

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ В ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ЛИТОЙ МЕДНОЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ РОТОРА

Железняков А.В., Чувашев В.А., к.т.н.

Украинский НИИ взрывозащищенного электрооборудования

Украина, 83052, Донецк, ул.50-й Гвардейской дивизии, 17

тел. (062)348-18-94, 382-93-53, e-mail: vach@list.ru, ukmiive@skif.net

*Розроблено математичні моделі для чисельних досліджень фізичних полів в активній зоні ПЕД, що реалізовані у виді алгоритмів і програм. Виконано польовий аналіз розподілу електромагнітного поля ПЕД. Досліджено вплив ексцентриситету на силу магнітного тяжіння. Сформульовано рекомендації з удосконалювання ПЕД.*

*Разработаны математические модели для численных исследований физических полей в активной зоне ПЭД, которые реализованы в виде алгоритмов и программ. Выполнен полевой анализ распределения электромагнитного поля ПЭД. Исследовано влияние эксцентриситета на силу магнитного тяжения. Сформулированы рекомендации по совершенствованию ПЭД.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Изучение рабочих характеристик ПЭД, необходимое для дальнейшего совершенствования двигателей и повышения их технико-экономических показателей, требует применения более совершенных методов математического моделирования и разработки адекватных математических моделей. Наибольшую достоверность результатов моделирования можно получить на базе полевых методов, позволяющих проанализировать особенности распределения физических полей в активной зоне ПЭД. При этом, ввиду особенностей конструкции ПЭД и условий его эксплуатации, интерес представляет распределение не только электромагнитного, но и теплового полей внутри двигателя.

В общем случае нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала, характеризующее электромагнитное поле в ПЭД, можно записать в следующем виде [1]:

$$\bar{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\bar{\nabla} \times \bar{A}) - \gamma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \gamma (\bar{V} \times (\bar{\nabla} \times \bar{A})) = \bar{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где  $\mu, \gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность;  $\bar{V}, \bar{J}_{\text{стор}}$  – векторы скорости движения среды и сторонней плотности тока;  $\bar{\nabla}$  – дифференциальный набла-оператор. Значок  $\times$  означает векторное произведение двух векторов. Для большинства конструкций ПЭД можно пренебречь электропроводностью шихтованных сердечников статора и ротора вдоль оси двигателя, поэтому уравнение (1) превращается в стационарное нелинейное уравнение Пуассона

$$\bar{\nabla} \times \frac{1}{\mu} (\bar{\nabla} \times \bar{A}) = \bar{J}_{\text{стор}}. \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, описывающее распределение температуры  $T$ , имеет следующий вид:

$$\nabla \times \lambda (\nabla \times T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c, \rho$  – удельная теплоемкость и плотность;  $Q$  – плотность тепло-

вых потерь, которыми являются в основном джоулевы потери в обмотках и потери в стали магнитопровода. Для однозначного решения краевых задач уравнения (1)-(3) дополняются соответствующими граничными условиями – значениями искомой функции или ее производных на границах расчетной области и начальными условиями (при решении нестационарной задачи) – значениями искомой функции в начальный расчетный момент времени.

Ввиду сложной геометрии активной зоны ПЭД и нелинейности задачи решение уравнений (1)-(3) возможно только численными методами, к которым относится метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод является одним из наиболее эффективных численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных, получившим широкое распространение в практике научных исследований и инженерных расчетов [2, 3]. Этот метод позволяет с высокой точностью аппроксимировать сложные границы расчетной области ПЭД, учитывать нелинейность характеристик материалов и т.п.

Основная идея МКЭ состоит в дискретизации расчетной области на большое число подобластей малых размеров, каждая из которых называется конечным элементом и в пределах которой искомая полевая функция, например, векторный магнитный потенциал  $A$ , аппроксимируется линейным полиномом. В декартовых координатах  $x, y, z$  имеем:

$$A = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y + a_4 \cdot z, \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – неизвестные коэффициенты, определяемые после решения соответствующей системы алгебраических уравнений для сетки конечных элементов. Как правило, при анализе полей в электрических машинах стремятся упростить задачу – перейти от трехмерной полевой задачи к двухмерной, что позволяет существенно сэкономить вычислительные ресурсы ПЭВМ. Для рассматриваемой задачи анализа характеристик ПЭД, а также с учетом значительной активной длины этой электрической машины вполне достаточным является расчет плоскопараллельных полей в ее поперечном сечении. Поэтому в данной работе анализ поля ограничен двумерными задачами, сформулированными в декартовых координатах в

поперечном сечении. После решения уравнения (2) и определения векторного магнитного потенциала в узлах сетки конечных элементов выполняется расчет составляющих магнитной индукции по следующим выражениям

$$B_x = \partial A / \partial y, B_y = -\partial A / \partial x. \quad (5)$$

Практическое решение и анализ распределения физических полей в ПЭД возможно при наличии высокоэффективного и удобного в использовании программного обеспечения. Целесообразно использовать протестированные, хорошо зарекомендовавшие себя пакеты прикладных программ, реализующие МКЭ. В данной работе при анализе физических полей ПЭД наряду с использованием собственного программного обеспечения применялся также пакет "FEMLAB", входящий в состав комплекса "MATLAB", а также частично использовалось программное обеспечение, разработанное на кафедре электромеханики НТУ "КПИ" г. Киев.

### ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Целью статьи является разработка полевых математических моделей двигателей типа ПЭД, методик расчета и компьютерных программ для исследований их электромагнитных полей и процессов в активной зоне.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Построение конечно-элементной модели ПЭД и исследование особенностей распределения его полей проведем для секционного ПЭД типа ПЭД 45-117 MB5 мощностью 45 кВт. Этот двигатель имеет основные технические данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

№	Показатель	Данные статора	Данные ротора
1	Мощность, кВт	45	
2	Напряжение фазы, В	1140	
3	Число полюсов	2	
4	Число секций (сердечников)	11	
5	КПД, %	89	
6	cosφ	0,876	
7	Внешний диаметр, мм	105	56,2
8	Внутренний диаметр, мм	56,8	30
9	Активная длина сердечника, мм	380	351
10	Воздушный зазор, мм	0,3	
11	Число пазов	24	27
12	Тип обмотки	1-слойная вразвалку	Стержневая коротко- замкнутая
13	Число витков	24	-
14	Тип паза	Полуза- крытый	Закрытый
15	Высота паза, мм	13,5	10,7

На рис. 1 представлен эскиз поперечного сечения ПЭД. На рис. 2 и рис. 3 изображена сгенерированная сетка конечных элементов (СКЭ) и ее фрагмент в области воздушного зазора в увеличенном масштабе. Она содержит 15699 узлов и 31352 элемента.

Аналогичным образом строятся СКЭ при наличии эксцентриситета ротора. Для этого все относящиеся к ротору поддомены получают сдвиг вдоль оси X декартовой системы координат, расположенной в геометрическом центре двигателя, на значение эксцентриситета,

например, на 0,1 мм (тогда минимальный зазор составит 0,2 мм, а максимальный – 0,4 мм) или на 0,2 мм (соответственно зазоры составят 0,1 мм и 0,5 мм).

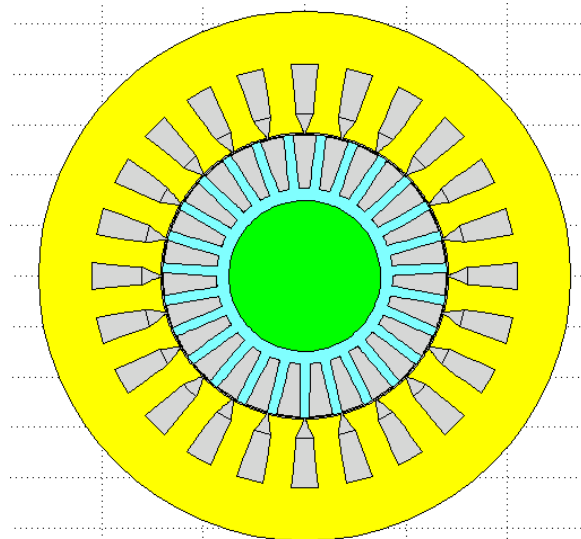


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения ПЭД 45-117 MB5

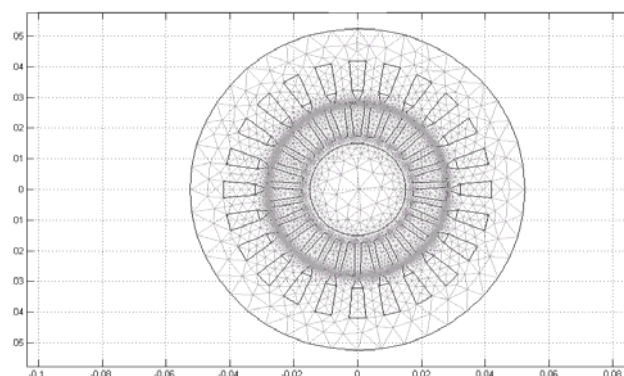


Рис. 2. Сгенерированная СКЭ для ПЭД 45-117 MB5

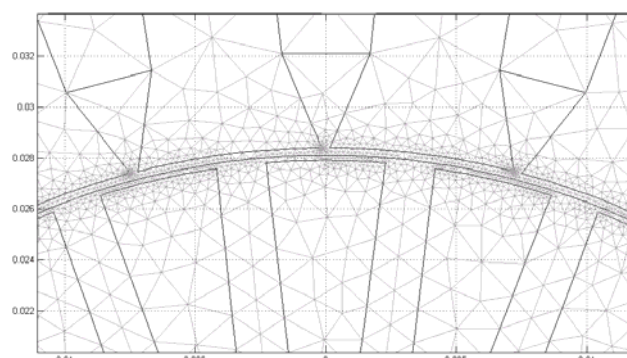


Рис.3. Фрагмент СКЭ в области воздушного зазора

### ЗАДАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОЛЯ

Источниками поля являются токи, задаваемые в пазах статора и ротора. Задание токов в трехфазной обмотке статора выполняется для определенного момента времени, например, для момента, при котором ток фазы А имеет амплитудное значение, а токи в фазах В и С равны, имеют значение, равное половине амплитудного, и направлены встречно току фазы А. Выбор такого направления токов в фазах не имеет принципиального значения, а определяется лишь удобством задания исходных данных. Указанные токи задаются в соответствующих пазах статора, относящихся к опре-

