

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

**РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА
ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ**

Отримане диференціальне рівняння руху ротора ПЕМП та картина розподілу магнітної індукції в поперечному перетині.

***Ключові слова:** поліфункціональний електромеханічний перетворювач, електромагнітний момент.*

Получена картина распределения индукции в поперечном сечении и дифференциальное уравнение движения ротора ПЭМП.

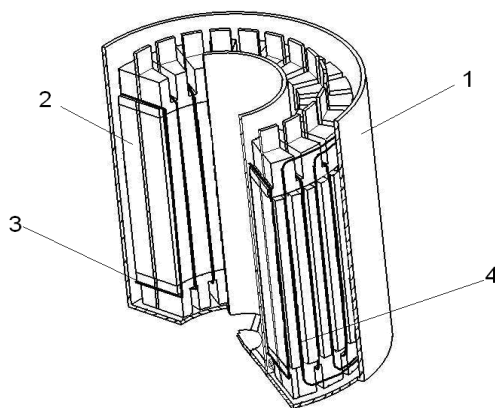
***Ключевые слова:** полифункциональный электромеханический преобразователь, электромагнитный момент.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Погружные полифункциональные электромеханические преобразователи (ПЭМП) относятся к новому классу электромеханических устройств, поэтому их создание требует разработки новых методик расчёта[1]. Известные методы расчёта традиционных электрических машин не отражают особенности геометрии ротора, конфигурации магнитной системы и взаимодействие полей комбинированных обмоток. Одним из основных элементов расчёта ПЭМП является расчёт электромагнитного момента ПЭМП.

Анализ исследований и публикаций. Методология создания указанной модификации погружного ПЭМП не достаточно разработана[1,2,3]. Традиционные подходы к анализу и расчёту ПЭМП на базе их электрических и магнитных схем замещения не учитывают тот очевидный факт, что на самом деле ПЭМП является сложной пространственной конструкцией с распределёнными параметрами, не обеспечивают необходимую достоверность расчётных результатов.

Постановка задачи. Разработать методику расчёта одной из основных интегральных величин - электромагнитного момента ПЭМП с использованием численных методов расчёта.

Изложение материала и его результаты Ряд модификаций погружных ПЭМП могут выполняться с обмотками кольцевого типа. При этом появляется возможность использования лобовых частей не только для формирования результирующего электромагнитного момента, но и обеспечения греющей мощности в торцевых зонах ПЭМП. Обмотка кольцевого типа (рисунок 1) укладывается в пазовую зону по всей длине, следовательно, лобовые части в такой обмотке отсутствуют, а длина активной части увеличивается[4].



- 1- полый массивный коаксиальный ротор
- 2- пакет статора с обмотками
- 3- кольцевая обмотка
- 4- внешняя обмотка барабанного типа

Рисунок 1 - Конструкция активной части погружного ПЭМП

Основными являются обмотки кольцевого и барабанного типов. Обмотка барабанного типа имеет активную зону только в цилиндрической части, а в торцевой расположены лобовые части, не формирующие суммарный момент. Поэтому расчёт моментов проводится по следующим зонам : торцевая и цилиндрическая - для обмотки кольцевого типа, цилиндрическая - для барабанного типа обмотки.

Применение кольцевых обмоток статора – это новое техническое решение, сопровождаемое значительным увеличением коэффициента использования активных материалов и увеличением технико-экономической эффективности ПЭМП. Оптимизацию структуры и параметров таких обмоток целесообразно выполнять методами математического моделирования. Достоверное определение параметров и характеристик ПЭМП в разных режимах работы зависит от точности ма-

тематических моделей, которые применяются для исследований, и полноты входящей информации, которая отражает физические особенности ПЭМП. Это требует разработки новых математических моделей ПЭМП, которые имеют меньше различного рода допущений и упрощений, и полной мерой учитывают геометрические особенности узлов и физические свойства материалов. Кроме того, новые методики и алгоритмы моделирования должны обеспечивать быстрое и наглядное отображение результатов удобным для пользователя интерфейсом.

