

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 553.537

doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-9-14

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ДВУХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS 6.2

Рюрик Тимофеевич Емельянов¹, Александр Константинович Данилов², Дмитрий Николаевич Желонин^{3✉}

^{1,2,3} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ ert-44@yandex.ru

² danilov_ak@mail.ru

³ dzhel124@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматривается использование электромагнитов в области машиностроения, а также на примере ротора и статора, имеющих полюса электромагнитных катушек. Проанализирована возможность перенаправления и экранирования электромагнитных потоков, приведено описание электрического и магнитного полей, возникающих вокруг любого проводника с электрическим током, которые являются неотъемлемой составляющей почти всех электрических машин. Показано, что в природе не существует материалов, имеющих нулевую магнитную проницаемость, то есть полностью не пропускающих сквозь себя магнитное поле. Рассмотрены результаты экранирования магнитного потока, создаваемого электромагнитами.

Для анализа использовался модуль Rotating Machinery, Magnetic, в котором доступны формулировки на основе векторного и скалярного магнитного потенциалов, а также инструмент подвижной сетки (Moving Mesh). Для экранирования магнитного потока, создаваемого электромагнитами, выбор наиболее эффективного способа зависит от типа электромагнита (постоянного или переменного тока), частоты его работы, интенсивности магнитного поля и требований к экранированию. Одним из наиболее эффективных способов является комбинированное экранирование с использованием ферромагнитных и проводящих материалов.

Ключевые слова: индукция, электромагниты, машины, машиностроение, COMSOL.

Ссылка для цитирования:

Емельянов Р.Т. Анализ распределения магнитного потока электрических машин и двухмерное моделирование в среде COMSOL MULTIPHYSICS 6.2. / Р.Т. Емельянов, А.К. Данилов, Д.Н. Желонин // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 6. – С. 9-14. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-9-14.

Original article

Open Access Article

ANALYSIS OF MAGNETIC FLUX DISTRIBUTION OF ELECTRIC MACHINES AND TWO-DIMENSIONAL MODELING IN COMSOL MULTIPHYSICS 6.2

Rurik Timofeevich Emelyanov¹, Aleksandr Konstantinovich Danilov², Dmitry Nikolaevich Zhelonin^{3✉}

^{1,2,3} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ ert-44@yandex.ru

² danilov_ak@mail.ru

³ dzhel124@yandex.ru

Abstract

The paper deals with the use of electromagnets in the field of mechanical engineering, as well as the example of a rotor and stator with poles of electromag-

netic coils. The possibility of redirection and shielding of electromagnetic fluxes is analyzed, and the description of electric and magnetic fields arising around any

conductor with electric current, which are an integral component of almost all electrical machines, is given. It is shown that there are no natural materials that have zero magnetic permeability, that is, they do not completely pass through a magnetic field. The results of shielding of the magnetic flux created by electromagnets are considered. Rotating Machinery, Magnetic module was used for the analysis, in which formulations based on vector and scalar magnetic potentials are available, as well as a Moving Mesh tool. To shield the

magnetic flux generated by electromagnets, the choice of the most effective method depends on the type of electromagnet (direct current or alternating current), its operation frequency, the intensity of the magnetic field and the requirements for shielding. One of the most effective methods is combined shielding using ferromagnetic and conductive materials.

Keywords: induction, electromagnets, machines, mechanical engineering, COMSOL.

Reference for citing:

Emelyanov RT, Danilov AK, Zhelonin DN. Analysis of magnetic flux distribution of electric machines and two-dimensional modeling in COMSOL MULTIPHYSICS 6.2. *Transport Engineering*. 2025;6:9-14. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-9-14.

Введение

Электромагнитные устройства используются в широком спектре самоходной техники, транспортных машин, агрегатов и узлов и обладают электрическими и магнитными полями. Электромагниты создают как постоянные, так и переменные магнитные поля, поэтому подходы к их экранированию могут различаться. Для экранирования магнитного потока, создаваемого электромагнитами, выбор наиболее эффективного способа зависит от типа электромагнита (постоянного или переменного тока), частоты его работы, интенсивности магнитного поля и требований к экранированию. Одним из наиболее эффективных способов является комбинированное экранирование с использованием ферромагнитных и проводящих материалов. Это позволяет защитить окружающее пространство от магнитных полей различной частоты и интенсивности. В особых случаях, таких как импульсные поля или сверхнизкие температуры, могут потребоваться специализированные решения, например, сверхпроводящие экраны [1].

