

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ (ВМАП)

С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов

Приводятся результаты исследования по выбору оптимального соотношения между наружным и внутренним диаметром для ВМАП с сегментными магнитами. Основываясь на том, что электромагнитная мощность ВМАП пропорциональна магнитному потоку и сечению проводников полюсного деления, было отмечено, что осевая длина машины в меньшей степени влияет на мощность. В большей степени на выходную мощность при фиксированном наружном диаметре влияет внутренний диаметр. Если внутренний диаметр приближается к наружному, то происходит уменьшение магнитного потока. При уменьшении внутреннего диаметра сокращается сечение проводников якорной обмотки. Таким образом, существует оптимальный внутренний диаметр, обеспечивающий максимальную выходную мощность при фиксированном наружном диаметре. В работе определены и теоретически доказаны оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами аксиальных машин для магнитных систем призматическими и сегментными магнитами.

*Ключевые слова:* вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком, синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, отношение геометрических размеров.

В настоящее время большое количество организаций занимается изучением вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП). Определенные научные и инженерные заделы по этой теме имеет кафедра электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ [1]. В частности, на кафедре активно ведутся работы по оптимизации геометрии двигателей этого класса. В статье приводятся результаты исследования по выбору оптимального соотношения между наружным и внутренним диаметром для ВМАП с сегментными магнитами.

В проектной практике ВМАП часто возникает задача, при которой заказчик фиксирует наружный диаметр ВМАП [2]. В этих условиях основной задачей разработчика является получение максимальной мощности в определенных габаритах.

Известно, что электромагнитная мощность ВМАП пропорциональна магнитному потоку и сечению проводников полюсного деления [3]. Уравнение электромагнитной мощности показывает, что осевая длина машины в меньшей степени влияет на мощность. Она определяет, в основном, высоту магнита и соответствующее ей оптимальное значение магнитного потока. В большей степени на выходную мощность при фиксированном наружном диаметре влияет внутренний диаметр. Если внутренний диаметр приближается к наружному, то происходит уменьшение магнитного потока. При уменьшении внутреннего диаметра сокращается количество меди якорной обмотки. Таким образом, должен существовать оптимальный внутренний диаметр, обеспечивающий макси-

мальную выходную мощность при фиксированном наружном диаметре.

Определим это оптимальное значение для различных конструктивных исполнений ВМАП.

Магнитные системы с призматическими магнитами [3]. Обобщенное уравнение электромагнитной мощности для ВМАП с призматическими магнитами при различных вариантах коммутации можно представить в следующем виде [3]:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{60} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} n \times \left( \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}}{2} \right)^2 \left( \frac{D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}}{2} \right) K_{\text{mod}} K_{\text{кэф}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{mod}}$  – коэффициент модели для соответствующей модели [3];

$K_{\text{кэф}}$  – коэффициент эффективности коммутации для соответствующей коммутации [3].

Выразим среднее значение индукции через коэффициент заполнения кольца сердечника магнитами:

$$B_{\text{ср}} = K_{\text{маг}} B_{\delta}.$$

При условии расположения призматических магнитов встык по внутреннему диаметру коэффициент заполнения диска магнитной системы постоянными магнитами можно выразить уравнением

$$K_{\text{маг}} = \frac{0,5(D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}) \frac{\pi D_{\text{вн}}}{2p} 2p}{0,25\pi(D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2)} = \frac{2D_{\text{вн}}}{D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}}. \quad (2)$$

\* Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г.

Среднее значение линейной нагрузки можно представить следующим образом:

$$A_{\text{ср}} = \frac{h_a K_{\text{меди}} j_a (D_{\text{вн}} - 2h_a)}{0,5(D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})}, \quad (3)$$

где  $h_a$  – высота активного слоя в рабочем зазоре;

$K_{\text{меди}}$  – коэффициент заполнения медью секции якорной обмотки;

$j_a$  – плотность тока в якорной обмотке.

Подставив в уравнение (1) выражение (2) и (3), получим выражение для электромагнитной мощности:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{120} j_a B_{\delta} n h_a D_{\text{вн}} (D_{\text{вн}} - 2h_a) (D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}) \times \\ \times K_{\text{меди}} K_{\text{mod}} K_{\text{кэф}}.$$

Зафиксируем наружный диаметр и найдем оптимальное значение внутреннего диаметра, соответствующее максимуму электромагнитной мощности. Для этого производную электромагнитной мощности по внутреннему диаметру приравняем к нулю.

