

УДК 621.313:621.318.122

Н. Н. Заблодский, д-р техн. наук,
В. Ю. Грицюк, канд. техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением. Применение магнитной жидкости в электромеханических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента на 8-10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, магнитожидкостное заполнение, массивный ротор, конечно-элементная модель, магнитная индукция, электромагнитный момент

N. Zablodskiy, ScD.,
V. Gritsyuk, PhD.

MODELLING OF PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL CONVERTERS WITH MAGNETIC-FLUID FILLING

Abstract. Showing the results of mathematical modeling of interconnected electromagnetic and thermal processes in electromechanical transducers with magnetic-fluid filling. Application of a magnetic fluid in electromechanical converters allow for an increase in the electromagnetic torque by 8-10 % due to lower magnetic resistance of the air gap.

Keywords: electromechanical converter, magnetic-fluid filling, massive rotor, finite element model, the magnetic induction, the electromagnetic torque

М. М. Заблодський, д-р техн. наук,
В. Ю. Грицюк, канд. техн. наук

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ З МАГНІТОРІДИННИМ ЗАПОВНЕННЯМ

Анотація. Наведено результати математичного моделювання взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів у електромеханічних перетворювачах з магніторідинним заповненням. Застосування магнітної рідини в електромеханічних перетворювачах дозволить забезпечити збільшення електромагнітного моменту на 8-10 % за рахунок зниження магнітного опору повітряного проміжку.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач, магніторідинне заповнення, масивний ротор, кінцево-елементна модель, магнітна індукція, електромагнітний момент

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Разумной альтернативой существующим комплексам переработки и разогрева вязких нефтепродуктов являются преобразователи погружного типа с вращающимся исполнительным органом и греющей поверхностью на базе полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) технологического назначения [1, 2]. На рис. 1 показан общий вид, а также активная часть предлагаемого преобразователя. В данном устройстве используется полый ферромагнитный коаксиальный ротор, выполняющий одновременно функции ротора асинхронного двигателя, нагревателя, исполнительного механизма и защитного корпуса. Разогреваемый материал выступает в двух качествах: механическая нагрузка для ротора, создаваемая силами вязкого трения; охлаждающая среда, которая омывает ротор и отбирает от него тепловую энергию. Ряд модификаций погружных преобразователей могут выполняться с заполнением внутреннего объема магнитной жидкостью (МЖ), служащей одновременно уплотняющим веществом и хладагентом.

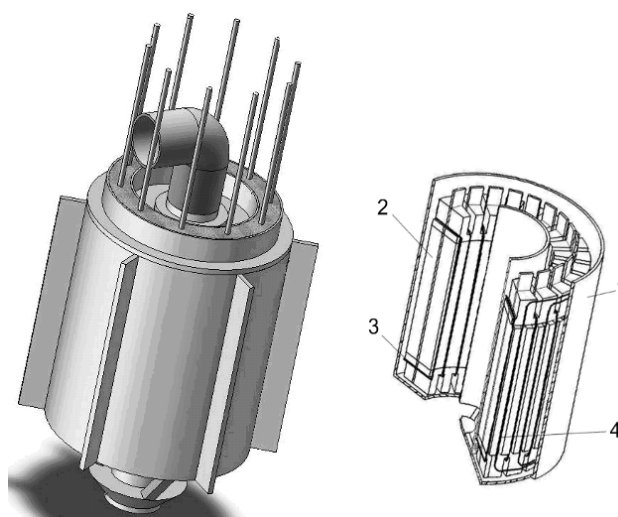


Рис. 1. Общий вид и активная часть погружного преобразователя:

- 1 – ферромагнитный коаксиальный ротор;
- 2 – пакет статора; 3 – кольцевая обмотка;
- 4 – обмотка барабанного типа

Магнитная жидкость представляют собой коллоидные растворы высокодисперсных магнитных частиц размером от 5 до 50 нм, находящихся в суперпарамагнитном, ферро- или ферримагнитном состояниях (частицы металлов, оксидов железа и пр.). Свойства МЖ определяются совокупностью характеристик входящих в нее компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которые можно в довольно широких пределах изменять параметры МЖ [3, 4].