Если необходимо создать сегмент, который полностью отражает магнитный поток от электромагнита, то это задача повышенной сложности, так как магнитные поля, в отличие от электрических, не могут быть полностью отражены в классическом понимании. Однако можно максимально ослабить или перенаправить магнитный поток, используя комбинацию материалов и методов. Эффективным методом для создания такого сегмента является метод активного экранирования. Суть метода активного

экранирования заключается в том, чтобы сформировать компенсирующее магнитное поле с такой пространственно-временной характеристикой, суперпозиция которого с магнитным полем экранируемого источника в защищаемом пространстве позволила уменьшить магнитное поле до минимума, иными словами, получить достаточно близкую к нулю магнитную проницаемость. Метод реализуется с использованием системы активного экранирования, схема которой состоит из компенсирующих обмоток, с помощью которых формируется компенсирующее магнитное поле. Токи в обмотке автоматически формируются по определенному алгоритму как функция сигналов от датчиков, установленных в зоне экранирования. Для питания экрана используется внешний источник [2].

Метод активного экранирования строится на решении многокритериальной стохастической игры, где выигрыш представлен в виде вектора. Каждый компонент этого вектора соответствует значению магнитной индукции в определенной точке зоны экранирования. Для нахождения решения такой многокритериальной игры используется алгоритм оптимизации, основанный на методе мултироя частиц. Этот алгоритм выбирает оптимальное решение из множества Парето-оптимальных вариантов, учитывая при этом бинарные отношения предпочтения. Значения компонентов векторного выигрыша определяются путем решения уравнений Максвелла в квазистационарном приближении [3].

Второй способ заключается в создании комбинированных экранов, с использованием ферромагнитных и проводящих материалов. Это позволяет максимально ослабить магнитный поток и перенаправить его. Ферромагнитные материалы замыкают магнитные силовые линии внутри себя, уменьшая поле в защищаемой области. Проводящие материалы (например, медь, алюминий) создают вихревые токи, которые генерируют противоположное поле, компенсирующее внешнее [4].

Для анализа магнитного потока проще всего использовать специализированное программное обеспечение позволяющая при помощи мощностей персонального компьютера, анализировать входные данные: замкнутой среды, материалов, используемых в модели, а также электротехнические характеристики. *COMSOL Multiphysics* – это интегрированная среда для численного решения задач, использующая метод конечных элементов для моделирования различных физических процессов.

Для анализа лучше всего подойдет интерфейс программы под названием Магнитные поля (*Magnetic Fields*). Областью применения данного интерфейса является расчет магнитных полей вокруг и в проводящих средах с известными источниками тока или напряжения. Данный инструмент можно применять для расчета: индукторов, трансформаторов, электромоторов и других электрических машин. В нем можно задавать

материальные модели для постоянных магнитов и нелинейных магнитных материалов, а также условия симметрии и периодичности. А самое главное есть возможность моделировать тонкие слои электрически проводящих материалов и материалов с высокой и низкой электрической и магнитной проницаемостью [5].

В работах зарубежных ученых [6-10] приведены сведения описывающие решения, касающиеся подавления именно электрической составляющей. Обычные электропроводящие экраны защищают изделие от внешних помех посредством создания обратного поля, отражения электрической помехи или отвода наведенной на экран энергии на общий провод или, как мы говорим по старинке, на «землю». Обычно это влияет на передачу сигнала. Одной из причин подобного влияния являются возникающие при таком экранировании паразитные емкости и связи. В предпочтительном варианте магнитное поле должно концентрироваться и управляться только там, где это необходимо. Данный подход обеспечивает защиту окружающих устройств и повышает эффективность экранирования. Для этого рекомендуется использовать материалы с высоким значением относительной магнитной проницаемости и низким значением потерь на частоте передачи сигнала.

Цель настоящего исследования состоит в повышении эффективности экранирования электрических машин.

Материалы, модели, эксперименты и методы

В контексте данной работы, была разработана плоская модель электрической машины (рис. 1).

