

## Оценка вращающих моментов в торцевых зонах погружных электромеханических преобразователей методами теории поля

*Предложена математическая модель расчета торцевых зон погружного электромеханического преобразователя (ПЭМП). Рассмотрена картина магнитного поля торцевых частей статора, получена картина распределения индуцированных токов, рассчитан электромагнитный момент торцевых частей ПЭМП.*

**погружной электромеханический преобразователь, торцевые зоны, картина распределения поля, электромагнитный момент**

В одной из модификаций двухстаторных погружных полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) существует возможность применения кольцевых обмоток статора. Подобное расположение обмоток стало возможным за счет применения торцевых зон статора с пазами, в которые уложены секции кольцевых обмоток, представленные на рис. 1. Использование кольцевых обмоток позволяет увеличить полезную греющую мощность и электромагнитный момент ПЭМП при одинаковых затратах активных материалов [1].

Расчетная методика для определения электромаг-

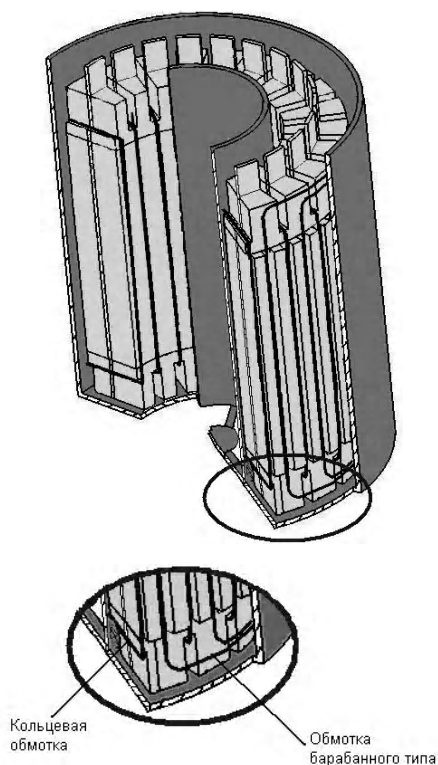


Рис. 1. Схема расположения обмоток в активной части ПЭМП  
© Н. Н. Заблодский, А. В. Лупанов 2010 г.

нитного момента была предложена ранее, однако математическая модель электромагнитного поля в торцевых зонах ПЭМП для уточнения оценки вращающего электромагнитного момента еще не применялась [2, 3]. Поэтому на сегодняшний день целесообразным является создание двумерной модели, которая обеспечит достаточную для инженерной практики точность и вычислительную эффективность, что является актуальным при проектировании новых и модернизации существующих исполнений ПЭМП. Для моделирования применяется пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics 3.4, использующий численные методы конечных элементов для решения полевых задач.

Особенностью электромагнитных процессов в торцевых зонах ПЭМП является то, что радиальное распределение поля (векторного магнитного потенциала, магнитной индукции и др.) определяется геометрией зубцовой зоны, в том числе переменной шириной зубца. Поэтому расчет поля можно выполнить в нескольких сечениях, а затем аппроксимировать (интерполировать) данные для получения зависимостей распределения этих величин в объеме торцевых зон. При этом точность расчета можно регулировать количеством расчетных сечений.

Для приближенного анализа достаточно ограничиться расчетом поля в трех наиболее характерных сечениях: на уровне поверхности внутреннего статора, в среднем сечении статора и на уровне поверхности внешнего статора. Это позволит значительно сократить время численной реализации математической модели на ЭВМ за счет уменьшения размерности массивов данных.

В общем виде дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала имеет следующий вид [3]:

$$\frac{1}{\mu} \Delta \vec{A} - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma (\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{топ}}, \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность участков среды в пределах расчетной области;

$\vec{J}_{стор}$  – значение плотности тока, вызванной сторонними ЭДС;

$\vec{v}$  – скорость движения электропроводного тела относительно источника магнитного поля.

Источники поля в правой части уравнения (1) задаются сторонней плотностью тока в пазах статора, который синусоидально изменяется во времени и определяется в соответствии со схемой обмотки статора. Рассматриваемая математическая модель торцевой части двумерная, поскольку рассмотрение трехмерной модели осложнено длительным временем расчета и обработки математических операций вычислительной техникой.