Наличие МЖ с магнитной проницаемостью, превышающей на порядок магнитную проницаемость воздуха, уменьшает магнитное сопротивление для вращающегося магнитного потока и способствует уменьшению тока намагничивания и реактивной мощности, потребляемой из сети, то есть увеличению коэффициента мощности погружного электромеханического преобразователя. МЖ, имеющая коэффициент теплопроводности 0,21 Вт/(м·К), который превышает теплопроводность воздуха в 7 раз, обеспечивает более интенсивный теплообмен нагревательного устройства и лопастного перемешивательного узла и, соответственно, теплообмен с перерабатываемым материалом. Наряду с повышением надежности и долговечности, применение МЖ обеспечивает увеличение электромагнитного момента за счет снижения магнитного сопротивления зазора [5, 6].

Решение вопроса практической целесообразности применения МЖ требует количественной оценки методами теории поля, учитывающими особенности конфигурации активной части преобразователя.

Постановка задачи. Задачей данной работы является проведение математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением.

Изложение материала и его результаты. 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 [7].

Исходными данными для расчета электромагнитного поля АД являются геометрические параметры модели, напряжение питания, угловая частота вращения ротора, а также электрические и магнитные свойства материалов. Расчет электромагнитного поля произведен с учетом реальных линейных размеров активной зоны и обмоточных данных серийного АД (4АМ180М2).

В общем виде дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала \vec{A} имеет следующий вид:

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

где μ и γ – магнитная проницаемость и электропроводность участков среды в пределах расчетной области;

$\vec{J}_{\text{сноп}}$ – значение плотности сторонних токов; \vec{v} – скорость движения электропроводного тела относительно источника магнитного поля.

Источники поля задаются в качестве разности потенциалов на участках пазов статора согласно трехфазной схеме соединения обмотки. Основные свойства материалов расчетных областей модели АД, задаваемые как исходные данные, приведены в табл.1.

1. Свойства материалов расчетных областей

Область	Относительная магнитная проницаемость, μ_r	Удельная электропроводность, γ , См/м
Магнитопровод статора и ротора	Кривая намагничивания Ст. 2013	0
Область зазора, заполненного МЖ	8	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Обмотка	1	$5,8 \cdot 10^7$
Стержни ротора	1	$3,8 \cdot 10^7$

Уравнение электромагнитного поля дополняется граничными условиями – нулевым значением векторного магнитного потенциала или его нормальной производной на внешних границах расчетной области, отображающей активную зону АД [8]:

$$A(x, y, t) = 0. \quad (2)$$

Задание граничного условия (2) эквивалентно принятию допущения об отсутствии магнитных потоков рассеяния во внешнее пространство через рассматриваемые границы.

Для определения индуцированной в роторе плотности тока использовано выражение, вытекающее из первого выражения системы уравнений Максвелла,

$$J_z = \text{rot}_z H = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (3)$$

На рис. 2 представлено распределение магнитного поля в активной части серийного АД в виде изолиний векторного магнитного потенциала, а также распределение плотности тока в стержнях ротора при $s = 1$. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса АД, а также плотности тока по высоте стержня ротора двигателя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения (штриховая линия) показано на рисунках 3 и 4 соответственно. Сравнивая полученные в ходе расчета данные о распределении магнитной индукции в АД, а также распределении плотности тока в стержнях ротора, следует отметить, что использование МЖ привело к увеличению индукции в воздушном зазоре от 0,72 Тл до 1,3 Тл, а также увеличению значения плотности тока в пазах ротора на 7,5 %. Величина момента при номинальном скольжении ($s = 0,026$) возросла на 11 %, а пускового момента на 9 % в сравнении с АД без магнитожидкостного заполнения.