Методами, которые обеспечивают высокую достоверность расчётов, являются полевые и цепе-полевые методы анализа, которые являются инвариантными к характеру электромагнитных связей объекта исследований. Использование полевого метода анализа позволяет проводить уточненные исследования параметров, характеристик и режимов работы ПЭМП с учётом таких их особенностей конструкции и режимов работы, которые не поддаются достоверному анализу традиционными классическими методами[1]. Цепе-полевые методы используются при анализе динамических режимов работы ПЭМП, они предусматривают совместное решение дифференциальных уравнений электрических обмоток и уравнений нестационарного электромагнитного поля в активной зоне ПЭМП.

При электромеханическом преобразовании энергии в ПЭМП возникает единое силовое физическое поле, отдельными составляющими которого являются поля электромагнитных, тепловых и механических величин. Анализ ряда явлений и эффектов в ПЭМП необходимо производить с учётом влияния отдельных составляющих.

Дифференциальное уравнение механического равновесия механических частей включает в себя суммарный электромагнитный момент M , создаваемый кольцевой и барабанной обмотками, динамический момент и момент сопротивления M_c :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c. \quad (1)$$

Механический момент сопротивления обусловлен сопротивлением легкоплавкого материала и имеет характер, который приближается к линейной зависимости от угловой скорости вращения ротора

$$M_c = M_{c0} + a\omega_k, \quad (2)$$

где M_{c0} – постоянная составляющая нагрузки, которая не зависит от скорости;

a - коэффициент нагрузки.

Учитывая то, что перерабатываемый материал имеет известную плотность, вязкость, температуру фазового перехода, можно заранее предусмотреть в конструкции соотношение тепловой и механической мощности ПЭМП. Создаваемый ПЭМП электромагнитный момент складывается соответственно из следующих компонент:

$$M = M_{ЭМ.кольц} \mp M_{ЭМ.бараб}, \quad (3)$$

где $M_{ЭМ.кольц}$ -электромагнитный момент, создаваемый кольцевой обмоткой;

$M_{ЭМ.бараб}$ -электромагнитный момент, создаваемый обмоткой барабанного типа.

Знак «+» означает согласное направление электромагнитного момента барабанной и кольцевой обмотки, «-» - встречное.

В результате подстановки значения электромагнитного момента из выражения(3) в уравнение(1) получаем:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ЭМ.кольц} \mp M_{ЭМ.бараб} - M_c. \quad (4)$$

Электромагнитный момент, передаваемый материалу определяется следующим выражением:

для внешнего ротора от кольцевой обмотки

$$M_{внешн} = F_k \cdot R_{внешн}; \quad (5)$$

для внутреннего ротора от кольцевой обмотки

$$M_{внутр} = F_k \cdot R_{внутр}; \quad (6)$$

для внешнего ротора от обмотки барабанного типа

$$M_{ЭМ.бараб} = F_b \cdot R_{внешн}; \quad (5)$$

где $R_{внутр}$, $R_{внешн}$ – внутренний и внешний радиусы ротора относительно средней линии статора.

Вектор результирующей силы F_V , которая действует на данный объем тела V , находится интегрированием вектора плотности электромагнитной силы:

$$F_V = \int_V \vec{f}_V dV. \quad (7)$$

Вектор объемной плотности электромагнитной силы определяется следующим выражением

$$\vec{f}_V = \vec{B} \cdot \vec{J} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \mu. \quad (8)$$

Первое произведение в выражении (8) описывает силу Ампера, которая действует на элементарный ток с плотностью \vec{J} , находящийся в магнитном поле, а второе произведение – силу, обусловленную неоднородным распределением (градиентом) магнитной проницаемости ферромагнитных материалов. Второй множитель позволяет учитывать силы, которые возникают в системе немагнитных сред (постоянные магниты, если таковые есть) [5].

