

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С ПОЛЫМ ПЕРФОРИРОВАННЫМ РОТОРОМ

Виконано аналіз тривимірного розподілу електромагнітного поля в активній зоні ПЕМП з порожнистим перфорированим ротором.

Выполнен анализ трехмерного распределения электромагнитного поля в активной зоне ПЭМП с полым перфорированным ротором.

ВВЕДЕНИЕ

Полифункциональные электрохимические преобразователи (ПЭМП) с полым ферромагнитным ротором, имеющим перфорированную структуру, относятся к новому классу электрохимических устройств. При их проектировании важно получить достоверную информацию о распределении электромагнитного поля в активной части, которое в отличие от традиционных электрических машин имеет весьма оригинальный характер [1]. Наличие сквозных отверстий в полым ферромагнитном роторе ПЭМП обуславливает необходимость анализа картины электромагнитного поля в трехмерной постановке.

Одним из наиболее эффективных численных методов решения трехмерных полевых задач является метод конечных элементов [2].

Целью данной работы является создание математической модели ПЭМП с полым перфорированным ротором для установления особенностей трехмерного распределения магнитного поля в его активной зоне.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Расчет трехмерного распределения электромагнитного поля выполнялся для экспериментального образца ПЭМП на базе асинхронного двигателя АОЛ-21-2, с учетом реальных линейных размеров активной зоны.

Основные конструктивные параметры: наружный диаметр статора – 140 мм; внутренний диаметр статора – 88 мм; активная длина сердечника статора – 75 мм; наружный диаметр полого ротора – 85 мм; длина полого ротора – 75 мм; толщина стенки полого ротора – 3,5 мм; воздушный зазор – 1,5 мм (увеличен с целью размещения индуктивных датчиков); число зубцов статора – 24; число радиальных отверстий ротора – 24; диаметр отверстий ротора – 4 мм. Ряды отверстий выполнены равномерно по длине окружности ротора (восемь аксиальных рядов по три отверстия). Расстояние между центрами отверстий одного ряда – 19 мм.

Переменное электромагнитное поле должно быть рассчитано с учетом нелинейных характеристик стали, а так же с учетом реакции токов, индуцированных в роторе, распределение которых в массиве перфорированного ротора носит сложный характер. Модель спроектирована при помощи программы Comsol Multiphysics 3.5a, позволяющей решать задачи, в которых токи источников поля изменяются по гармоническому закону. Общий вид трехмерной модели активной части ПЭМП представлен на рис. 1.

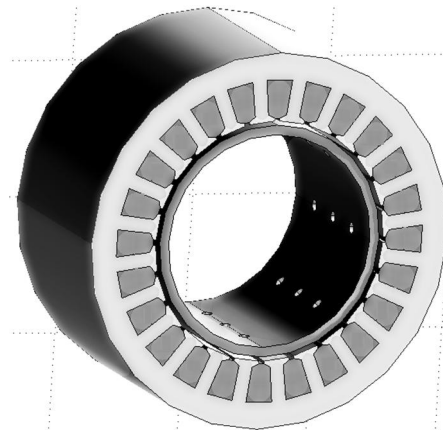


Рис. 1. Общий вид трехмерной модели активной части ПЭМП

С точки зрения численного расчета квазистационарного электромагнитного поля в асинхронном двигателе, целесообразно использовать уравнение для роторной системы координат [3]:

$$\Delta \vec{A} - j\omega_1 s \mu \gamma \vec{A} = -\mu \vec{J}, \quad (1)$$

где \vec{A} – векторный магнитный потенциал; ω_1 – угловая частота вращения поля статора; s – скольжение ротора; μ – относительная магнитная проницаемость; удельная электрическая проводимость массивного ротора; \vec{J} – вектор плотности тока источника поля.

При моделировании были заданы нелинейные характеристики стали статора (сталь 2013, сердечник шихтован) и ротора (Ст3, массив). На участках пазов (медь) задавались комплексные значения плотности тока (J_z компонента). Компоненты J_x и J_y принимались равными нулю. Плотность токов в фазах обмотки статора:

$$\begin{aligned} \vec{J}_A &= I_m \cdot u_n / S_n, \\ \vec{J}_B &= -I_m [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] \cdot u_n / S_n, \\ \vec{J}_C &= -I_m [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] \cdot u_n / S_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_m – амплитуда тока в фазе статора; u_n – число эффективных проводников в пазу; S_n – площадь сечения паза.

