

*д.т.н. Заблодский Н.Н.,  
Филатов М.А., Грицюк В.Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЗИНТЕГРАТОРА**

*Розроблено скінченно-елементну модель ЕМД багатofакторної дії. Отримані за допомогою математичної та фізичної моделей дані про розподіл магнітного поля в ЕМД показують, що величина магнітної індукції в повітряному проміжку досягає значень, рекомендованих для апаратів з вихровим шаром.*

**Ключові слова:** *електромеханічний дезінтегратор, індуктор, скінченно-елементна модель, електромагнітне поле.*

*Разработана конечно-элементная модель ЭМД многофакторного действия. Полученные с помощью математической и физической моделей данные о распределении магнитного поля в ЭМД показывают, что величина магнитной индукции в воздушном зазоре достигает значений, рекомендуемых для аппаратов с вихревым слоем.*

**Ключевые слова:** *электромеchanический дезинтегратор, индуктор, конечно-элементная модель, электромагнитное поле.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

На сегодняшний день процессы дробления и измельчения твердых материалов в целях обогащения, выделения полезного компонента, повышения реологической активности, увеличения контактной поверхности и интенсификации ряда физико-химических процессов являются наиболее распространенными технологическими операциями промышленного производства различных материалов. Важность процессов технологического измельчения подчеркивает и тот факт, что именно на измельчение материалов различного происхождения в наше время расходуется более 20 % всей вырабатываемой на планете электроэнергии.

Одним из способов, позволяющих осуществлять различные технологические процессы тонкого и сверхтонкого измельчения, гомогенного перемешивания жидких и твердых порошковых веществ (приготовления эмульсий, суспензий и т.п.), ускорения некоторых химических реакций, является применение принципиально нового класса электромеchanических преобразователей энергии – электромеchanиче-

ских дезинтеграторов (ЭМД) многофакторного действия [1, 2, 3].

Основой для проектирования и исследования процессов в новых электромеchanических устройствах является математическое моделирование электромагнитных полей. Полученные с помощью математической модели данные о распределении электромагнитного поля позволяют на предварительном этапе определить геометрические размеры активной части преобразователя и приближенно оценить его рабочие свойства и характеристики. Одним из наиболее эффективных численных методов решения полевых задач является метод конечных элементов. Достоинством этого метода является сравнительная простота и точность описания достаточно сложных конфигураций границ раздела сред, возможность учета нелинейности свойств материалов и т.п.

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является создание конечно-элементной модели ЭМД и анализ распределения магнитного поля в его активной части.

**Изложение материала и его результаты.** В общем виде нелинейное дифферен-

циальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала  $\vec{A}$  можно представить как

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \gamma(\vec{v} \times \operatorname{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$  – абсолютная магнитная проницаемость;

$\gamma$  – удельная электрическая проводимость;

$\vec{v}$  – вектор скорости движения электропроводящей среды относительно источника магнитного поля;

$\vec{J}_{\text{стор}}$  – плотность сторонних токов.

Для непроводящих областей справедливо уравнение Пуассона

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}\right) = -\vec{J}_{\text{стор}}. \quad (2)$$

Источники поля в правой части уравнения (1) задаются сторонней плотностью тока на участках пазов индукторов согласно трехфазной схеме соединения обмоток. Для предварительного расчета токовой нагрузки использовались экспериментальные данные фазных токов ЭМД. Комплексные значения плотности тока в фазах обмотки индуктора:

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

где  $I_m$  – амплитуда тока в фазе индуктора;

$u_n$  – число эффективных проводников в пазу;

$S_n$  – площадь сечения паза.

Расчет квазистационарного магнитного поля ЭМД был проведен методом конечных элементов с использованием про-

граммно-вычислительного комплекса Comsol Multiphysics 3.5a.

На рисунке 1 показана расчетная геометрическая модель, построенная с учетом реальных линейных размеров активной зоны экспериментального образца ЭМД. Основные свойства материалов, задаваемые как исходные данные для каждого расчетного участка, приведены в таблице 1. На внешних границах расчетной области задается нулевое значение векторного магнитного потенциала (условие Дирихле)  $\vec{A} = 0$ . На границе раздела сред с различными магнитными свойствами используется условие равенства нормальных к границе составляющих вектора магнитной индукции и касательных составляющих вектора напряженности магнитного поля (условие Неймана):  $\vec{B}_{n1} = \vec{B}_{n2}$ ,  $\vec{H}_{\tau1} = \vec{H}_{\tau2}$ .

