

УДК 621.313

## АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*К. В. Хохлова*

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рассмотрена проблема оценки эксплуатационного потенциала электрических аппаратов, связанная с изменением их энергетических характеристик. В качестве наиболее перспективных инструментов для оценки и прогнозирования выбраны программные продукты имитационного моделирования FEMM, ELCUT и COMSOL Multiphysics. Приведены достоинства и недостатки данных продуктов, установлено, что наиболее рациональным инструментом для оценки и прогнозирования энергетических характеристик является пакет COMSOL Multiphysics.

**Ключевые слова:** электрический привод, электромагнитные задачи, моделирование, современные прикладные программы, FEMM, ELCUT, COMSOL Multiphysics.

## ANALYSIS OF TOOLS FOR MODELING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC APPARATUS

*K. V. Khokhlova*

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The problem of assessing the operational potential of electrical devices associated with changes in their energy characteristics is considered. FEMM, ELCUT and COMSOL Multiphysics simulation software products were selected as the most promising assessment and forecasting tools. The advantages / disadvantages of the indicated products are given; it is found that the most rational tool for assessing and predicting energy characteristics is the COMSOL Multiphysics package.

**Keywords:** electric apparatus, electromagnetic problems, modeling, modern application programs, FEMM, ELCUT, COMSOL Multiphysics.

**Введение.** Электрический привод используется во многих отраслях промышленности. В настоящее время среди различных его типов электрический является наиболее энергоэффективным, что обуславливает его применение в автомобильной промышленности, энергетике и так далее [1–3]. К преимуществам данного типа систем относят возможность наиболее рационально построить технологический процесс, получить наивысшую производительность рабочих органов, снизить себестоимость продукции. При эксплуатации привода возникают факторы, снижающие рабочие показатели. Поэтому важной задачей является поиск решений, способствующих оптимизации технологии восстановления рабочего процесса.

Методы имитационного моделирования позволяют прогнозировать состояние электрического привода [4–5]. Моделирование дает полное понимание процесса, что способствует нахождению новых оптимальных решений, получению адекватной оценки и формированию единого видения результата будущего проекта, и обеспечивает высокую производительность [6]. При этом возможно проводить виртуальное тестирование, исследование тех или иных исполнений. Как правило, тестовые стенды значительно дешевле физических прототипов, что позволяет эффективно распределять и минимизировать временные и материальные ресурсы. На

основании изложенного можно сделать вывод об актуальности исследования. Цель данной работы — провести анализ программных продуктов, прогнозирующих уровень энергетического состояния электрических приводов с помощью имитационных методов.

**Основная часть.** Наиболее широко применяемыми программами для моделирования являются FEMM, ELCUT, COMSOL Multiphysics [7–8].

Программный продукт FEMM позволяет создать модель для расчета плоскопараллельного или осесимметричного стационарного и квазистационарного магнитного и стационарного электростатического полей, визуализировать их и определить полевые и цепные параметры [9]. К преимуществам относят простоту и быстроту получения какого-либо предварительного результата. Программный продукт имеет свободную лицензию, выполнен на русском языке. Недостатками данного программного продукта является создание только двумерного пространства, возможность использования лишь статического режима, решение исключительно электромагнитных задач. Программа имеет маленькую базу материалов и требует знаний в области программирования. Интерфейс программного продукта представлен на рис. 1.

