

*Лунанов А.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПОГРУЖНОГО ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С КОЛЬЦЕВЫМИ ОБМОТКАМИ

Создана комплексная математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей погружного электромеханического преобразователя (ПЭМП) с кольцевыми обмотками. Получена картина распределения температур в активной части ПЭМП.

***Ключевые слова:** погружной электромеханический преобразователь, математическая модель, тепловое поле.*

Створена комплексна математична модель взаємозв'язаних електромагнітних та теплових полів заглибного електромеханічного перетворювача(ПЄМП) з кільцевими обмотками. Отримана картина розподілу температур в активній частині ПЄМП.

***Ключові слова:** заглибний електромеханічний перетворювач, математична модель, теплове поле.*

Введение и постановка задачи. Методика проектирования погружных полифункциональных электромеханических преобразователей отличается от методики проектирования машин стандартной конструкции [1, 2, 3] тем, что предварительно полезная мощность выбирается из соображений баланса суммы нескольких мощностей [5]:

$$P_2 = P_{\text{тепл}} + P_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{тепл}}, P_{\text{мех}}$ - соответственно тепловая и механическая мощность ПЭМП.

Для погружных ПЭМП электромагнитный момент является переменной величиной, поскольку сила механического сопротивления создаваемая нагрузочно - охлаждающей средой является функцией нескольких переменных, в том числе температуры, и в значительной степени изменяется при нагреве [4]. Зависимость тангенциальной силы сопротивления сдвигу описывается выражением.

$$F = \mu \cdot \frac{v_2 - v_1}{z_2 - z_1} \cdot S, \quad (2)$$

где F — тангенциальная (касательная) сила, вызывающая сдвиг слоёв жидкости относительно друг друга;

S — площадь слоя, по которому происходит сдвиг;

$(v_2 - v_1)/(z_2 - z_1)$ — градиент скорости течения;

μ — вязкость жидкости.

Вязкость жидкости с повышением температуры уменьшается. Влияние температуры на динамический коэффициент вязкости жидкостей описывается выражением:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{a(t-t_0)}, \quad (3)$$

где μ ; μ_0 - значения динамического коэффициента вязкости соответственно при температуре t и t_0 градусов $^{\circ}\text{C}$;

a - показатель степени, зависящий от рода жидкости.

Составляющая тепловой мощности в некоторых рабочих режимах является преобладающей над механической (например, в режиме «стоянки под током», при низких частотах вращения), поэтому актуальной задачей на этапе проектирования является прогнозирование максимальной температуры пазов пакета статора и изоляции обмотки.

Цель работы: получение картины распределения теплового поля в сечении активной части ПЭМП в результате решения взаимосвязанной электромагнитной и тепловой математической модели.

Основным методом исследования является метод конечных элементов реализованный в пакете Comsol Multiphysics 3.4.

Объектом исследования является математическая модель погружного ПЭМП с совмещенными обмотками (кольцевого и барабанного типов). Конструктивная схема ПЭМП представлена на рисунке 1.

Изложение материала. Решения взаимосвязанных задач электромагнитного и теплового поля ПЭМП с совмещенными обмотками требует наличия мощной вычислительной техники, наличия экспериментальных данных для задания адекватных граничных и начальных условий математической модели.

В общем виде дифференциальное уравнение электромагнитного поля в частных производных относительно векторного магнитного потенциала имеет следующий вид [5]:

$$\frac{1}{\mu} \Delta \vec{A} - \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma (\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}) = -\vec{J}_{\text{стор}} , \quad (4)$$