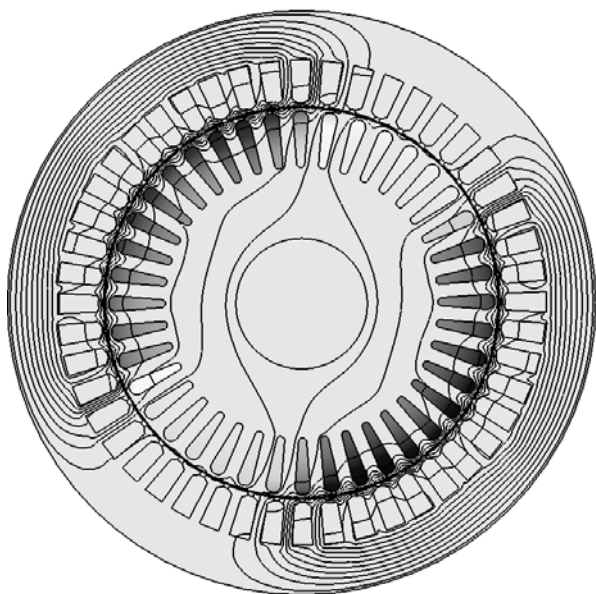


Рис. 2. Распределение векторного магнитного потенциала и плотности тока в стержнях АД с магнитожидкостным заполнением

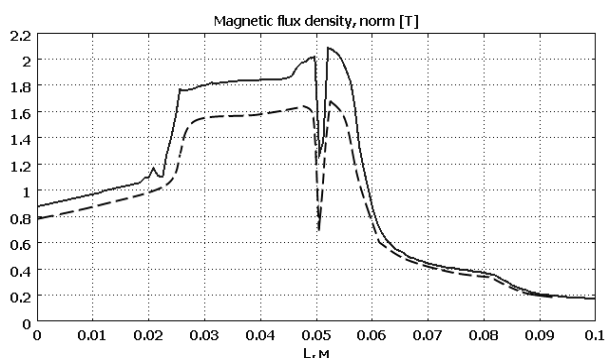


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса АД с магнито-жидкостным заполнением и без заполнения

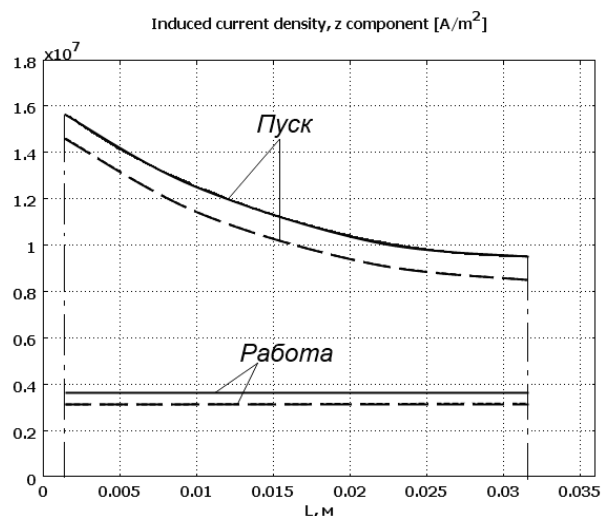


Рис. 4. Распределение плотности тока по высоте стержня ротора АД с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

Результаты расчета электромагнитного поля серийного асинхронного двигателя указывают на целесообразность применения МЖ в зазоре асинхронной машины классической конструкции.

Для асинхронных машин с массивным ротором учет взаимного влияния электромагнитного и теплового поля является особенно важным [1, 9]. Нагрев массивного ротора приводит к существенному изменению конфигурации токонесущего слоя, к изменению плотности тепловыделений и, соответственно, температуры. В каждой точке ротора удельные потери рассчитываются по выражению

$$Q = J_z^2 / \gamma(T), \quad (4)$$

где γ – электропроводность материала ротора, зависящая от температуры T по закону

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (5)$$

где γ_0 – электропроводность “холодного” ротора; T_0 , T – температура окружающей среды и температура материала ротора; α – температурный коэффициент

Дифференциальное уравнение теплового поля в частных производных относительно температуры T имеет следующий вид [10, 11]:

$$\lambda \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (6)$$

где λ, c, ρ – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; Q – удельные тепловые потери, рассчитываемые по выражению (4).

