

*д.т.н., проф. Заблодский Н.Н.,
аспирант Лупанов А.В.
(ДонГТУ, г.Алчевск, Украина)*

МЕТОДИКА РАСЧЁТА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПОГРУЖНОГО ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Наведено методику розрахунку магнітного ланцюга заглибного електротепломеханічного перетворювача з торцевими частинами статору.

Проблема и её связь с научным и практическими задачами.

Погружные полифункциональные электромеханические преобразователи (ПЭМП) относятся к новому классу электромеханических устройств, поэтому при их проектировании и усовершенствовании встает вопрос, связанный с выбором методов и методик расчёта. Известные методы расчёта для обычных машин не отражают особенности геометрии ротора, конфигурации магнитной системы, поэтому методику расчёта для обычных машин необходимо корректировать. Одной из составляющих расчёта ПЭМП является расчёт магнитной цепи, состоящей из цилиндрической и торцевой частей, методики расчёта, которой пока не предложено.

Анализ исследований и публикаций. Метод расчета, предложенный Ф.Пунгой и уточнённый Т.Г.Сорокером широко используется в расчётной практике[1]. Однако реальные двигатели имеют неодинаковые уровни насыщения спинок сердечников статора, которые в высокоиспользованных машинах весьма заметны. При этом насыщение зубцов уплощает кривую индукции, а насыщение спинок наоборот заостряет. Кроме того, существующие методики расчета не охватывают конструкции электромагнитных систем погружных ПЭМП с кольцевыми обмотками, имеющие торцевые активные зоны [2].

Постановка задачи. Создание методики расчёта магнитной цепи ПЭМП с торцевыми частями при учете уровней насыщения.

Изложение материала и результаты. Использование вычислительной техники позволяет провести более точный численный расчёт магнитной цепи ПЭМП на основе схемы замещения[1]. Конструкция активной части погружного ПЭМП[3] представлена для половины по-

люсного деления, поскольку магнитопровод симметричен относительно оси полюсного деления на рисунке 1. Для магнитных систем с различными высотами пазов и спинок этот расчёт является более простым из возможных. Шаг разбиения равен зубцовому делению статора, так как это наиболее соответствует реальной магнитной системе. Магнитопровод массивного ротора заменяется некоторым эквивалентным, неподвижным относительно статора с неизменной индукцией в массиве.

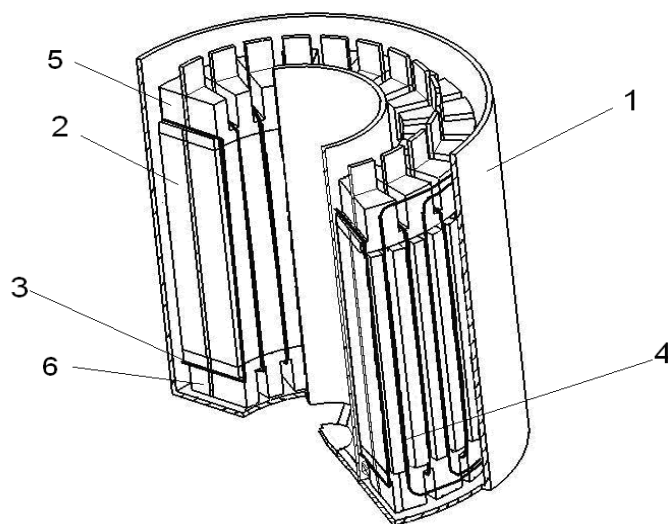


Рисунок 1 - Конструкция активной части погружного ПЭМП
 1-полый массивный коаксиальный ротор; 2-пакет статора с обмотками;
 3-кольцевая обмотка; 4-внешняя обмотка барабанного типа;
 5-верхний торцевой индуктор; 6-нижний торцевой индуктор

Расчёт проводится при обычном допущении: насыщение магнитной цепи определяется основной гармоникой магнитного поля в воздушном зазоре. Высшие пространственные гармоники не оказывают заметного влияния на насыщение машины.

