результатов моделирования магнитного поля для оценки магнитного потока, потокосцепления и потерь электроэнергии в тяговом двигателе. После синтеза компьютерной модели и проведения вычислений результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов соотнеслись с теоретическими расчетными и экспериментальными данными.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты будут полезны разработчикам электрических машин и исследователям, занимающимся компьютерным моделированием асинхронных электрических машин. На основе представленной и верифицированной расчетной компьютерной модели могут быть выполнены исследования, направленные на улучшение характеристик тяговых электродвигателей, совершенствование и оптимизацию их конструкции, а также создание цифровых двойников электрических машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, асинхронный тяговый электродвигатель, ДТА-1200А, магнитное поле, моделирование, визуализация поля

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зуев А. С., Глущенко М. Д. О применении численных методов для анализа магнитного поля в тяговых электрических машинах переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 127–134. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134.

✉ aleksandr-zuev-1987@mail.ru (А. С. Зуев)

© Зуев А. С., Глущенко М. Д., 2023

CC BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 621.313.333.2
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134
EDN: https://elibrary.ru/fwcqxe

Application of numerical methods to the analysis of the magnetic field in AC traction machines

Alexander S. Zuev✉, Mikhail D. Glushchenko

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article examines the current approach to the design of rotating electrical machines. An overview is given of existing software packages for modelling electromagnetic and thermal processes using numerical finite element methods, designed to replace concentrated parameter analysis of electrical equivalent circuits. It describes how modern Russian researchers solve a wide range of problems, from studying traction performance, to analysing electromagnetic disturbances, noise and vibration, to modelling and diagnosing faults. The aim of the study is to investigate the features of a modern software package suitable for modelling and visualising the magnetic field in the induction traction motor DTA-1200A of the electric locomotive EP20.
Materials and methods. The study applies a numerical finite element calculation method using an application software package that synthesises a two-dimensional computer model of the traction motor to calculate the magnetic field and formalises the calculation of output parameters based on data from technical literature, test results and reference materials.
Results. One of the existing software packages is successfully piloted as a result of the study. The steps involved in the geometric construction of a traction motor cross section, the principles of setting and measuring physical phenomena, and the capabilities of the software are reviewed. The modelling characteristics of asynchronous electric motors are described. The practical application of magnetic field modelling results to estimate magnetic flux, flux linkage and power loss in a traction motor is studied. After synthesis of the computer model and calculations, the results of the finite element computer modelling are correlated with theoretical design and experimental test data.
Discussion and conclusion. The results of the study are expected to be useful to electrical machine designers and researchers involved in computer modelling of induction electric machines. On the basis of the computer model presented and verified, research could be carried out to improve the performance of traction motors, to improve and optimise their design and to create digital twins of electric machines.

KEYWORDS: electric locomotive, induction traction motor, DTA-1200A, magnetic field, simulation, field visualisation

FOR CITATION: Zuev A. S., Glushchenko M. D. Application of numerical methods to the analysis of the magnetic field in AC traction machines. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):127-134. (In Russ.). https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134.

✉ aleksandr-zuev-1987@mail.ru (A. S. Zuev)

© Zuev A. S., Glushchenko M. D., 2023

Введение. Решение задач совершенствования и оптимизации конструкции электрических машин на современном, уже довольно высоком уровне их развития, создания их цифровых двойников в системах управления и диагностики требует новых углубленных методов расчета и исследования. По мнению авторов, на смену исследованию сосредоточенных параметров эквивалентной электрической схемы замещения электрических машин сегодня должно прийти изучение распределенного магнитного поля, позволяющее более точно и корректно моделировать физические процессы. Возможности для этого предоставляет конечно-элементный метод расчета [1, 2], используемый во многих областях компьютерного проектирования.