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

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

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

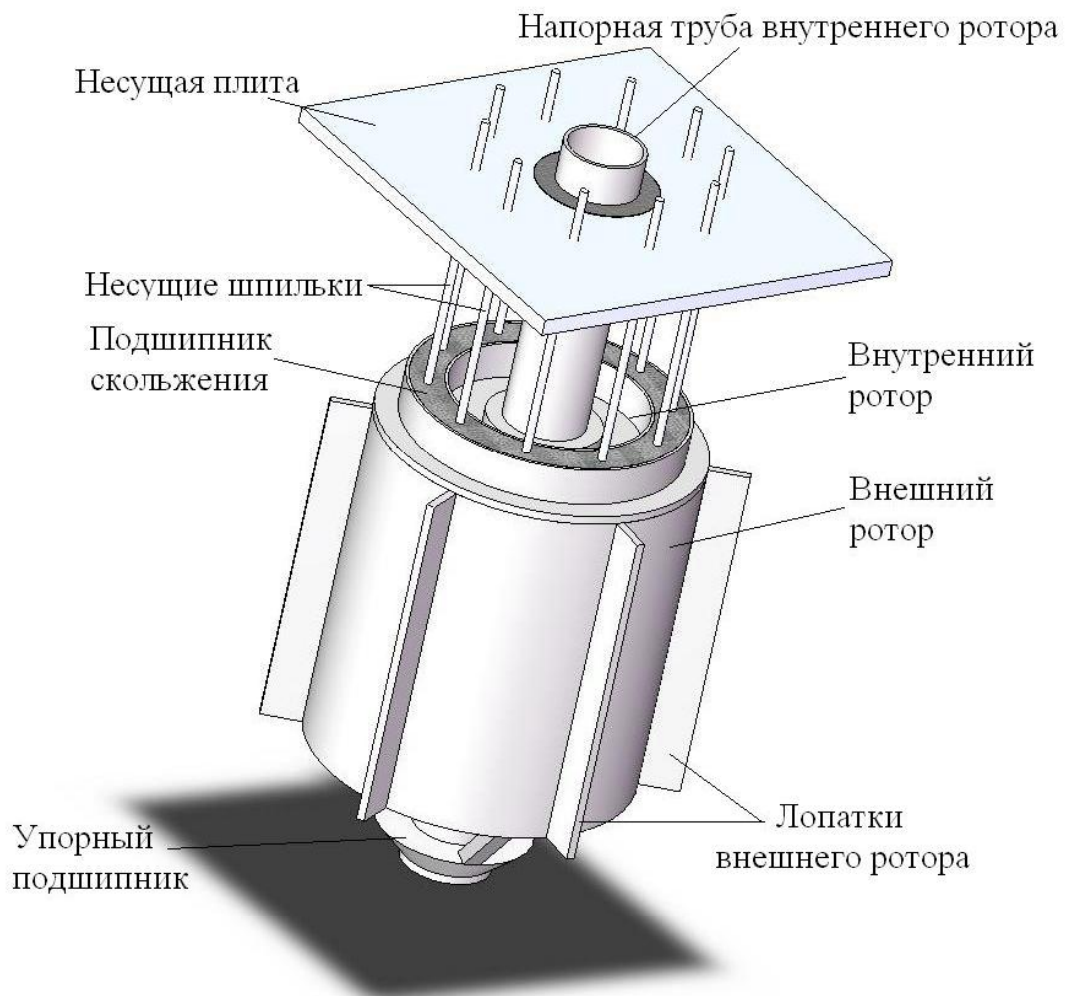


Рисунок 1 – Конструктивная схема погружного ПЭМП

Уравнения электромагнитного поля дополняются граничными условиями – нулевым значением векторного магнитного потенциала или его нормальной производной на внешних границах расчетной области, отображающей активную зону ПЭМП. Такими границами для погружного ПЭМП являются – внешние поверхности коаксиального массив-

ного ротора (G_1 и G_2) (см. рис. 2). На этих поверхностях задаются однородные граничные условия первого рода [5]

$$A(x, y, t) |_{G_1, G_2} = 0, \quad (5)$$

Задание граничного условия (5) эквивалентно принятию допущения об отсутствии магнитных потоков рассеяния во внешнее пространство через рассматриваемые границы.

При решении нестационарного полевого уравнения необходимо задать начальные условия – значения искомой функции внутри области в начальный расчетный момент времени t_0 :

$$A(x, y, z, t) |_{t=t_0} = A_0(x, y, t_0). \quad (6)$$

При анализе характерных для погружных 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 следующее выражение, вытекающее из первого уравнения системы уравнений Максвелла:

$$J_z = \text{rot}_z H = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right). \quad (7)$$

После расчета поля векторного магнитного потенциала несложно найти полное магнитное потокосцепление всех фаз обмотки статора по следующему выражению [6]:

$$\psi_k = \frac{2l_a w_{II}}{S_{II}} \int_{S_A} A_z \cdot ds, \quad (8)$$

где S_A - площадь интегрирования, состоящая из суммарной площади поперечного сечения сторон всех последовательно соединенных катушек фазы, имеющих токи одного направления;

l_a - активная длина статора;

w_{II} - число проводников в пазу;

S_{II} - площадь паза.