Внутренний ротор имеет 4 сердечника с обмоткой, а статор имеет 8. В статоре и ротора обмотка выполнена из медной проволоки, по обмоткам ток течет постоянный. Однако в статоре по обмоткам одного и того же сердечника ток течет разнонаправленно. К обмотке была подключена произвольная нагрузка в сосредоточенном схематическом формате через интерфейс Electrical Circuit. Таким образом имеем возможность ротора своими полюсами притягиваться к одному из полюсов сердечника. Статор и внешний ротор имеют как ферромагнитные

вставки, так и вставки, не пропускающие магнитный поток ($\mu = 0$). Конечно, в природе не существует материала способного полностью заблокировать магнитное поле, но в расчете для наглядности мы задали именно такое условие для этого параметра. В данном расчетном ПО есть возможность назначать материал из библиотеки к каждому конкретному геометрическому элементу. Для анализа использовался модуль *Rotating Machinery, Magnetic* (рис. 2) в котором доступны формулировки на основе векторного и скалярного магнитного потенциала, а также инструмент подвижной сетки (*Moving Mesh*).

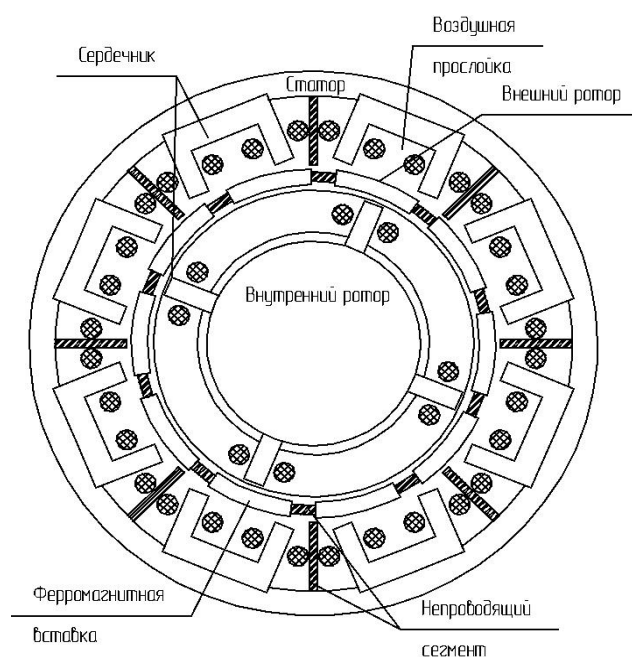


Рис. 1. Схема электрической машины
Fig. 1. Diagram of an electric machine

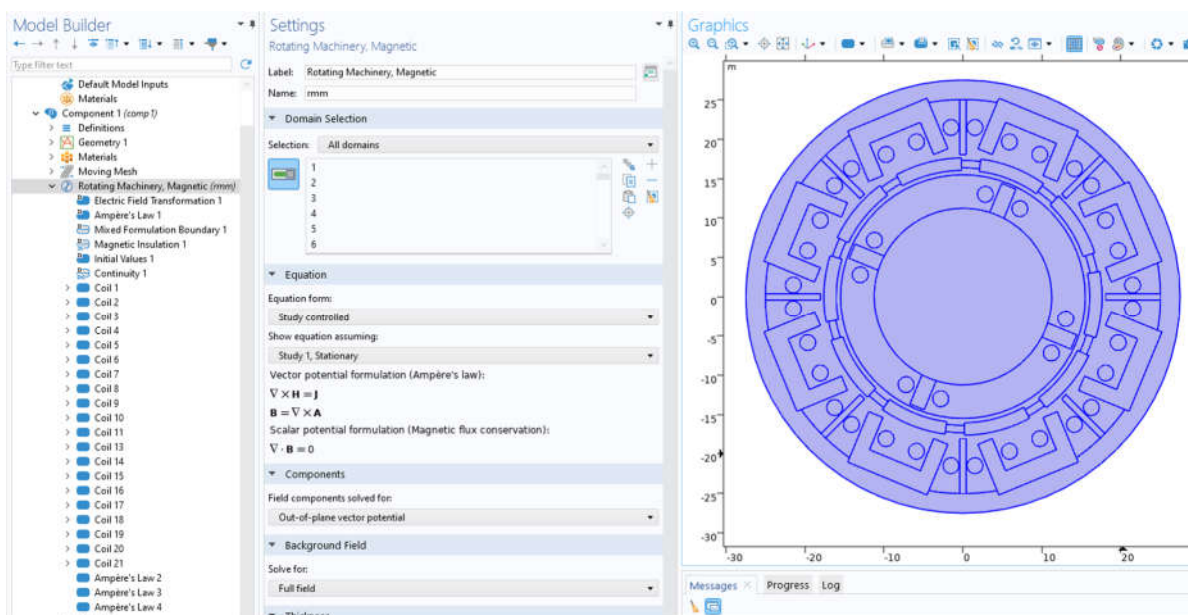


Рис. 2. Интерфейс модуля *Rotating Machinery, Magnetic*
Fig. 2. Interface of the module *Rotating Machinery, Magnetic*

