

## Numerical-Field Calculation of the Angle Torque Characteristic of the Three-Phase Inductor of the Magnetic Field of the Electromagnetic Stirrer in Processing Dissimilar Mixtures

**Milykh V.I., Shilkova L.V.**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»  
Kharkov, Ukraine

**Abstract.** The evaluation of the possibility of using electromagnetic stirrers for dissimilar mixtures in various technological processes requires the study of their work under load conditions. The load mode of the agitator is ensured by the needle ferromagnetic elements moving inside a cylindrical working chamber under the influence of a rotating magnetic field, whose effectiveness can be predicted by analyzing the magnitude and nature of changes at the electromagnetic moment. The magnetic field ensures ordering of the ferromagnetic elements, therefore the magnetic permeability in it along the longitudinal and transverse axes becomes different. Due to the anisotropy of the magnetic properties of the composite medium in the working chamber, strong influences arise on this medium, based on the magnetic tension forces acting on the ferromagnetic elements. The purpose of this work was to present the method of calculation of the electromagnetic moment and determination of its dependence on the angular displacement of the rotating magnetic field of the inductor. The distribution of the magnetic induction inside the working chamber in the idle and load modes was compared, it gave an idea of the distribution of the magnetic field lines in those modes, set out the basic principles for calculation of the angular characteristics of the torque of the electromagnetic stirrer. The proposed method was based on the multi-position numerical calculations of the magnetic fields in the FEMM software package. Comparative calculations of the angular characteristics of the torque were performed at different magnetic permeabilities of the composite medium in the working chamber.

**Keywords:** electromagnetic stirrer, inductor, magnetic field, numerical-field calculations, electromagnetic moment, angular characteristic, magnetic permeability, anisotropy.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3239174

### Calculul numeric-experimental al caracteristicilor unghiulare de moment pentru inductorul electromagnetic trifazat al agitatorului electromagnetic pentru prelucrarea amestecurilor diferite

**Mylykh V.I., Shilkova L.V.**

Universitatea Tehnică Națională "Institutul Politehnic Kharkhov"  
Kharkhov, Ucraina

**Rezumat.** Evaluarea posibilității de a utiliza agitatoare electromagnetice de amestecuri eterogene în diferite procese tehnologice necesită studierea funcționării lor sub sarcină. Regimul de funcționare a agitatoarelor este asigurat de elemente feromagnetice de tip ac, care se deplasează într-o cameră de lucru cilindrică sub influența unui câmp magnetic rotativ. Acest câmp este excitat de un inductor trifazat, a cărui eficiență poate fi prezisă prin analizarea amplitudinii și a naturii schimbărilor în momentul electromagnetic, sub influența căruia amestecurile sunt amestecate în interiorul camerei de lucru. Câmpul magnetic asigură comandarea elementelor feromagnetice în camera de lucru a inductorului, prin urmare permeabilitatea magnetică în el de-a lungul axelor longitudinale și transversale devine diferită. Datorită anizotropiei proprietăților magnetice ale mediului compozit, efectele forței asupra acestui mediu apar în camera de lucru și se bazează pe forțele magnetice de tensiune care acționează asupra elementelor feromagnetice. Scopul acestei lucrări este prezentarea metodei de calcul al momentului electromagnetic și determinarea dependenței de deplasarea unghiulară a câmpului magnetic rotativ al inductorului. Soluția problemei analizei funcționării unui inductor în regimul de încărcare se realizează prin calcule numerice ale câmpurilor magnetice. Se face o comparație a distribuției inducției magnetice în interiorul camerei de lucru la mers în gol și sub sarcină, sunt prezentate modelele de distribuție a liniilor câmpului magnetic în aceste regimuri, sunt evidențiate principiile de calcul al momentului unghiular caracteristic unui inductor de câmp magnetic trifazat.

**Cuvinte-cheie:** agitator electromagnetic, inductor, câmp magnetic, calcule experimental-numerice, moment electromagnetic, caracteristică unghiulară, permeabilitate magnetică, anizotropie.

**Численно-полевой расчет моментной угловой характеристики трехфазного индуктора магнитного поля электромагнитного перемешивателя для обработки разнородных смесей**  
**Милых В.И., Шилкова Л.В.**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
 Харьков, Украина

**Аннотация.** Оценка возможности применения электромагнитных перемешивателей разнородных смесей в различных технологических процессах требует исследования их работы под нагрузкой. Рабочий режим перемешивателей обеспечивается ферромагнитными элементами игольчатого типа, движущимися внутри цилиндрической рабочей камеры под воздействием вращающегося магнитного поля. Это поле возбуждается трехфазным индуктором, эффективность работы которого может прогнозироваться путем анализа величины и характера изменения электромагнитного момента, под воздействием которого происходит перемешивание смесей внутри рабочей камеры. Магнитное поле обеспечивает упорядоченность ферромагнитных элементов в рабочей камере индуктора, поэтому магнитная проницаемость в ней по продольной и поперечной осям становится разной. Благодаря анизотропии магнитных свойств композитной среды в рабочей камере возникают силовые воздействия на эту среду, и они основываются на силах магнитного натяжения, действующих на ферромагнитные элементы. Целью данной работы является представление методики расчета электромагнитного момента и определение его зависимости от углового смещения вращающегося магнитного поля индуктора. Решение задачи анализа работы индуктора в режиме нагрузки достигается численными расчетами магнитных полей. Проводится сравнение распределения магнитной индукции внутри рабочей камеры в режиме холостого хода и под нагрузкой, представлены картины распределения силовых линий магнитного поля в этих режимах, изложены принципы расчета моментной угловой характеристики трехфазного индуктора магнитного поля. Предложенная методика базируется на многопозиционных численных расчетах магнитных полей в программном пакете FEMM методом конечных элементов. Построение физико-геометрических расчетных моделей индуктора, расчеты магнитных полей и получение угловой моментной характеристики автоматизированы с использованием созданного скрипта Lua, встроенного в программу FEMM. Сравнительные расчеты моментных угловых характеристик сделаны при различных магнитных проницаемостях композитной среды в рабочей камере по взаимноперпендикулярным осям. Варьирование магнитных свойств среды позволяет оценить возможность использования электромагнитного перемешивателя для разных технологических операций.