На рис. 2 представлена трехмерная конечно-элементная сетка модели. Конечно-элементная сетка воздушных областей, прилегающих к торцам модели, не показана. Решение задачи трехмерного распределения поля (нормальная составляющая индукции) в виде поперечного среза, проходящего через центры отверстий, представлено на рис. 3.

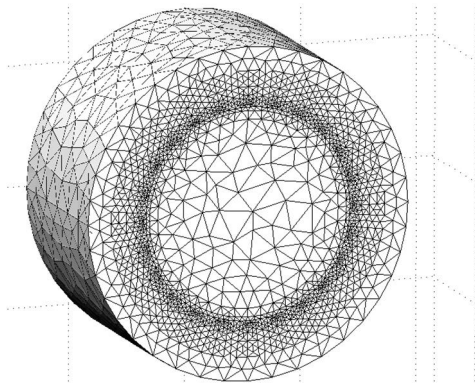


Рис. 2. Трехмерная конечно-элементная сетка модели

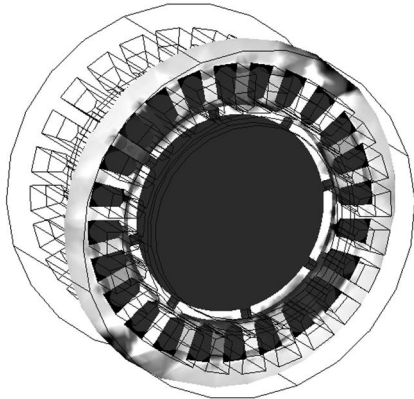


Рис. 3. Решение задачи в виде поперечного среза (нормальная составляющая индукции)

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Магнитное поле в воздушном зазоре между статором и полым перфорированным ротором ПЭМП распределяется неравномерно. На рис. 4 показан фрагмент картины распределения магнитной индукции в зазоре ПЭМП в виде линий тока. Из рисунка видно, что силовые линии сгущаются в пределах сплошных участков ротора и разрежаются в пределах площади сквозного отверстия. Как результат, провалы в кривой индукции в зазоре над отверстием достигают 0,4-0,5 Тл. Силовые линии, входящие в ротор через отверстие сбоку, проходят путь, длина которого больше, чем воздушный зазор, обуславливая уменьшение зоны провала в кривой индукции.

На рис. 5 показан график распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль середины воздушного зазора над отверстием, в пределах зубца статора. Зона отверстия на графике ограничена пунктирными линиями.

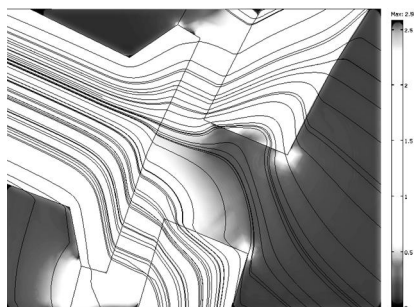


Рис. 4. Фрагмент картины распределения магнитной индукции в зазоре ПЭМП

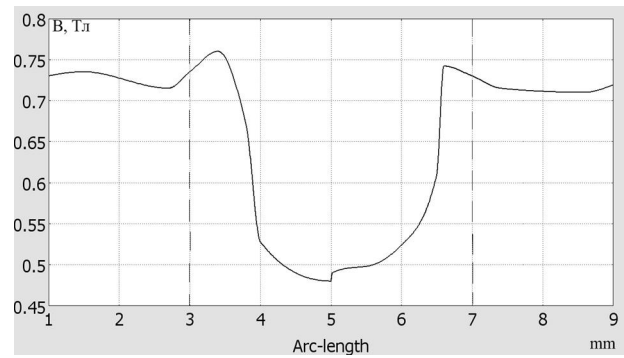


Рис. 5. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль середины воздушного зазора над отверстием

На рис. 6 представлен график распределения нормальной составляющей индукции вдоль аксиальной линии, проходящей над центрами отверстий одного ряда, через середину воздушного зазора.