Для определения магнитной индукции ПЭМП использован метод конечных элементов и применен пакет прикладных программ Femlab.

В декартовых координатах нормальная и тангенциальная составляющая магнитной индукции в любой точке определяется по известным в этой же точке проекциям вектора индукции на оси системы координат

$$\begin{aligned} B_{ni} &= B_{xi} \sin \gamma_i + B_{yi} \cos \gamma_i \\ B_{ti} &= B_{xi} \cos \gamma_i - B_{yi} \sin \gamma_i \end{aligned} \quad (9)$$

где γ_i – угол между осью Y и вектором нормали к i – му отрезку расчетной линии.

Составляющие индукции B_x, B_y определяются с помощью известного соотношения $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$, которое увязывает векторный магнитный потенциал и магнитную индукцию. В частности для двумерных полей имеем выражения.

$$B_x = \partial A / \partial y, \quad B_y = -\partial A / \partial x. \quad (10)$$

Следует отметить, что на практике при использовании МКЭ очень часто применяют треугольные конечные элементы первого порядка. В пределах любого треугольного элемента первого порядка распределение векторного магнитного потенциала аппроксимируется линейным полиномом:

$$A(x, y) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y, \quad (11)$$

где a_1, a_2, a_3 – постоянные коэффициенты, получаемые по значению векторного потенциала в вершинах треугольного элемента. После дифференцирования потенциала в каждом треугольном конечном элементе, составляющие магнитной индукции приобретают постоянные значения[5].

$$B_x = a_3, \quad B_y = -a_2. \quad (12)$$

На рисунках 2,3 представлены результаты моделирования электромагнитной структуры погружного ПЭМП, показанного на рисунке 1, в режиме короткого замыкания (стоянка под током).

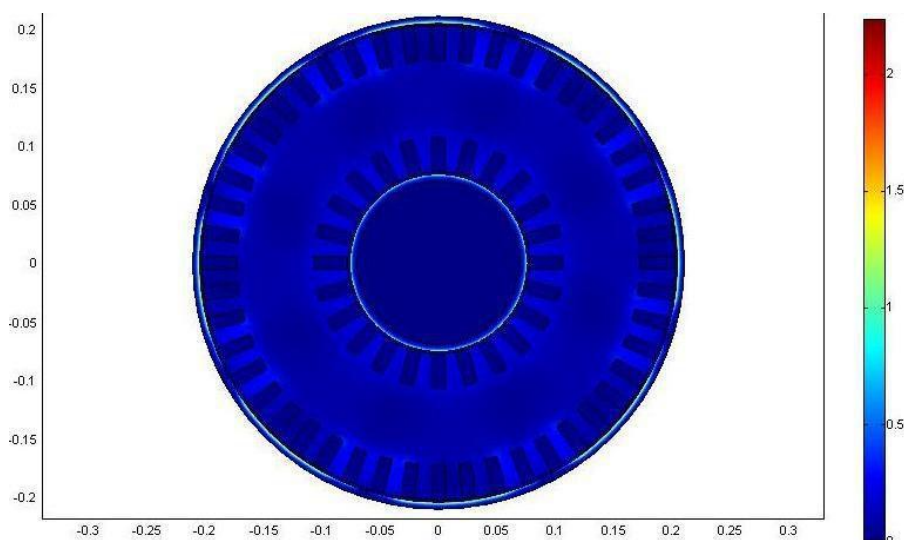


Рисунок 2 – Картина распределения нормальной составляющей плотности магнитного потока ПЭМП