**Ключевые слова:** электромагнитный перемешиватель, индуктор, магнитное поле, численно-полевые расчеты, электромагнитный момент, угловая характеристика, магнитная проницаемость, анизотропия.

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитная сепарация во все времена развития технического прогресса находит широкое применение, как важный этап технологической обработки различных материалов. Устройства, которые обеспечивают такие процессы, имеют множество конструкций. Магнитные сепараторы (МС) можно разделить в зависимости от источника магнитного поля (МП) на два класса: на основе постоянных магнитов и на основе электромагнитов.

Первые применяются с целью обогащения руд магнитных и слабомагнитных материалов, очистки немагнитных материалов от нежелательных магнитных примесей, а также для извлечения ферромагнитных предметов с целью их дальнейшей переработки, транспортировки и использования [1].

Второе применение связано с эффектом вихревого слоя, который возникает в рабочей зоне в результате создания МП электромагнитами.

Широкие возможности в области технологии перемешивания мелких объектов с различными электромагнитными свойствами, с

точки зрения существенного повышения интенсивности и производительности технологических процессов, открываются с использованием электромагнитных перемешивателей (ЭМП) на базе трехфазных асинхронных двигателей (ТАД).

Так, при производстве резины применения ЭМП позволяют уменьшить продолжительность измельчения и смешивания наполнителей, увеличить прочность вулканизаторов на основе каучуков.

Для интенсификации химических процессов применение ЭМП позволяет ускорить окислительно-восстановительные процессы и процессы полимеризации.

Для порошковой металлургии характерным примером служит интенсификация процессов смешивания и диспергирования тугоплавких соединений в качестве сырья для порошкообразных материалов.

В электронной промышленности одной из перспективных отраслей использования ЭМП является производство токопроводящих композиций для переменных непроволочных резисторов. Это позволяет обеспечить необхо-

димое качество помола и смешивания компонентов для резисторов.

В горной химии – доизмельчение до нескольких сотен микрон руды и концентратов, позволяет раскрыть тонковкрапления руды. А также ускорение процессов растворения, выщелачивания и увеличения процента извлечения из руды полезного продукта.

В производстве алмазных и абразивных инструментов применение ЭМП позволяет обеспечить равномерность смешивания компонентов в смеси.

В процессах очистки сточных вод они позволяют произвести очистку от примесей тяжелых металлов.

Также ЭМП находят широкое применение в производстве стройматериалов – для качественного смешивания материалов при производстве керамзита, ячеистых бетонов, силикатного кирпича, при подготовке керамической массы, для размолва красителей и пигментов. Свойства вихревого слоя ферромагнитных частиц могут находить широкое применение и в других отраслях промышленности, как с принудительным введением в рабочую зону дополнительных ферромагнитных частиц для немагнитного сырья, так и без них для ферромагнитного сырья.

Для распространения ЭМП в различные технологические процессы актуальной становится оценка величины электромагнитного момента (ЭММ), под воздействием которого происходит перемешивание разнородных смесей внутри рабочей зоны ЭМП.

Этот вопрос остается неосвещенным и является новизной представляемой работы, несмотря на то, что современные ученые активно изучают и совершенствуют систему проектирования МС, что решаются за счет применения численных методов проектирования, применения новых материалов и конфигураций магнитов или электромагнитов и магнитопроводов.

К таким разработкам относятся:

- работа [1] представляет аналитический метод расчета плоскомеридианного МП МС с осевым расположением полюсов. Используя метод конформного отображения, дано аналитическое выражение для МП во внутренней области МС;

- в работе [2], представлен метод расчета установки возбуждающего тока для процесса высокоинтенсивной сепарации гематитовой руды;

- в работах [3–7] исследуется МС с постоянными магнитами разной формы, предназначенными для разделения ферромагнитных включений в органических продуктах. Представлена математическая модель, основанная на методе конечных элементов и результаты экспериментального исследования;

- работа [8] посвящена проблемам исследования линейных индукционных машин для электродинамического разделения объектов в движущемся МП;

- работа [9] посвящена изучению МП в специальных электромагнитах постоянного тока МС, используемых для извлечения ферромагнитных объектов из разных смесей;

- в работе [10] показаны результаты численных расчетов МП гибридной магнитной системы, состоящей из П-образного электромагнитного сепаратора железа и концентраторов ножеобразных форм, выполненных с использованием метода конечных элементов в программе ANSYS Maxwell;

- в работе [11] целью является изучение имитационных моделей двух электрических устройств с открытой магнитной системой (концентратор) и гибридной магнитной системой (сепаратор железа и концентратор);

- в работе [12] описан способ идентификации и разделения отходов черных и цветных металлов, а также их сплавов;

- в одной из глав работы [13] рассматриваются наиболее распространенные типы МС;

- в работе [14] представлен усовершенствованный механизм МС твердых жидкостей, который отделяет твердую компоненту от жидкой смеси с помощью центробежной силы и разницы удельного веса;

- в работе [15] анализируется крутящий момент и потери в металлической оболочке, которую используют МС удерживающие постоянные магниты;

- в работе [16] описан МС, состоящий из нескольких модульных магнитных роликов, магнитная система которых имеет верный и кольцевой магнит;

- в работе [17] представлена методика численного моделирования динамики магнитных частиц МС;

- также большой интерес у ученых вызывает изучение высокоградиентных МС. Так работы [18-19] посвящены усовершенствованию их конструкций с помощью численного моделирования распределения МП.

