

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ

*Проценко Д.В.<sup>1</sup>, Савко Н.О.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

*Научный руководитель: Пискун Г.А. – канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры ПИКС*

**Аннотация.** Изучены основные аспекты проектирования электродвигателей, генераторов. Рассмотрены основные методы моделирования электродвигателей и генераторов с помощью программных пакетов, основанных на методе конечных элементов. Указаны преимущества и недостатки каждого из рассмотренных программных пакетов, их области применения.

**Ключевые слова:** электродвигатель, генератор, моделирование процессов, метод конечных элементов.

**Введение.** В современных исполнительных устройствах и средствах автоматизации сервоприводы или сервомоторы – самые часто применяемые устройства. Они приводят в контролируемое движение различные исполнительные механизмы. Для большинства современных станков, манипуляторов, конвейеров, и прочих устройств, широко применяемых в современной промышленности необходимо точное позиционирование полезной нагрузки.

В условиях окружающей среды при разных режимах работы электродвигатели и генераторы испытывают высокие электромагнитные и тепловые нагрузки. Это накладывает определенные требования к виду исполнения, системе охлаждения и материалам, применяемым в двигателе для обеспечения нужных эксплуатационных характеристик. Поэтому важной задачей при проектировании электродвигателей и генераторов является оценка его теплового состояния, которая позволяет получить информацию о продолжительности работы двигателя в различных режимах и, при необходимости, скорректировать конструкцию для обеспечения необходимых требований.

В работе представлено современное программное обеспечение для проектирования электродвигателей. Рассмотрены такие программные пакеты как *COMSOL Multiphysics* с модулем *AC/DC*, *Ansys Motor-CAD* и *JMAG-Designer*. Выделены преимущества и недостатки каждого из рассмотренных программных пакетов.

**Основная часть.** При проектировании электродвигателей или генераторов необходимо учитывать множество факторов. Распределение магнитного поля или индукции является очень важным при проектировании электрических машин. В синхронных вращающихся машинах ключевым параметром для исследования индуцированных напряжений является пространственное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре (между ротором и статором). Фазное напряжение на статоре будет синусоидальным только в том случае, если радиальная компонента магнитной индукции имеет синусоидальное распределение по периферии ротора. Эта пространственная волновая мода в специализированной литературе иногда называется волной магнитодвижущей силы в воздушном зазоре. Если такая волна несинусоидальная, в индуцированном напряжении существуют гармоники более высокого порядка.

Необходимо исследование и оптимизация механического крутящего момента, исследование и оптимизация использования железа, электромагнитных потерь, тепловых и прочностных характеристик [1 – 3].

Наиболее детальную и точную картину позволяют получить численные методы на основе метода конечных элементов. Данные методы позволяют выполнить расчеты установившегося или переходного процесса в трехмерной постановке задачи и определить параметры в любой части двигателя.

В частности, *Ansys Motor-CAD* является специализированным инструментом проектирования электродвигателей и оценки электромагнитных, тепловых и прочностных характеристик электродвигателей во всех режимах эксплуатации с учетом различной топологии. *Motor-CAD* позволяет инженерам-конструкторам оценивать топологии и концепции двигателей во всем рабочем диапазоне, чтобы создавать конструкции, оптимизированные с точки зрения производительности, эффективности и размера. Четыре интегрированных модуля программного обеспечения *Motor-CAD* (*EMag*, *Therm*, *Lab* и *Mech*) позволяют быстро и многократно выполнять мультифизические расчеты, поэтому пользователи могут перейти от концепции к окончательному проекту за меньшее время [4].

Преимуществами пакета являются интуитивно понятные настройки на основе шаблонов. Это упрощает и автоматизирует процесс анализа, а встроенные электромагнитные, тепловые и механические решатели предлагают мультифизическую информацию о конструкции двигателя (рисунок 1). Моделирование может быть завершено за считанные секунды, что дает достаточно времени и возможностей для обширного исследования проектного пространства. В программе присутствует возможность создавать оптимизированные конструкции электродвигателей и генераторов, чтобы они соответствовали размеру, весу, энергоэффективности, стоимости и другим характеристикам [5].

