Андреева Е.Г.
Andreeva E.G.

*доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электрическая
техника» ФГБОУ ВО «Омский
государственный технический
университет»,
г. Омск
Российская Федерация*

Семина И.А.
Semina I.A.

*кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электрическая техника»
ФГБОУ ВО «Омский государственный
технический университет»,
г. Омск
Российская Федерация*

УДК 621.318.3:004.94

DOI:

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ГИБРИДНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

В работе исследовались разработанные и имитационно смоделированные трехмерные модели конструкций электротехнических устройств (ЭУ) с незамкнутыми гибридными магнитными системами. Они представляют совокупность магнитных систем открытого типа (концентратор) различного количества и конструктивного исполнения и магнитных систем разомкнутого типа (железоотделитель).

Эти устройства используются и могут быть использованы в электроэнергетике и теплоэнергетике для очистки угольных смесей и мазута; в сельском хозяйстве и сельхозпереработке – для очистки зерна, пшеничной муки, солода, костной муки; в сфере ЖКХ – для очистки воды; улучшения качества углеводородных топлив; в физических и медицинских приборах – для повышения магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля (устройства АЛМАГ, системы МРТ).

Цель исследования: разработка и имитационное 3D-моделирование магнитных полей статических ЭУ с незамкнутыми гибридными магнитными системами для улучшения технико-экономических и массогабаритных показателей (энергоэффективности). Методы исследования: численное решение уравнений магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ) и имитационное моделирование с помощью программных продуктов ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell и SolidWorks.

Результаты: проведенные исследования на трехмерных моделях гибридной магнитной системы определили хорошую эффективность от применения концентраторов. Такая система позволяет охватить больший объем очищаемого материала магнитным полем, а наличие концентраторов ножевидной формы позволяет усилить и локализовать магнитное поле гибридной магнитной системы в заданной области пространства.

Выводы: имитационное 3D-моделирование ЭУ с незамкнутым гибридным магнитопроводом показало, что за счет конструктивного исполнения и конфигурации магнитного поля улучшаются силовые характеристики магнитного поля, в том числе, пондеромоторные силы, технико-экономические и массогабаритные показатели этих ЭУ.

Ключевые слова: концентратор, железоотделитель, гибридная магнитная система, электротехническое устройство, силовые характеристики, математическая модель, магнитное

поле, магнитная индукция, численный метод, программный продукт.

3D-MODELING OF ELECTROTECHNICAL DEVICES WITH A HYBRID MAGNETIC SYSTEM

The paper investigates the developed and simulated three-dimensional models of designs of electrotechnical devices with unclosed hybrid magnetic systems. They represent a set of magnetic systems of open-type (concentrator) of different quantity and design and magnetic systems of open-loop (iron separator).

These devices are used and can be used in power and heat power engineering for cleaning of coal mixes and fuel oil; in agriculture and agricultural processing for cleaning of grain, wheat flour, malt, bone meal; in the sphere of housing and communal services for water purification; for improvement of quality of hydrocarbon fuels; in physical and medical devices for increase of magnetic induction and intensity of an external magnetic field (almag devices, MRI systems).

Purpose of the study: development and 3D-simulation of magnetic fields of static electrotechnical devices with unclosed hybrid magnetic systems to improve the technical, economic and weight and size indicators (energy efficiency). Research methods: numerical solution of magnetic field equations by finite element method (FEM) and simulation using software products ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell and SolidWorks.

Results: the studies conducted on three-dimensional models of the hybrid magnetic system determined the good efficiency of the concentrators. Such a system allows to cover a larger volume of the cleaned material with a magnetic field, and the presence of knife-shaped concentrators allows to strengthen and localize the magnetic field of the hybrid magnetic system in a given area of space.

Conclusion: 3D-simulation of a electrotechnical device with unclosed hybrid magnetic core has shown that due to the design and configuration of the magnetic field will improve the power characteristics of the magnetic field, including the ponderomotive force, economic and mass-dimensional characteristics of these electrotechnical devices.

Key words: concentrator, iron separator, hybrid magnet system, electrotechnical device, power characteristics, mathematical model, magnetic field, magnetic induction, numerical method, software program.