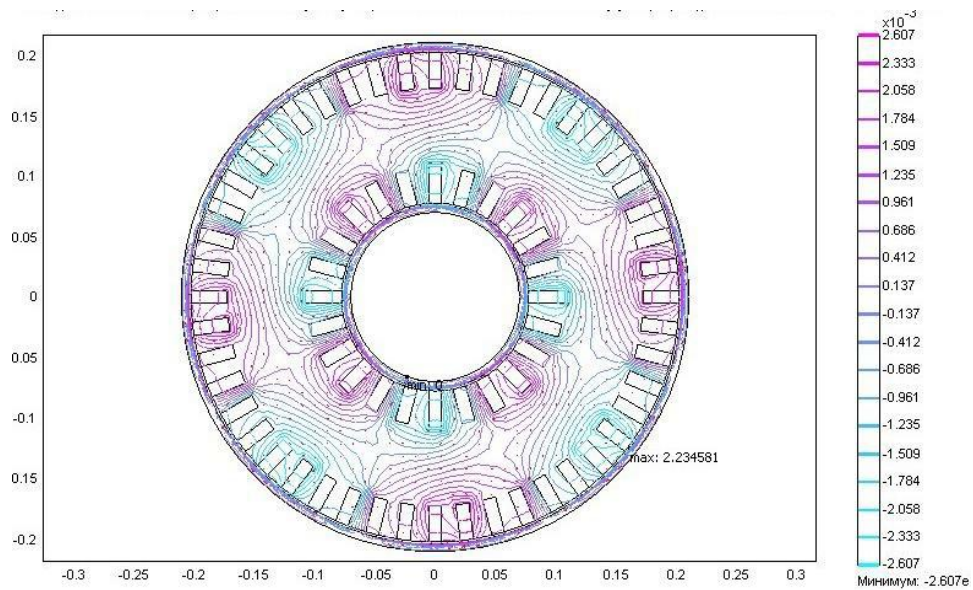


Рисунок 3 – Картина распределения нормальной составляющей векторного магнитного потенциала, с указанием максимума и минимума плотности магнитной индукции ПЭМП

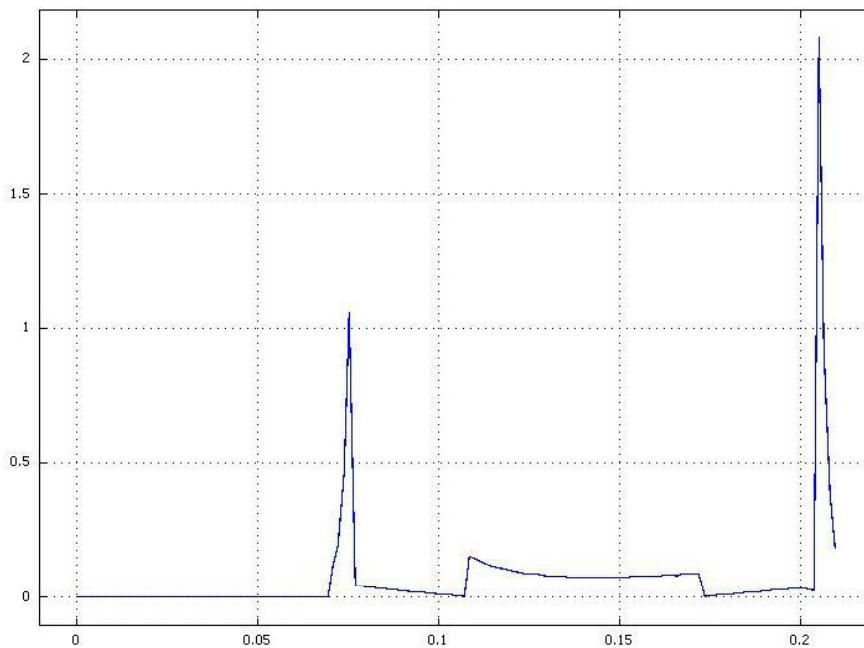


Рисунок 4 – Картина радиального распределения плотности магнитного потока ПЭМП

Полученные данные по распределению магнитной индукции использованы для расчёта электромагнитных моментов.

