

Н. Н. ЗАБЛОДСКИЙ, В. Ю. ГРИЦЮК, П. Б. КЛЕНДИЙ, Д. С. СОРОКИН

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ В ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Наведено результати математичного моделювання взаємозв'язаних електромагнітних і теплових процесів в заглибних електромеханічних перетворювачах з магніторідним заповненням. Отримано механічні характеристики, залежності розподілу магнітної індукції та густини вихрового струму в активній частині заглибного перетворювача. Застосування магнітної рідини в електромеханічних перетворювачах дозволить забезпечити збільшення електромагнітного моменту на 8-10 % за рахунок зниження магнітного опору повітряного зазору, а також поліпшити умови теплообміну з навколишнім середовищем.

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

Приведены результаты математического моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в погружных электро-механических преобразователях с магнито-жидкостным заполнением. Получены механические характеристики, зависимости распределения магнитной индукции и плотности вихревого тока в активной части погружного преобразователя. Применение магнитной жидкости в электро-механических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента на 8-10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора, а также улучшить условия теплообмена с окружающей средой.

Ключевые слова: электро-механический преобразователь, магнито-жидкостное заполнение, массивный ротор, конечно-элементная модель, магнитная индукция, электромагнитный момент.

Results of mathematical modeling of interrelated electromagnetic and thermal processes in submersible electromechanical converters with magneto-liquid filling are presented. A number of modifications of submersible electromechanical transducers are performed with the filling of the internal volume with a magnetic fluid serving simultaneously as a sealant agent and a refrigerant. Mechanical characteristics are obtained, the dependences of the distribution of magnetic induction and the density of the eddy current in the active part of the submerged converter. The use of a magnetic fluid in electromechanical converters will provide an increase in the electromagnetic torque by 8-10 % due to a decrease in the magnetic resistance of the air gap, and also improve the conditions for heat exchange with the surrounding medium.

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

Введение. Магнитная жидкость (МЖ) – коллоидная наносистема, находящаяся в суперпарамагнитном, ферро- или ферримагнитном состояниях. Свойства МЖ определяются совокупностью характеристик входящих в нее компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которыми можно в довольно широких пределах изменять параметры МЖ [1, 2]. Развитие исследований в этом направлении осуществлялось при рассмотрении процессов релаксации магнитного момента однодоменных частиц и учета их взаимодействия [3-5]. Одним из параметров, исследование которого позволяет провести анализ проявления этих процессов, является магнитная восприимчивость, а особо ценным результатом является экспериментально обнаруженный максимум температурной зависимости восприимчивости. Его наличие в [6] было объяснено потерей ориентационных степеней свободы магнито-жестких однодоменных частиц при затвердевании дисперсионной среды. Необходимо подчеркнуть, что в большинстве работ, посвященных этому вопросу, исследовались магнитные жидкости на основе керосина с дисперсными частицами магнетита, переход которых в твердое состояние происходит при очень низких температурах. Исследование динамической магнитной восприимчивости и кривых намагничивания в широком температурном интервале (от 77 до 380 °К) проведено в работе [7]. Ряд модификаций погружных электро-механических преобразователей (ПЭМП) могут выполняться с заполнением внутреннего объема МЖ, служащей одновременно уплотняющим веществом и хладагентом [8]. Характерным для МЖ является наличие эффекта увлечения (перемещения) ее магнитным и электромагнитным полем, в том числе и вращающимся. Это обстоятельство позволяет

при использовании МЖ в качестве теплоносителя системы охлаждения, например, асинхронного электродвигателя, исключить специальные нагнетательные устройства, используемые для чисто жидкостных систем охлаждения [9].

Постановка задачи. Целью работы является качественная и количественная оценка применимости магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электро-механических преобразователях для улучшения механических и энергетических характеристик, а также условий теплообмена.

Материал и анализ исследований. Для рассмотрения взят ПЭМП, используемый в технологических процессах анаэробного брожения для перемешивания субстрата. На рис. 1 показана схема размещения ПЭМП в метантенке. В состав оборудования для автоматического управления процессом анаэробного брожения входит ПЭМП 1 для перемешивания субстрата, совмещенный с индукционным нагревателем биомассы и выполненный в виде двух статоров 2, 3, расположенных на вертикальной полой оси 4 и подключенных к полупроводниковому преобразователю напряжения (не показан), а также полого ферромагнитного ротора 5, на котором жестко закреплена шнековая мешалка 6 с полыми лопастями 7. Внутренняя полость ферромагнитного ротора и лопасти мешалки заполнены МЖ на основе парафина 8, выполняющей одновременно функции теплоаккумулирующего материала. ПЭМП установлен в теплоизолированный резервуар 9, который имеет штуцер отвода биогаза 10, дно 11 и бункер загрузки 12. Во внутренней полости ПЭМП расположены бесконтактный тахометр 13 и бесконтактный датчик температуры 14 ротора.