Новые, инновационные потребности людей и производства, их техническая и технологическая реализация требуют разработки и исследования энергоэффективных, экологических, качественных, простых и имеющих новые функциональные возможности технических устройств, в том числе и электротехнических. К таким устройствам можно отнести электротехнические устройства с незамкнутой магнитной системой (магнитопроводом) различного конструктивного исполнения и функционального назначения [1, 2]. ЭУ с незамкнутым магнитопроводом могут иметь подвижные части – это линейные индукционные машины [3, 4] и линейные асинхронные двигатели линейных транспортных средств [5]. У ЭУ с незамкну-

тым магнитопроводом также могут и отсутствовать движущиеся части, это статические ЭУ. Основной частью их являются электромагниты постоянного и переменного тока или же постоянные магниты [1].

Они могут быть также использованы в рудопроизводстве и на обогатительных фабриках, на предприятиях промышленности строительных материалов, коксохимических заводах – для защиты рабочих органов от поломок ферромагнитными предметами; на металлургических комбинатах в литейных цехах – для очистки формовочной смеси от ферромагнитных включений; в рудопроизводстве и металлургии – для сепарации на фракции твердых металлических проводящих частиц [6].

Гибридная магнитная система

В работе исследуются трехмерные имитационные модели электротехнических устройств с незамкнутой гибридной (комбинированной) магнитной системой (магнитопроводом), состоящей из П-образного железозотделителя и концентраторов с различными насадками переменного поперечного сечения. Рассматривается 3D-модель П-образного железозотделителя с одной, тремя и четырьмя концентрирующими насадками ножевидной формы. Гибридные магнитные системы усиливают магнитное поле в межполюсном зазоре, под полюсами и на уровне транспортера с очищаемой сухой смесью, а также меняют конфигурацию магнитного поля, что приводит к увеличению пондеромоторных сил, действующих на ферромагнитные частицы, извлекаемые из очищаемого веще-

ства. При этом охватывается больший объем очищаемого материала магнитным полем [7].

Исследование магнитного поля и его силовых характеристик ЭУ с гибридной магнитной системой на 3D-моделях различной конфигурации

При построении имитационных моделей гибридных магнитных систем (данные для расчета приведены в виде табл. 1) заданы основные допущения, граничные условия, определен тип задачи, построена геометрия модели гибридной магнитной системы (рис. 1), задана намагничивающая сила обмотки и определены свойства сред при моделировании. Поскольку конструкция железозотделителя существенно трехмерна, то рассматривается его 3D-модель в Декартовой системе координат.

Таблица 1. Параметры задачи

№ п/п	Наименование параметра задачи	Значение параметра
1	Задача	Гибридная магнитная система
2	Тип задачи	Задача магнитостатики
3	Геометрия модели	Рис. 1
4	Относительная магнитная проницаемость: – воздуха – обмотки	$\mu_{\text{с}} = 1$ $\mu_{\text{об}} = 1$
5	Намагничивающая сила обмотки, А	$I_w = 2600$

При моделировании магнитного поля приняты основные допущения:

– магнитные свойства модели (П-образный магнитопровод 1, концентратор 3, рис. 1) задаются кривой намагничивания стали 1045 (программно);

– относительная магнитная проницаемость воздуха и медной обмотки равна единице;

– плотность тока в сечении обмотки распределяется равномерно, ток обмотки постоянный;

– расчет магнитного поля гибридной магнитной системы рассматривается как задача магнитостатики;

– на границе расчетной области приняты нулевые граничные условия.

Трехмерные задачи исследования магнитного поля и его характеристик решались в программном продукте ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell [8, 9]. Исходные уравнения магнитостатического поля:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (3)$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{J}$ – вектор плотности тока, μ – относительная магнитная проницаемость материала, μ_0 – магнитная постоянная [4, 10].

Гибридная магнитная система с одним концентратором под полюсом железотделителя

На рисунке 1 представлена геометрическая модель для электромагнитных исследо-

ваний гибридной магнитной системы с одним концентратором под полюсом [1, 7].

Рисунок 1. Внешний вид и размеры гибридной системы в плоскости X0Y:
1 – магнитопровод, 2 – обмотка, 3 – концентратор ножевидной формы

Построение 3D-модели железотделителя с концентратором магнитного поля ножевидной формы в программе SolidWorks

Принцип построения состоит в том, что 3D-модель устройства создается из несколь-

ких частей в различных файлах и потом собирается в единую сборку. Для начала нужно нарисовать чертеж стального сердечника в 2D (рис. 2).