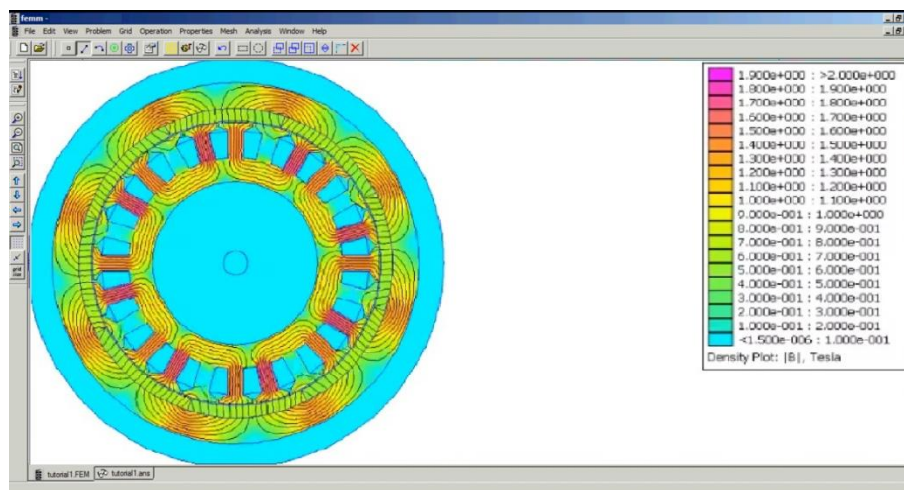


Рис. 1. Интерфейс программного продукта FEMM

Программный продукт ELCUT позволяет создать модель для расчета плоских и осесимметричных электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [7]. Преимуществами данного программного продукта являются простота использования, доступность справочной системы, большое количество учебного материала, бесплатная пробная версия, возможность быстро получить предварительный результат с максимальной точностью. Подходит для решения простых задач в области моделирования. К недостаткам относится отсутствие возможности одновременного решения полевых задач. Программа предназначена для расчета только двумерных геометрических моделей. Стоимость лицензии от 50 тысяч рублей. На рис. 2 представлена модель асинхронного двигателя и интерфейс программного продукта.

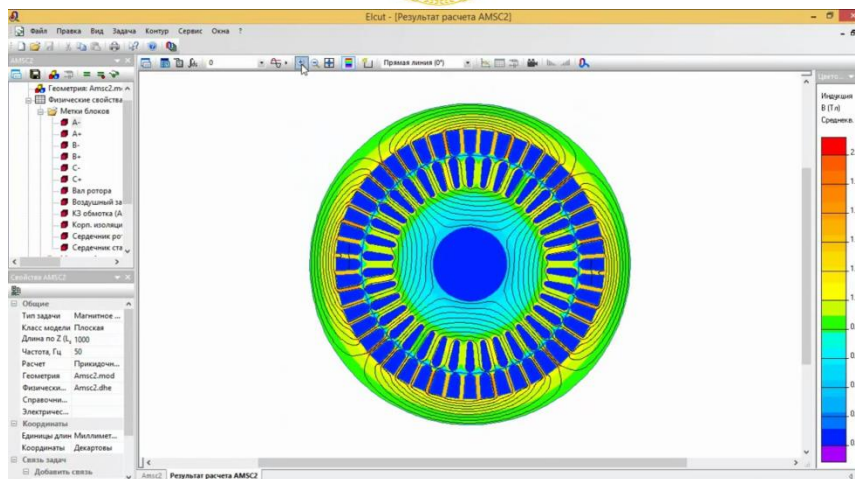


Рис. 2. Модель асинхронного двигателя и интерфейс программного продукта ELCUT

Программный продукт COMSOL Multiphysics позволяет исследовать в одной программной среде явления электромагнетизма, механики конструкций, акустики, гидродинамики, теплопередачи и химические реакции, а также любые другие физические явления, которые можно описать системами дифференциальных уравнений в частных производных [8]. К преимуществам относят возможность решения междисциплинарных задач в одной среде, т. е. сочетание в одной модели всех связанных физических явлений, что не могут позволить программные продукты, рассмотренные выше. Имеется возможность построения модели как в двумерном, так и в трехмерном пространстве. В отличие от FEMM и ELCUT, COMSOL Multiphysics позволяет проводить исследования не только в статическом, но и в динамическом режиме. Имеется большое количество свободных библиотек и решателей, которые могут работать автоматически или быть настроены подходящим образом для решения той или иной задачи. Пакет COMSOL Multiphysics прост для ознакомления из-за единого интерфейса и интеграции всех процессов построения модели в единой удобной среде. Подходит для решения задач разного уровня сложности в области моделирования. Недостатком данного программного продукта является отсутствие русификатора, стоимость программного пакета от 100 тысяч рублей, для создания и исследования модели требуется больше ресурсов, чем в программных продуктах, описанных выше. На рис.3 представлена модель асинхронного двигателя и интерфейс программного продукта.