Анализ научных публикаций свидетельствует о высоком интересе к моделированию электромагнитного поля у ученых различных отраслей, включающих промышленное оборудование [3–6], автомобилестроение [7, 8], при исследовании различных типов электродвигателей — постоянного тока [8, 9], синхронных с постоянными магнитами [7], вентильно-индукторных [10], шаговых [11]. Анализ магнитного поля необходим при исследовании тягово-энергетических характеристик автомобиля [7], электромагнитных помех, шума и вибрации [12, 13], а также при моделировании и диагностике отказов асинхронных электродвигателей [4, 5]. Моделирование электромагнитных процессов осуществимо во многих программных пакетах. Например, пакет ANSYS Maxwell использован в работах [12, 13, 10], ELCUT в [9, 8], ELMEC, COMSOL Multiphysics в [3, 7, 14], FEATool, FEMM в [15], JMAG Designer в [11], кроме этого применяются пакет ANSYS Motor-CAD или продукты компании Siemens (Simcenter MAGNET, Simcenter Motorsolve). Некоторые исследователи используют программы собственной разработки [9]. Тем не менее задачи настоящего исследования построения конечно-элементных моделей геометрии и физических процессов асинхронных тяговых электродвигателей при исследовании энергосберегающих характеристик являются новыми для асинхронных двигателей, применяемых на локомотивах и электропоездах. В отличие от упомянутых публикаций в статье будут также рассмотрены этапы построения модели, принципы задания и измерения физических явлений.

Постановка задач исследования. В настоящем исследовании поставлены следующие задачи:

1) оценить применимость современного программного пакета для моделирования токораспределения и магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин;

2) рассчитать методом конечных элементов магнитное поле тягового двигателя и сравнить полученное потокосцепление обмотки статора с расчетными данными для оценки точности расчета программного пакета;

3) реализовать расчет потерь энергии в асинхронном тяговом электродвигателе электровоза и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными [16] для оценки точности расчета программного пакета.

В настоящем исследовании задача расчета методом конечных элементов будет решаться с точки зрения скольжения ротора относительно магнитного поля статора. Смоделированное скольжение после запуска расчета будет вызывать индукцию токов в медных и стальных элементах ротора. Применение инструмента «преобразование Лоренца» для учета скольжения ротора позволяет использовать стационарный решатель. При стационарном подходе будет возможно рассмотреть установившиеся режимы работы от источника синусоидального питания. Расчет потерь в стали статора будет реализован в модели по данным распределения магнитного поля.

Математическое моделирование. Для решения поставленных задач применим программный пакет COMSOL Multiphysics, широко используемый Национальным исследовательским университетом «МЭИ». Рабочее окно программы представлено на рис. 1.

Запуск расчета сложной трехмерной модели электродвигателя не увенчался успехом, и задача решалась в двухмерной постановке.

Основные размеры расчетной модели соответствуют тяговому электродвигателю ДТА-1200А отечественного пассажирского электровоза ЭП20 [16]. Это трехфазная асинхронная машина с двухслойной распределенной обмоткой статора. Двигатель имеет короткозамкнутую клетку на роторе и шихтованную магнитную систему.

При моделировании использованы следующие исходные данные для продолжительного режима работы (см. таблицу).

Разработан следующий алгоритм создания модели асинхронного тягового электродвигателя:

1) ввод исходных данных;

2) геометрическое построение сечения тягового электродвигателя;

3) моделирование скольжения ротора;

4) моделирование измерения электромагнитного момента;

5) моделирование физических свойств и характеристик материалов;

6) моделирование обмотки статора;

7) расчет электромагнитных процессов методом конечных элементов;

8) моделирование механических потерь;

9) расчет вращающего момента на валу;