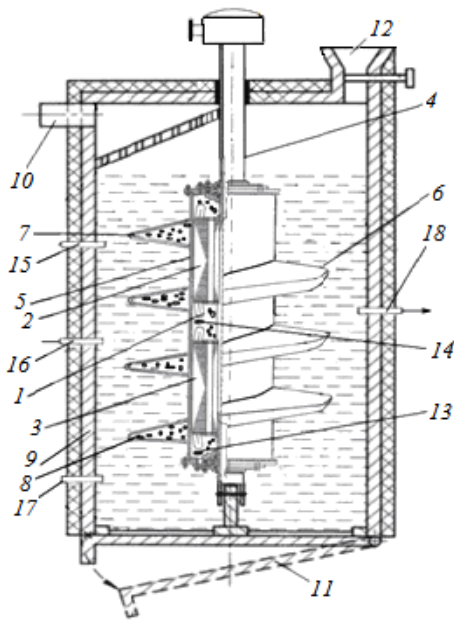


Рис. 1 – Схема размещения ПЭМП в метантенке

В стенках теплоизолированного резервуара смонтированы первый, второй и третий датчики температуры 15, 16, 17 для измерения температуры субстрата в трех слоях по высоте резервуара, а также датчик окислительно-восстановительного потенциала 18. Все датчики подключены к контроллеру, а управление полупроводниковым преобразователем напряжения осуществляется с помощью системы фазоимпульсного управления (не показаны).

Биомасса загружается через бункер загрузки 12. С помощью ПЭМП субстрат смешивается и равномерно прогревается. От источника переменного тока подается питание к полупроводниковому преобразователю напряжения и, в зависимости от сформированного микроконтроллером и системой фазоимпульсного управления закона регулирования, на индукторы 2, 3 подается напряжение соответствующей амплитуды и частоты. Переменные вращающиеся магнитные поля индукторов возбуждают вихревые токи в полой ферромагнитном роторе 6, осуществляя нагрев последнего, при этом осуществляется запасание тепла в теплоаккумулирующей МЖ, содержащейся в полых лопастях шнековой мешалки и внутренней полости ПЭМП. Одновременно от взаимодействия вращающегося магнитного поля и вихревых токов создается электромагнитный момент, приводящий во вращение полой ферромагнитный ротор и шнековую мешалку 7. При подключении к обмотке статора 2 трехфазной системы напряжений частотой f_1 образуется вращающееся $2p_d$ – полюсное магнитное поле Φ_d , под действием которого в полой ферромагнитном роторе протекают вихревые токи, создается асинхронный момент и ротор вращается с частотой $n_p = n_1(1 - s_d)$, где $n_1 = \frac{60f_1}{p_d}$; s_d – скольжение. Частота токов в роторе

$f_{2d} = f_1 s_d$. При подключении трехфазной системы напряжений к обмотке статора 3 образуется $2p_T$ – полюсное магнитное поле, характеризующееся потоком

Φ_T , которое наводит на соответствующем участке полого ферромагнитного ротора ЭДС с частотой

$$f_2 = \left[\frac{p_T}{p_d} (1 - s_d) \pm 1 \right]. \quad (1)$$

Знак «+» в (1) соответствует встречному, а «-» – согласованному вращению полей Φ_d и Φ_T . Результирующий момент определяется только электромеханическими и тепловыми процессами:

$$M_{pi} = M_{дв} + M_{Ti} = \left[(i_{2d}')^2 \cdot \frac{R_{2d}'}{s_d} - (i_{2T}')^2 \cdot \frac{R_{2T}'}{2 - s_d} \right] \cdot \frac{m \cdot p}{\omega_{pi}}, \quad (2)$$

где i_{2d}' , i_{2T}' , R_{2d}' , R_{2T}' , ω_{pi} – текущие значения наведенного тока и активного сопротивления ротора соответственно для участков каждого из статоров 2, 3, а также значение угловой скорости полого ферромагнитного ротора; M_{2d} , M_{2T} – текущие значения электромагнитных моментов, созданных статорами; m , p – соответственно число фаз и число пар полюсов в статорах. В общем случае статоры 2, 3 могут иметь различные значения m и p .