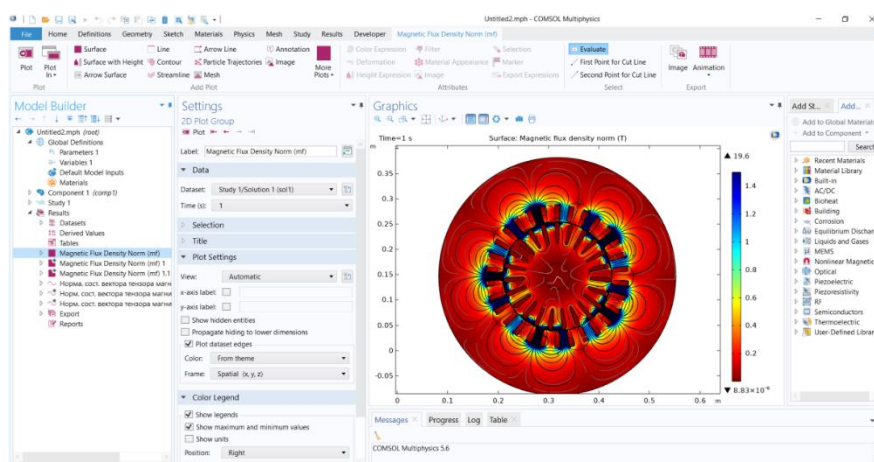


Рис. 3. Модель асинхронного двигателя и интерфейс программного продукта COMSOL Multiphysics

**Заключение (выводы).** На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

— обосновано, что эффективное численное проектирование и моделирование позволяют при минимальных затратах анализировать и оптимизировать рабочие характеристики и режимы работы электрических аппаратов;

— определено, что для решения простых задач и получения быстрого результата целесообразно использовать программный продукт ELCUT;

— установлено, что перспективным с точки зрения анализа энергетических характеристик электрических аппаратов являются COMSOL Multiphysics.

#### **Библиографический список**

1. Лимаренко, Н. В. Определение закона распределения плотности вероятностей удельной электрической энергоёмкости при обеззараживании стоков агропромышленного комплекса / Н. В. Лимаренко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2017. — № 2–3 (356–357). — С. 118–120.

2. Исследование влияния параметров рабочих тел индуктора на коэффициент мощности / И. А. Успенский, И. А. Юхин, Г. А. Борисов, Н. В. Лимаренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. — 2019. — № 3 (55). — С. 360–369.

3. Расчёт и моделирование параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью / Н. В. Бышов, И. А. Успенский, И. А. Юхин, Н. В. Лимаренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. — 2020. — № 4 (60). — С. 350–369.

4. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров, Ю. В. Панов, Б. Г. Шаповал // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 136–142.

5. Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства / Б. Ч. Месхи, Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров, Б. Г. Шаповал // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 129–135.

6. Лимаренко, Н. В. Влияние температуры на параметры работы индуктора, используемого при обеззараживании материалов / Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2016. — № 1 (349). — С. 88–91.

7. Беззубцева, М. М. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем АПК / М. М. Беззубцева, В. С. Волков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2015. — № 6–2. — С. 191–195.

8. Шабанов, А. С. Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей / А. С. Шабанов, В. Ю. Нейман // Современные материалы, техника и технологии. — 2017. — № 5 (13). — С. 96–100.

9. Милых, В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей трехфазных асинхронных двигателей для программной среды FEMM / В. И. Милых // Вісник НТУ «ХП». — 2017. — № 1 (1223). — С. 3–15.

*Об авторе:*

**Хохлова Кристина Владимировна**, студентка кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [cristy2020@yandex.ru](mailto:cristy2020@yandex.ru)