

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ БЕСПАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РОТОРОМ

Розглянуто пошук оптимальної геометрії елементів системи збудження і обмотки безпазових електро-механічних перетворювачів магнітоелектричного типу. Визначено співвідношення між діаметром двопольного циліндричного магніту та довжиною повітряного зазора, при яких досягається максимум електромагнітного моменту, залежно від співвідношення внутрішнього та зовнішнього діаметрів циліндричного магніту. Визначено оптимальний кут дуги повітряного зазора, у межах якого доцільно розміщувати активні частини обмоток.

Введение. В проводившихся ранее исследованиях, посвященных поиску оптимальных соотношений между размерами элементов систем возбуждения бесконтактных магнитоэлектрических двигателей (БМД) с беспазовым статором, были установлены, в частности, зависимости изменения средних значений индукции в зазоре при варьировании отношением длины зазора к диаметру цилиндрического ротора $L_u = \delta/D$ *. Для БМД с цилиндрическим

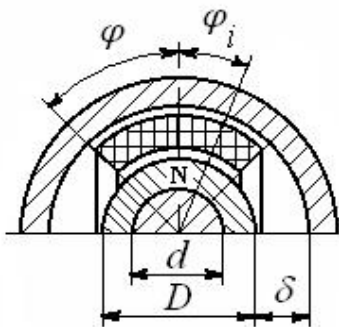


Рис. 1

ротором установлены также зависимости изменения среднего значения индукции в области расположения обмотки при варьировании угловой зоной этой области φ (рис. 1). Углом φ обозначена симметричная половина сечения активной зоны обмотки. В результате исследований был установлен закон изменения среднего значения радиальных составляющих индукции в элементарной радиальной трубке цилиндрического зазора, положение которой определяется углом φ_i :

$$B_{T_u}^{cp} = B_r \cdot b_u^{L_u} \cdot \cos \varphi_i, \quad (1)$$

где B_r – остаточная индукция магнита; $B_r \cdot b_u^{L_u}$ – средняя величина индукции в элементарной радиальной трубке зазора при $\varphi_i = 0$ и заданном значении L_u ; $b_u^{L_u}$ – степенная функция, определяющая крутизну падения среднего значения индукции в цилиндрическом зазоре при его увеличении.

Основание b_u показательной функции $b_u^{L_u}$, как показали исследования, зависит от отношения внутреннего и наружного диаметров цилиндрического магнита d/D и представляет собой положительное число, меньше единицы. В частности, для случая $d/D = 0$, когда магнит ротора не имеет центрального отверстия, b_u составляет 0,12. В соответствии с (1) среднее интегральное значение радиальных составляющих индукции в цилиндрическом зазоре для всего углового диапазона φ составляет

$$B_u^{cp} = B_r \cdot b_u^{L_u} \cdot \frac{\sin \varphi}{\varphi}. \quad (2)$$

В работе * определены также среднее значение плеча приложения электромагнитной силы $r_{cp} = (D + \delta)/2$ и средняя длина витка обмотки, включающая в себя активную и лобовую части. При этом была принята упрощенная модель длины витка, при которой активная и лобовая части были зависимы друг от друга. При этом модель не учитывала изменения дли-

ны лобовой части при варьировании конфигурацией обмотки. В результате такого упрощения влияние длины лобовой части обмотки на ее сопротивление при варьировании углом φ не было учтено, и оптимальная величина относительного зазора L_y была определена с некоторой погрешностью.

Одной из задач исследования было уточнение результата оптимизации геометрии магнитоэлектрической системы с двухполюсным цилиндрическим магнитом ротора. Кроме того, практический интерес представлял выбор оптимального углового размера обмотки φ , при котором эффективность взаимодействия обмотки и потока возбуждения будет максимальной. Проведение такого исследования представлялось целесообразным ввиду неравномерности распределения индукции по объему обмотки в соответствии с (1).

Определение оптимальных соотношений в БМД. Исходя из геометрии, представленной на рис. 1, была принята модель длины лобовой части среднего витка обмотки

$$l_n = 2(D + \delta) \frac{\sin \varphi}{\varphi},$$

которая учитывает зависимость длины лобовой части обмотки от величины угловой зоны ее активной части. При этом активная длина БМД l_a может устанавливаться независимо. Тогда выражение для общей длины среднего витка обмотки примет вид

$$l_{cp} = 2(D + \delta) \frac{\sin \varphi}{\varphi} + l_a.$$

Такая модель средней длины витка отличается от принятой ранее* и является более точной, поскольку позволяет не только учитывать изменение длины лобовой части витка, зависящей от угла φ , но и независимо вводить любую длину его активной части.