От частоты вихревых токов на соответствующих участках полого ферромагнитного ротора зависит глубина проникновения и энергия электромагнитного поля. Таким образом, становится возможным регулирование скорости, интенсивности тепловыделений, а также осуществление реверсивного режима вращения полого ферромагнитного ротора и, соответственно, шнековой мешалки для создания благоприятных условий анаэробного процесса как в мезофильном, так и в термофильном режимах и увеличения доступной для ферментов удельной площади при механической активации субстрата. На внешней поверхности полого ферромагнитного цилиндра действует также низкочастотное магнитное поле, амплитуда которого может регулироваться в пределах от 25 до 50 мТл, а частота – от 8 до 55 Гц, подачей на статоры 2, 3 квазичастотного напряжения от частотного регулятора. Бактерии наиболее активны в средней зоне. Поэтому содержание резервуара необходимо периодически перемешивать, желательно до шести раз в сутки. Субстрат в резервуаре перемешивают с целью достижения таких эффектов: перемешивание свежего субстрата с переработанным с целью переселения и размножения в новом материале активных бактерий; распределение тепла с целью удержания насколько возможно равномерного распределения температуры в резервуаре; предотвращения или разрушения корки или осадка.

Для контроля и управления параметрами анаэробного брожения в биореакторе одновременно измеряются с помощью бесконтактного тахометра 13, датчиков 14–18 соответственно скорость вращения шнековой мешалки, температура ротора, температура субстрата в трех слоях по высоте теплоизолированного резервуара, кислотно-щелочной баланс субстрата. Информация от датчиков и тахометра с помощью устройств сопряжения передается в микроконтроллер, в котором в соответствии с заложенной программой с

помощью частотного регулятора происходит управление включением и скоростью вращения ПЭМП, а также передачей дополнительной тепловой энергии путем изменения глубины проникновения вращающегося магнитного поля в полый ферромагнитный ротор и соотношений электромагнитных моментов. Кислотно-щелочной баланс субстрата регулируется изменением интенсивности и частоты магнитного поля на внешней поверхности полого ферромагнитного ротора, а стабильность температурного поля субстрата в паузах между включениями ПЭМП поддерживается за счет тепловой энергии, запасенной теплоаккумулирующим материалом 8. К ограничивающим условиям отнесена максимальная температура внешней поверхности полого ферромагнитного ротора, которая не должна превышать 60°C по условиям жизнедеятельности метановых анаэробных бактерий.

Теплоаккумулирующий материал рекомендуется выбирать с температурой фазового перехода 62–70°C и удельной энтальпией плавления не ниже 200 Дж/г. Программа микроконтроллера предусматривает преобладающее количество включений ПЭМП с повышенной тепловой и механической мощностью только в периоды действия ночного тарифа по электроэнергетики. В дневной период, при необходимости включения, потребляемая мощность ПЭМП уменьшается до уровня, который обеспечивает в основном механические потери на перемешивание, а основная часть тепловой энергии покрывается за счет запасенного тепла теплоаккумулирующего материала.

Визуализация движения МЖ в зоне лобовых частей статоров осуществлялась с помощью специальных трассеров в объеме МЖ и видеосъемки через окна в подшипниковых щитах ПЭМП. Круговое движение массива МЖ начинается с некоторым запаздыванием γ во времени от момента включения. При этом γ и частота вращения массива МЖ являются сложными функциями тока статора, скорости магнитного поля, температуры МЖ и направления вращения ротора по отношению к магнитному полю соответствующего статора. При восьмиполюсной магнитной системе статоров, работающих в режиме противовключения, частота вращения массива МЖ составляет 20–22 об/мин, а при питании от тиристорного регулятора напряжения с квазичастотным управлением на рабочей частоте 10 Гц – 4 об/мин. Круговое движение массива МЖ позволяет избежать инконгруэнтного характера плавления, в результате которого происходит расслаивание твердой и жидкой фаз с выпадением в осадок наночастиц, уменьшение энтальпии фазового перехода с ростом числа циклов "плавление-кристаллизация" и снижение эффективности теплообмена. Кроме того, проблема низкой теплопроводности парафина частично решается именно наличием наночастиц МЖ.

Для оценки влияния частоты питающего напряжения на агрегатирование наночастиц с помощью оптического микроскопа проведены наблюдения на тонких слоях МЖ при воздействии вращающегося поля, созданного на физической модели торцевого двухполюсного статора. Амплитудные значения напряженности магнитного поля зафиксированы на уровне 2,6 кА/м. На рис. 2, а, б показаны структуры

массивов наночастиц при воздействии вращающегося магнитного поля. Экспериментальные исследования показали, что при воздействии вращающегося магнитного поля в МЖ происходит формирование упорядоченных структур, при этом характер возникающих структур зависит от частоты вращающегося поля.