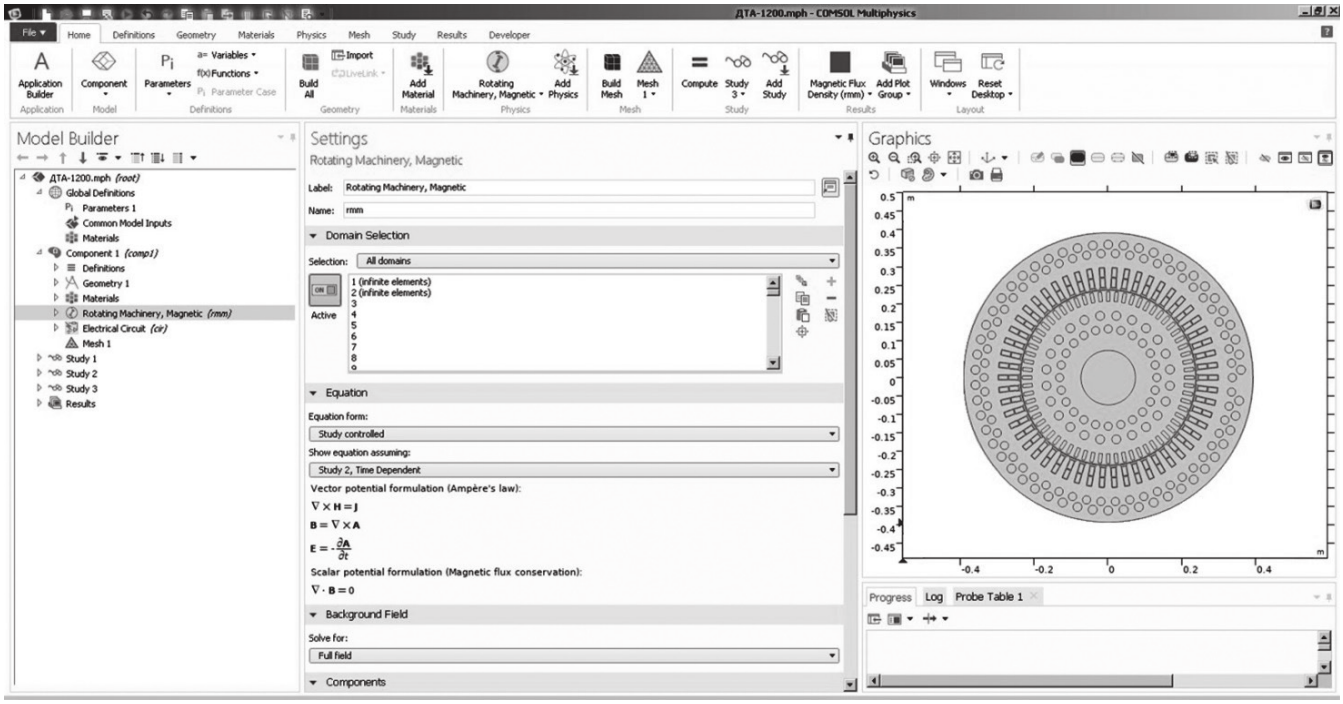

Рис. 1. Рабочее окно COMSOL Multiphysics

Fig. 1. COMSOL Multiphysics Desktop

Таблица

Исходные данные для моделирования тягового электродвигателя

Table

Input data for modelling a traction motor

Показатель, размерность	Значение
Число эффективных проводников в секции обмотки статора, ед.	3
Линейное напряжение, В	2183
Фазный ток, А	360
Число зубцов статора, ед.	54
Число зубцов ротора, ед.	64
Число фаз статора, ед.	3
Абсолютная частота скольжения, Гц	0,69
Частота тока статора, Гц	89
Частота вращения, об/мин	1766
Вращающий момент, Н·м	5948
Число пар полюсов, ед.	3
Диаметр двигателя, мм	786
Диаметр ротора, мм	474
Внутренний диаметр статора, мм	478
Воздушный зазор, мм	2
Длина пакета статора, мм	400
Толщина листа электротехнической стали, мм	0,5

10) моделирование расчета потерь электроэнергии;
11) расчет потерь электроэнергии;
12) работа с полученной моделью.

На первом этапе происходит обозначение используемых переменных и присвоение им значений исходных данных.

На втором этапе проводится геометрическое построение сечения тягового электродвигателя. Размеры и количество конструктивных элементов можно задавать в виде переменных, что помогает легко изменять или переконфигурировать конструкцию. Создание геометрии завершается объединением элементов.