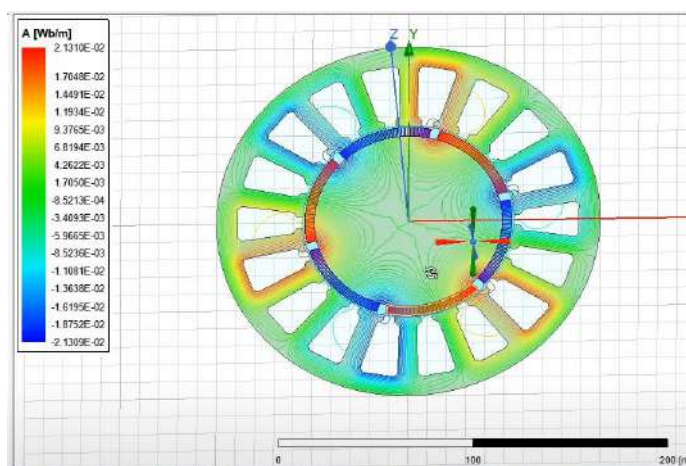


Рисунок 1 – Тепловой анализ электродвигателя в *Ansys Motor-CAD*

Для детального анализа и проверки конструкции двигателя модель *Motor-CAD* можно перенести в *Ansys Maxwell*, *Ansys Icepak* и *Ansys Fluent*. Объединение этих решателей с *Motor-CAD* обеспечивает возможность высокоточного 2D/3D-анализа, позволяя пользователям анализировать конечные эффекты, размагничивание, потери в сердечнике, гистерезис и другие сложные электромагнитные явления, рассчитывать тепловую оболочку для работы и проектировать полные системы охлаждения двигателя [4, 5].

С помощью программы *COMSOL Multiphysics* инженеры и ученые моделируют конструкции, устройства и процессы во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. С помощью этой платформы можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы. Среда разработки моделей, которая позволяет пройти все этапы от построения геометрической модели, задания свойств материалов и описания физики задачи до решения и визуализации результатов моделирования [7 – 9].

По сравнению с проведением физических экспериментов и испытанием прототипов моделирование, совмещенное с эмпирическими техниками, позволяет быстрее, эффективнее и точнее оптимизировать процессы и устройства. Успешные инженерные расчеты, основанные на экспериментально подтвержденных моделях, могут заменить в известной степени и физические эксперименты, и прототипирование, и позволяют лучше понять разрабатываемую конструкцию или изучаемый процесс [1].

Для процесса проектирования электроприводов и генераторов необходимо задействовать только некоторых функциональных возможностей, предоставляемых *COMSOL Multiphysics* и модулем *AC/DC*. С помощью данного пакета можно изучить как линейный график магнитной индукции в воздушном зазоре машины показывает, будет ли индуцированное напряжение синусоидальным. Используя *Parametric Sweep* в *COMSOL Multiphysics*, можно определить начальный угол ориентации ротора, который обеспечит максимальный крутящий момент. Анализ графиков распределения магнитной индукции позволяет визуально определить, является ли использование железа оптимальным для эффективного вырабатывания крутящего момента. С использованием встроенных инструментов *COMSOL Multiphysics* можно также определить э/м потери в железных компонентах и влияние на них характерного радиального размера ротора и статора (рисунок 2 [1]).

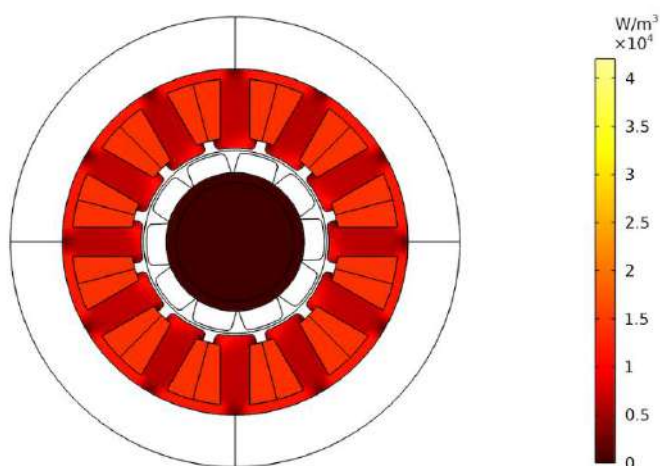


Рисунок 2 – Распределение потерь железа при различных значениях характерного размера железных компонентов в *COMSOL Multiphysics*

Стоит выделить программу моделирования, разработки и проектирования электрических устройств *JMAG Designer*. Первоначально *JMAG* был выпущен как инструмент для поддержки проектирования таких устройств, как двигатели, приводы, компоненты схем и антенны. Программный пакет использует технологию моделирования для точного анализа широкого спектра физических явлений, включая сложную геометрию, различные свойства материалов, а также тепло и структуру в центре электромагнитных полей. *JMAG* имеет интерфейс, способный связываться со сторонним программным обеспечением, и часть функций анализа [2].