В декартовых координатах для двумерной картины поля уравнение (6) переписывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (7)$$

Взаимосвязь уравнений электромагнитного и теплового полей проявляется во взаимном влиянии температуры, электропроводности, плотности вихревых токов и удельных тепловых потерь. Также как и для уравнения электромагнитного поля для уравнения (7) задаются граничные и начальные условия. Выбор граничных условий обусловлен особенностями охлаждения ротора ПЭМП. При построении математической модели предполагается, что основная теплопередача в нагрузочно-охлаждающую среду выделившейся в активных элементах ПЭМП тепловой энергии осуществляется путем конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и нагрузочно-охлаждающей средой в жидком состоянии описывается выражением (8). Подобная теплопередача происходит в соответствии с законом Ньютона-Рихмана [10]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{k}{\lambda}(T - T_0), \quad (8)$$

где k – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура охлаждающего воздуха.

Граничное условие (8) задается на внешних поверхностях ротора. С физической точки зрения наиболее адекватным является предположение о передаче всех выделившихся в роторе джоулевых потерь жидкому материалу в виде теплового потока через поверхность. Кондуктивному теплообмену в твердом состоянии, соответствует граничное условие второго рода, которое задает среднюю величину теплового потока на границах расчетных областей ротора

$$q_1 \Big|_{G_1} \frac{1}{R_{2n1}} \int Q ds = \frac{1}{R_{2n1}} \int [J_{z1}^2 / (\gamma) T] ds$$

$$q_2 \Big|_{G_2} \frac{1}{R_{2n2}} \int Q ds = \frac{1}{R_{2n2}} \int [J_{z2}^2 / (\gamma) T] ds$$
(9)

где R_{2n1}, R_{2n2} – наружный радиус внешнего и внутреннего ротора; S – область интегрирования.

Для повышения точности математической модели внесены функциональные зависимости температурных коэффициентов активных материалов в зависимости от температуры $\alpha_{стали}(t)$, $\alpha_{меди}(t)$, зависимости магнитной проницаемости электротехнической стали от величины магнитной индукции $\mu(B)$, коэффициентов теплопроводности стали, воздуха, нагрузочно-охлаждающей среды в зависимости от температуры $k_{стали}(t)$, $k_{возд}(t)$, $k_{н.с.}(t)$.

Геометрия модели погружного ПЭМП представляет собой четверть поперечного сечения реальной восьмиполюсной конструкции. Конечно-элементная сетка модели представлена на рис. 5. В табл. 2 приведены основные свойства материалов для каждой расчетной области погружного ПЭМП, задаваемые как исходные данные.

2. Свойства материалов расчетных областей

Область	Относительная магнитная проницаемость, μ_r	Удельная электропроводность, $\gamma(T)$, См/м
Магнитопровод статора	Кривая намагничивания Ст. 2013	0
Области, заполненные магнитной жидкостью	8	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Массивный ротор	Кривая намагничивания Ст.3	$0,5 \cdot 10^7$
Обмотка	1	$5,8 \cdot 10^7$

На рисунках 6; 7 и 8 представлены результаты моделирования электромагнитного поля погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без заполнения (штриховая линия) в режиме стоянки под током. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в этом режиме магнитное поле проникает на небольшую глубину массива (2 – 3 мм) со стороны внутренней поверхности наружного и внутреннего цилиндров. При этом величина индукции в роторе достигает значений 2,1 – 2,2 Тл. Радиальная линия, вдоль которой построен график распределения нормальной составляющей магнитной индукции (рис. 7) проходит через участок внутреннего ферромагнитного ротора, воздушный зазор, зубцы и ярмо статора, а также через зазор и участок внешнего ротора.