деленной фазной зоне. Например, для ПЭД 45-117 MB5 при числе пазов на полюс и фазу  $q = 4$  в пазах под номерами 1 – 4, в которых расположена фазная зона  $A$ , задается ток  $\sqrt{2} \cdot I_{\phi n} = 33,7$  А. В пазах с номерами 5 – 8, в которых расположена фазная зона  $Y$ , задается ток 16,8 А, а в пазах 9 – 12 (фазная зона  $B$ ) – 16,8 А и т.д. При этом, поскольку в уравнениях поля источниками поля является плотность тока в пазах, она определяется с учетом заданного количества эффективных проводников в пазу  $N_{1\phi\phi}$ :

$$J_{1\phi\phi} = N_{1\phi\phi} \cdot I_{\phi} / S_{\text{обм}}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{обм}}$  - обмотанная площадь паза (без учета площади паза под клин и др.). При расчете эквивалентной плотности тока в пазу площадью изоляции в нем пренебрегаем. Это допущение для расчета поля вполне допустимо. Для рассматриваемого ПЭД в номинальном режиме получим  $J_{1\phi\phi} = 3$  А/мм<sup>2</sup>.

Более сложным является задание плотности индуцированного тока в пазах ротора. В статье разработан следующий алгоритм задания тока:

1. Используя известные заранее рассчитанные параметры двигателя – индуктивные и активные сопротивления обмоток, строим векторную диаграмму рассматриваемого режима работы двигателя. При построении учитывается, что приведенный ток ротора  $I_2'$  отстает по фазе от ЭДС  $E_2'$  ротора на угол  $\psi_2$ , рассчитываемый по формуле

$$\psi_2 = \arctg(x_{2\sigma}' / (r_2' / s)).$$

2. По векторной диаграмме определяем ток  $I_2'$ , а также угол  $\beta$  фазового сдвига между токами статора и ротора.

3. При задании плотностей токов в пазах ротора смещаем положение максимума тока в пазах ротора по отношению к максимуму тока фазы  $A$  обмотки статора на найденный угол  $\beta$  (в электрических градусах).

4. С учетом синусоидального закона распределения тока ротора вдоль полюсного деления, каждому пазу ротора, следуя по часовой стрелке, присваиваем соответствующее значение плотности тока по формуле  $J_{2i} = J_{m2} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot p \cdot i / Z_2)$ , где  $i$  – номер паза;  $J_{m2}$  – максимальное значение плотности тока ротора.

#### ЗАДАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ СРЕД И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Электропроводность вдоль оси шихтованных сердечников статора и ротора принимаем равной нулю. Это означает, что при расчете поля пренебрегаем влиянием вихревых токов в сердечниках на распределение поля в активной зоне двигателя. Действие этих токов учитывается лишь при расчете потерь в стали сердечников.

Учет нелинейных свойств магнитопровода, а также вала, имеющего значительный диаметр, производим заданием соответствующих кривых намагничивания  $B = f(H)$  ферромагнитных сталей, имеющих в справочниках электротехнических материалов. В рамках рассматриваемого пакета "FEMLAB" это выполнялось следующим образом. Для того, чтобы задать кривую намагничивания стали статора и

ротора, воспользуемся средой "MATLAB". Создается файл с данными о кривой намагничивания, информация о которой берется из справочной литературы. В файле в векторном виде задается кривая намагничивания и по полученным точкам в среде "MATLAB" строится интерполированный график. Далее, программируется функция, входной величиной которой является  $\text{norm}B$  – абсолютное значение индукции в каждой точке, а выходной – магнитная проводимость  $\mu$  (например, для стали 2013 приведена на рис. 4).

В качестве граничных условий задаем значение векторного магнитного потенциала, равное нулю. Задание этого условия означает пренебрежение магнитными потоками рассеивания во внешнее пространство из ярма магнитопровода статора.

```

1 function mu=cemmu2013(normB)
2 mu=pi*4e-7;
3 B1=[0;0.01;0.39];
4 B2=[2.491;0.01;10.491];
5 H2=[362000;8000;6762000];
6 B=[0.4;0.01;2.49];
7 H=[56 56.1 57 58 59 60 60.1 61 61.1 62 63 63.1 64 65 66 67 67.1 68 68.1 69 70 70.1];
8 Bs=[B;B2];Hs=[H;H2];Bd=[B1;B2];
9 mu=[0.4/56.*ones(1,size(Bd,2)),Bs./Hs]./mu;
10 mu=interp1(Bd,M,normB);

```

Рис. 4. Файл с параметрами кривой намагничивания для стали 2013 в среде "MATLAB"

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЭД

### Анализ электромагнитного поля в установленном режиме

С использованием построенных выше конечно-элементных математических моделей ПЭД выполнен анализ особенностей распределения электромагнитных полей в их активной зоне.