В программном пакете имеется возможность задания скорости вращения. На третьем этапе при моделировании скольжения с помощью этой функции была задана угловая частота первой гармоники тока ротора:

$$\omega_2 = 2\pi\left(f_1 - \frac{np}{60}\right), \quad (1)$$

где f_1 — частота тока статора, Гц; n — частота вращения ротора, об/мин; p — число пар полюсов, ед.

Так как имеется возможность измерения электромагнитного момента, то на четвертом этапе устанавливается его область измерения $M_{изм}$.

На пятом этапе необходимо выбрать и распределить материалы, задать их характеристики, а также

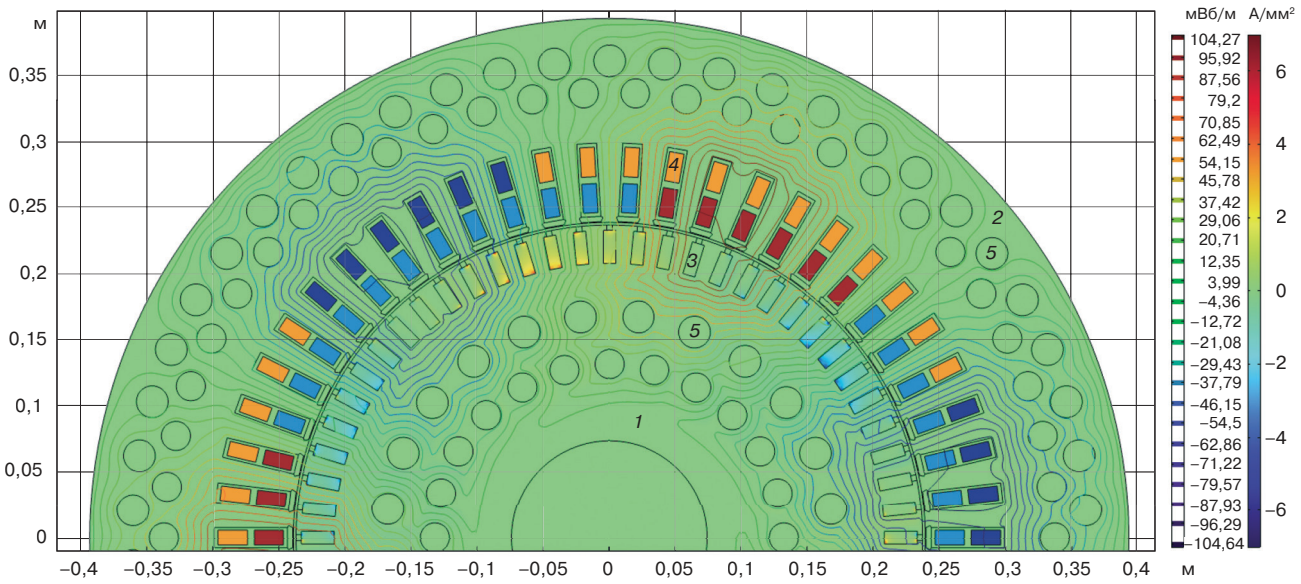

Рис. 2. Результаты расчета модели тягового электродвигателя ДТА-1200А, распределение токов и эквипотенциальных линий векторного магнитного потенциала магнитного поля в поперечном сечении: *1* — ротор; *2* — статор; *3* — пазы ротора; *4* — пазы статора; *5* — продольные вентиляционные каналы

Fig. 2. Calculation results of the DTA-1200A traction motor model, current distribution and equipotential lines of the magnetic field vector potential in the cross section: *1* — rotor; *2* — stator; *3* — rotor slots; *4* — stator slots; *5* — longitudinal ventilation ducts