При низких частотах вращающегося поля мелкие массивы выстраиваются по полю перпендикулярно слою, а более крупные формируют сложные волнистые структуры. Увеличение частоты приводит к разбиению массивов на более мелкие, которые ориентированы по направлению поля.

Учитывая то обстоятельство, что в МЖ использован термоаккумулирующий материал, важно провести оценку процессов интенсификации теплообмена ПЭМП и изменения магнитной восприимчивости в циклах "плавление-кристаллизация" МЖ. Анализ температурных зависимостей магнитной восприимчивости образцов МЖ на основе парафина, представленных в работе [7], позволяет утверждать, что особенности изменения магнитной восприимчивости действительно могут быть связаны с затвердеванием основы и блокировкой броуновских степеней свободы магнитожестких частиц.

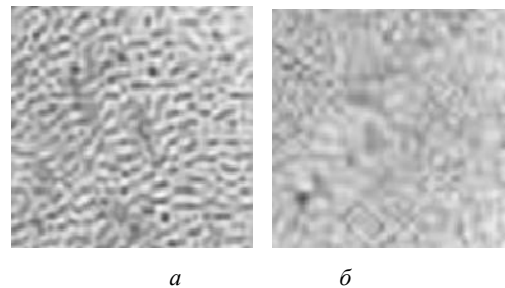


Рис. 2 – Структурные образования массивов наночастиц МЖ при квазичастотном регулировании напряжения с рабочими частотами: а – 10 Гц; б – 15 Гц

Об этом может свидетельствовать острый экстремум на температурной зависимости магнитной восприимчивости, наблюдающийся при температуре, соответствующей плавлению дисперсионной среды (парафина), при этом максимум смещается в область более высоких температур при увеличении частоты магнитного поля. Таким образом, зоны реальных рабочих температур ПЭМП соответствуют диапазону повышенных значений магнитной восприимчивости МЖ и эффективному ее участию в улучшении магнитной проводимости зазора и области лобовых частей.

Охлаждение магнитной жидкостью, вращающейся совместно с магнитным полем ведет к значительному снижению температуры активных частей ПЭМП в сравнении с внутренним естественным воздушным охлаждением. Представляет интерес использование скрытой теплоты плавления парафиновой основы МЖ в качестве способа интенсификации отвода тепла в погружном ПЭМП. Как известно, в асинхронных двигателях с массивным ротором интенсивного охлаждения требует в первую очередь обмотка статора. В качестве хладагентов желательнее использовать вещества, температура плавления которых находится в

диапазоне 40–90 °С. Это позволяет эффективно осуществлять отвод тепла от обмотки не только за счет скрытой теплоты плавления, но и за счет теплоемкости хладагента в твердой и жидкой фазах. Нефтяные парафины отличаются от других легкоплавких веществ высокой теплоемкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, инертностью по отношению к контактируемым материалам. Проведенные измерения средних превышений температуры пазовых и лобовых частей статоров при неподвижном роторе показали, что скорость нарастания температуры в лобовых частях в 2,2 раза, а в пазовых – в 1,8 раза меньше для ПЭМП, заполненного МЖ на парафиновой основе, в сравнении с естественным воздушным охлаждением. Поскольку режим работы ПЭМП в биореакторе может быть отнесен кратковременному, то важным параметром является время достижения предельной для выбранного класса нагревостойкости температуры с момента включения напряжения. Результаты тепловых испытаний показали, что время работы ПЭМП в субстрате при мезофильном режиме брожения (40 °С) до допустимого перегрева обмоток статора (115 °С) с заполнением МЖ на основе парафина в 7,5 раз превышает время работы ПЭМП без заполнения МЖ.

Оценку взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов проведем еще на одной модификации погружного ПЭМП с внешним и внутренним массивным ротором.

Для асинхронных машин с массивным ротором учет взаимного влияния электромагнитного и теплового поля является особенно важным [10, 11]. 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

$$Q = J^2 / \gamma(T), \quad (3)$$

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

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (4)$$

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 [12, 13]:

$$\lambda \Delta T - cp \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (5)$$

где λ , c , p – соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; Q – удельные тепловые потери, рассчитываемые по выражению (3).