Таким образом, можно сделать выводы, что ЭМП имеют широкие возможности при-

менения в различных отраслях промышленности, но до сих пор не являются достаточно изученными, а совершенствование разнообразных конструкций МС современные ученые достигают путем численного моделирования их МП.

Аналогами по принципу действия исследуемого здесь ЭМП являются аппараты вихревого слоя АВС-100 и АВС-150 [20]. Конструктивно они выполняются с сосредоточенными обмотками индуктора в отличие от ЭМП, который сконструирован на базе ТАД, а, значит, имеет распределенную обмотку. Следует отметить, что эти аппараты вихревого слоя имеют уровень магнитной индукции (МИ) в рабочей камере  $B=0,15$  Тл.

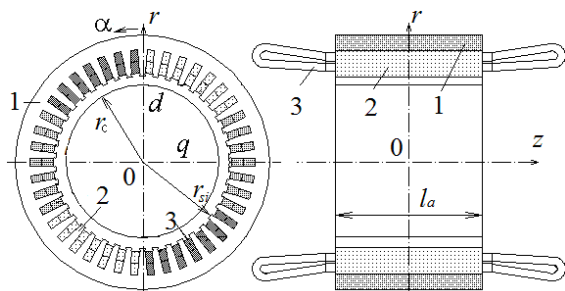
**ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Индуктор ЭМП, представляемый авторами данной работы, сконструирован на базе статора ТАД и рассчитан на обеспечение в режиме холостого хода (ХХ) внутри рабочей камеры равномерного МП с МИ  $B=0,24$  Тл.

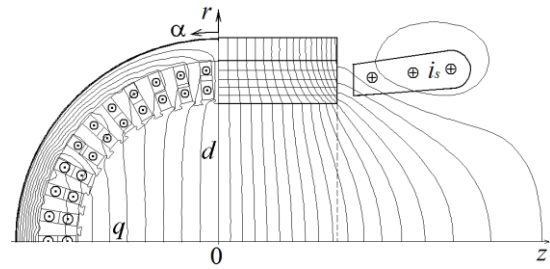
Этот индуктор был подробно представлен в [21], и его конструкция изображена здесь на рис. 1. Рабочая зона ЭМП находится во внутреннем пространстве индуктора, где в ТАД располагался ротор. Проектирование индуктора выполнено по методикам из [22, 23] – аналогично проектированию статора ТАД.

Режим ХХ подразумевает отсутствие в рабочей зоне ферромагнитных элементов, поэтому анизотропии магнитных свойств нет, и относительная магнитная проницаемость здесь по всем направлениям составляет  $\mu_r=1$ .

Ввиду того, что пространство внутри рабочей камеры индуктора при ХХ немагнитное, необходимо было исследовать трехмерное распределение МП. На рис. 2 силовыми линиями представлена структура такого МП, полученная в [21] численно-полевыми взаимосвязанными расчетами МП в поперечном и продольном сечениях индуктора (на рисунке даны симметричные четверти этих сечений).



1 - спинка сердечника,  
2 - зубцово-пазовая зона,  
3 - трехфазная обмотка  
**Рис. 1. Конструктивная схема индуктора ЭМП.<sup>1</sup>**



**Рис. 2. Продольно-поперечная электромагнитная модель МП индуктора ЭМП.<sup>2</sup>**

Как видно по картине МП, в аксиальном направлении – по оси  $z$  вблизи координатной оси  $r$  оно существенно не изменяется. Поэтому для анализа электромагнитных процессов в рабочей зоне можно ограничиться расчетами МП в центральном поперечном сечении, проходящем по оси  $0r$  (рис. 1 и 2). Это сечение на рис. 2 расположено слева.

Следующий – более важный этап в изучении ЭМП – исследование его работы в режиме нагрузки.

Для обеспечения какого-либо технологического процесса в рабочей камере будут находиться равномерно распределенные ферромагнитные элементы, например, в виде иголок или просто коротких отрезков железной проволоки. При неподвижном МП они будут ориентироваться по его силовым линиям и, значит, на рис. 2 – параллельно оси  $0r$ . Это приведет к различию магнитных свойств внутри рабочей камеры по разным направлениям, и будет выражаться магнитной анизотропией с разными составляющими относительной магнитной проницаемости  $\mu_{rd}$  и  $\mu_{rq}$  по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям, обозначенным на рис. 1 и 2. Причем значения этих составляющих будут зависеть от конфигурации и числа ферромагнитных элементов.

Интенсивность и качество технологической обработки разнородных смесей зависят от электромагнитного момента (ЭММ)  $M_{em}$ , действующего на ферромагнитные элементы. По сути, в ЭМП этот момент является реактивным и сам принцип действия ЭМП оказывается подобным принципу действия синхронного реактивного двигателя [24]. Поэтому в рабочем режиме между ориентацией намагничивающихся ферромагнитных элементов и направлением силовых линий МП

<sup>1,2</sup> Appendix 1

должен быть некоторый угол, который можно считать углом нагрузки  $\Theta$ .

В соответствии с отмеченными условиями, целью данной работы является представление методики расчета ЭМП и определение его зависимости от углового смещения вращающегося кругового МП индуктора ЭМП относительно оси, по которой сориентированы (расположены) ферромагнитные элементы. Фактически задача состоит в получении моментной угловой характеристики индуктора МП  $M_{em}(\Theta)$ . Данная задача может быть решена с применением численно-полевых расчетов.