их линейные и нелинейные магнитные свойства по элементам конструкции. Электропроводность корректируется с учетом длины лобовых частей. Расчет проводился при задании нелинейной кривой намагничивания электротехнической стали марки 2212. Ее характеристики намагничивания и потерь приведены в справочных изданиях [17, 18]. Кривая была задана в табличном виде, но она также может быть задана аналитически с помощью формулы, аппроксимирующей кривую прямой взаимозависимости, и формулы, аппроксимирующей кривую обратной взаимозависимости магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Эквивалентная электропроводность шихтованного пакета ротора была подобрана исходя из приближения получаемого значения вращающего момента к его экспериментальному значению по данным испытаний ВЭлНИИ [16]. Полученная зависимость эквивалентной электропроводности шихтованного пакета ротора $\sigma_{экв}$, мСм/м, от частоты тока ротора f_2, Гц, интерполирована следующим выражением:

$$\sigma_{экв} = 4e^{-6,2f_2^2}. \quad (2)$$

На шестом этапе указывается расположение обмоток статора, в обмотках статора задаются значения токов с учетом их фаз. Нет необходимости вручную задавать значение тока в короткозамкнутой клетке ротора. Токораспределение в стержнях клетки ротора рассчитывается автоматически программным пакетом при смоделированном скольжении ротора и заданной удельной электропроводности медной короткозамкнутой клетки ротора, скорректированной с учетом сопротивления участков короткозамыкающих колец.

На внешней окружности статора модели установлено граничное условие

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к границе; $\mathbf{B}$ — вектор магнитной индукции.

На седьмом этапе производится запуск и проведение расчета электромагнитных процессов методом конечных элементов.

В результате моделирования получена картина магнитного поля в тяговом асинхронном электродвигателе ДТА-1200А электровоза ЭП20 (рис. 2). Видно искажение магнитного поля в тангенциальном направлении, вызванное скольжением. При этом большинство эквипотенциальных линий векторного магнитного потенциала электромагнитного поля пересекает воздушный зазор под углом в том же направлении, что и поле в стали сердечника ротора, и вызывает вращающий момент. Границы магнитного потока каждого полюса характеризуются наибольшими по модулю значениями векторного магнитного потенциала (красные и синие линии).

На практике полученная картина магнитного поля может быть использована для расчета магнитного потока двигателя, а также потокосцепления распределенной по пазам статорной обмотки при известном числе ее витков. По результатам анализа магнитного поля потокосцепление фазы обмотки статора составило 3,53 Вб, что очень близко к теоретически рассчитанному значению — 3,48 Вб (отклонение 1,4 %).

На восьмом этапе для моделирования механических потерь рассчитывается КПД комплекта подшипников $\eta_{\text{кподш}}$ на основе значений КПД шарикового и роликового подшипников.

На девятом этапе проводится расчет вращающего момента на валу:

$$M = mM_{\text{изм}}\eta_{\text{кподш}}, \quad (4)$$

где m — число фаз обмотки статора.

На десятом этапе моделируется расчет потерь электроэнергии в тяговом двигателе ΔP. Полученные в результате моделирования токораспределение и магнитное поле позволяют рассчитать потери в тяговом двигателе с помощью опций программного пакета, интегрирующих квадрат плотности тока или заданную функцию магнитной индукции с учетом характеристик материалов по необходимым геометрическим областям. Необходимо учесть потери в шариковом и роликовом подшипниках:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с1}} + \Delta P_{\text{с2}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (5)$$

где $\Delta P_{\text{с1}}$ — потери в стали статора; $\Delta P_{\text{с2}}$ — потери в стали ротора; $\Delta P_{\text{м1}}$ — потери в меди статора; $\Delta P_{\text{м2}}$ — потери в меди ротора; $\Delta P_{\text{мех}}$ — потери в подшипниках.

На одиннадцатом этапе запускается и выполняется расчет потерь электроэнергии. В итоге возможна оценка КПД двигателя.

На двенадцатом этапе синтезированная модель используется в работах по оптимизации конструктивных размеров элементов, подбору материалов, построению характеристик, разработке энергосберегающих алгоритмов управления, схем замещения для цифровых двойников и в других возможных сферах применения.