Преимуществами *JMAG Designer* является поддержка импорта *CAD*-моделей из любой среды для *3D* моделирования. Геометрия также может быть изменена в *CAD*-системах при сохранении настроек условий в *JMAG*. После изменения геометрии анализ может быть выполнен сразу же после сброса условия. Благодаря этому эффективность выполнения анализа с использованием САПР быстро повышается. Благодаря тому, что *JMAG* часто используется научными лабораториями в разработке новых материалов, это гарантирует, что *JMAG* всегда способен фиксировать точные отклики материалов.

Достоинством *JMAG Designer* также является то, что с помощью него могут быть исследованы не только проблемы, связанные с электромагнитной совместимостью, но и вибрационные явления, связанные с магнитострикцией. Может быть выполнена оценка напряжения от центробежной силы и др. [6].

Важным аспектом проектирования электродвигателей и генераторов является моделирование нагрева. Тепловой анализ в *JMAG* позволяют сочетать анализ магнитного поля и тепловой с вихревыми токами, потерями в стали и джоулевыми потерями катушки в качестве

источников тепла. Анализ магнитного поля включает в себя изменяющиеся от температуры свойства магнитных материалов и проводников.

При моделировании процессов, протекающих в электродвигателях, генераторах важное место занимает анализ процессов, имеющих одновременно и электрическую и тепловую природу. Именно при анализе таких процессов можно оценить взаимное влияние электромагнитных и тепловых полей – являющееся одной из основных особенностей моделирования индукционного нагрева. Другой, не менее важной особенностью, является необходимость учета нелинейных зависимостей свойств материала от температуры [2]. Так же при проектировании конструкции зачастую требуется учитывать влияние внешних факторов. Пакет программ *JMAG-Designer* обладает интуитивно понятным интерфейсом и позволяет легко учитывать эти особенности при моделировании процессов, протекающих в разрабатываемых устройствах [6].

**Заключение.** Выделены некоторые аспекты проектирования электродвигателей, генераторов. Использование функциональных возможностей, предоставляемых рассмотренными автоматизированными системами моделирования на основе метода конечных элементов, позволяет оценить параметры и процессы, протекающие в электродвигателях, генераторах. На основе результатов анализа параметров можно получить информацию о продолжительности работы двигателя в различных режимах и, при необходимости, скорректировать конструкцию для обеспечения необходимых требований.

### Список литературы

1. Янкин, С. Разработка электродвигателей и генераторов с помощью COMSOL/ С. Янкин // Блог COMSOL [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://www.comsol.ru/blogs/analyzing-electric-motor-and-generator-designs-with-comsol/> – Дата доступа : 25.03.2022.
2. Патанов, Д. Обзор возможностей программного пакета JMAG-Designer и его применение для моделирования задач индукционного нагрева/ Д. Патанов // Расчеты электромагнитных и тепловых задач в программе Jmag-Designer [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : [http://inductor-jmag.ru/raschetu\\_na\\_zakaz/stati/jmag-designeri-3/](http://inductor-jmag.ru/raschetu_na_zakaz/stati/jmag-designeri-3/) – Дата доступа : 27.03.2022.
3. Прахт, В. Разработка энергоэффективных электродвигателей и генераторов/ В. Прахт // Уральский Энергетический Институт [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа <https://enin.urfu.ru/ru/partneram/issledovaniya-i-razrabotki/razrabotka-ehnergoehffektivnykh-ehlektrodvigateli-i-generatorov/> – Дата доступа : 25.03.2022.
4. ANSYS MOTOR-CAD / Fluid Codes [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://fluidcodes.com/software/ansys-motor-cad/> – Дата доступа : 26.03.2022.
5. ANSYS MOTOR-CAD / CADFEM Ansys [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/electronics/motor-cad/> – Дата доступа : 26.03.2022.
6. JMAG-Designer / JMAG [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа : <https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer/> – Дата доступа : 26.03.2022.
7. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20-21 мая 2020 года: в 3 ч. Ч. 3 / редкол.: В. А. Бозуш [и др.]. – Минск : Бестпринт, 2020. – С. 282–286.
8. Моделирование джоулева нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В. Ф. Алексеев и др. // Доклады БГУИР. - 2018. - № 7 (117). - С. 90 - 91.
9. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. - 2014. - № 4 (82). - С. 16 - 22.

UDC 621.382

## MODELING AND ANALYSIS OF PHYSICAL PARAMETERS OF ELECTRIC MOTORS AND GENERATORS

Protsenko D.V.<sup>1</sup>, Savko N.O.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Piskun G.A. – PhD, assistant professor, associate professor of the department of ICSD

**Annotation.** The main aspects of designing electric motors, generators are studied. The main methods for modeling electric motors and generators were chosen using software packages based on the finite element method. The advantages and application of each of the considered software packages in their field are indicated.

**Keywords:** electric motor, generator, process modeling, finite element method.