В декартовых координатах для двумерной картины поля уравнение (5) переписывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - cp \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (6)$$

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 (6) 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 (7). Подобная теплопередача происходит в соответствии с законом Ньютона-Рихмана [12]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{k}{\lambda} (T - T_0), \quad (7)$$

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

Граничное условие (7) 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 области ротора

$$q_1|_{G1} \frac{1}{R_{2i1}} \int_S Q ds = \frac{1}{R_{2i1}} \int_S [J_{z1}^2 / (\gamma) T] ds; \quad (8)$$

$$q_2|_{G2} \frac{1}{R_{2i2}} \int_S Q ds = \frac{1}{R_{2i2}} \int_S [J_{z2}^2 / (\gamma) T] ds,$$

где R_{2i1} , R_{2i2} – 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 $\alpha_{steel}(t)$, $\alpha_{cu}(t)$, зависимости магнитной проницаемости электротехнической стали от величины магнитной индукции $\mu(B)$, коэффициентов теплопроводности стали, воздуха, нагрузочно-охлаждающей среды в зависимости от температуры $k_{steel}(t)$, $k_{air}(t)$, $k_{load}(t)$.

Геометрия модели погружного ПЭМП представляет собой четверть поперечного сечения реальной восьмиполусной конструкции. Конечно-элементная сетка модели представлена на рис. 3. В табл. 1 приведены основные свойства материалов для каждой расчетной области погружного ПЭМП, задаваемые как исходные данные.

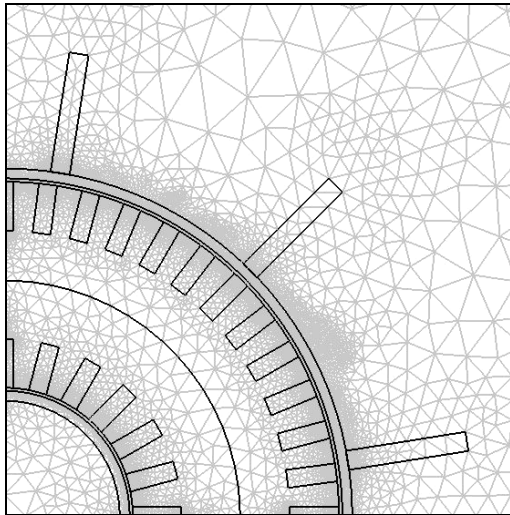


Рис. 3 – Конечно-элементная сетка модели погружного преобразователя

Таблица 1 – 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 рис. 4, 5 и 6 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. 5) проходит через участок внутреннего ферромагнитного ротора, воздушный зазор, зубцы и ярмо статора, а также через зазор и участок внешнего ротора.

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 расчета величины электромагнитного момента.

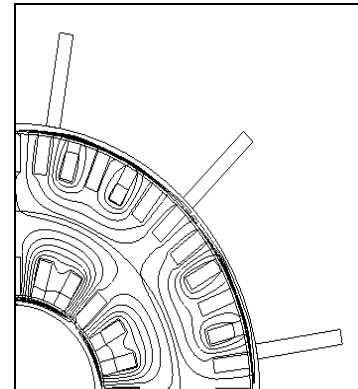


Рис. 4 – Картина распределения нормальной составляющей магнитной индукции и векторного магнитного потенциала в активной части погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

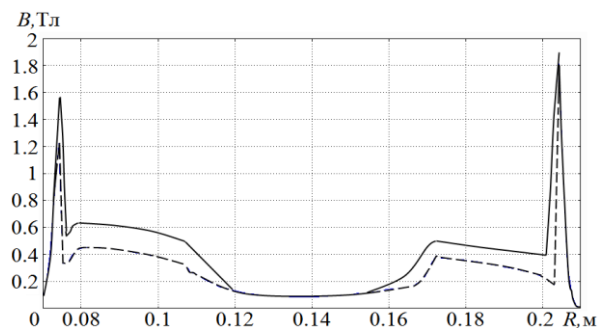


Рис. 5 – Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль радиуса погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

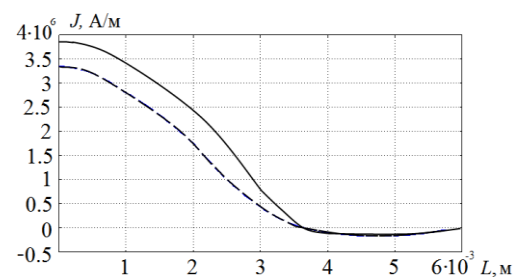


Рис. 6 – Распределение плотности тока по глубине массивного ротора погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением показана на рис. 7. Полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне удельных тепловыделений в активной части погружного преобразователя.

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.