Определенное по выражению (8) потокосцепление включает в себя составляющие от потоков пазового и дифференциального рассеива-

ния, а также учитывает укорочение шага катушек обмотки и распределение катушек фазы по пазам, которые в классической теории электрических машин отображаются с помощью обмоточного коэффициента. Полевой метод не требует введения и использования обмоточных коэффициентов.

В каждой точке ротора удельные потери рассчитываются по выражению:

$$Q = J_z^2 / \gamma(T), \quad (9)$$

где γ - электропроводность материала ротора, зависит от температуры T по закону:

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (10)$$

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:

$$\lambda \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (11)$$

где λ, c, ρ - соответственно теплопроводность, теплоемкость и плотность материала;

Q - удельные тепловые потери, рассчитываемые по выражению (9).

В декартовых координатах для двумерной картины поля уравнение (11) переписывается в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (12)$$

Взаимосвязь уравнений электромагнитного и теплового полей проявляется во взаимном влиянии температуры, электропроводности, плотности вихревых токов и удельных тепловых потерь, которые отображаются в выражениях (9), (10). Также как и для уравнения электромагнитного поля для уравнения (12) задаются граничные и начальные условия. Выбор граничных условий обусловлен особенностями системы

теплоотвода от 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 (13). Подобная теплопередача происходит в соответствии с законом Ньютона–Рихмана.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{G_1, G_2} = -\frac{\alpha}{\lambda}(T - T_0), \quad (13)$$

где α - коэффициент теплоотдачи;

T_0 - температура охлаждающего воздуха.

Граничное условие (13) задается на внешних частях границ ротора G_1 и G_2 . 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 границ ротора G_1 и G_2 :

$$\begin{aligned} q_1|_{G_1} \frac{1}{R_{2n1}} \int_S Q ds &= \frac{1}{R_{2n1}} \int_{S_1} [J_{z1}^2 / (\gamma) T] ds \\ q_2|_{G_2} \frac{1}{R_{2n2}} \int_S Q ds &= \frac{1}{R_{2n2}} \int_{S_2} [J_{z2}^2 / (\gamma) T] ds \end{aligned}, \quad (14)$$

где R_{2n1}, R_{2n2} - наружный радиус внешнего и внутреннего ротора;

S - область интегрирования.

Такое условие часто применяется при расчетах высокотемпературных печей. Условие (13) также обуславливает взаимосвязь электромагнитной и тепловой задач.

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

Математическая модель погружного ПЭМП представляет половину действительной конструкции ПЭМП, поскольку конструкция ПЭМП, и процессы протекающие внутри симметричны относительно линии проходящей через центр.

Расчетная модель ПЭМП и границы на которых заданы граничные условия представлены на рисунке 2.

В математической модели подобласти 1 описывают физические свойства стальной конструкции коаксиального массивного ротора с лопатками, подобласть 2 характеризует физические свойства электротехнической стали пакета статора, подобласти 3 описывают физические свойства нагрузочно-охлаждающей среды, подобласти 4 описывают физические свойства медной обмотки, подобласти 5 характеризуют воздушные зазоры активной части ПЭМП.