Верификация модели. В связи с отсутствием в распоряжении авторов данных прямых измерений магнитного поля внутри асинхронных тяговых двигателей и сложностью их проведения верификация модели магнитного поля осуществлялась косвенным методом — на основании величины, на которую влияет магнитное поле тягового двигателя. Для оценки достоверности результатов математического моделирования допустимо сравнить полученную в процессе моделирования величину КПД электрической машины в рассматриваемом режиме работы с экспериментальным значением. Стоит отметить, что экспериментальное значение КПД не использовалось ранее, в отличие от экспериментального значения вращающего момента, при оценке эквивалентной электропроводности шихтованного пакета ротора и может быть использовано для верификации модели, а полученное при моделировании значение КПД не является «подогнанным» под данные эксперимента. По данным ВЭлНИИ [16], тяговый двигатель ДТА-1200А в процессе испытаний от синусоидального источника питания в продолжительном режиме имеет КПД 0,96300. Полученное в результате моделирования значение КПД 0,96319 свидетельствует об отличии потерь на 5 %, что говорит об адекватности разработанной модели, достаточной точности моделирования с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и применимости его возможностей для проектирования тяговых электрических машин.

Обсуждение. Исследование показало, что с помощью метода конечных элементов возможно построение адекватной модели магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин и использование ее для расчета потерь электроэнергии в тяговой электрической машине. В случае отсутствия экспериментальных данных с использованием предлагаемого подхода появляется возможность качественного представления электромагнитных процессов и оценки потерь, а количественная оценка требует проведения отдельных исследований и использования результатов испытаний.

Современный программный пакет COMSOL Multiphysics вполне применим для моделирования токораспределения и магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин. С его помощью были исследованы особенности моделирования асинхронного тягового электродвигателя.

Эквивалентная электропроводность модели шихтованного пакета ротора зависит от частоты тока ротора. Визуализация магнитного поля показала его направленное искажение в области ротора, что дает возможность применить эту информацию на практике при разработке новых конструкций электрических машин.

По результатам анализа магнитного поля величина потокосцепления фазы обмотки статора оказалась очень близкой к теоретическому расчетному значению, что подтверждает адекватность разработанной модели и приемлемую точность расчета при использовании программного пакета. Реализован расчет потерь энергии в тяговом двигателе. Соответствие результатов моделирования экспериментальным данным также подтверждает адекватность разработанной модели и достаточную точность моделирования с помощью программного пакета.

Важной областью применения расчетов с использованием метода конечных элементов является проектирование нестандартных инновационных электрических машин со сложной или асимметричной геометрией магнитной системы, которые не описываются типовой теоретической расчетной методикой.

Заключение. В ходе исследования апробирован программный пакет, подходящий для компьютерного моделирования магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин. Рассмотрены особенности и разработаны практически значимые рекомендации по построению компьютерной модели двигателя, исследованы возможности применения программы для расчета потерь электроэнергии в тяговом двигателе. Освоение изложенного метода позволит исследователям и разработчикам электрических машин совершенствовать свои навыки компьютерного моделирования асинхронных электрических машин, найти и предложить верные технические решения, направленные на улучшение характеристик тяговых электродвигателей, совершенствование и оптимизацию их конструкции.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Гнутов С. К., Раецкая О. В. Подход к численному моделированию физических полей в стартерных электродвигателях // Вопросы электротехнологии. 2019. № 2 (23). С. 46–50 [Gnutov S. K., Raetskaya O. V. An approach to numerical modeling of physical fields in starter electric motors. *Journal of Electrotechnics*. 2019;(2):46-50. (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/zkwkyr.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662303 Российская Федерация. Построение сетки граничных элементов для метода граничных интегральных уравнений (pFields: геометрия): № 2019661086: заявл. 10.09.2019: опубл. 20.09.2019 / Денисов П. А. 1 с. [Denisov P. A. *Certificate of State Registration of Computer Program No. 2019662303 Russian Federation. Constructing a Boundary Element Mesh for the Boundary Integral Equation Method (pFields: Geometry): No. 2019661086: appl. 10.09.2019: publ. 20.09.2019*. 1 p. (In Russ.)].