На первом этапе создания расчёта магнитной цепи будем вести расчёт по основной гармонике.

При расчёте принимаем синусоидальное распределение индукции $B_{\delta}(\alpha) = B_{\delta 1} \sin p\alpha$, а затем рассчитываем соответствующее ему распределение МДС и выделяем из него основную гармоническую. Для этого определяем суммарные напряжения по контуру кольцевой обмотки для всех поперечных ветвей схемы замещения.

Из-за наличия торцевых частей ротора и статора, формула расчёта суммы МДС имеет слагаемые:

$$\begin{aligned} \sum F(i) = & \sum F_{\text{внутр}}(i) + \sum F_{\text{внешн}}(i) + \sum F_{\text{торц,верхн}}(i) + \\ & \sum F_{\text{торц,нижн}}(i) + F_{\text{ar,внешн}}(n) + F_{\text{ar,внутр}}(n) + F_{\text{ar,торц}}(n), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sum F_{\text{внутр}}(i)$ - падение магнитного напряжения на внутренней поверхности статора $i^{\text{го}}$ элемента;

$\sum F_{\text{внешн}}(i)$ - падение магнитного напряжения на внешней поверхности статора $i^{\text{го}}$ элемента;

$\sum F_{\text{торц,верхн}}(i)$ $\sum F_{\text{торц,нижн}}(i)$ - падение магнитного напряжения в верхней и нижней торцевой части $i^{\text{го}}$ элемента.

Символ (i) и (n) обозначает порядковый номер элемента от середины полюса на расчётной схеме падений магнитных напряжений.

Для анализа распределения МДС на полюсном делении статора и определения локальных максимумов и минимумов магнитных напряжений целесообразно представить массив выражений в виде расчётной схемы распределения падений магнитных напряжений в ПЭМП (рисунок 2).

$$\sum F_{\text{внешн}}(i) = F_{\delta \text{внешн}}(i) + F_{\text{ZS,внешн}}(i) + \sum_{n=1}^{i-1} [F_{\text{aS,внешн}}(n)] \quad (2)$$

$$\sum F_{\text{внутр}}(i) = F_{\delta \text{внутр}}(i) + F_{\text{ZS,внутр}}(i) + \sum_{n=1}^{i-1} [F_{\text{aS,внутр}}(n)] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum F_{\text{торц,верхн}}(i) = \sum F_{\text{торц,нижн}}(i) = & F_{\delta \text{торц}}(i) + F_{\text{ZS,торц}}(i) + \\ & \sum_{n=1}^{i-1} [F_{\text{aS,торц}}(n)] \end{aligned} \quad (4)$$

где $F_{\delta}(i)$ - падение магнитного напряжения в воздушном зазоре статора $i^{\text{го}}$ элемента;

$F_{\text{ZS}}(i)$ - падение магнитного напряжения в зубцевой зоне статора $i^{\text{го}}$ элемента;

$F_{\text{aS}}(n)$ - падение магнитного напряжения в спинке статора $i^{\text{го}}$ элемента.

Символ *торц*, *внутр*, *внешн* поясняет принадлежность элемента к торцевой зоне, внутренней или внешней зоне статора соответственно.

$F_{\text{aR,торц}}(n)$, $F_{\text{aR,внешн}}(n)$, $F_{\text{aR,внутр}}(n)$ не входят в формулы 2-4 для расчёта суммарных МДС участков, поскольку параметры (комплексное магнитное сопротивление) входящие в них изменяются и без применения итераций их рассчитать невозможно.