В частности, если в пазах с проводниками фазы «А» мгновенное значение плотности тока достигнет заданного амплитудного значения  $|\vec{J}_{стор}|$ , то в пазах с проводниками фаз «В» и «С» соответствующие мгновенные значения будут равны  $|\vec{J}_{стор}/2|$  и т. д. Величина эквивалентной плотности тока в пазу статора рассчитывается по следующему выражению:

$$J_{max} = I\sqrt{2}w_{II}/S_{II}, \quad (2)$$

где  $I$  – действующее значение тока обмотки статора;  
 $w_{II}$  – число последовательно соединенных элементарных проводников в пазу;

$S_{II}$  – площадь сечения паза статора.

По данным расчета векторного магнитного потенциала, используя соотношение

$$\vec{B} = rot \vec{A},$$

можно найти составляющие вектора магнитной индукции в характерных сечениях:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, \quad B_y = -\partial A_z / \partial x. \quad (3)$$

Уравнение (1) дополняется граничными условиями – значением векторного магнитного потенциала или его нормальной производной на внешних границах расчетной области, отображающей активную зону ПЭМП. Такими границами для ПЭМП являются внешние поверхности внешнего и внутреннего коаксиальных роторов. Обычно на этих поверхностях задаются однородные граничные условия первого рода:

$$\vec{A}(x, y, t)|_{G1} = 0. \quad (4)$$

Задание граничного условия (4) эквивалентно принятию допущения об отсутствии магнитных потоков рассеяния во внешнее пространство через рассматриваемые границы.

При решении нестационарного полевого уравнения (1) необходимо задать начальные условия – значения искомой функции внутри области в начальный рас-

четный момент времени  $t_0$ :

$$\vec{A}(x, y, t)|_{t=t_0} = \vec{A}_0(x, y, t_0). \quad (5)$$

При анализе характерных для ПЭМП динамических процессов, например пуска, обычно задается однородное начальное условие  $A_0(x, y, t_0) = 0$ .

Для определения индуцированной в роторе плотности тока может быть использовано выражение, следующее из уравнений Максвелла для области характерного сечения:

$$J_z = rot_z H = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (6)$$

Картина расчетного распределения плотности индуцированных токов в сегменте торцевой зоны ПЭМП представлена на рис. 2.

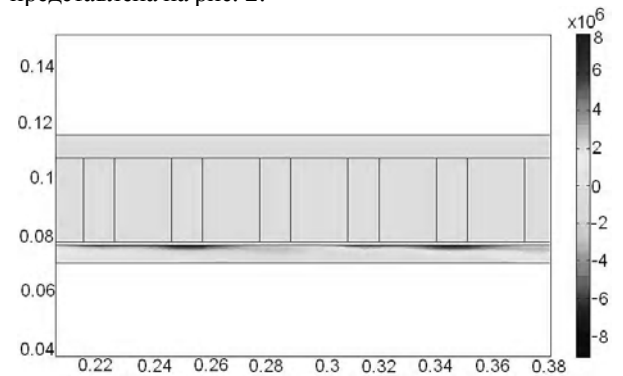


Рис. 2. Картина распределения плотности индуцированных токов в характерном сечении сегмента торцевой зоны ПЭМП

Значения векторного магнитного потенциала используются в дальнейшем при расчете магнитной индукции (рис. 3) и электромагнитного момента.

Поскольку торцевых зон две, то среднее значение результирующего электромагнитного момента двух торцевых частей ПЭМП определяется соотношением:

$$M_{торц} = 4p \int_0^{\tau} B_m \cdot I_{2m} \cdot \sin(p\varphi - \psi) \times \times \left( \frac{D_2 - D_1}{4} \right) d\varphi, \quad (7)$$

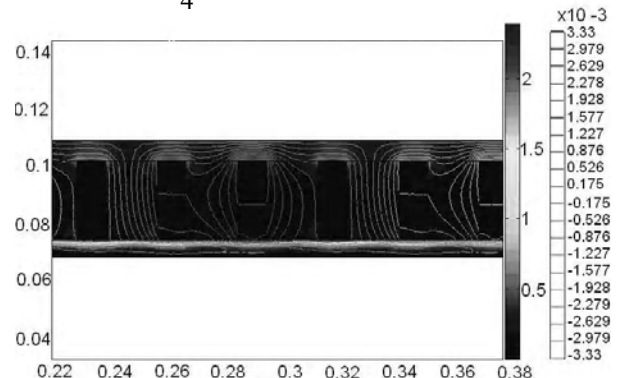


Рис. 3. Картина распределения магнитной индукции и векторного магнитного потенциала в характерном сечении сегмента торцевой зоны ПЭМП

где  $p, \tau$  – соответственно число пар полюсов и полюсное деление;

$B_m$  – амплитудное значение магнитной индукции;  
 $I_{2m}$  – амплитудное значение тока ротора;  
 $\varphi$  – угловая координата;  
 $\Psi$  – начальный фазовый сдвиг гармоники тока.