Для возможности объективной оценки проводимых исследований приведем **основные параметры** электромагнитной системы ЭМП, конструкция которого представлена на рис. 1. Его главные размеры составляют: активная длина  $l_a=300$  мм, радиус расточки сердечника индуктора  $r_{si}=175$  мм, радиус рабочей камеры  $r_c=170$  мм. Определены также номинальные расчетные фазные напряжение  $U_{sN}=220$  В и ток  $I_{sN}=950$  А, частота  $f_s=50$  Гц. В обмотке индуктора числа фаз  $m_s=3$  и пар полюсов  $p=1$ , числа пазов  $Q_s=42$  и последовательных витков фазной обмотки  $N_s=28$ , число параллельных ветвей  $a_s=1$ . Обмотка индуктора – двухслойная, распределенная, с диаметральной шаг, схема соединения «звезда».

### ОСНОВЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКТОРА ЭМП

В поперечном сечении расчетной модели индуктора ЭМП на рис. 1 и 2 заданы и далее используются полярные координаты  $r, \alpha$ .

МП индуктора в его центральном поперечном сечении описывается общеизвестным двумерным дифференциальным уравнением:

$$\text{rot} \left[ \frac{1}{\mu_e} \text{rot}(\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (1)$$

где  $A_z, J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;

$\vec{k}$  – орт по аксиальной оси  $z$ ;

$\mu_e$  – абсолютная магнитная проницаемость (АМП), причем для участков области расчета в шихтованном сердечнике используется эквивалентное ее значение:

$$\mu_e = \mu_{Fe} k_{Fe}, \quad (2)$$

где  $\mu_{Fe}$  – АМП стальных листов;

$k_{Fe}$  – коэффициент заполнения ими сердечника.

Для остальных участков, кроме области рабочей камеры,  $\mu_e$  соответствует магнитным свойствам немагнитных сред.

АМП рабочей камеры  $\mu_c$  задавалось через относительную магнитную проницаемость  $\mu_r$

$$\mu_c = \mu_r \mu_0, \quad (3)$$

где  $\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

При определении значений  $\mu_c$  и  $\mu_r$  в рабочей камере учитывается разреженная структура ферромагнитных элементов. На данном этапе исследования сделать это достаточно точным расчетом не представлялось возможным, поэтому магнитная проницаемость  $\mu_r$  принимались ориентировочно как эквивалентная с учетом АМП ферромагнитных элементов и их концентрации в рабочей камере.

В связи с тем, что для разнообразных технологических процессов требуется различное количество ферромагнитных элементов, которое влияет на величину  $\mu_r$ , задача расчета моментной угловой характеристики решается для ряда различных значений  $\mu_r$ . При этом принимается, что ферромагнитные элементы ориентированы по продольной оси, что будет выражаться условием неравенства  $\mu_{rq} < \mu_{rd}$ .

Распространение МП ограничивалось внешней поверхностью сердечника индуктора, где задано граничное условие Дирихле:

$$A_z = 0. \quad (4)$$

Фактором возбуждения магнитного поля в ЭМП являются токи его индуктора.

В фазных зонах трехфазной обмотки индуктора задана симметричная система токов:

$$\begin{aligned} i_{As} &= I_m \cos(\omega t_k + \beta); \\ i_{Bs} &= I_m \cos(\omega t_k - 2/3 \pi + \beta); \\ i_{Cs} &= I_m \cos(\omega t_k + 2/3 \pi + \beta); \end{aligned} \quad (5)$$

где  $I_m = \sqrt{2} I_s / a_s$  – амплитуда токов;

$\omega = 2\pi f_s$  – угловая частота;

$t_k$  – текущее время;

$\beta$  – начальная фаза токов, которая задает пространственное угловое направление МДС обмотки статора  $F_s$  в области расчета МП.

В начальный момент времени ( $t_k = 0$ ) ток в фазной обмотке  $A$  равняется амплитудному

значению  $i_{sA}=I_{ms}$ , тогда определены и токи в фазных обмотках  $B$  и  $C$ :  $i_{sB}=i_{sC}=-0,5I_{ms}$ .

Расчетным инструментом (решателем) для решения полевой задачи, описанной уравнениями (1)–(5), является общедоступная программа FEMM [25], составлена на основе метода конечных элементов. Общие принципы таких расчетов магнитного поля и определения ряда электромагнитных параметров электрических машин и других электротехнических устройств изложены в [26, 27].

В качестве исходной иллюстрации на рис. 3 представлена электромагнитная система ЭМП при относительных магнитных проницаемостях по продольной и поперечной осям  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ . Расчет МП проводился при  $\beta = 0$  (5), поэтому картина силовых линий этого поля на рис. 3 в рабочей зоне ориентирована по продольной оси  $d$ .

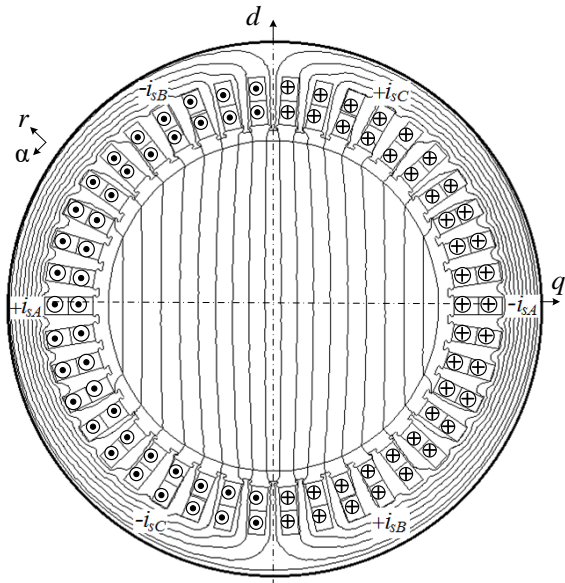


Рис. 3. Поперечное сечение электромагнитной системы ЭМП для  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ .<sup>3</sup>

В пазах индуктора на рис. 3 показаны соответствующие направления фазных токов, знаки + и – после их символов учтены в их мгновенных значениях, определяемых по (5). В режиме нагрузки во всех вариантах представляемого исследования так же, как и в режиме ХХ, значение фазного тока принято одним и тем же и равным номинальному току  $I_{sN}$ . Это являлось единой основой для сравнения разных режимов и вариантов расчета МП и соответствующих ему параметров индуктора.