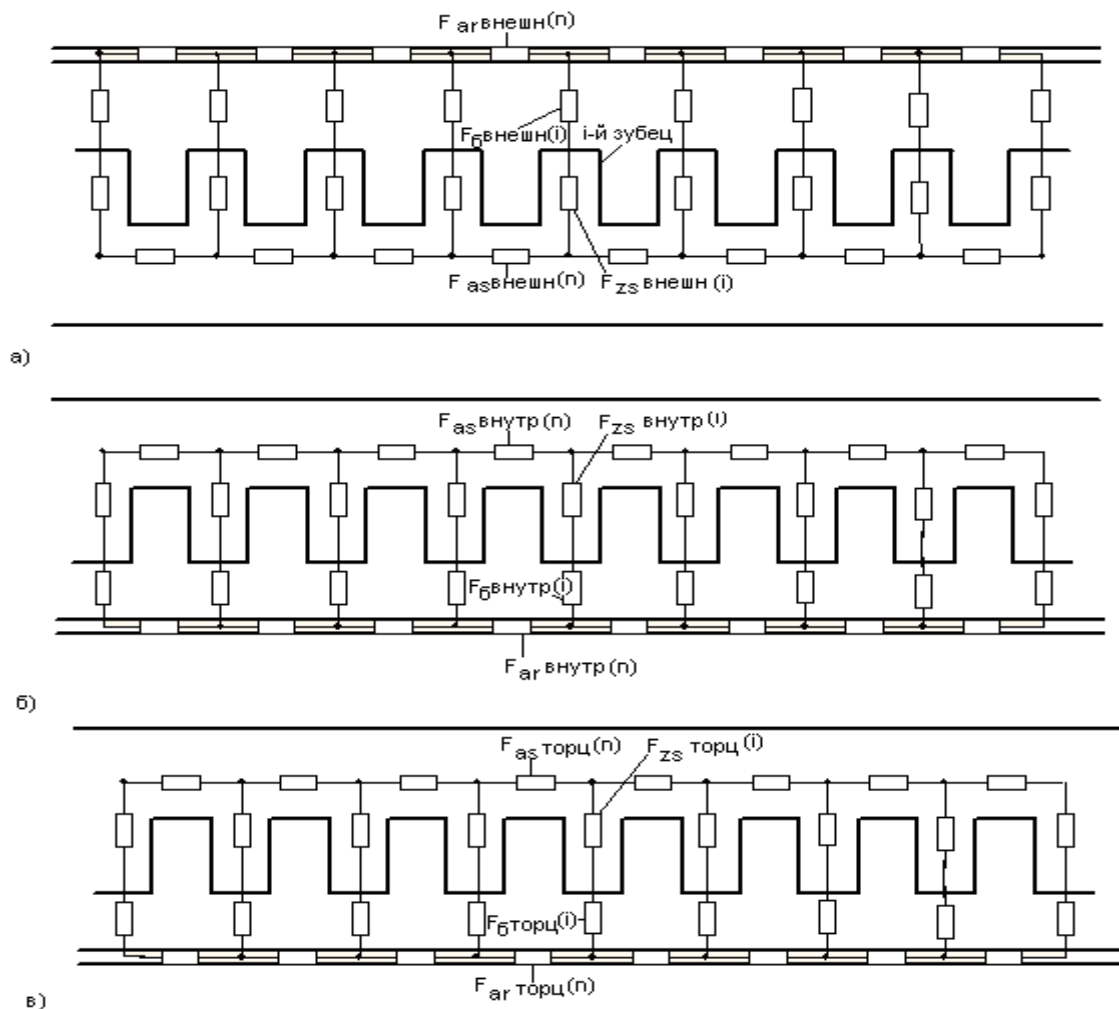


Рисунок 2 - Расчётная схема падений магнитных напряжений ПЭМП:
 а) - внешняя цилиндрическая зона,
 б) - внутренняя цилиндрическая зона, в) -торцевая зона

Данная схема позволяет учесть неравномерность падений магнитных напряжений участков вдоль ярма в зависимости от расположения центра полюсного деления. На расчётной схеме (рисунок 2в) представлено изображение падений магнитных напряжений торцевой части статора по средней линии магнитопровода, считая индукцию усреднённой.