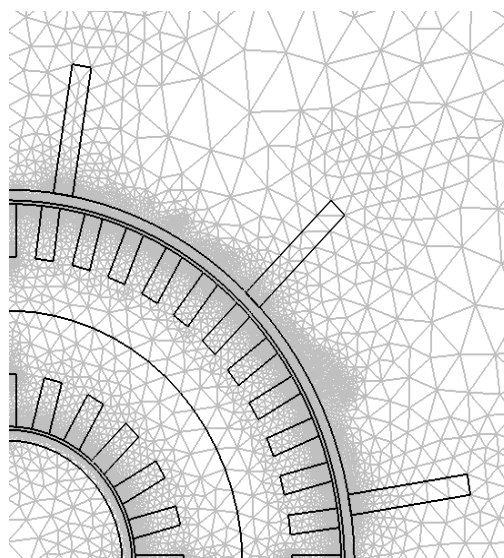


Рис. 5. Конечно-элементная сетка модели погружного преобразователя

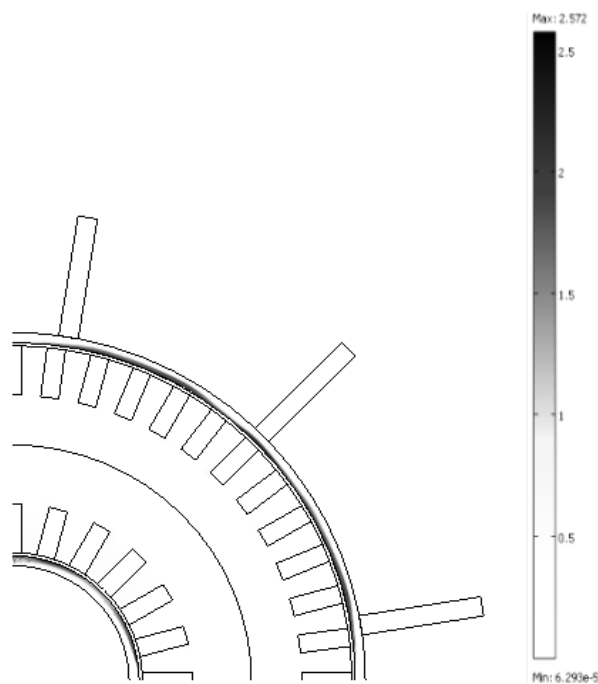


Рис. 6. Картина распределения нормальной составляющей магнитной индукции в активной части погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

Результатом расчета электромагнитной задачи является величина мощности тепловых потерь, использованная для расчета картины теплового поля погружного преобразователя, а также данные по распределению магнитной индукции и вихревых токов в роторе, использованные для расчёта величины электромагнитного момента. Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением показана на рис. 9. Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне удельных тепловыделений в активной части погружного преобразователя.

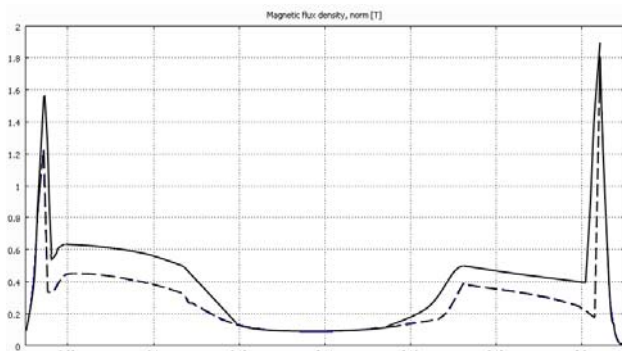


Рис. 7. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

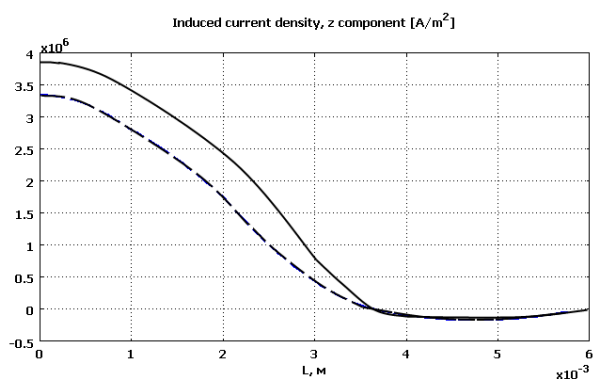


Рис. 8. Распределение плотности тока по глубине массивного ротора погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