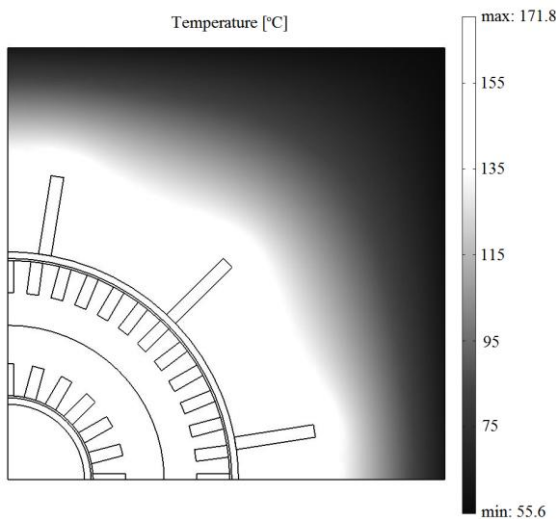


Рис. 7 – Картина теплового поля погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением

В соответствии с методом тензора магнитного натяжения, для определения электромагнитного момента, приложенного к ротору ПЭМП, последний следует охватить поверхностью S , расположенной в немагнитной среде на бесконечно малом расстоянии от ротора и ограничивающей его объем V [14].

Под силой натяжения T_n понимают силу, действующую извне на единицу поверхности S , внешняя нормаль к которой направлена по орту n . Если система натяжений T_n на поверхности S эквивалентна электромагнитной силе, действующей на объем V , то эту силу можно найти путем суммирования элементарных сил натяжения $T_n dS$.

$$\vec{F}_V = \int_V \vec{f}_V dV = \oint_S \vec{T}_n dS = \vec{q}_x F_x + \vec{q}_y F_y, \quad (9)$$

где q_x, q_y – расстояние от начала системы координат по осям x, y .

Составляющие электромагнитной силы по осям прямоугольной системы координат:

$$F_x = \oint_S T_{nx} dS, \quad F_y = \oint_S T_{ny} dS, \quad (10)$$

где T_{nx}, T_{ny} – компоненты вектора магнитного натяжения T_n по осям системы координат.

Выражение для определения силы натяжения на произвольно ориентированной в магнитном поле поверхности можно представить в виде

$$\vec{T}_n = \frac{1}{\mu} (\vec{B} B_n - 0,5 B^2 \vec{n}), \quad (11)$$

где B – вектор магнитной индукции в рассматриваемой точке поверхности S ;

B_n – нормальная составляющая магнитной индукции;

n – нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует натяжение T_n .

Суммируя элементарные моменты относительно начала системы координат найдем электромагнитный момент и его составляющие относительно осей x и y

$$\vec{M} = \oint_S [\vec{r} T_n] dS = \vec{q}_x M_x + \vec{q}_y M_y, \quad (12)$$

где r – радиус-вектор элемента поверхности S .

Электромагнитный момент погружного ПЭМП рассчитан с помощью функции *Torque*, использующей проекции тензора магнитного натяжения на оси системы координат. В специальной литературе указывается на возможность использования двух основных способов учета механической мощности в конечно-элементных моделях: с помощью моделей с неподвижной сеткой; с помощью моделей, имеющих подвижную сетку (*Moving mesh*), воспроизводящую вращение ротора. Необходимость предварительного измерения токов статора физической модели при каждом значении скольжения увеличивает трудоемкость первого способа определения механической характеристики. Постановка двумерной электромагнитной задачи с использованием в качестве исходных данных напряжения питания устраняет эту необходимость. Таким образом, каждая точка характеристики рассчитывалась как отдельный установившийся режим. Механические характеристики погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без заполнения (штриховая линия) представлены на рис. 8.

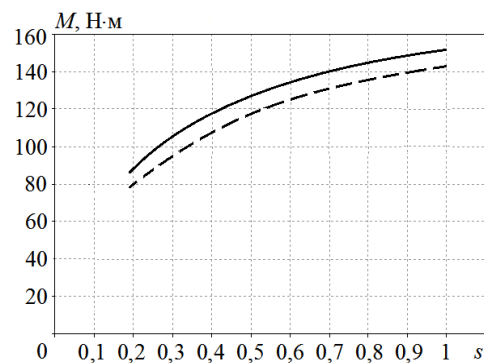


Рис. 8 – Механические характеристики погружного преобразователя с магнитожидкостным заполнением и без заполнения

Механические характеристики погружного ПЭМП с магнитожидкостным заполнением и без получили по результатам параметрических расчетов модели. Переменным параметром являлась угловая частота вращения ротора, выраженная через частоту напряжения питания. Значения электромагнитного момента для различных значений скольжения получены из решения уравнений квазистационарного электромагнитного поля. Данные расчета свидетельствуют о том, что результирующее значение момента для двух цилиндрических частей ротора погружного преобразователя в среднем возрастает на 8–10 % в сравнении с вариантом без магнитожидкостного заполнения.