Рисунок 2. Чертеж стального сердечника в программном продукте SolidWorks

Далее создается файл с 3D-моделью стального сердечника П-образного железотделителя (рис. 3), а затем – файлы с медной обмот-

кой сердечника и концентратором в виде усеченного конуса с наконечником в виде ножа (рис. 4).

Рисунок 3. 3D-модель стального сердечника П-образного железотделителя

Рисунок 4. Составные части в отдельных файлах для гибридной магнитной системы: медная обмотка (а), концентратор в виде усеченного конуса (б), наконечник в виде ножа (в)

Создаем файл «сборка», открываем все файлы, из которых будет состоять будущая сборка. Переместим мышью в файл «сборка» стальной сердечник. Файл «сердечника» закроем. Аналогичным способом переместим обмотку меди два раза и сопряжем

катушки с магнитопроводом. Перенесем в сборку сначала насадки в виде усеченного конуса, а затем концентраторы в виде ножа, получаем 3D-модель П-образного железотделителя с гибридной магнитной системой (рис. 5).

Рисунок 5. 3D-модель П-образного железотделителя с гибридной магнитной системой, построенная в программном продукте SolidWorks

Расчет 3D-модели железотделителя с концентратором магнитного поля ножевидной формы в программе ANSOFT Maxwell/ ANSYS Maxwell

Создадим проект, который необходимо решить и исследовать, для чего находим вкладку project→Insert Maxwell 3D Design.

В рабочее пространство трехмерного моделирования импортируется построенная 3D-модель с помощью опции Modeler→Import, это файл, сохраненный в программе SolidWorks в формате *.SAT. Затем задаются материалы и их свойства для элементов модели: медь, сталь и воздух; ток в катушке, область решения задачи, граничные условия. Решение задачи проводится по команде «AnalyzeAll». После решения задачи на экран компьютера выводятся различные параметры,

например, картина магнитного поля или значения векторов индукции и напряженности магнитного поля.

Имитационное моделирование гибридной магнитной системы с одним концентратором ножевидной формы [7] позволило получить следующие результаты (рис. 6).

Рисунок 6. Картина магнитного поля (а) и график векторов индукции (б) магнитного поля гибридной магнитной системы в направлениях ОА (транспортёр с сухой смесью находится на расстоянии 60 мм от полюса) и ОБ (на расстоянии 100 мм)

Под полюсными наконечниками (концентраторами) гибридной магнитной системы формируется неоднородное магнитное поле, поэтому при длинах $L = 80$ мм и при $L = 365$ мм в направлении ОА магнитная индукция возрастает до значения 0,120 Тл (рис. 6, б), что обусловлено формой концентраторов.

Гибридная магнитная система с тремя концентраторами подполюсом железоотделителя [2]

На рисунке 7 показаны картина магнитного поля железоотделителя с тремя концентраторами ножевидной формы и графики магнитной индукции по соответствующим контурам (по линиям 0-2 и 0-3, ОА – расстояние до транспортера с сухой смесью 60 мм, ОВ – 80 мм ОС – 100 мм).

Рисунок 7. Трехмерная модель гибридной магнитной системы с тремя насадками ножевидной формы (а); картина магнитного поля (вид снизу вверх) (б); зависимость вектора магнитной индукции (В) от длины (L) ленты транспортера под П-образным железоотделителем с тремя концентраторами по контуру 0-2 (в) и контуру 0-3 (г)

Гибридная магнитная система с четырьмя концентраторами ножевидной формы на каждом полюсе железоотделителя

На рисунке 8 показаны картины магнитного поля железоотделителя с четырьмя концентраторами ножевидной формы и зависимости магнитной индукции по соответствующим контурам.

Рисунок 8. Трехмерная модель гибридной магнитной системы с четырьмя насадками ножевидной формы (а); картина магнитного поля (вид снизу вверх) (б); зависимость вектора магнитной индукции (B) от длины (L) ленты транспортера под П-образным железоотделителем с четырьмя концентраторами по контуру 0-2 (в) и контуру 0-1 (г)

Таблица 2. Результаты 3D-моделирования незамкнутой гибридной системы

Расстояние от середины полюса до транспортера	Базовая конструкция (без концентраторов)	П-образный железоотделитель с одним концентратором в виде ножа	П-образный железоотделитель с тремя концентраторами в виде ножа	П-образный железоотделитель с четырьмя концентраторами в виде ножа
Наибольшее значение магнитной индукции, Тл				
60 мм	0,024	0,12	0,46	0,16
100 мм	0,0155	0,018	0,025	0,0155

Результаты 3D-моделирования электро-технического устройства с гибридной магнитной системой базовой конструкции П-образного железоотделителя (без концентраторов) с одним, тремя и четырьмя концентраторами в виде ножа показали, что максимальные искажение магнитного поля и значение магнитной индукции (0,46 Тл) достигаются при трех ножевидных концентраторах (табл. 2).