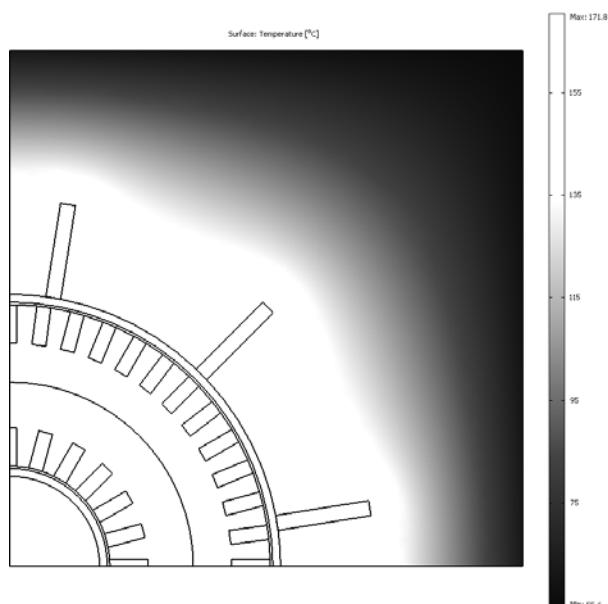


Рис. 9. Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

Главными источниками тепловыделений за счет протекающих вихревых токов являются внешний и внутренний цилиндры ферромагнитного ротора. Температура на их поверхности в режиме стоянки под током достигает значения 160 – 170 °С. Температура

разогреваемой среды вблизи поверхности ротора – 145 – 155 °С. Вместе с тем, данные расчета величины электромагнитного момента свидетельствуют о том, что результирующее значение момента для двух цилиндрических частей ротора погружного преобразователя возрастает на 9 % (156 Н·м) в сравнении с вариантом без магнитожидкостного заполнения (143 Н·м).

Выводы. В работе методом конечных элементов проведено математическое моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением. Получены зависимости распределение магнитной индукции и плотности тока в активной части электромеханических преобразователей с магнитожидкостным заполнением. Результаты расчета электромагнитного поля серийного асинхронного двигателя указывают на целесообразность применения МЖ в зазоре асинхронной машины классической конструкции. Применение МЖ в электромеханических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента на 8 – 10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора.

Список использованной литературы

1. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: Монография / Н. Н. Заблодский – Алчевск : ДонГТУ, 2008. – 340 с.
2. Патент 39226 Украины, МКІ 7 H05B6/10. Погружной электронагреватель / Н. Н. Заблодский, В. И. Веремеенко, В. М. Бондарев. № 98031637; Заявл. 31.03.1998; Опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5. – 6 с.
3. Макаров В. М. Переработка железосодержащих отходов с получением наночастиц для изготовления магнитной жидкости / В. М. Макаров, С. З. Каляева, А. М. Шипилин // *Нанотехника*, 2004. – № 12. – С. 66 – 69.
4. Scherer C., and Figueiredo Neto A.M., (2005), *Ferrofluids: Properties and Applications*, *Brazilian J. Phys.* V. 35, pp. 718 – 727.
5. Лавров А. Г. Магнитное поле и параметры асинхронного двигателя с магнитожидкостным заполнением / А. Г. Лавров, А. В. Щукин // *Электротехника*, 1988. – № 10. – С. 7 – 10.
6. Аврамчук А. З. Свойства и перспективы применения феррожидкостей в электромашиностроении / А. З. Аврамчук, Ю. О. Михалев, Д. В. Орлов и др. // *Электротехническая промышленность. Электрические машины*. – 1981. – № 2. – С. 1 – 3.
7. Дегтярева Е. Л. Исследование механических характеристик электрической машины с массивным ферромагнитным ротором / Е. Л. Дегтярева, Л. А. Потапов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1998. – № 2. – С. 23 – 27.
8. Степанов А. Е. Моделирование электромагнитных полей в электротехнических устройствах / А. Е. Степанов, Р. А. Сикора. – К. : Щецин, Техника, 1990. – 190 с.

9. Васьяковский Ю. Н. Полевой анализ электрических машин / Ю. Н. Васьяковский. – К. : НТУУ «КПИ», 2007. – 191 с.

10. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1969. – 440 с.

11. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 255 с.

Получено 03.07.2014

References

1. Zablodsky N.N. Polifunktsionalnye elektromekhanicheskie preobrazovateli tehnologicheskogo naznacheniya [Polyfunctional Electromechanical Converters Technological Purpose], (2008), *Monografiya*, Alchevsk, Ukraine, 340 p. (In Russian).

2. Pat. 39226 Ukraine, МПК H05B 6/10. Submersible Electric Heater [Zablodskiy N.N., Veremeenko V.I., and Bondarev V.M.; Applicant and Patentee Donbas's State Technical University, No. 98031637; Declared 31.03.1998; Published 15.06.2001, Bul. No. 5 (In Russian)].

3. Makarov V.M., Kalaeva S.Z., and Shipilin A.M. Pererabotka zhelezosoderzhaschih othodov s polucheniem nanochastits dlya izgotovleniya magnitnoy zhidkosti [Processing Wastes to Produce iron Nanoparticles for Manufacturing Magnetic Fluid], (2004), *Nanotehnika*, Vol. 12, pp. 66 – 69 (In Russian).

4. Scherer C., and Figueiredo Neto A.M., (2005), Ferrofluids: Properties and Applications, *Brazilian J. Phys.*, V. 35, pp. 718 – 727 (In English).

5. Lavrov A.G., and Shchukin A.V. Magnitnoe pole i parametry asinhronnogo dvigatelya s magnitnozhidkostnym zapolneniem [Magnetic Field and the Parameters of Induction Motor with Magnetic Fluid Filling], (1988), *Elektrotehnika*, Vol. 10, pp. 7 – 10 (In Russian).

6. Avramchuk A.Z., Mikhalev Y.O., and Orlov D.V. Svoystva i perspektivy primeneniya ferrozhidkostey v elektromashinostroenii [Properties and Prospects of Ferrofluids in Electrical], (1981), *Elektrotehnicheskaya Promyshlennost. Elektricheskie Mashiny*, Vol 2, pp. 1 – 3 (In Russian).

7. Degtyareva E.L., and Potapov L.A. Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik elektricheskoy mashiny s massivnym ferromagnitnym rotorom [Study the Mechanical Characteristics of the Electric Machine with a Massive Ferromagnetic Rotor], (1998), *Izv. Vuzov. Elektromekhanika*, Vol 2, pp. 23 – 27 (In Russian).

8. Stepanov A.E., and Sikora R.A. Modelirovanie elektromagnitnykh poley v elektrotehnicheskikh ustroystvakh [Simulation of Electromagnetic Fields in Electrical Devices], (1990), Kiev, Ukraine, *Tehnika*, 190 p. (In Russian).

9. Vaskovsky Yu.N. Polevoy analiz elektricheskikh mashin [Field Analysis of Electric Machines], (2007), NTU “KPI”, Ukraine, 191 p. (In Ukrainian).

10. Isachenko V.P., Osipova V.A., and Sukomel A.

S. Teploperedacha [Heat Transfer], (1969), Moscow, Russian Federation, *Energiya*, 440 p. (In Russian).

11. Filippov I.F. Teploobmen v elektricheskikh mashinakh [Heat Transfer in Electrical Machines], (1986), *Energoatomizdat*, 255 p. (In Russian).



Заблодский
Николай Николаевич,
д-р техн. наук, проф., зав.
каф. электрических машин и
аппаратов Донбасского
государственного техниче-
ского ун-та.
94204, Луганская обл.,
г. Алчевск, ул. Белинского 11,
кв. 28.
Тел.: +38 050 68 69 956.
E-mail: info@dmmi.edu.ua



Грицюк
Владимир Юрьевич,
канд. техн. наук, ст. преп.
каф. электрических машин
и аппаратов Донбасского
государственного техниче-
ского ун-та.
94204, Луганская обл.,
г. Алчевск, ул. Гагарина 35-б,
кв. 50.
Тел.: +38 099 94 85 433.
E-mail: Grits.86@mail.ru