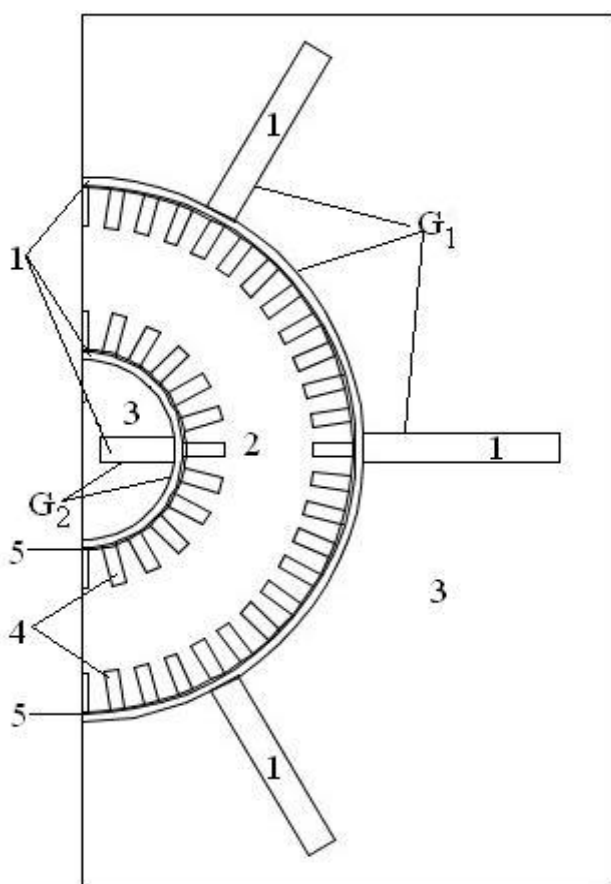


Рисунок 2 – Расчетная модель ПЭМП и границы, на которых заданы граничные условия

Картина распределения температурного поля математической модели погружного ПЭМП с совмещенными обмотками и окружающей нагрузочно-охлаждающей средой (битум), представлена на рисунке 3.

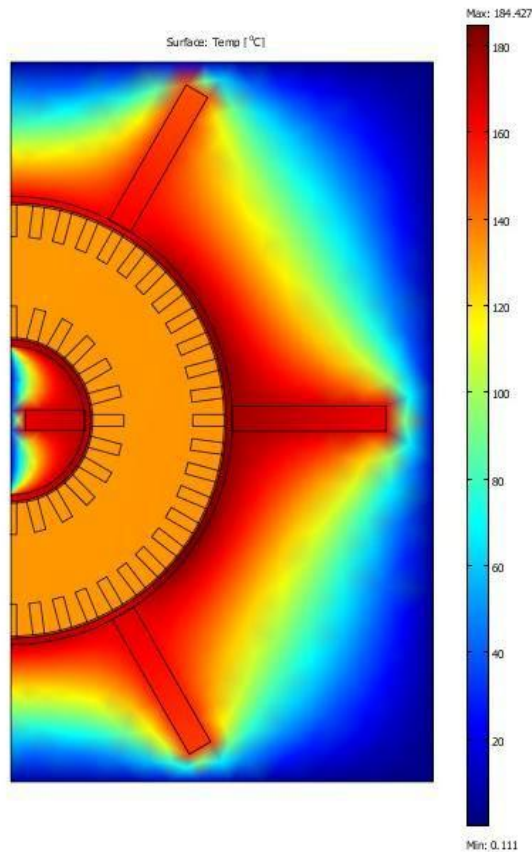


Рисунок 3 – Картина распределения температурного поля ПЭМП с окружающей нагрузочно-охлаждающей средой

В результате моделирования ПЭМП получена картина температурного поля сечения активной части погружного ПЭМП с комбинированными обмотками и окружающей нагрузочно-охлаждающей средой, в данном случае битум марки БНД 200/300. Температура вспышки данной марки битума составляет 220°C и характеризует степень огнеопасности битума при его разогреве. Предельно допустимой температуры битум в результате нагрева при помощи ПЭМП не достигает, что создает безопасный температурный коридор в технологической цепи при его переработке.

Вывод.

1. Создана комплексная математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей ПЭМП с комбинированными обмотками и окружающего его обрабатываемого нагрузочно-охлаждающего материала.

2. В результате моделирования были определены максимальные значения температур пазов пакета статора (134°C) и нагрузочно-охлаждающей среды вблизи поверхности ротора (184°C). Температуры

входит в пределы достижимые классом нагревостойкости электроизоляционного материала обмотки и максимальные температуры допустимого нагрева обрабатываемого материала.

3. Дальнейшие исследования взаимосвязанных комплексных математических моделей ПЭМП должны включать изоляции обмоток и пазов для повышения точности расчетов.

4. В дальнейшем должна быть создана и исследована комплексная математическая модель торцевых зон погружного ПЭМП с комбинированными обмотками.

Библиографический список

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

2. Лиценко А.И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором / А.И. Лиценко, В.А. Лесник. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с

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

4. Вильнер Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов. Под ред. Б. Б. Некрасова.: Минск, «Вышэйш. школа», 1976. 416 с. с ил.

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

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

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.