На рис. 5 представлена расчетная картина распределения электромагнитного поля ПЭД 45-117 MB5 в установленном, близком к номинальному, режиме работы при скольжении  $s = 0,015$ . Расчетная картина для наглядности дана для всего поперечного сечения двигателя, а не только для одного полюсного деления, как это обычно делают другие исследователи. Изолиниями на рисунке обозначены уровни векторного магнитного потенциала, а интенсивностью (цветом) окраски участков расчетной области – уровни магнитной индукции, причем в правой части рисунка приведены соответствующие шкалы как для векторного магнитного потенциала, так и для модуля магнитной индукции. Расчет выполнен при предположении, что вихревые токи в валу ротора отсутствуют. На рис. 6. приведен фрагмент картины поля в области воздушного зазора.

Проведенные расчеты позволили сделать следующие выводы относительно особенностей распределения магнитного поля в номинальном режиме ПЭД.

1. Наиболее насыщенными участками магнитопровода являются тонкие коронки (перекрытия) закрытых пазов ротора, магнитная индукция в которых находится в пределах 2,2...2,6 Тл. Насыщение этих перекрытий способствует снижению индуктивных параметров рассеивания обмотки ротора.

2. Ввиду малого сечения ярма ротора рабочий магнитный поток достаточно глубоко проникает в

стальной вал ротора. Индукция внутри вала находится в пределах 0,85...0,89 Тл.

3. В зубцах ротора индукция равна 1,7...1,9 Тл.

4. В магнитопроводе статора наиболее насыщенным участком является ярмо, индукция в котором составляет 1,65...1,82 Тл. Зубцы статора ввиду их достаточно большого сечения ненасыщены.

Выполненный анализ позволил оптимизировать конфигурацию магнитопровода, добившись оптимального уровня насыщения всех участков магнитопровода ПЭД.

#### Анализ влияния эксцентриситета ротора

Ввиду значительной аксиальной длины ПЭД при его сборке возможно появление эксцентриситета, обуславливающего неравномерность воздушного за-

зора вдоль оси статора и, в результате, появление магнитных сил одностороннего магнитного тяжения.

Этот эффект исследовался в нашей работе. На рис. 7 представлен фрагмент картины электромагнитного поля для случая эксцентриситета, при котором минимальный зазор в ПЭД 45-117 MB5 составляет 0,1 мм, а максимальный – 0,5 мм (при среднем рабочем зазоре 0,3 мм).

На рис. 7 отчетливо видно увеличение магнитной индукции в зубцовопазовой зоне в правой части рисунка на участке с  $\delta_{\min}$  и его ослабление на участке с  $\delta_{\max}$ . Так, если в области минимального зазора индукция достигает значения 1,16 Тл, то в области максимального – всего 0,51 Тл.

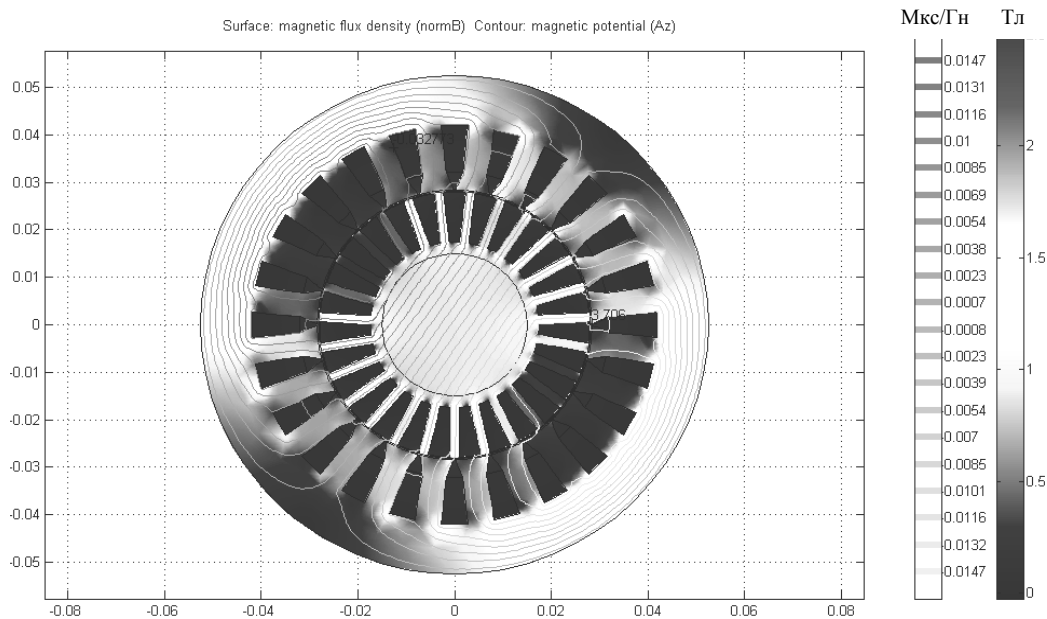


Рис. 5. Расчетная картина поля ПЭД 45-117 MB5 в установившемся номинальном режиме работы