Результат расчета в виде картины распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД представлен на рисунке 2.

Одним из основных параметров аппаратов с вихревым слоем является величина магнитной индукции в центральной части расточки индуктора при холостом ходе, т. е. при условии отсутствия ферромагнитных частиц [4]. Величиной индукции определяются скорость перемешивания и диспергирования фаз, а также скорость химической реакции в зоне вихревого слоя. Опыт осуществления технологических процессов с использованием таких устройств позволил определить целесообразный интервал индукции – 0,1...0,2 Тл.

На рисунке 3 показано распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль длины ЭМД (посередине воздушного зазора). Расчеты показывают, что магнитное поле ЭМД имеет выраженный зубчатый характер, а значение магнитной индукции посередине зазора достигает 0,084 Тл, т.е. является достаточным для приведения в движение ферромагнитных рабочих тел [4].

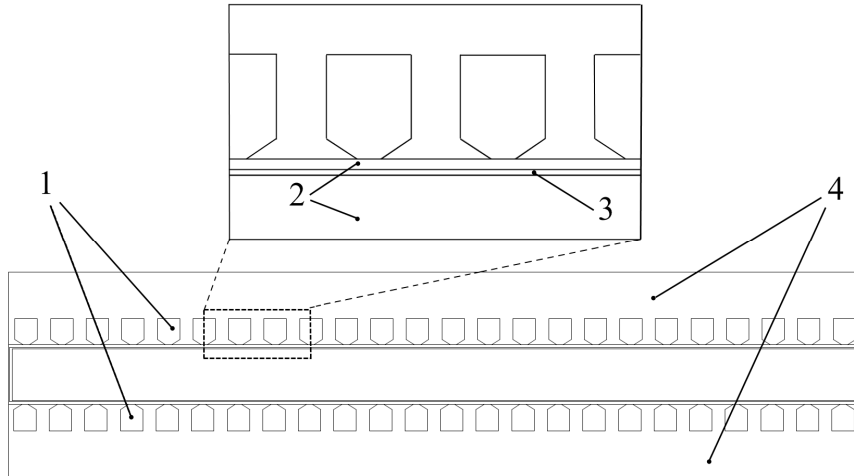


Рисунок 1 – Расчетная геометрическая модель ЭМД

Таблица 1 – Свойства материалов расчетных областей

Название расчетного участка	Относительная магнитная проницаемость, $\mu_r$	Удельная электрическая проводимость, $\gamma$ , См/м
1. Обмотка индуктора	1	$5,8 \cdot 10^7$
2. Воздушная область	1	0
3. Рабочая камера	1	$1,12 \cdot 10^7$
4. Магнитопровод индуктора	Кривая намагничивания Ст. 2211	0

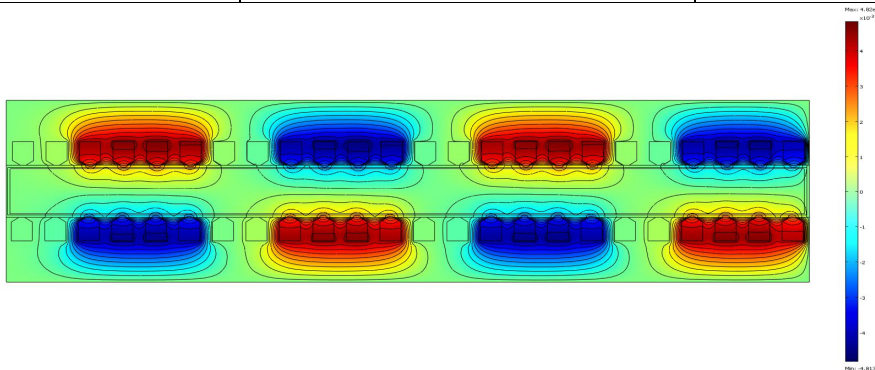


Рисунок 2 – Распределение векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД

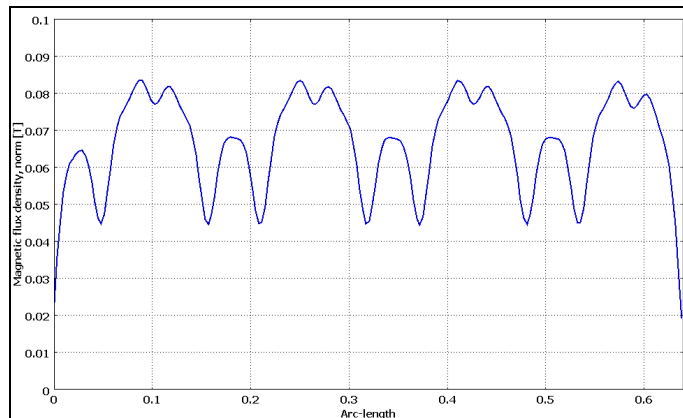


Рисунок 3 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль длины ЭМД (посередине воздушного зазора)

График распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль длины ЭМД, на расстоянии 2 мм от поверхности одного из индукторов, представлен на рисунке 4. Величина индукции вблизи зубцов магнитопровода ЭМД достигает 0,18 Тл.

На рисунке 5 показан график распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль линии, проходящей через ярмо магнитопровода верхнего индуктора, середину зубца, воздушный зазор, и соответственно, середину зубца и ярмо магнитопровода нижнего индуктора.

На рисунке 6а показан общий вид экспериментального образца ЭМД, изготовленного в Донбасском государственном техническом университете. ЭМД состоит из верхнего 1 и нижнего 2 плоских индукторов с трехфазными обмотками 3 и 4, которые образуют бегущие магнитные поля с противоположным порядком чередования фаз, и рабочей камеры 5 с ферромагнитными рабочими телами, которая расположена в межиндукторном зазоре (рисунок 6б). Технические данные экспериментального образца ЭМД приведены в таблице 2.

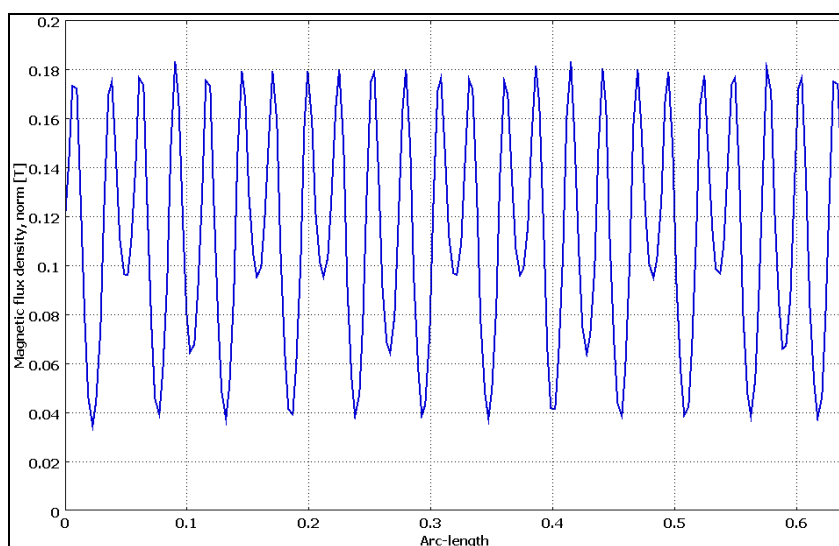


Рисунок 4 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль длины ЭМД (вблизи индуктора)