Моменты, создаваемые во внешней цилиндрической зоне ротора от кольцевой обмотки и обмотки барабанного типа:

$$M_{\text{цк}} = \left[\int \left(\frac{\mathbf{r}}{B_{\kappa}} \cdot \mathbf{J}_{\kappa} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внешн}} . \quad (13)$$

$$M_{\text{цб}} = \left[\int_V \left(\frac{\mathbf{r}}{B_{\delta}} \cdot \mathbf{J}_{\delta} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внешн}} . \quad (14)$$

Момент на внутренней цилиндрической зоне ротора создаёт только кольцевая обмотка

$$M_{\text{цк.внутр}} = \left[\int_V \left(\frac{\mathbf{r}}{B_{\kappa}} \cdot \mathbf{J}_{\kappa} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внутр}} . \quad (15)$$

Среднее значение результирующего электромагнитного момента двух торцевых частей ПЭМП:

$$M_{\text{торц}} = 4p \int_0^{\tau_{\phi}} B_m \cdot I_{2m} \cdot \sin p\phi \cdot \sin(p\phi - \psi_2) \left(\frac{D_2^2 - D_1^2}{4} \right) d\phi, \quad (16)$$

где τ_{ϕ} – полюсное деление в единицах угловой координаты ϕ ;

ψ_2 – начальный фазовый сдвиг гармоники тока $i_{2\phi}$;

p, τ – соответственно число пар полюсов и полюсное деление;

I_{2m} – амплитудное значение тока ротора;

B_m – амплитудное значение магнитной индукции;

Расчётная активная длина лобовых частей кольцевой обмотки при наружном D_2 и внутреннем D_1 диаметрах совмещённого статора составляет $l_{\text{ла}} = (D_2 - D_1)/2$ [4].

Таким образом, после подстановки всех составляющих дифференциальное уравнение движения ротора приобретает вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \left[\int_V \left(\frac{\mathbf{r}}{B_{\kappa}} \cdot \mathbf{J}_{\kappa} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внешн}} +$$

$$+ \left[\int_V \left(\frac{\mathbf{r}}{B_{\kappa}} \cdot \mathbf{J}_{\kappa} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внутр}} +$$

$$\begin{aligned}
& + 4p \int_0^{\tau_\phi} B_m \cdot I_{2m} \cdot \sin p\phi \cdot \sin(p\phi - \psi_2) \left(\frac{D_2^2 - D_1^2}{4} \right) d\phi m \\
& m \left[\int_V \left(\frac{r}{B_\sigma} \cdot J_\sigma - \frac{1}{2} \cdot \frac{|B|^2}{\mu} \cdot \text{grad } \mu \right) \cdot dV \right] \cdot R_{\text{внешн}} - M_c.
\end{aligned} \tag{17}$$

Результаты моделирования подтверждают соответствие распределения магнитной индукции, полученному ранее в [4].

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Создана математическая модель и получена картина распределения индукции в поперечном сечении ПЭМП, определены зоны максимума и минимума магнитной индукции.

2. Получено дифференциальное уравнение движения ротора ПЭМП с кольцевыми обмотками и обмотками барабанного типа.

3. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование методов экспериментального определения электромагнитного момента ПЭМП.

Библиографический список

1. *Заблодский Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения. – Монография. – Алчевск: ДонГТУ. – 2008. – 340 с.*

2. *Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Электромагнитные и тепловые процессы вращающихся электромеханических нагревателей. Вестник ХГПУ.- 2000. - Вып.84. - С. 93- 97.*

3. *Куцевалов В.И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с.*

4. *Заблодский Н.Н., Лупанов А.В., Квасов В.А. Эффективность применения кольцевых обмоток в полифункциональных электротепломеханических преобразователях // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту: Наукові праці КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51). Ч. 1. – С. 67-69.*

5. *Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Зеленовым А.Б