Падение магнитных напряжений определяют с использованием основной кривой намагничивания $H = f(B)$. При этом используются следующие соотношения:

Для зубцовой зоны статора

$$B_{zS}(i) = \frac{B_{\delta} t_{zS}}{k_c b_{zS}} \sin \frac{2\pi p(i-1)}{Z_S},$$

$$F_{zS}(i) = H_{zS}(i) h_{zS}(i)$$
(5)

где B_{δ} -индукция в воздушном зазоре;

t_{zS} -зубцовое деление статора;

k_c -коэффициент воздушного зазора;

b_{zS} -ширина зубца статора;

Z_S -число зубцов статора;

p -число полюсов;

h_{zS} -высота зубца статора;

H_{zS} -напряженность магнитного поля статора.

Для спинки внешнего статора

Поскольку на внешней части статора расположены две обмотки(кольцевого и барабанного типов), то расчёт индукций от двух обмоток проводим по методу суперпозиции.

$$B_{aS_{внешн}}(n) = \frac{D}{h_{aS}(n)} \left(\frac{B_{\delta k}}{p_k} \cos \frac{2\pi p_k(n-1)}{Z_S} + \frac{B_{\delta \sigma}}{p_{\sigma}} \cos \frac{2\pi p_{\sigma}(n-1)}{Z_S} \right)$$

$$F_{aS_{внешн}}(n) = H_{aS}(n) \frac{\pi}{Z_S} (D - 2h_{zS}(n) - h_{aS}(n))$$
(6)

Для спинки внутреннего статора

$$B_{aS_{внутр}}(n) = \frac{B_{\delta} D}{p h_{aS}(n)} \cos \frac{2\pi p(n-1)}{Z_S}$$

$$F_{aS_{внутр}}(n) = H_{aS}(n) \frac{\pi}{Z_S} (D - 2h_{zS}(n) - h_{aS}(n))$$
(7)

Для спинки ротора в цилиндрической зоне

$$F_{ar_{внешн}}(n) = k_{\phi} k_{\Lambda} p_{\kappa} \sqrt{\frac{\sqrt{s_n} \operatorname{Re}(\dot{A}) P_u(L_2 + r)}{\pi l_{\delta_{внешн}} m \sqrt{\rho_2 \mu_e f_1}}} \pm k_{\phi} k_{\Lambda} p_{\sigma} \sqrt{\frac{\sqrt{s_n} \operatorname{Re}(\dot{A}) P_u(L_2 + r)}{\pi l_{\delta_{внешн}} m \sqrt{\rho_2 \mu_e f_1}}} \quad (8)$$

$$F_{R_{\text{внутр}}} (n) = k_{\phi} k_{\Lambda} P \sqrt{\frac{\sqrt{s_n} \operatorname{Re}(\dot{A}) P_n (L_2 + r)}{\pi l_{\delta \text{ внутр}} m \sqrt{\rho_2 \mu_e f_1}}}. \quad (9)$$

В формуле для расчёта МДС спинки внешнего ротора добавлена составляющая потому, что в роторе наводятся вихревые токи от двух обмоток.

где $\dot{A} = 1,13 + j1,85$ - коэффициент для расчёта комплексного магнитного сопротивления введённый Нейманом. [4]

P_n - расчётная мощность ротора;

$\rho_2 = f(t_{\text{рот.}})$ - удельное сопротивление стали ротора;

μ_e - относительная магнитная проницаемость материала ротора;

L_2 - длина активной части ротора;

k_{ϕ} - коэффициент формы поля;

$k_{\Lambda} = f(l_{\delta} / \tau)$ - коэффициент относительного удлинения ротора.