3. Автайкин И. Н., Квон А. М. Сравнительный анализ эффективности использования активных материалов радиальных и аксиальных асинхронных машин электропривода технологических установок // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2019. № 1 (367). С. 70–72 [Avtaykin I. N., Kvon A. M. Comparative analysis of the efficiency of the use of active materials of radial and axial asynchronous machines of the electric drive of technological installations. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2019;(1):70-72 (In Russ.)]. http://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.1.17.

4. Бельский И. О. Численное моделирование параметров магнитного поля при обрыве стержней асинхронных электродвигателей машиностроительного производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. Т. 57, № 1. С. 60–70 [Belskiy I. O. Numerical modeling of magnetic field parameters of the asynchronous electric motors with broken bars in machine-building production. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2018:57(1):60-70 (In Russ.)]. https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57).60-70.

5. Бельский И. О., Лукьянов А. В. Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 44–53 [Belskiy I. O., Lukyanov A. V. Mathematical, numerical and full-scale modeling of magnetic field parameters in the asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases. *Systems. Methods. Technologies*. 2018;(2):44-53 (In Russ.)]. https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-44-53.

6. Повышение удельных характеристик асинхронных двигателей / К. Е. Кононенко [и др.] // Электричество. 2020. № 9. С. 34–39 [Kononenko K. E., Kononenko A. V., Krutskikh S. V., Manukovskiy S. M. Improving the Specific Characteristics of Induction Motors. *Electrichestvo*. 2020;(9):34-39 (In Russ.)]. https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-9-34-39.

7. Разработка и исследование тягового синхронного электродвигателя с инкорпорированными в ротор магнитами для электромобиля / Ю. Б. Казаков [и др.] // Вопросы электротехнологии. 2022. № 2 (35). С. 89–97 [Kazakov Yu. B., Stulov A. V., Nikiforov M. I., Kiselev M. A. Development and research of a traction synchronous electric motor with magnets incorporated in the rotor for an electric vehicle. *Journal of Electrotechnics*. 2022;(2):89-97. (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/vrbtem.

8. Симаков А. В., Огневский А. С. Моделирование режимов работы тягового электродвигателя методом конечных элементов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф., посвященной Дню российской науки, Омск, 8 февраля 2019 г. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2019. С. 196–201 [Simakov A. V., Ognevskiy A. S. The traction motor operating modes modelling with the finite element metod. In: *Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of scientific conference devoted to the Day of Russian Science, Omsk, 8 February 2019*. Omsk: OmGUPS; 2019. p. 196–201. (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/uzoskz.

9. Глущенко М. Д., Горюнов И. О. Особенности расчета магнитного поля электрических машин // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 6. С. 5–8 [Glushchenko M. D., Goryunov I. O. Characteristics of the calculation of electric machine's magnetic field. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2018;(6):5-8 (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/yuiwqh.

10. Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей / В. В. Сиротkин [и др.] // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8, № 4. С. 58–73 [Sirotkin V. V., Pigalev D. A., Bol'shikh I. V., Chernyaev S. S. Application of specialized software for calculation of magnetic field in the turns of switched reluctance motors stator windings. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):58-73. (In Russ.)]. https://doi.org/10.17816/transsyst20228458-73.

11. Расчет параметров математической модели электрического шагового двигателя гибридного типа на основе анализа картины магнитостатического поля / С. В. Волков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 8. С. 482–489

[Volkov S. V., Goryachev O. V., Efromeev A. G., Stepochkin A. O. Calculation of the Parameters of a Mathematical Model of an Electric Hybrid Stepper Motor Based on the Analysis of the Magneto Static Field Pattern. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2019;20(8):482-489. (In Russ.)]. https://doi.org/10.17587/mau.20.482-489.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669927 Российская Федерация. Программа для исследования магнитного шума и вибрации асинхронного электродвигателя: № 2022669399: заявл. 21.10.2022: опубл. 26.10.2022 / Ермолаев А. И., Гордеев Б. А., Охулков С. Н., Титов Д. Ю. 1 с. [Ermolaev A. I., Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Titov D. Yu. *Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022669927 Russian Federation. Programme for the investigation of magnetic noise and vibration of an asynchronous drive: No. 2022669399: appl. 21.10.2022: publ. 26.10.2022*. 1 p. (In Russ.)].

13. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством мкэ-моделирования / А. И. Ермолаев [и др.] // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3 (15). С. 37–56 [Ermolaev A. I., Erofeev V. I., Plekhov A. S., Titov D. Yu. Study of magnetic vibration occurring in induction motor using FEM simulation. *Smart Electrical Engineering*. 2021;(3):37-56 (In Russ.)]. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_37.

14. Сравнение методов расчета электромагнитных процессов на примере цилиндрического линейного вентильного двигателя / Д. А. Чирков [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 4 (28). С. 76–91 [Chirkov D. A., Klyuchnikov A. T., Korotaev A. D., Timashev E. O. Comparison of electromagnetic processes calculation methods on the example of a cylindrical linear electronic motor. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*. 2018;(4):76-91. (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/vqadwu.

15. Авдеев А. И. Автоматизация расчета магнитного поля асинхронного электродвигателя в программе FEMM // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. тр. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Смоленск, 22–23 апреля 2021 г.: в 3 т. Смоленск: Универсум, 2021. Т. 1. С. 121–126 [Avdeev A. I. Automation of calculation of magnetic field of asynchronous electric drive in the programme FEMM. In: *Information technologies, power engineering and economy (power engineering, electrical engineering and thermal power engineering, mathematical modelling and information technologies in production): Proceedings of XVIII International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Smolensk, 22–23 April 2021: in 3 vol*. Smolensk: Universum; 2021. Vol. 1. p. 121–126 (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/jxydoe.

16. Захаров В. И. Параметры, характеристики и конструктивные особенности асинхронного тягового двигателя ДТА-1200А электровоза ЭП20 // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2009. № 2. С. 55–66 [Zakharov V. I. Parameters, characteristics and design features of the DTA-1200A asynchronous traction engine of the EP20 electric locomotive. *Journal of the All-Russian research and development institute of electric locomotives*. 2009;(2):55-66 (In Russ.)]. EDN: https://www.elibrary.ru/kxotud.

17. Молотилов Б. В., Миронов Л. В., Петренко А. Г. Холоднокатаные электротехнические стали: справ. изд. / под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1989. 168 с. [Molotilov B. V., Mironov L. V., Petrenko A. G. *Cold-rolled Electrotechnical Steels: Reference Manual*. Moscow: Metallurgiya; 1989. 168 p. (In Russ.)].

18. Новиков Н. Н., Родионов И. Е., Шутько В. Ф. Синхронные двигатели: справ. для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 36 с. [Novikov N. N., Rodionov I. E., Shut'ko V. F. *Synchronous engines: Handbook for students of electrical engineering and power engineering*. Ekaterinburg: UGTU-UPI; 2005. 36 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич ЗУЕВ,
аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 836869, https://orcid.org/0000-0001-8873-9800

Михаил Дмитриевич ГЛУЩЕНКО,
д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 298452, https://orcid.org/0000-0002-8847-0204

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. ZUEV,
Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 836869, https://orcid.org/0000-0001-8873-9800

Mikhail D. GLUSHCHENKO,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Electric trains and locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 298452, https://orcid.org/0000-0002-8847-0204

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Сергеевич ЗУЕВ. Проведение исследования, поиск информации, расчеты, моделирование, подготовка публикации (75 %).

Михаил Дмитриевич ГЛУЩЕНКО. Постановка цели и задач исследования, консультирование и научное руководство (25 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander S. ZUEV. Carrying out research, finding information, calculations, modelling, preparing a publication (75 %).

Mikhail D. GLUSHCHENKO. Formulating research objectives, advising and providing scientific guidance (25 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 13.03.2023, рецензия от второго рецензента получена 22.03.2023, принята к публикации 22.05.2023.

The article was submitted 02.02.2023, first review received 13.03.2023, second review received 22.03.2023, accepted for publication 22.05.2023.