По распределению ВМП  $A_z(r, \alpha)$ , через известное выражение [21, 26]

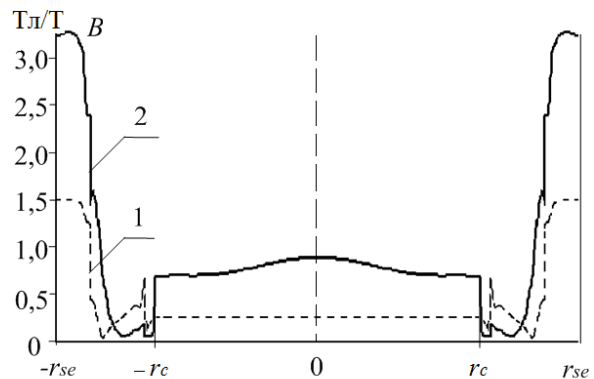
$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (6)$$

определяются радиальная и угловая составляющие МИ:

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (7)$$

$$\text{и ее модуль: } B = \sqrt{B_r^2 + B_\alpha^2}. \quad (8)$$

На рис. 4 представлены изменения в распределении МИ  $B$  по продольной оси  $0q$  ЭМП при переходе от режима ХХ к режиму нагрузки в начальном положении МП, которое соответствует рис. 2 и 3. Характерно, что внутри рабочей камеры при ХХ МИ распределена равномерно, а в режиме нагрузки МИ существенно увеличивается и ее кривая становится «выпуклой». Увеличение МИ к краям графиков приходится на зоны стального сердечника индуктора, что практически не затрагивает рабочую камеру. Ограничение уровня МИ в сердечнике может быть сделано изменением его размеров или уменьшением тока обмотки индуктора при нагрузке.



1 – режим ХХ,

2 – режим нагрузки для  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ .

Рис. 4. Распределение МИ  $B$  по оси  $0q$ .<sup>4</sup>

### РАСЧЕТ МОМЕНТНОЙ УГЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМП

Силовые действия в индукторе ЭМП возникают под воздействием МП и основываются на силах магнитного натяжения, которые возникают за счет разной магнитной проводимости наполнителя его рабочей камеры по продольной  $0d$  и поперечной  $0q$  осям.

После численного расчета МП, описываемого уравнением (1), ЭММ определяется через тензор магнитного натяжения Максвелла [27]:



$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_{si} - r_c)} \int_{S_\delta} B_r B_\alpha r dS. \quad (9)$$

Для этого в программе FEMM есть соответствующая функция, активизируемая скриптом Lua. Ее работа подготавливается выделением всей области рабочей камеры, и далее программа сама формирует в зазоре кольцевой слой между радиусами окружностей  $r_{si}$  и  $r_c$ , которые ограничивают поперечную площадь зазора  $S_\delta$  со сторон расточки индуктора и поверхности рабочей камеры. Результатом работы функции является значение ЭММ (9).

Для получения угловых функций ЭММ проведены многопозиционные расчеты МП при последовательных изменениях угла  $\beta$ , входящего в (5), с заданным шагом, равным, например, 5 или 10 градусам. При этом структура токов и МДС трехфазной обмотки индуктора поворачивалась на такой же угол. Пересчет токов индуктора (5) при разных углах  $\beta$ , а также вычисление и сбор необходимых результатов расчета проводились при работе программы FEMM автоматически с использованием специально написанной подпрограммы на языке Lua, встроенном в эту программу.

Чтобы убедиться, что МП поворачивается на тот же угол  $\beta$ , что и структура токов (5), провели тестовые расчеты при отсутствии магнитной анизотропии в рабочей камере внутри индуктора. Конкретно было принято  $\mu_{rd} = \mu_{rq} = 1$ , что соответствует режиму ХХ. Для численного эксперимента взяли значения  $\beta_1 = 24^\circ$  и  $\beta_1 = 52,5^\circ$  (их происхождения станет ясно из дальнейшего текста). Полученные результаты показаны на рис. 5 в виде соответствующих картин МП ЭМП. Как ожидалось, при магнитной проницаемости, в рабочей камере, равной  $\mu_0$ , анизотропия не проявилась, и МП повернулось строго на заданные углы.

Численные расчеты зависимости ЭММ от угла нагрузки, т.е.  $M_{em}(\Theta)$  проводились при различных сочетаниях составляющих относительной магнитной проницаемости по продольной  $\mu_{rd}$  и поперечной  $\mu_{rq}$  осям. На рис. 6 представлены в виде графиков наиболее характерные варианты угловой моментной характеристики при разных сочетаниях  $\mu_{rd}$  и  $\mu_{rq}$ . Такие варианты могут быть обусловлены разнообразием областей применения ЭМП, а характеристики могут использоваться для определения ЭММ при применении ферромагнит-

ного наполнителя с различными магнитными свойствами для исследуемого образца ЭМП.