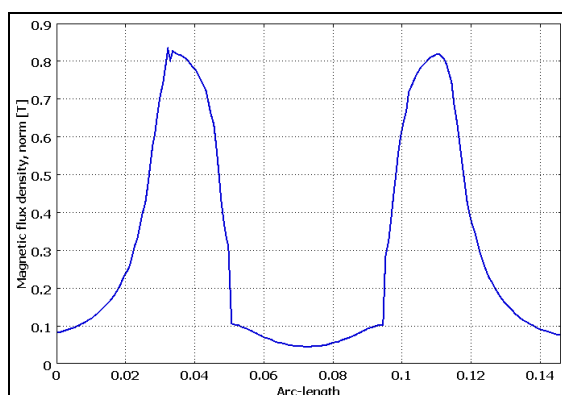


Рисунок 5 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в ЭМД

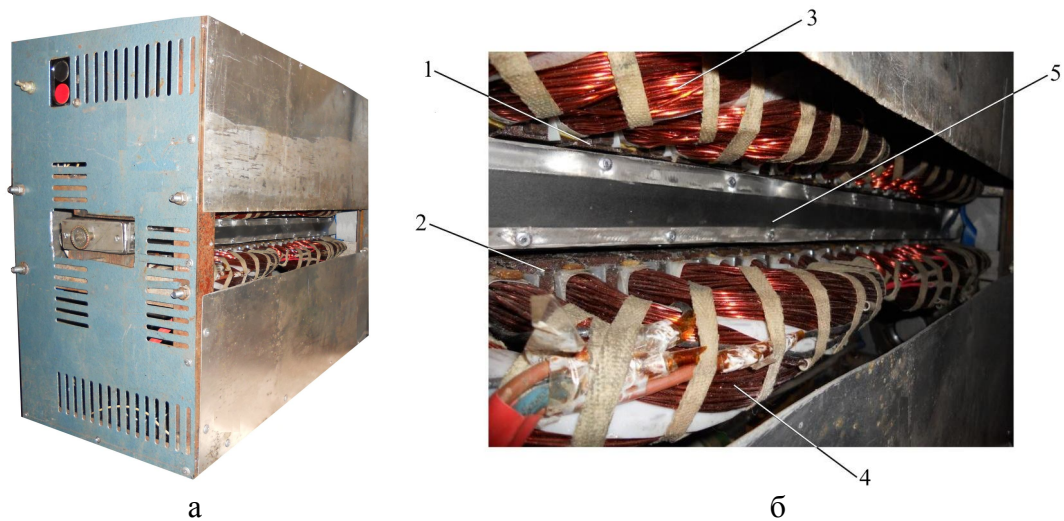


Рисунок 6 – Экспериментальный образец ЭМД  
1, 2 – индукторы бегущего поля; 3, 4 – трехфазные обмотки;  
5 – рабочая камера.

Таблица 2 – Технические данные ЭМД

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Источник питания	Электросеть переменного тока
2	Напряжение питания, В	380
3	Частота, Гц	50
4	Число фаз	3
5	Активная мощность, кВт	4
6	Потребляемый ток, А	26,5
7	Коэффициент мощности, о.е.	0,23
8	Объем активной зоны электромагнитного воздействия, дм <sup>3</sup>	2,82
9	Объем рабочей камеры, дм <sup>3</sup>	2,68
10	Режим работы	Кратковременный
11	Максимальное время одного включения с последующей паузой для остывания, мин	7
12	Охлаждение	Принудительное воздушное

Экспериментальные исследования показали, что расхождение значения магнитной индукции, полученного при численном расчете, и измеренного значения в изготовленном ЭМД не превышает 10 %.

#### Выводы и направление дальнейших исследований.

Разработана конечно-элементная модель ЭМД многофакторного действия. Полученные с помощью математической и физической моделей данные о распределе-

нии магнитного поля в активной части ЭМД показывают, что величина магнитной индукции в воздушном зазоре достигает значений, рекомендуемых для аппаратов с вихревым слоем. Результаты численного расчета электромагнитного поля ЭМД могут быть использованы при выборе геометрических размеров активной части с целью получения заданных рабочих свойств и характеристик.

### **Библиографический список**

1. Шинкаренко В.Ф. Еволюційний синтез нових видів електромеханічних перетворювачів енергії технологічного призначення з використанням моделей макроеволюції / В.Ф. Шинкаренко, С.А. Безсонов // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ», 2001. – № 16. – С. 171–173.
2. Пат. 43635 Україна, МПК В01F 13/00. Електромеханічний дезінтегратор / Шинкаренко В.Ф., Августинович А.А., Лисак В.В., Вахновецька М.О.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «ХПИ». – № u200902781, заявл. 25.03.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
3. Филатов М.А. Оценка возможности использования электромеханического дезинтегратора в технологии приготовления водоугольного топлива / М.А. Филатов, В.Ю. Грицюк, В.В. Лысак // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 325–329.
4. Логвиненко Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков. – Техніка, 1976. – 144 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Лушиком В.Д.**