Результаты

В данном интерфейсе происходит основная работа с моделью. В подмодуле *Ampere's Law* (Закон Ампера) происходит назначение основных параметров и выбор методов расчета для моделирования взаимодействия между катушками, обмотками, ферромагнитными вставками и непроводящими сегментами. Магнетизационная модель принята на основе расчета относительной проницаемости. *Mixed Formulation Boundary* (Смешанное граничное условие)

это условие для уравнения в частных производных, при котором требуется решить уравнение так, чтобы оно удовлетворяло различным граничным условиям на непересекающихся участках области, где указано условие. Данное условие распространяется на всю модель и позволяет программному комплексу учитывать множество физических факторов. *Continuity* (Граница) позволяет отделять ротор и статор в модели и создавать более точное

условие на границе между ними, если в этом есть потребность. Элемент *Coil* (обмотка) позволяет задать обмотку на сердечник, для расчета было принято: $I = 200\text{ A}$; количество витков $N = 500$; сечение проволоки 0.5 мм. Расчет производился в определенной временной области и с постоянной угловой скоростью. Результаты расчета можно увидеть на рис. 3.

На диаграмме, под цифрой 1, цветовым градиентом показывается плотность магнитного потока. Цифрой 2 обозначаются силовые магнитные линии и их направление. Цифра 3 обозначает сегменты в которых плотность близка нулю, так же через них не проходит и магнитный поток.

Обсуждение и заключение

На основании анализа распределения магнитного потока электрических машин и двухмерное моделирование в среде *COM-SOL Multiphysics 6.2* можно сделать вывод, что, применяя технологию экранирования можно добиться перенаправления магнитного потока, а также разрывать магнитные связи двух связанных, подвижных элементов без прекращения подачи тока на обмотку. Что в свою очередь упрощает электрическую схему машины или механизма и дает возможность создания новых способов применения технологии электромагнетизма в целом и экранирования в част-

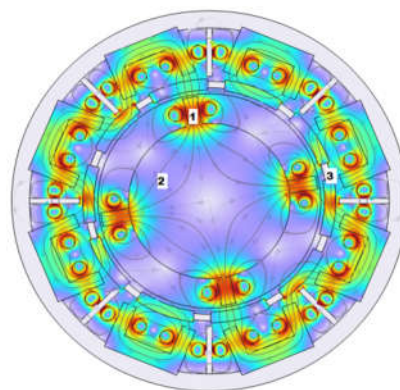


Рис. 3. Диаграмма, показывающая направление линий магнитного потока и напряженность магнитного поля

Fig. 3. Diagram showing the direction of the magnetic flux lines and the strength of the magnetic field

ности. Общая рекомендация при проектировании – уменьшение влияния магнитного потока электрических машин за счет экранирования.

Дальнейшее улучшение экранирования может быть достигнуто за счет разработки материальной модели для постоянных магнитов и нелинейных магнитных материалов, а также условия симметрии и периодичности, а также возможности моделировать тонкие слои электрически проводящих материалов и материалов с высокой и низкой электрической и магнитной проницаемостью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Джабин Ван, Каис Аталлах, Карвли С.Д. Магнитное устройство с непрерывной передачей // IEEE Transactions on magnetics. 2011. Т. 47, № 10. С. 2815-2818.
2. Цзянь Линни, Чау К.Т., Ю Гонг и др. Сравнение коаксиальных магнитных редукторов с разной топологией // IEEE Transactions on magnetics. 2009 г. Том 45, № 10 С. 4526-4529.
3. Фрэнк Николас У., Толият Хамид Анализ концентрической планетарной магнитной передачи с усиленным статором и внутренним ротором с постоянными магнитами // IEEE Transactions on industry applications. 2011 г. Том 47, № 4 С. 1652-1660.
4. Расмуссен Петер Оманд, Торбен Оле Андерсен, Франк Т. Йоргенсен, Орла Нильсен. Разработка высокоэффективной магнитной передачи // IEEE Transactions on industry applications. 2005 Том 41, № 3 С. 764-770.
5. Юн Лю, Ченгдэ Тонг, Цзинган Бай, Шуан Ю и др. Оптимизация синхронной машины с постоянными магнитами радиально-полюсной составной конструкции мощностью 80 кВт, используемой для электромобилей // IEEE Transactions on magnetics. 2011. Т. 47, № 10. С. 2399-2402.
6. Цзянь А., Чау Л.Н., Дун Чжан Цзян К.Т., Чжэн Ван Дж.З. Магнитный редуктор Бесщеточная машина с внешним ротором и постоянными магнитами для выработки энергии ветра // Конференция по промышленным применениям, 42-е ежегодное собрание IAS, Новый Орлеан, штат Луизиана, США, 23–27 сентября 2007 г.
7. Каис Аталлах, Ян Ренс, Смайл Мезани, Дэвид Хоу. Новая «псевдо» бесщеточная машина с постоянными магнитами с прямым приводом // IEEE Transactions on magnetics. 2008. Том 44, № 11. С. 4349-4352.
8. Шах Лаксман, Эндрю Круден, Барри У. Уильямс. Магнитная коробка передач с переменной скоростью, использующая противоположно вращающиеся входные валы // IEEE Transactions on magnetics. 2011. Т. 47, № 2. С. 431-438.