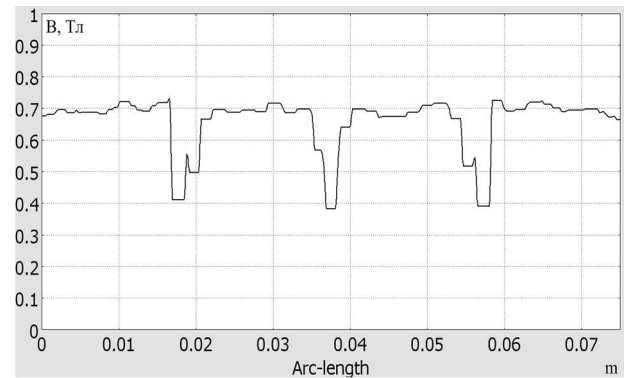


Рис. 6. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в зазоре вдоль аксиальной линии, проходящей над центрами отверстий одного ряда

Аналогичная кривая для сплошного участка между рядами отверстий представлена на рис. 7.

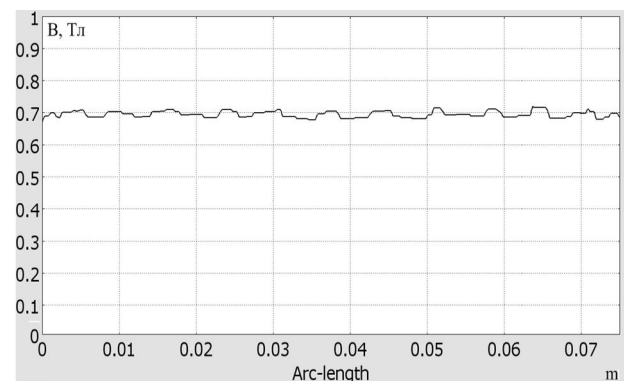


Рис. 7. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в зазоре вдоль сплошного участка между рядами отверстий

Фрагмент картины распределения магнитной индукции в зазоре ПЭМП для случая, когда ряд отверстий расположен между зубцами статора, представлен на рис. 8. Продольный срез выполнен на расстоянии 0,5 мм от поверхности ротора. На рисунке темным областям воздушного зазора соответствует значение индукции 0,4-0,45 Тл, светлым – 0,7-0,72 Тл.

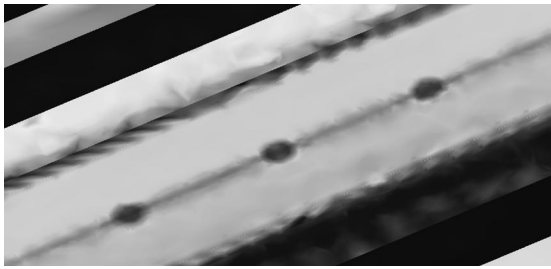


Рис. 8. Фрагмент картины распределения магнитной индукции в зазоре ПЭМП

На рис. 9 показано распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса ПЭМП. В первом случае (верхний график) радиальная линия проходит от оси ПЭМП через сплошной участок ферромагнитного ротора, середину зубца и ярмо статора. Во втором, от оси через центр отверстия в роторе, середину зубца и ярмо статора. Для визуального удобства ось вдоль радиуса показана на графике не от нуля.