Выводы. В работе методом конечных элементов проведено математическое моделирование взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических преобразователях с магнитожидкостным заполнением. Получены механические характеристики, зависимости распределения магнит-

ной индукции и плотности вихревого тока в активной части погружного преобразователя с магнитоожидкостным заполнением и без заполнения. Применение магнитной жидкости в электромеханических преобразователях позволит обеспечить увеличение электромагнитного момента в среднем на 8-10 % за счет снижения магнитного сопротивления воздушного зазора, а также улучшить условия теплообмена с окружающей средой.

Список литературы

1. Макаров В. М., Калаева С. З., Шипилин А. М. Переработка железосодержащих отходов с получением наночастиц для изготовления магнитной жидкости. *Нанотехника*. 2004. № 12. С. 66–69.
2. Scherer C., and Figueiredo Neto A. M., *Ferrofluids: Properties and Applications*, Brazilian J. Phys. 2005. V. 35. pp. 718–727.
3. Пшеничников А. Ф., Лебедев А. В. Магнитная восприимчивость концентрированных ферроколлоидов. *Коллоидный журнал*. 2005. Т 67. № 2. С 218–230.
4. Гладких Д. В., Диканский Ю. И., Балабанов К. А., Радионов А. В. О влиянии структурной организации на релаксацию магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости. *ЖТФ*. 2005. № 75, вып. 10. С. 139–142.
5. Adolphi N. et al. Characterization of magnetic nanoparticle by dynamic light scattering. *Phys. Med. Biol.* 2010. V 55, pp. 5985–6003.
6. Yoon S., *Journal of the Korean Physical Society*. 2011. V 59, 3069 p.
7. Диканский Ю. И., Испирян А. Г. и др. Особенности намагничивания магнитных коллоидных наносистем на парафиновой основе. Сб. тр. 16-й Междунар. Плесской научн. Конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. 2014. С. 22–30.
8. Заблодский Н. Н., Грицюк В. Ю. Мультиградиентность полей в массиве ротора шнекового электромеханического преобразователя. *Вісник Національного технічного ун-ту «ХПІ»*. Зб. наук. пр. Серія: Електричні машини та електро механічне перетворення енергії. Харків. НТУ «ХПІ». 2016. № 11(1183). С. 88–92.
9. Старовойтов В. А. Магнитоожидкостное охлаждение электрических машин. *Вестник Кузбасского госуд. техн. ун-та*. 2005. № 2(46). С. 20–22.
10. Заблодский Н. Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения. Монография. Алчевск. 2008. 340 с.
11. Васильковский Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. *НТУ «ХПІ»*. 2007. 191 с.
12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва. Энергия. 1969. 440 с.
13. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. Энергоатомиздат. 1986. 255 с.
14. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. Москва. Высшая школа. 1989. 312 с.

References (transliterated)