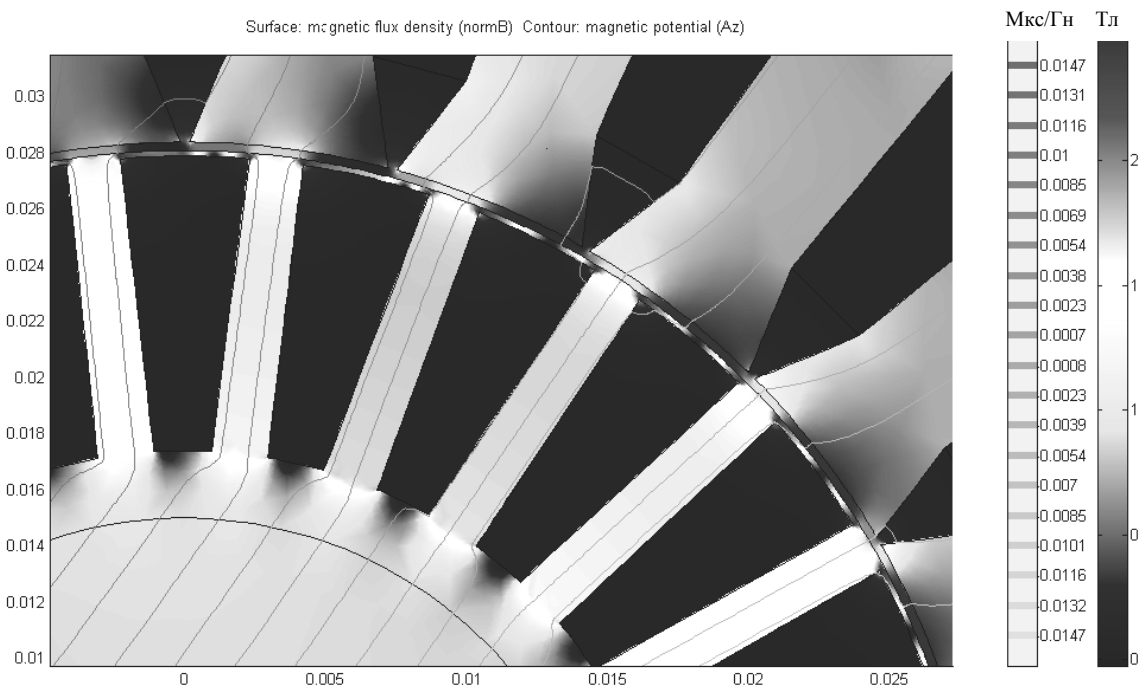


Рис. 6. Фрагмент картины поля в области воздушного зазора

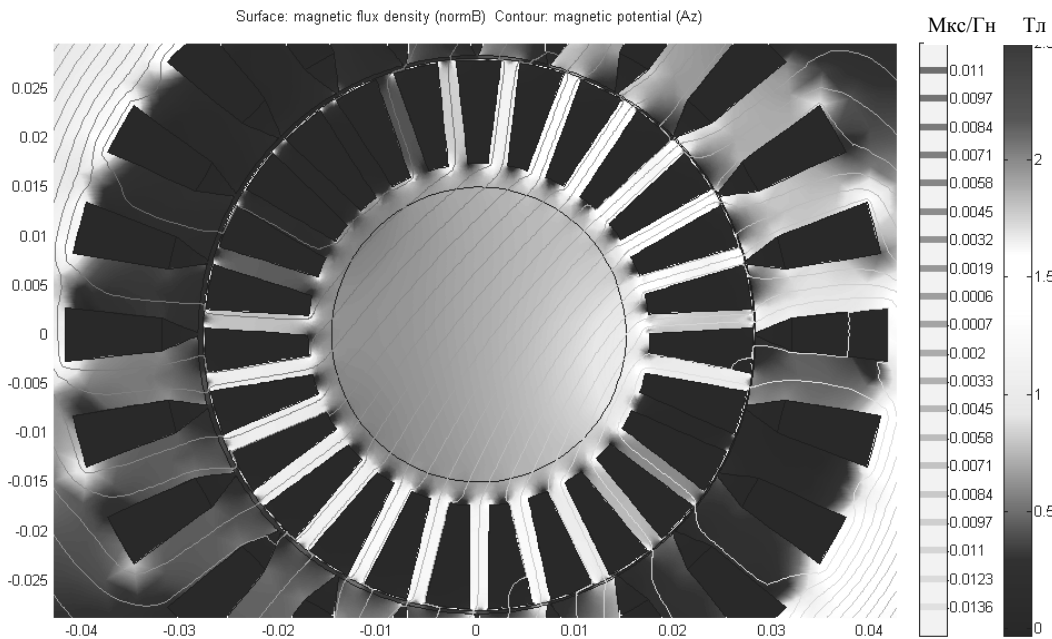


Рис. 7. Фрагмент картины электромагнитного поля ПЭД 45-117 MB5 при эксцентриситете  $\delta_{\min} = 0,1$  мм и  $\delta_{\max} = 0,5$  мм