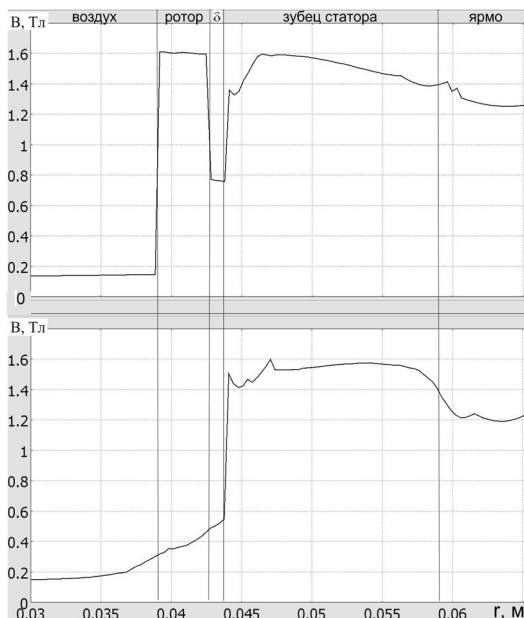


Рис. 9. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса ПЭМП

Максимальное значение индукции в пределах сплошных участков ферромагнитного ротора ввиду его малой толщины достигает значения 2,8 Тл. Проходя вдоль стенок ротора, магнитные силовые линии как бы обтекают отверстие. Вследствие этого их плотность с двух сторон отверстия резко возрастает, а с двух других сторон – снижается (рис. 10).

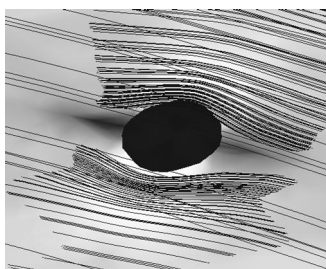


Рис. 10. Распределение силовых линий индукции вокруг отверстия в роторе ПЭМП

Фрагмент картины распределения магнитной индукции в роторе для отверстий одного ряда представлен на рис. 11. Продольный срез ротора выполнен на глубине 1 мм. Светлые участки с двух сторон отверстия – участки, на которых индукция достигает 3-4 Тл. Темным участкам соответствует индукция 0,5-1 Тл.

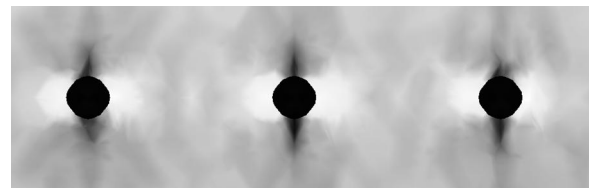


Рис. 11. Фрагмент картины распределения магнитной индукции в роторе ПЭМП

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ трехмерного распределения электромагнитного поля в активной зоне ПЭМП с полым перфорированным ротором. Полученные результаты исследования ПЭМП могут быть использованы для оптимизации конструкции и повышения эффективности его использования в качестве теплогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблодский Н.Н., Грицок В.Ю., Лукьянов Н.В. Определение коэффициента воздушного зазора для полого ротора сквозной структуры в полифункциональных электромеханических преобразователях // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2010. – Вып. 31. – С. 187-192.
2. Biro O., Preis K., Richter K.R. Various FEM formulations for the calculation of transient 3D eddy currents in nonlinear media. – IEEE Transactions on Magnetics. – 1995, v. 31, No. 3. – P. 1307-1312.
3. Васильковский Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 191 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zablodskij N.N., Gricyuk V.Yu., Luk'yanov N.V. Opredelenie ko'effitsienta vozdušnogo zazora dlya pologo rotora skvoznoj struktury v polifunkcional'nyh `elektromehaničeskikh preobrazovatel'nyh // Sb. nauch. tr. DonGTU. - Alchevsk: DonGTU. - 2010. - Vyp. 31. - S. 187-192. 2. Biro O., Preis K., Richter K.R. Various FEM formulations for the calculation of transient 3D eddy currents in nonlinear media. - IEEE Transactions on Magnetics. - 1995, v. 31, No. 3. - P. 1307-1312. 3. Vas'kovskij Yu. M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin. - K.: NTUU "KPI", 2007. - 191 s.

Поступила 24.11.2011

*Заблодский Николай Николаевич, д.т.н., проф.,
Филатов Максим Анатольевич,
Грицок Владимир Юрьевич*
Донбасский государственный технический университет
кафедра "Электрические машины и аппараты"
94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина, 16
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87
e-mail: info@dgmi.edu.ua

Zablodskiy N.N., Filatov M.A., Gricyuk V.Yu.
Numerical modeling of electromagnetic field in polyfunctional electromechanical transducers with a hollow perforated rotor

Three-dimensional electromagnetic field distribution in the active zone of polyfunctional electromechanical transducers with a hollow perforated rotor is analyzed.

Key words – polyfunctional electromechanical transducer, perforated rotor, three-dimensional electromagnetic field.