Для воздушного зазора

$$F_{\delta} (i) = 0,8 \cdot 10^4 B_{\delta} \delta k_{\delta} \sin \frac{2\pi p(i-1)}{Z_s}. \quad (10)$$

Для зубцовой зоны статора в торцевой зоне

$$B_{ZS \text{ торц}} (i) = \frac{B_{\delta \text{ торц}} \cdot t_{ZSmSmo}}{k_c b_{ZSmSmo}} \sin \frac{2\pi p(i-1)}{Z_s} \quad (11)$$

$$F_{ZS \text{ торц}} (i) = H_{ZSmSmo} (i) h_{ZSmSmo} (i)$$

Для спинки статора в торцевой зоне

$$B_{aS \text{ торц}} (n) = \frac{B_{\delta \text{ торц}} D_{\text{тор.ср}}}{p h_{aSmo} (n)} \cos \frac{2\pi p(n-1)}{Z_s}, \quad (12)$$

$$F_{aS \text{ торц}} (n) = H_{aSmo} (n) \frac{\pi}{Z_s} D_{\text{ср.торц}}$$

где $D_{cp.торц} = (D_n - D_i) / 2$ - средний диаметр торцевой зоны статора.
 D_n и D_i - наружный и внутренний диаметры магнитопровода статора[5].

Для спинки ротора в торцевой зоне

$$F_{ar торц}(n) = k_\phi k_\Lambda P \sqrt{\frac{\sqrt{s_n} \operatorname{Re}(\dot{A}) P_n (L_2 + r)}{\pi l_{\delta торц} \cdot m \sqrt{\rho_2 \mu_e f_1}}}, \quad (13)$$

где $l_{\delta торц} = \pi D_{cp.торц}$ - длина воздушного зазора торцевой части на средней линии.

Для воздушного зазора в торцевой зоне

$$F_{\delta торц}(i) = 0.8 \cdot 10^4 B_{\delta торц} \cdot \delta_{торц} \cdot k_{\delta торц} \cdot \sin \frac{2\pi p(i-1)}{Z_s}. \quad (14)$$

Намагничивающий ток рассчитывается в соответствии с выражением:

$$I_\mu = p F_\psi / (0.9 m \omega_{sA} k_0). \quad (15)$$

Исходя из этого, что амплитуда МДС магнитной цепи на пару полюсов равна $F_\psi = 4F_{m1}$. Амплитуда первой гармонической МДС F_{m1} определяется при разложении МДС в воздушном зазоре в ряд Фурье.

Коэффициент насыщения

$$K_\mu = F_\psi / F_\delta. \quad (16)$$

Изначально задаём значение индукции в воздушном зазоре торцевой зоны $B_{\delta торц}$ спинки статора и ротора, где находится их наиболее узкое сечение, для предотвращения насыщения магнитопровода.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Создана методика расчёта учитывающая размещение и взаимодействие в пространственной и временной области двух обмоток: кольцевой и барабанной.

При расчёте МДС целесообразно обособить расчёт участков массивного ротора вследствие его переменных параметров, зависящих от скольжения и температуры.

Для более точных расчётов распределения индукции вдоль активной длины проводника, необходимо провести дальнейшие исследования с применением численных методов, предполагая в дальнейшем уточнение ряда факторов таких как: насыщение, значение МДС с учётом пространственных и временных гармоник.

Приведена методика расчёта магнитной цепи погружного электропеломеханического преобразователя с торцевыми частями.

The method of calculation of magnetic chain of submersible electrotermomechanical with butt parts converter is resulted.

Библиографический список

1. Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. - М.: Высш.шк., 2002.-511с.:ил.
2. Заблодский Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения. – Монография. – Алчевск: ДонГТУ. – 2008. – 340 с.
3. Заблодский Н.Н., Лупанов А.В., Квасов В.А. Эффективность применения кольцевых обмоток // Вісник Кременчуцького державного політехн. ун-ту: Наук. праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип. 4 / 2008 (51). Частина 1. – С. 67-69.
4. Куцевалов В.И. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 302 с.
5. Давыдов Л.И., Оноприч Л.В. Определение главных размеров торцевых асинхронных двигателей при проектировании // Электротехника.-2007.-№5