Значение силы одностороннего магнитного тяжения определяется после расчета поля по тензору магнитного натяжения. Составляющая магнитной силы, действующей по нормали к поверхности  $S$ , охватывающей тот элемент конструкции двигателя (например, его ротор), для которого определяется сила, рассчитывается по выражению [1]:

$$F_n = \frac{1}{2\mu} \int_S (B_n^2 - B_\tau^2) \cdot dS, \quad (7)$$

где  $B_n$  и  $B_\tau$  - нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции на выделенной поверхности. При анализе двумерных полей интегрирование по поверхности заменяется интегрированием по замкнутому контуру, охватывающему рассматриваемый элемент конструкции. С учетом этого, после замены интеграла конечной суммой на  $N$  отрезках, полная сила одностороннего магнитного тяжения рассчитывается по формуле:

$$F_n = \frac{\pi \cdot R_\delta \cdot l_\delta}{\mu_0 \cdot N} \cdot \sum_i^{N-1} (B_{ni}^2 - B_{\tau i}^2), \quad (8)$$

где  $R_\delta$  - радиус замкнутой расчетной линии, проходящей через середину воздушного зазора и охватывающей ротор;  $B_{ni}, B_{\tau i}$  - нормальная и тангенциальная составляющие вектора магнитной индукции на  $i$ -ом отрезке;  $l_\delta$  - активная длина двигателя;  $\mu = \mu_0$ , т.к. расчетная линия полностью лежит в воздушном зазоре.

На рис. 8 изображена расчетная зависимость силы одностороннего магнитного тяжения в функции от относительного эксцентриситета  $\varepsilon = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / \delta_{\max}$ . Параметр  $\varepsilon$  может изменяться в пределах от нуля (отсутствие эксцентриситета) до  $\varepsilon = 1$  (касание ротора о статор). Расчет выполнен на длину одного сердечника ротора.

Из рис. 8 следует, что при увеличении эксцентриситета сила одностороннего тяжения резко увеличивается, достигая при касании ротора о статор значения около 15 кН.

С помощью разработанной методики проанализированы также силы одностороннего тяжения, возникающие при нарушении продольной соосности ротора и статора (при непараллельности осей статора и ротора).

На рис. 9 изображены две кривые действующих на ротор сил одностороннего тяжения для случаев, когда максимальный эксцентриситет на торцах достигает соответственно  $\varepsilon = 1$  и  $\varepsilon = 0,5$ . При этом оси статора и ротора пересекаются друг с другом в центре активной длины пакета ротора.

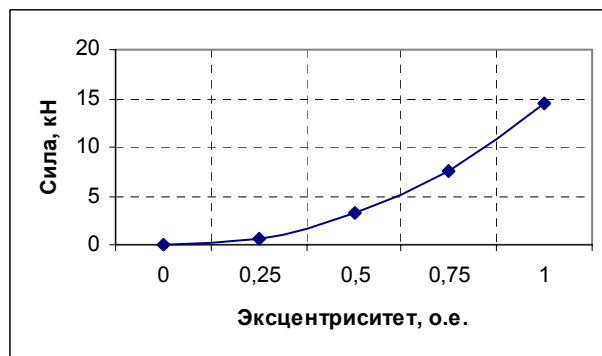


Рис. 8. Сила одностороннего магнитного тяжения от относительного эксцентриситета  $\varepsilon = (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / \delta_{\max}$

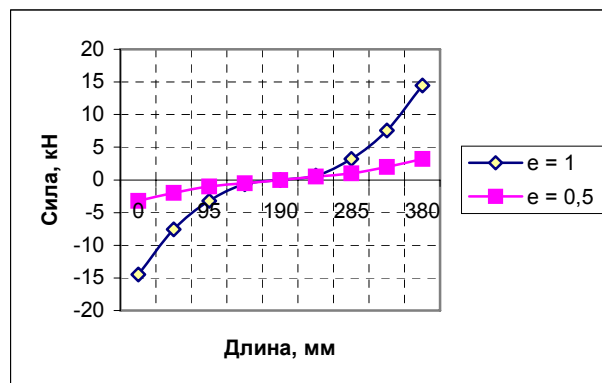


Рис. 9. Силы одностороннего тяжения при непараллельности осей статора и ротора

Таким образом, проведенное исследование показало, что эксцентриситет в ПЭД может оказать значительное влияние на работоспособность двигателя и поэтому требуется разработка специальных конструкторских решений и технологических операций по его устранению.