Выразим количество витков, размещаемых в зазоре в пределах угла φ через площадь сечения зазора и сечение провода s . Тогда с учетом коэффициента заполнения объема медью запишем $W = \frac{k \cdot \delta(D + \delta) \cdot \varphi}{2s}$.

Теперь можно записать выражение для сопротивления обмотки при заданных напряжении U и токе I :

$$R = \frac{\rho \cdot l_{cp} \cdot W}{s} = \frac{k \cdot \rho \cdot \delta(D + \delta) [2(D + \delta) \sin \varphi + \varphi \cdot l_a]}{2s} = \frac{U}{I}.$$

Так же, как и в предыдущей работе*, введем условие постоянства рассеиваемой в обмотке электрической мощности, выразив при этом сопротивление обмотки через геометрические размеры зазора:

$$s = \sqrt{\frac{k \cdot I \cdot \rho \cdot \delta(D + \delta) [2(D + \delta) \sin \varphi + \varphi \cdot l_a]}{2U}}. \quad (3)$$

Тогда с учетом (3) выражение для числа витков примет вид

$$W = \frac{\delta(D + \delta) \cdot \varphi \cdot \sqrt{k \cdot 2U}}{\sqrt{I \cdot \rho \cdot \delta(D + \delta) [2(D + \delta) \sin \varphi + \varphi \cdot l_a]}}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) представляют собой условия постоянства рассеиваемой в обмотке электрической мощности при переменном объеме обмотки и постоянной величине напряжения источника питания применительно к БМД с цилиндрическим магнитом ротора.

Подставим полученные зависимости для величин B_y^{cp} и W в выражение электромагнитного момента, развиваемого обмоткой с активной длиной витка l_a , учитывая, что $L_y = \delta/D$. В результате получим

* См. сноску на стр.

$$M = K \frac{\sin \varphi}{\sqrt{2D(1 + L_y) \sin \varphi + \varphi \cdot l_a}}, \quad (5)$$

где
$$K = \frac{B_r \cdot b_y^{L_y} \cdot l_a \cdot D^3 \cdot L_y (1 + L_y)^2 \cdot \sqrt{2k \cdot P}}{2\sqrt{\rho \cdot D^2 \cdot L_y (1 + L_y)}}.$$

Решение экстремальной задачи для выражения (5) по переменной L_y при любом фиксированном угле φ выявило единственный экстремум, соответствующий величине $L_y = 0,39$. График зависимости $M(L_y)$ представлен на рис. 2.

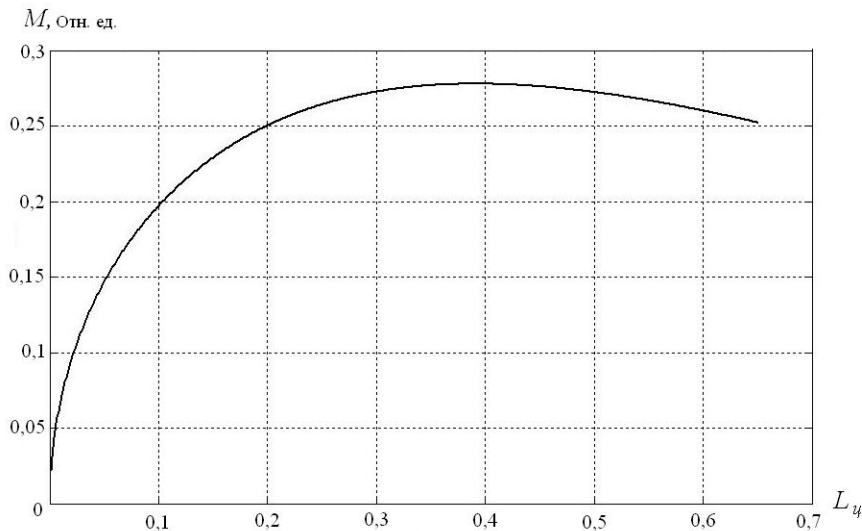


Рис. 2

Величина оптимального относительного зазора (рис. 2) получена для БМД с цельным цилиндрическим двухполюсным магнитом ротора без центрального отверстия ($d/D = 0$). Если же цилиндрический магнит имеет центральную полость, то основание b_y показательной функции $b_y^{L_y}$ в (2), определяющей крутизну изменения среднего значения индукции в зазоре при варьировании величиной L_y , будет зависеть также от отношения