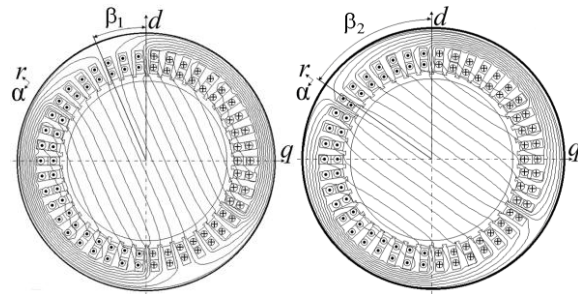
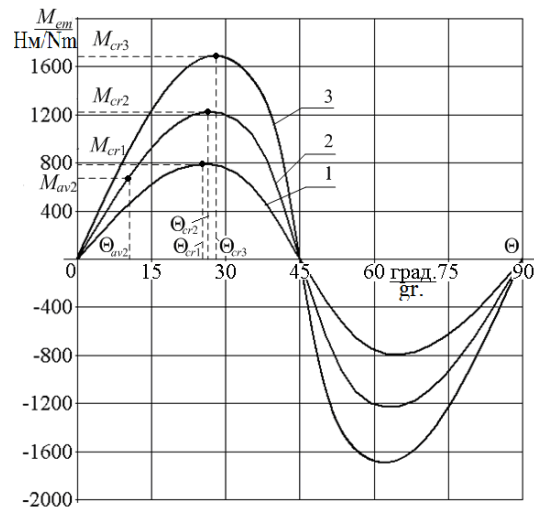


Рис. 5. Картини МП ЭМП при  $\beta_1 = 24^\circ$  и  $\beta_2 = 52,5^\circ$  для  $\mu_{rd}=1, \mu_{rq}=1$ .<sup>5</sup>



1 – при  $\mu_{rd}=5, \mu_{rq}=2$ ; 2 – при  $\mu_{rd}=10, \mu_{rq}=2$ ; 3 – при  $\mu_{rd}=50, \mu_{rq}=2$ .

Рис. 6. Моментная угловая характеристика ЭМП.<sup>6</sup>

Адекватность расчетов подтверждает то, что характер изменения ЭММ при вращении МП индуктора на 180 эл.град. типичен для синхронных реактивных машин [24]. Там при идеализации расчетных моделей машин угловая функция реактивного момента имеет вид:

$$M_r = M_{max} \sin(2\Theta), \quad (10)$$

где угол  $\Theta$  соответствовал бы основной угловой функции ЭММ обычной синхронной машины.

Соответственно (10) период изменения функции реактивного момента в два раза меньше периода токов (5). Поэтому соответствующие им аргументы имеют соотношение:

$$\Theta = \beta / 2, \quad (11)$$

и именно в такой интерпретации на рис. 6 представлен масштаб по оси абсцисс.

На рис. 6 функции подтвердили периодичность идеализированной функции (10), но здесь «волны» угловой функции (рис. 6) наклонились

<sup>5, 6</sup>Appendix 1

и получились смещения критической точки на графиках, которое обусловлено искажением реалистичного МП.

На рис. 6 видны уровни максимальных значений момента  $M_{cr}$  в критических точках характеристик при критических углах нагрузки  $\Theta_{cr}$ , а также среднего значения момента  $M_{av}$  для одного из расчетных вариантов.

При расчетном исследовании образца ЭМП: для  $\mu_{rd}=5, \mu_{rq}=2$ :  $\Theta_{cr1}=25,25^\circ$  при  $\beta_1 = 50,5^\circ$ ; для  $\mu_{rd}=10, \mu_{rq}=2$ :  $\Theta_{cr2}=26,25^\circ$  при  $\beta_2 = 52,5^\circ$ ; для  $\mu_{rd}=50, \mu_{rq}=2$ :  $\Theta_{cr3} = 29,25^\circ$  при  $\beta_3 = 58,5^\circ$ .

На рис. 7 и 8 представлены картины МП, демонстрирующие повороты его силовых магнитных линий при нагрузке ЭМП. Оба раза для удобства сравнения взят один и тот же вариант относительных магнитных проницаемостей:  $\mu_{rd}=10, \mu_{rq}=2$ , но при указанных на рисунках углах  $\Theta$ :  $\Theta_{av2}$  и  $\Theta_{cr2}$ , которые определены согласно рис. 6.

Таким образом, поворот силовых линий МП соответствует углам нагрузки, определяемым по (11), то есть силовые линии МП повернулись на углы, в два раза меньшие, чем заданные для токов (5) углы  $\beta$ . Это и подтверждает то, что в индукторе ЭМП, как и в теории синхронных электрических машин, угол поворота МП относительно продольной оси ротора считается углом нагрузки.

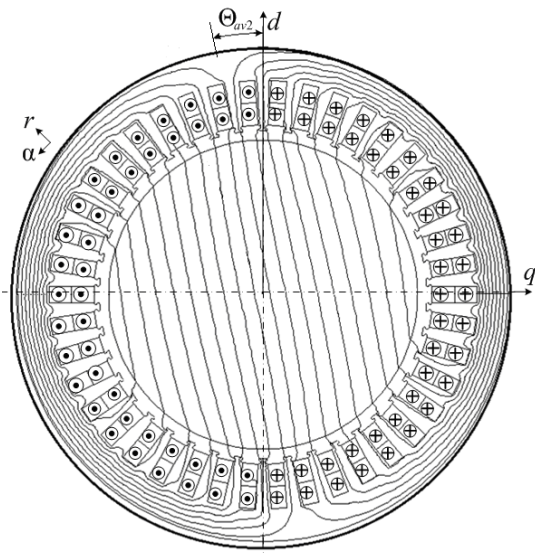


Рис. 7. Картина МП ЭМП при  $\Theta_{av2}=12^\circ$  для  $\mu_{rd}=10, \mu_{rq}=2$ .<sup>7</sup>