### Влияние вихревых токов вала ротора

Как показали проведенные выше расчеты, магнитный поток ввиду малой высоты ярма ротора ПЭД значительно проникает в вал ротора, и индукция в нем достигает значений 0,85...0,89 Тл. Однако указанный результат получен при предположении об от-

сутствии вихревых токов в вале ротора. Поскольку конструктивно вал выполняется массивным, в нем возникают вихревые токи частоты скольжения, вытесняющие магнитный поток из вала и влияющие на результирующее распределение электромагнитного поля. На рис.10 показан фрагмент расчетной картины поля в области ротора, выполненный при условии, что в массивном вале индуцируются вихревые токи частоты скольжения. Расчет выполнен по полевому уравнению, идентичному уравнению (1), при условии синусоидального изменения во времени всех полевых величин (квазистационарное уравнение поля).

Сравнение рис. 5 и рис. 10 показывает, что даже

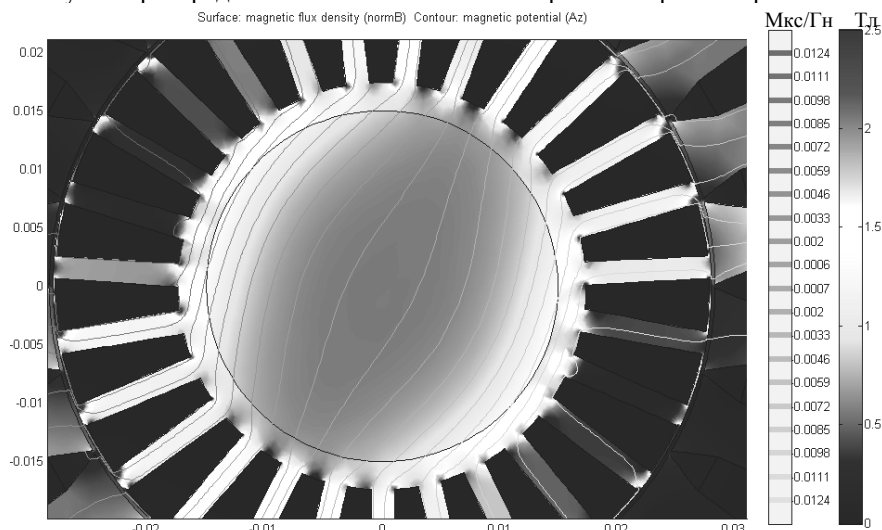


Рис. 10. Фрагмент картины поля в области ротора ПЭД при учете влияния вихревых токов частоты скольжения в массивном вале ротора

при небольшой частоте скольжения в номинальном режиме вихревые токи в вале ротора значительно вытесняют магнитный поток из вала в ярмо ротора. При этом по сравнению с исходным расчетом, показанным на рис.5, насыщение шихтованного ярма ротора увеличивается, а магнитная индукция в нем возрастает до 1,7...1,8 Тл против 1,5 Тл при неучете индуцированных токов. В самом вале в пределах глубины проникновения токов в сталь вала индукция достигает значения 1,25 Тл. Плотность вихревого тока на поверхности вала ротора достигает значений 0,3 А/мм<sup>2</sup>, а плотность удельных потерь – 17 кВт/м<sup>3</sup>. Указанный уровень джоулевых потерь в вале ротора может оказывать определенное влияние на дополнительный нагрев клетки обмотки ротора и увеличение температуры опорных подшипников. Поэтому требуется разработка специальных конструктивных решений по уменьшению влияния вихревых токов вала ротора.

### Влияние углового сдвига сердечников ротора

Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ПЭД вдоль полюсного деления характеризуется значительной неравномерностью. Эта неравномерность обусловлена рядом конструктивных особенностей ПЭД: малым значением воздушного зазора, соизмеримым с величиной зазора открытого паза статора; значительным магнитным насыщением тонких перекрытий (коронки) пазов ротора. В результате кривая магнитной индукции имеет высокий уровень зубцовых и высших пространственных гармоник, индуцирующих в обмотке статора паразитные ЭДС. На

рис. 11, а) и 11, б) изображены два фрагмента расчетных картин поля в области воздушного зазора при двух положениях зубцов статора относительно ротора: а) при исходном положении ротора, для которого угол смещения между осями пазов статора и ротора принят равным нулю; б) при повороте ротора относительно статора на угол 7,5°.

Форма кривой индукции в зазоре и фазовые сдвиги гармоник в значительной мере зависят от взаимного положения зубцов статора и ротора и изменяются при смещении статора и ротора в пределах зубцового деления. Это следует из рис.12, на котором представлены две кривые распределения магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль одного полюсного деления при исходном положении ротора (угол поворота ротора равен 0°) и при смещении ротора относительно статора на угол 7,5°. Кривые на рис.12 получены после обработки результатов полевых расчетов, в частности, анализа модуля магнитной индукции на расчетной линии, проходящей через середину высоты воздушного зазора.

Обе кривые демонстрируют высокую амплитуду зубцовых гармоник магнитной индукции, однако отличаются фазовым сдвигом этих гармоник по отношению друг к другу.