внутреннего и внешнего диаметров d/D . В соответствии с этим будет изменяться и положение точки оптимума L_y . Это объясняется тем, что по мере увеличения диаметра центрального отверстия магнита нелинейно уменьшаются абсолютные значения индукции в зазоре и соответственно величина развиваемого момента, которая не может быть скомпенсирована ростом объема обмотки. Поэтому должны уменьшаться и оптимальные значения L_y , соответствующие максимуму развиваемого электромагнитного момента. Аналогичные исследования по установлению зависимостей изменения индукции в зазоре для различных величин отношения d/D дали результирующую зависимость оптимальных значений $L_y(d/D)$, обеспечивающих максимальное значение момента при изменении отношения d/D (рис. 3).

Выполнение условия оптимума отношения длины воздушного зазора к длине

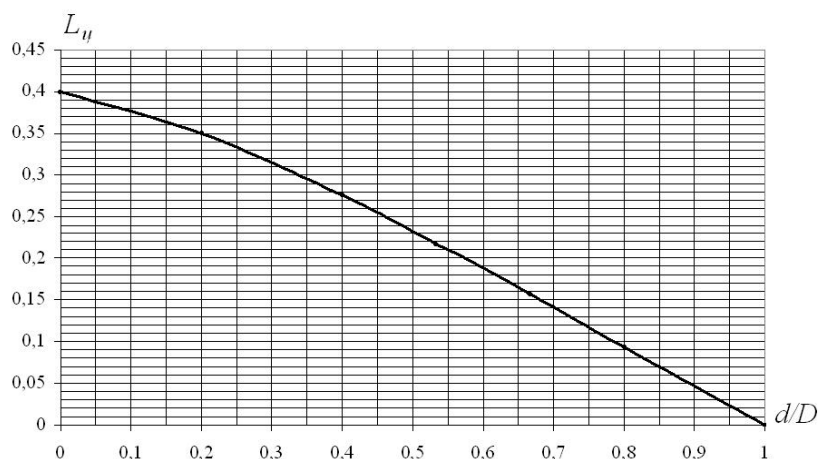


Рис. 3

постоянного магнита еще не решает полностью задачу достижения максимальной эффективности взаимодействия потока возбуждения и токовых контуров в БМД. Это связано с тем, что рабочая составляющая индукции в зазоре изменяет свое значение от максимума на полюсе до нуля в нейтральном сечении магнитной системы, поэтому протяженность углового диапазона (φ), в пределах которого размещаются активные части обмотки в зазоре, тоже влияет на величину развиваемого момента. Выбор этого объема и его положения проведем в обобщенном виде по критерию максимума развиваемого момента на единицу затрачиваемой электрической энергии. При этом определяющей переменной в выражении момента (5) выберем угловой размер обмотки φ , зафиксировав L_{ψ} . Напомним, что угол φ – это угол, в пределах которого располагается симметричная половина сечения обмотки, или половина одной секции обмотки, если она выполняется распределенной (секционированной), как при использовании многополюсного ротора. Исследование (5) на экстремум по переменной φ при фиксированной L_{ψ} показало, что в пределах физически возможного диапазона задания угла φ ($0 \dots \pi/2$) положение точки экстремума момента зависит от соотношения между диаметром цилиндрического магнита ротора и его длиной. Закон изменения угла φ_{opt} , соответствующего максимуму развиваемого момента при изменении отношения l_p/D , представлен на рис. 4. Здесь $l_p = l_a/2$ – длина активной части ротора (длина постоянного магнита).