Расчетная активная длина лобовых частей кольцевой обмотки при наружном  $D_2$  и внутреннем  $D_1$  диаметрах совмещенного статора составляет  $l_{\text{на}} = (D_2 - D_1)/2$ .

Расчет электромагнитного момента ПЭМП можно также провести, применяя встроенные функции пакета COMSOL Multiphysics 3.4 и используя проекции тензора натяжения на оси системы координат. При этом электромагнитный момент рассчитывается интегрированием тангенциальной составляющей вектора тензора магнитного натяжения  $T_\tau$  по следующему выражению [3]:

$$M_{EM} = 2 \cdot p \cdot F_\tau \cdot R_\delta = 2 \cdot p \cdot R_\delta \int_0^\tau T_\tau \cdot dl = \frac{2 \cdot p \cdot R_\delta}{\mu_0} \int_0^\tau B_n \cdot B_\tau \cdot dl, \quad (8)$$

где  $F_\tau, T_\tau$  – тангенциальные составляющие электромагнитной силы и тензора магнитного натяжения;

$R_\delta$  – радиус воздушного зазора;

$B_n, B_\tau$  – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в воздушном зазоре;

$p$  – число пар полюсов;

$\tau$  – полюсное деление.

При определении электромагнитного момента численным методом и его расчете с использованием аналитического выражения и данных моделирования электромагнитного поля, расхождение соответствующих значений не превысило 1%, что обусловлено изменением вычислительной погрешности из-за разной разрядности данных и округления результатов. При сравнении результатов расчета вращающих моментов, полу-

ченных при моделировании электромагнитного поля в торцевых зонах ПЭМП, с экспериментальными данными относительная погрешность не превысила 12 %, что является допустимым для инженерных расчетов и свидетельствует об адекватности математической модели, приемлемой точности результатов ее численной реализации.

## Вывод

Математическое моделирование нестационарных электромагнитных процессов в формулировках векторного магнитного потенциала в характерных сечениях торцевой зоны ПЭМП с использованием методов конечных элементов, реализованных в структуре средств COMSOL Multiphysics, обеспечивает достоверную оценку вращающих моментов для погружных электро-механических преобразователей, достаточную для практических инженерных задач точность и снижение затрат времени для этих расчетов.

## Список литературы

1. Заблодский Н. Н. Эффективность применения кольцевых обмоток в полифункциональных электротепломеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский, А. В. Лупанов, В. А. Квасов // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету : Наукові праці КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51). Ч. 1. – С. 67–69.
2. Заблодский Н. Н. Расчет электромагнитного момента полифункционального электро-механического преобразователя с применением численных методов / Н. Н. Заблодский, А. В. Лупанов // Сборник научн. трудов ДонГТУ. – Алчевск. – 2009. – № 28. – С. 403–407.
3. Васильковский Ю. М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.

Поступила в редакцию 28.09.09 г.

После доработки 22.01.10 г.

Заблодський М. М., Лупанов А. В. Оцінка рухомих моментів в торцевих зонах заглиблених електро-механічних перетворювачів методами теорії поля.

Запропоновано математичну модель розрахунку торцевих зон поліфункціонального заглибленого електро-механічного перетворювача (ПЕМП). Розглянуто картину магнітного поля торцевих зон статора, отримано картину розподілу індукованих струмів, розраховано електро-магнітний момент торцевих зон ПЕМП.

заглиблений електро-механічний перетворювач, торцеві зони, картина розподілу поля, електро-магнітний момент

Zablodsky N. N., Lupanov A. V. Torque at face area of stator of submersible electromechanical converter assessment by the field theory methods.

The mathematical model of submersible electromechanical converter (SEMC) end zones calculation is presented. Magnetic field distribution pattern of the stator end zones is considered, induced currents distribution pattern is obtained, and electromagnetic moment of SEMC end zones is calculated. submersible electromechanical converter, stator end zones, field distribution pattern, electromagnetic moment.