9. Хо С. Л., Нью Шуанся, Фу В. Н. Анализ переходных процессов в бесщёточной машине с постоянными магнитами, встроенной в магнитную коробку передач, с помощью метода конечных элементов с учётом движения магнитного поля // Transactions on magnetics. 2010 Том 46, № 6 С. 2074–2077.

10. К. Аталлах, С. Д., Калверли и Д. Хоу, «Проектирование, анализ и реализация высокопроизводительной магнитной передачи», IEE Proc. Electr. Power Appl., том 151, № 2, стр. 135–143, март 2004 г.

REFERENCES

1. Jabin W, Kais A, Karvli SD. Magnetic device with continuous transmission. IEEE Transactions on Magnetism. 2011;47(10): 2815-2818.
2. Linni J, Chau KT, Gong Yu. Comparison of coaxial magnetic gearboxes with different topologies. IEEE Transactions on Magnetism. 2009;45(10):4526-4529.
3. Frank Nicholas W, Toliyat H. Analysis of a concentric planetary magnetic transmission with a reinforced stator and an internal rotor with permanent magnets. IEEE Transactions on Industry Applications. 2011;47(4):1652-1660.
4. Rasmussen PO, Torben OA, Frank TJ, Orla N. Development of high-efficiency magnetic transfer. IEEE Transactions on Industry Applications. 2005;41(3):764-770.
5. Yun L, Chengdu T, Jinggang B, Shuang Yu. Optimization of a synchronous machine with stationary magnets of 80 kW radial-pole composite structure used for electric vehicles. IEEE Transactions on Magnetism. 2011;47(10):2399-2402.
6. Jian A, Chau LN, Dong Zhang Jiang KT, Zheng Wang JZ. Magnetic gearbox. Brushless machine with

- external rotor and permanent magnets for wind power generation. Conference on Industrial Applications, 42nd Annual Meeting of the IAS; 2007 Sep 23-27; New Orleans, Louisiana, USA.
7. Atallah K, Rens J, Mesani S, Howe D. A new "pseudo" brushless permanent magnet machine with direct drive. IEEE Transactions on Magnetism. 2008;44(11):4349-4352.
8. Laxman Sh, Cruden A, Barry WW. Magnetic gearbox with variable speed using oppositely rotating input shafts. IEEE Transactions on Magnetism. 2011;47(2):431-438.
9. Ho SL, Nu Shuangxia, Fu VN. Analysis of transients in a brushless permanent magnet machine embedded in a magnetic gearbox using the finite element method taking into account magnetic field motion. IEEE Transactions on Magnetism. 2010;46(6):2074-2077.
10. Atallah K, Calverley SD, Howe D Design, analysis and implementation of high-performance magnetic transmission. IEE Proc. Electr. Power Appl. 2004;151(2):135-143.

Информация об авторах:

Емельянов Рюрик Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, профессор Сибирского федерального университета, тел. 8923 305 2510.

Emelyanov Ryurik Timofeevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Siberian Federal University, phone: 8923 305 2510.

Данилов Александр Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент Сибирского федерального университета, тел. 8913 831 7148.

Желонин Дмитрий Николаевич – инженер Сибирского федерального университета, тел. 8913 575 2073.

Danilov Aleksandr Konstantinovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Siberian Federal University, phone: 8913 831 7148.

Zhelonin Dmitry Nikolaevich – Engineer of Siberian Federal University, phone: 8913 575 2073.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 26.05.2025. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 04.04.2025; approved after review on 05.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.