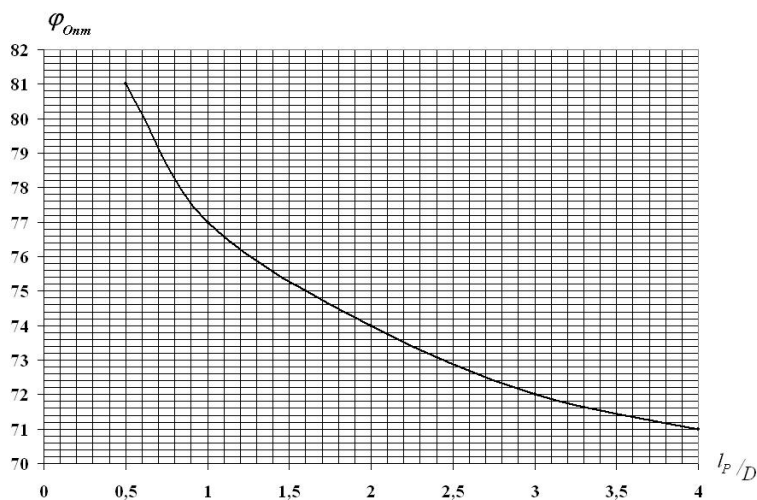


Рис. 4

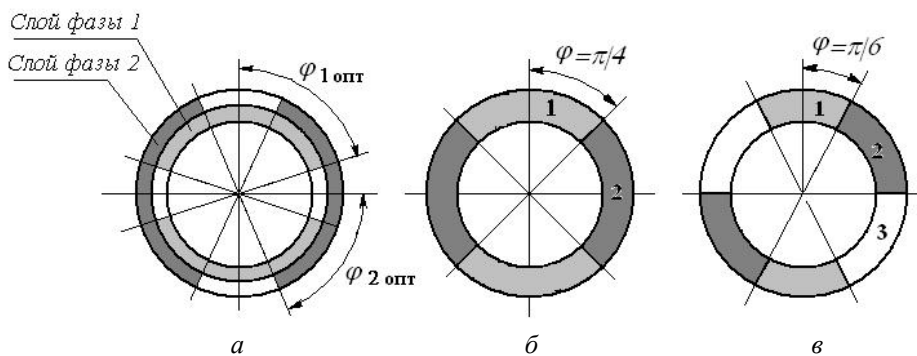


Рис. 5

Из рисунка следует, что оптимальная величина угла возрастает при трансформации двигателя в плоский диск. Объясняется это тем, что при уменьшении активной части витка возрастает доля лобовых частей, длина которых зависит от угла φ . Следует заметить, что практически оптимальная величина φ_{opt} может быть выдержана только в случае многослойной обмотки, когда обмотка каждой последующей фазы располагается поверх обмотки предыдущей (рис. 5 а). Если же катушки всех фаз обмотки укладываются в один слой, то предельно возможный угол φ для двухфазной обмотки составляет 45 град. (рис. 5 б), а для трехфазной обмотки – 30 град. (рис. 5 в). Отметим, что при использовании трехфазной обмотки к инвертору поочередно подключаются последовательно соединенные 1-2, 2-3 и 3-1 обмотки. Каждая пара подключаемых обмоток представляет собой одну фазу, взаимодействующую с полюсом ротора, для которой угол φ_{ϕ} в соответствии с рис. 5 в составляет 60 град. ($\varphi_{\phi} = 2\varphi$).

В заключение следует отметить следующее:

1. Полученные результаты относятся только к беспазовым БМД с двухполюсным цилиндрическим магнитом ротора.

2. При принятой модели средней длины витка оптимальное отношение длины воздушного зазора к диаметру ротора ($L_{\text{ц}} = 0,39$) отличается от полученного ранее ($L_{\text{ц}} = 0,36$) и является, по мнению авторов, более точным.

3. Полученные рекомендации по выбору соотношений между диаметром магнита и длиной воздушного зазора $L_{\text{ц}} (d/D)$ и $\varphi_{\text{опт}} (l_p/D)$ вполне применимы не только к БМД, но и к генераторам магнитоэлектрического типа, поскольку величина возбуждаемой в обмотке ЭДС зависит от тех же параметров, что и электромагнитный момент в двигателе.

Рассмотрен поиск оптимальной геометрии элементов системы возбуждения и обмотки беспазовых электромеханических преобразователей магнитоэлектрического типа. Определены соотношения между диаметром двухполюсного цилиндрического магнита и длиной воздушного зазора, при которых достигается максимум электромагнитного момента, в зависимости от соотношения внутреннего и наружного диаметров цилиндрического магнита. Определен оптимальный угол дуги воздушного зазора, в пределах которого целесообразно размещать активные части обмоток.

The article is dedicated to the search of the optimal configuration of the elements of excitation system and the windings of slotless electromechanical converters of the magnetoelectric type. The correlation between the diameter of two-band cylindrical magnet and the gap width with the maximal air gap torque depending on correlations between internal and external diameters of the cylindrical magnet is measured. The optimum gap arc angle being reasonable for active winding deployment is measured.

Надійшла 26.02.2010