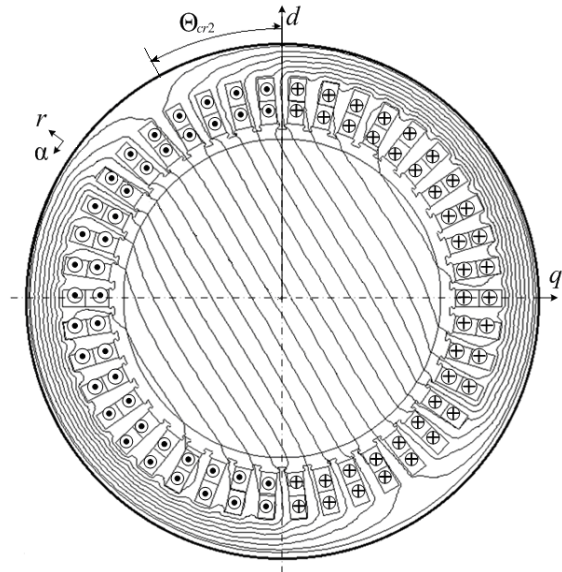


Рис. 8. Картина МП ЭМП при  $\Theta_{cr2}=26,25^\circ$  для  $\mu_{rd}=10, \mu_{rq}=2$ .<sup>8</sup>

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из цели работы в процессе исследования было установлено:

1. Численно-полевые расчеты МП и ЭММ по программе FEMM с использованием написанной подпрограммы на языке Lua являются эффективным средством для расчетного анализа режимов работы индуктора МП в ЭМП. При этом практически без упрощений учитываются геометрия электромагнитной системы индуктора, нелинейные магнитные свойства его сердечника и анизотропия полумагнитной среды, заполняющей рабочую камеру.

2. Численные расчеты МП достаточно точно возвращают его повороты в соответствии с задаваемой фазой токов трехфазной обмотки индуктора. При этом в режиме нагрузки получаемый угол нагрузки индуктора соответствует углу поворота МП, но оказывается в два раза меньше, чем задаваемый угол фазы токов обмотки индуктора.

3. Период моментной угловой характеристики рассматриваемого индуктора МП оказывается в два раза меньше периода токов обмотки индуктора, что соответствует классическим представлениям об угловой функции реактивного момента электрических машин.

4. Представленная методика автоматизированных численно-полевых расчетов индуктора МП может стать эффективной основой для проектирования устройств рассмотренного типа с получением необходимого уровня ЭММ.



**APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)**

<sup>1</sup>**Fig. 1.** The design of the inductor of the electromagnetic stirrer.

<sup>2</sup>**Fig. 2.** The longitudinal-transverse electromagnetic model of the magnetic field of the inductor of the electromagnetic stirrer.

<sup>3</sup>**Fig. 3.** The electromagnetic system cross section of the electromagnetic stirrer for  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ .

<sup>4</sup>**Fig. 4.** The distribution of magnetic induction on the  $Od$  axis (1 – idle mode, 2 – load mode for  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ ).

<sup>5</sup>**Fig. 5.** The view of magnetic field of the electromagnetic stirrer on the  $\beta_1 = 24^\circ$  и  $\beta_2 = 52,5^\circ$  for  $\mu_{rd}=1$ ,  $\mu_{rq}=1$ .

<sup>6</sup>**Fig. 6.** The torque angular characteristic of the electromagnetic stirrer (1 – for  $\mu_{rd}=5$ ,  $\mu_{rq}=2$ ; 2 – for  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ ; 3 – for  $\mu_{rd}=50$ ,  $\mu_{rq}=2$ ).

<sup>7</sup>**Fig. 7.** The view of magnetic field of the electromagnetic stirrer on the  $\Theta_{cr2}=12^\circ$  for  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ .

<sup>8</sup>**Fig. 8.** The views of magnetic field of the electromagnetic stirrer on the  $\Theta_{av2}=26,25^\circ$  for  $\mu_{rd}=10$ ,  $\mu_{rq}=2$ .

**Литература (References)**

- [1] Smolkin M.R., Smolkin R.D., Smolkin E.R. Analysis of magnetic fields and circuits in separators with plane-parallel and plane-meridian symmetry. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008, vol. 44, no. 8. pp. 1990–2001. doi: 10.1109/TMAG.2008.921841.
- [2] Liu Jinxin, Liu Jinli, Ding Jinliang, Chai Tianyou. Intelligent control for operation of iron ore magnetic separating process. *IEEE Conference Publications "7th World Congress on Intelligent Control and Automation"*. China. 2008. pp. 2798–2803. doi: 10.1109/WCICA.2008.4593369.
- [3] Dimova Tatyana, Marinova Mariya, Aprahamian Bohos. Assessment of the influence of the magnetic filter type on the magnetic field of a separator type MCR-5. *IEEE Conference Publications "19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)"*. Bulgaria. 2016. pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2016.7542990.
- [4] Dimova Tatyana, Aprahamian Bohos, Marinova Maria, Streblau Maik. Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation. *IEEE Conference Publications "19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)"*. Bulgaria. 2016. pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2014.6871849.
- [5] Dimova Tatyana, Mariya Marinova, Aprahamian Bohos. Investigation of the magnetic field of a separator with specific configuration of the magnetic filter. *IEEE Conference Publications "19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)"*. Bulgaria. 2016. pp. 1–4. doi: 10.1109/SIELA.2016.7542989.
- [6] Dimova Tatyana M., Marinova Mariya I., Aprahamian Bohos R., Marinov Marin T. Investigation of the exploitation modes of a special type magnetic separator. *IEEE Conference Publications "2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)"*. Bulgaria. 2018. pp. 444–447. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955482.
- [7] Dimova Tatyana M., Streblau M., Aprahamian Bohos R. 3D Modeling of the Magnetostatic Field in Separation Apparatus. *IEEE Conference Publications "15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)"*. Bulgaria. 2017. pp. 1–4. doi: 10.1109/HiTech.2018.8566294.
- [8] Obvintseva Evgeniya Yu., Konyaev Andrey Yu. Linear induction machines for electrodynamic separation of non-ferrous metals. *IEEE Conference Publications "IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)"*. Russia. 2017. pp. 1567–1570. doi: 10.1109/EIConRus.2017.7910871.
- [9] Tatevosyan A. A. Tatevosyan A. S., Zaharova N. N. The study and calculation of magnetic field of the DC electromagnet with the split poles and polar tips. *IEEE Conference Publications "2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)"*. Russia. 2016. pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911489.
- [10] Andreeva Yelena G., Semina Irina A., Orlov Andrey S. The research of three-dimensional magnetic field of the hybrid magnetic system in the ANSYS Maxwell program. *IEEE Conference Publications "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)"*. Russia. 2016. pp. 1–4. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7818964.
- [11] Demin Alexander V., Andreeva Elena G., Semina Irina A. The study of electromagnetic processes and characteristics systems with open magnetic core. *IEEE Conference Publications "International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)"*. Russia. 2015. pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7146974.
- [12] Brojboiu Maria, Mandache Lucian, Ivanov Virginia. Concerning the selectivity of the experimental device based on eddy currents for the metal waste separation. *IEEE Conference Publications "4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)"*. Romania. 2013. pp. 1–5. doi: 10.1109/ISEEE.2013.6674383.
- [13] Brauer John R. *Magnetic actuators operated by DC. Magnetic actuators and sensors*. Wiley-IEEE Press eBook Chapters. Publisher: Wiley-IEEE Press. 2014. Edition 1. p. 400. doi: 10.1002/9781118779262.ch07.
- [14] Koshi Yasuhiro, Ooshima Masahide, Uddin M. Nasir, Kitada Hiroshi. Improvement of rotational torque and suspension force by winding arrangement in a bearingless motor drive for a solid-liquid separator. *IEEE Conference Publications "IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)"*. Canada. 2011. pp. 1415–1420. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994815.
- [15] Gerlando A. Di, Foglia G., Iacchetti M., Perini R., Gatelli F., Armellini L. Torque and losses in the metallic shell of a dual mechanical port PM electrical machine, for dangerous fluid pumps. *IEEE Confer-*