Выводы

Приведенные в статье исследования с помощью программного продукта ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell трехмерных имитационных моделей незамкнутых гибридных

магнитных систем «железоотделитель – концентратор» позволяют рассматривать различные конструкции базового 10 железоотделителя, концентраторов, изменять их количество на полюсах, т.е. решать задачи инженерной оптимизации базовой конструкции железоотделителей и гибридных магнитных систем с целью улучшения их энергоэффективности и качества, т.е. силовых параметров и характеристик, изменять и увеличивать их функциональные и технологические возможности.

Таким образом, улучшать характеристики и свойства исследуемых незамкнутых гибридных магнитных систем можно тремя способами: конструктивными – изменять

габаритные размеры железоотделителя, конструкцию концентратора, использовать на полюсе не один концентратор, а несколько; электрическими – изменять параметры питающей сети и обмотки железоотделителя; программным – перейти на трехмерные модели, увеличить точность расчета (увеличить количество конечных элементов, область моделирования), в связи с этим улучшить программно-аппаратное обеспечение решения задачи.

Список литературы

1. Андреева Е.Г. Моделирование электротехнических устройств с незамкнутым магнитопроводом // Промышленная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 19–24.

2. Андреева Е.Г., Плеханова В.С. Исследование магнитного поля, его силовых характеристик, свойств материалов электротехнических устройств с незамкнутой магнитной системой // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 31–37.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

4. Андреева Е.Г., Ковалев В.З. Математическое моделирование электротехнических комплексов: монография; под общ. ред. Ю.З. Ковалева. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. – 172 с.

5. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей; Пер. с англ. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.

6. Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

7. Andreeva Y.G., Semina I.A., Orlov A.S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85013644442&partnerID=MN8TOARS>

8. ANSOFT Maxwell [Электронный ресурс] / URL: <http://www.ansoft-maxwell.narod.ru/maxwell/MagnetostaticFieldCalculation.htm>

9. Руководство ANSOFT Maxwell 3D [Электронный ресурс]. – URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf

10. Тамм И.Е. Основы теории электричества: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

Имитационное моделирование электромагнитных процессов с помощью программного продукта ANSOFT Maxwell/ANSYS Maxwell показало, что наиболее энергоэффективной конструкцией является гибридная магнитная система с тремя концентраторами ножевидной формы на полюсе, поскольку дает максимальное изменение конфигурации магнитного поля и увеличивает концентрацию магнитного поля под полюсами до 0,46 Тл.

References

1. Andreeva E.G. Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv s nezamknutym magnitoprovodom // Promyshlennaja energetika. – 2017. – № 3. – P. 19-24.

2. Andreeva E.G., Plehanova V.S. Issledovanie magnitnogo polja, ego silovykh harakteristik, svoystv materialov elektrotehnicheskikh ustroystv s nezamknutoj magnitnoj sistemoj // Omskij nauchnyj vestnik. – 2018. – № 4 (160). – P. 31-37.

3. Vol'dek A.I. Indukcionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom. – L.: Jenergiya, 1970. – 272 p.

4. Andreeva E.G., Kovalev V.Z. Matematicheskoe modelirovanie elektrotehnicheskikh kompleksov: monografija; pod obshh. red. Ju.Z. Kovaleva. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 1999. – 172 p.

5. Jamamura S. Teorija linejnyh asinhronnyh dvigatelej / Per. s angl. – L.: Energoatomizdat, 1983. – 180 p.

6. Sumcov V.F. Elektromagnitnye zhelezootdeliteli. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 174 p.

7. Andreeva Y.G., Semina I.A., Orlov A.S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85013644442&partnerID=MN8TOARS>

8. ANSOFT Maxwell [Elektronnyj resurs] / URL: <http://www.ansoft-maxwell.narod.ru/maxwell/MagnetostaticFieldCalculation.htm>

9. Rukovodstvo ANSOFT Maxwell 3D [Elektronnyj resurs]. – URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf

10. Tamm I.E. Osnovy teorii elektrichestva: ucheb. posobie dlja vuzov. – M.: Nauka, 1989. – 504 p.