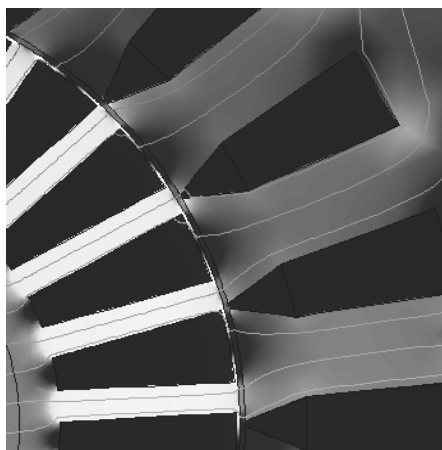
Амплитуды зубцовых гармоник достигают значения 0,3 Тл, что является источником значительных добавочных потерь в двигателе и требует разработки специальных технических решений по снижению негативного влияния высших гармоник

При разработке таких решений необходимо принять во внимание, что ротор ПЭД по длине состоит из

ряда независимых сердечников с ЛМКО, отделенных друг от друга опорными подшипниками. Например, в ПЭД 45-117 МВ5 ротор состоит из 11 сердечников. Обмотка статора выполнена общей и с ней сцеплен суммарный магнитный поток от всех сердечников ротора. Такая конструкция позволяет существенно ослабить результирующие ЭДС зубцовых гармоник в обмотке статора за счет углового поворота отдельных

сердечников ротора вокруг оси на небольшой угол. При этом в обмотке статора магнитные потоки зубцовых гармоник, порожденные разными сердечниками ротора, будут взаимно компенсироваться, что ведет к снижению добавочных потерь в статоре.

Расчетные исследования показали, что в ПЭД 45-117 МВ5 оптимальным является сдвиг сердечников ротора друг относительно друга на угол  $1,5^\circ$ .



а)



б)

Рис.11. Фрагменты картины поля в области воздушного зазора: а) при исходном положении ротора (угол между осями пазов статора и ротора равен  $0^\circ$ ); б) при повороте ротора относительно статора на угол  $7,5^\circ$

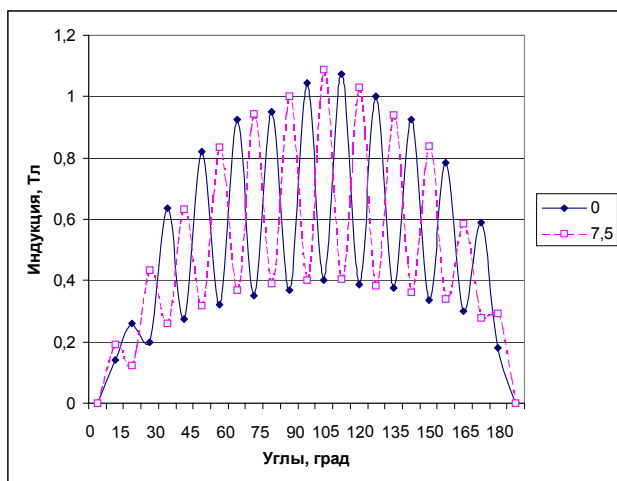


Рис.12. Кривые распределения магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль полюсного деления при углах поворота  $0^\circ$  и  $7,5^\circ$

Поскольку одно зубцовое деление статора в двигателе составляет  $\gamma_1 = 360^\circ / Z_1 = 15^\circ$ , то при указанном угловом смещении в любой момент времени зубцы статора и ротора по отношению друг к другу расположены в разных сердечниках в различных положениях, что ведет к фазовым сдвигам магнитных потоков зубцовых гармоник в разных сердечниках и их взаимной компенсации при индуктировании результирующей ЭДС в обмотке статора. При этом не требуется выполнять скос пазов одного сердечника ротора.

Предлагаемое техническое решение в определенной степени идентично скосу пазов ротора в пределах всей активной длины обмотки статора, который широко применяется в традиционных короткозамкнутых асинхронных двигателях.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методология построения конечно-элементных математических моделей, предназначенных для численного исследования физических полей в активной зоне ПЭД. Модели реализованы в виде алгоритмов и компьютерных программ с целью исследования полей и процессов в ПЭД.

2. Выполнен полевой анализ распределения электромагнитного поля ПЭД как с учетом влияния вихревых токов частоты скольжения, индуцированных в области вала ротора, так и без него. Показано, что в номинальном режиме работы плотность тока в вале ротора достигает значения  $0,3 \text{ А/мм}^2$ , что может влиять на дополнительный нагрев конструктивных элементов ротора.

3. Выполнено исследование влияния эксцентриситета на силу одностороннего магнитного тяжения. Полученные значения силы свидетельствуют о их существенном влиянии на работоспособность двигателя, что требует разработки специальных конструктивных и технологических решений по недопущению эксцентриситета.

4. Выполнен анализ распределения магнитного поля в воздушном зазоре. Показано наличие зубцовых гармоник большой амплитуды, для устранения которых целесообразно осуществить угловой сдвиг сердечников ротора по отношению друг к другу на угол  $1,5^\circ$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. – Київ, НТУУ "КПІ". – 2003. – 164с.
- [2] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир. – 1979. – 392с.
- [3] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радионженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир. – 1986. – 230с.

Поступила 30.09.2005