1. Makarov V. M., Kalaeva S. Z., Shipilin A. M. Pererabotka zhelezosoderzhashchikh otkhodov s polucheniem nanochastits dlya izgotovleniya magnitnoy zhidkosti. [Iron-containing waste processing with nanoparticles obtaining for the magnetic fluid production] *Nanotekhnika*. Publ., 2004. no. 12. pp. 66–69.
2. Scherer C., Figueiredo Neto A. M. [Ferrofluids: Properties and Applications]. *Brazilian J. Phys. Publ.*, 2005. vol. 35. pp. 718–727.
3. Pshenichnikov A. F., Lebedev A. V. Magnitnaya vospriimchivost' kontsentrirrovannykh ferrokolloidov. [Concentrated ferrocoldoids magnetic susceptibility]. *Kolloidnyy zhurnal*. Publ., 2005. vol. 67. no. 2. pp 218–230.
4. Gladkikh D. V., Dikanskiy Yu. I., Balabanov K. A., Radionov A. V. O vliyaniy strukturnoy organizatsii na relaksatsiyu magnitnogo momenta dispersnykh chastits v magnitnoy zhidkosti. *ZhTF*. Publ., 2005. vol. 75, no. 10. pp. 139–142.
5. Adolphi N. et al. Characterization of magnetic nanoparticle by dynamic light scattering. *Phys. Med. Biol.* Publ., 2010. vol. 55, pp. 5985–6003.
6. Yoon S. Determination of the temperature dependence of the magnetic anisotropy constant in magnetite nanoparticles. *J Korean Phys. Soc.* Publ., 2011. vol., 59. no. 5. pp. 3069–3073.
7. Dikanskiy Ju. I., Ispirjan A. G. i dr. Osobennosti namagnichivaniya magnitnykh kolloidnykh nanosistem na parafinovej osnove. [Features of the magnetic colloidal nanosystems magnetization on a paraffin basis]. Sb. tr. 16-j Mezhdunar. Plesskoj nauchn. Konf. po nanodispersnym magnitnym zhidkostjam. Publ., 2014. pp. 22–30.
8. Zablodskiy N. N., Gritsyuk V. Yu. Mul'tigradientnost' poley v massive rotora shnekovogo elektromekhanicheskogo preobrazovatelya. [Fields' multi-gradient in the rotor array of a screw electromechanical converter]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho un-tu «KhPI»*. Zb. nauk. pr. Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi. Kharkov. NTU «KhPI». Publ., 2016. no. 11 (1183). pp. 88–92.
9. Starovoytov V. A. Magnitozhidkostnoe okhlazhdenie elektricheskikh mashin. [Magnet-liquid cooling of electrical machines] *Vestnik Kuzbasskogo gosud. tekhn. un-ta*. Publ., 2005. no., 2(46). pp. 20–22.
10. Zablodskiy N. N. Polifunkcional'nye jelektromekhanicheskie preobrazovateli tehnologicheskogo naznachenija. [Polyfunctional Electromechanical Converters Technological Purpose]. *Monografija. Alchevsk*. Publ., 2008. 340 p.
11. Vas'kovskiy Yu. M. Pol'ovyy analiz elektrychnykh mashyn. [Field Analysis of Electric Machines]. *NTU «KPI»*. Publ., 2007. 191 p.
12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha*. [Heat Transfer]. Moskva. Jenergiya. Publ., 1969. 440 p.
13. Filippov I. F. *Teploobmen v jelektricheskikh mashinah*. *Jenergoatomizdat*. [Heat transfer in electrical machines]. Publ., 1986. 255 p.
14. Ivanov-Smolenskiy A. V. *Jelektromagnitnye sily i preobrazovanie jenerгии v jelektricheskikh mashinah*. [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moskva. Vysshaja shkola. Publ., 1989. 312 p.

Поступила (received) 02.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Применение магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк, П. Б. Клендий, Д. С. Сорокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 67–74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2409-9295.

Применение магнитной жидкости с фазовым переходом в погружных электромеханических преобразователях / Н. Н. Заблодский, В. Ю. Грицюк, П. Б. Клендий, Д. С. Сорокин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 67–74. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2409-9295.

A magnetic fluid application with a phase transition in a submersible electromechanical converters / N. N. Zablodskiy, V. YU. Gritsyuk, P. B. Klendiy, D. S. Sorokin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 67–74. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Заблодський Микола Миколайович, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, професор кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Заблодский Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, профессор кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования; (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Zablodskiy Nikolay Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Professor of the Department of Electrical machines and maintenance of Electric equipment; tel. +38 (050) 686-99-56; e-mail: zablodskiynn@gmail.com.

Грицюк Володимир Юрійович, кандидат технічних наук, Донбаський державний технічний університет, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем та електропривода; (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Грицюк Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, Донбасский государственный технический университет, доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем и электропривода; (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Gritsyuk Vladimir Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Donbas State Technical University, Associate Professor at the Department of Automated electromechanical systems and Electric drive; tel. +38 (099) 948-54-33; e-mail: gritsyukvy@gmail.com.

Клендій Петро Богданович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, доцент кафедри енергетики і автоматики; (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Клендий Петр Богданович, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, доцент кафедры энергетики и автоматики; (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Klendiy Petro Bogdanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Associate Professor of the Department of Power Engineering and Automation; tel. +38 (096) 604-52-19; e-mail: pklen_@i.ua.

Сорокін Дмитро Сергійович, кандидат технічних наук, Національний університет біоресурсів і природокористування України, старший викладач кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання; (063) 073-41-59; e-mail: sdimasp@gmail.com.

Сорокин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, старший преподаватель кафедры электрических машин и эксплуатации электрооборудования; (063) 073-41-59; e-mail: sdimasp@gmail.com.

Sorokin Dmitro Sergiyovich, Candidate of Technical Sciences, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Senior Lecturer of the Department of Electrical machines and maintenance of Electric equipment; tel. +38 (063) 073-41-59; e-mail: sdimasp@gmail.com.