- ence Publications "The XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010". Italy. 2010. pp. 1–6. doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607880.
- [16] Hongguang Jiao, Song Liu, Jiao Ma. Research on new magnetic roller for magnetite preselection with discarding tailings. *IEEE Conference Publications "2011 Second International Conference on Mechanical Automation and Control Engineering"*. China. 2011. pp. 612–616. doi: 10.1109/MACE.2011.5986999.
- [17] Young Sun Kim, Myung Ki Baek, Gwan Soo Park, Il Han Park. Dynamics of magnetic particles in a magnetic separation system using the finite element field model and level set method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010, vol. 20, no. 3. pp. 953 - 956. doi: 10.1109/TASC.2010.2040381.
- [18] Shvedchykova Iryna, Romanchenko Julia, Nitchenko Inna. Comparative analysis of inhomogeneity degree of magnetic field of polygradient magnetic separators for purification of bulk materials. *IEEE Conference Publications "2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)"*. Ukraine. 2017. pp. 144–147. doi: 10.1109/MEES.2017.8248873.
- [19] Kheshti Zeinab, Hassanajili Shadi, Ghajar Koorosh Azodi. Study and optimization of a high-gradient magnetic separator using flat and lattice plates. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018, vol. 55, no. 2. pp. 1–8. doi: 10.1109/TMAG.2018.2883624.
- [20] Kompanija GlobeCore. *Apparat Vikhrevogo Sloja AVS-100*. [Company GlobeCore. Vortex Layer Machine ABC-100]. Available at: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. (accessed 17.11.2017).
- [21] Milykh V.I., Shilkova L.V., Revugenko S.A. Chyselnyi analiz mahnitnoho polia tsylindrychnoho tryfaznoho induktora mahnitnoho separatora [Numerical analysis of the magnetic field of a cylindrical three-phase magnetic separator inductor]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion."*, 2017, no. 1 (1123), pp. 76–82. (In Ukrainian).
- [22] Gol'dberg O. D., Gurin Ja. S., Sviridenko I. S. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Vysshaja shkola, 2001, 430 p. (in Russian).
- [23] Kopylov I. P., Goryainov F. A., Klovov B. K. et al. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow: Yurait, 2011, 767 p. (in Russian).
- [24] Voldek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Mashinyi peremennogo toka* [Electrical Machines. Machines of alternating current], SPb, Piter Publ, 2010, 356 p. (in Russian).
- [25] Meeker D. *Finite Element Method Magnetics: OldVersions*. 11October 2010. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>. (accessed 21.10.2016).
- [26] Bianchi, Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005, 276 p.
- [27] Milykh V. I., Polyakova N. V. Opredelenie elektromagnitnykh parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley [Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field]. *Electrotehnika i Electromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2006, no. 2, pp. 40-46. (in Russian).

**Сведения об авторах.**



**Мильх Владимир Иванович**, окончил Харьковский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты», заведующий кафедрой «Электрические машины» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», профессор, доктор технических наук, Отличник образования Украины, член специализированного ученого совета Д 64.050.08. Область научных интересов связана с математическим моделированием и исследованием электромагнитных полей, параметров и процессов в электрических машинах, исследованием машин постоянного тока разных типов, турбогенераторов, линейных электродвигателей различного назначения.

E-mail: [mvikemkpi@gmail.com](mailto:mvikemkpi@gmail.com)

**Шилкова Лариса Васильевна**, окончила Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические машины и аппараты» в 2007 г. Аспирант и по совместительству старший преподаватель кафедры «Электрические машины» этого же университета. Область научных интересов связана с исследованием магнитных сепараторов, автоматизированными численными расчетами магнитных полей электрических машин, повышением эффективности системы проектирования магнитных сепараторов.

E-mail: [larisa\\_lv@ukr.net](mailto:larisa_lv@ukr.net)