Получим следующее квадратное уравнение.

$$3D_{\text{вн}}^2 - 2(D_{\text{н}} + 2h_a)D_{\text{вн}} + 2h_a D_{\text{н}} = 0.$$

Данное уравнение имеет одно физически реальное решение.

$$D_{\text{вн}} = \frac{2(D_{\text{н}} + 2h_a) + \sqrt{4(D_{\text{н}} + 2h_a)^2 + 24h_a D_{\text{н}}}}{6}.$$

Учитывая тот факт, что высота активного слоя имеет существенно меньшее значение по сравнению с наружным диаметром, уравнение можно преобразовать к упрощенному виду:

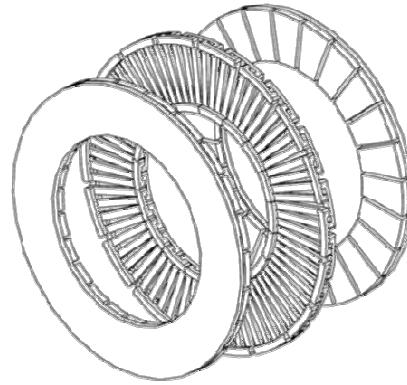
$$D_{\text{вн}} = \frac{2}{3} D_{\text{н}} = 0,66 D_{\text{н}}. \quad (4)$$

Таким образом, оптимальное соотношение между внутренним и наружным диаметром для призматических магнитов, обеспечивающее максимальную электромагнитную мощность при фиксированном наружном диаметре определяется соотношением (4). Полученная зависимость позволяет сократить число независимых переменных при оптимизации ВМАП.

Определим это оптимальное значение для ВМАП с сегментными магнитами. На рисунке изображена модель с магнитной системой, содержащей сегментные магниты.

По аналогии с магнитной системой, имеющей призматические магниты, уравнение электромагнитной мощности для моделей с сегментными магнитами можно представить в виде уравнения:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{60} A_{\text{ср}} B_{\text{ср}} n \left( \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}}{2} \right)^2 \left( \frac{D_{\text{н}} - D_{\text{вн}}}{2} \right) \times \\ \times K_{\text{mod}} K_{\text{кэф}}. \quad (5)$$



Модель с сегментными магнитами

Среднее значение индукции через коэффициент заполнения кольца магнитопровода магнитами можно выразить уравнением:

$$B_{\text{ср}} = K_{\text{маг}} B_{\delta}, \quad (6)$$

где  $K_{\text{маг}}$  – коэффициент заполнения диска индуктора сегментными постоянными магнитами.

Среднее значение линейной нагрузки можно выразить уравнением:

$$A_{\text{ср}} = \frac{h_a K_{\text{меди}} j_a (D_{\text{вн}} - 2h_a)}{0,5(D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})}, \quad (7)$$

Подставим выражения (6) и (7) в уравнение электромагнитной мощности (5). Получим следующее выражение:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{240} j_a B_{\delta} n h_a (D_{\text{вн}} - 2h_a) (D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \times \\ \times K_{\text{маг}} K_{\text{меди}} K_{\text{mod}} K_{\text{кэф}}.$$

Зафиксируем наружный диаметр кольца и определим значение внутреннего диаметра, которое обеспечивает максимальную электромагнитную мощность. Для этого возьмем производную от электромагнитной мощности по внутреннему диаметру и приравняем ее к 0. В результате получим следующее квадратное уравнение:

$$3D_{\text{вн}}^2 - 4h_a D_{\text{вн}} - D_{\text{н}}^2 = 0.$$

Квадратное уравнение имеет следующее физически реальное решение:

$$D_{\text{вн}} = \frac{4h_a + \sqrt{16h_a^2 + 12D_{\text{н}}^2}}{6}.$$

Высота активного слоя по сравнению с наружным диаметром является существенно малой величиной и ей можно пренебречь. Тогда оптимальное значение внутреннего диаметра при фиксированном наружном, которое обеспечивает максимальную электромагнитную мощность для варианта с сегментными магнитами, будет равно:

$$D_{\text{вн}} = \frac{D_{\text{н}}}{\sqrt{3}} = 0,578 D_{\text{н}}. \quad (8)$$

Таким образом, оптимальное соотношение между внутренним и наружным диаметром для сегментных магнитов, обеспечивающее максимальную электромагнитную мощность при фиксированном наружном диаметре, определяется соотношением (8).

### Выводы

Определены и теоретически доказаны оптимальные соотношения между наружным и внутренним диаметрами ВМАП для магнитных систем с сегментными магнитами (8).

Полученная зависимость позволяет сократить число независимых переменных при оптимизации ВМАП.

### Литература

1. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором / С.А. Ганджа // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12, № 34. – С. 68–72.
2. Киндряшов, А.Н. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения / А.Н. Киндряшов, А.С. Мартьянов, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2013. – № 1. – С. 59–62.
3. Ганджа, С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком / С.А. Ганджа // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика» – 2010. – Вып. 14, № 32. – С. 64–69.

**Ганджа Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электромеханика и электромеханические системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8-908-812-5819, gandzhasa@susu.ac.ru

**Мартьянов Андрей Сергеевич**, начальник конструкторского отдела, ЗАО НИИ «Уралмет», г. Челябинск, тел.: 8-902-600-2557, martianovas@susu.ac.ru

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2013, vol. 13, no. 2, pp. 88–90**

---

## DEFINING THE OPTIMAL OUTLINE DIMENSIONS FOR AXIAL GAP ELECTRIC MACHINES

**S.A. Gandja**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, gandzhasa@susu.ac.ru

**A.S. Martyanov**, ZAO NII Uralmet, Chelyabinsk, Russian Federation, martianovas@susu.ac.ru

Article describes the results of research in defining of optimal ratio between outer and inner diameter of axial gap electric machines with rectangle and segment magnets. It's known that electromagnetic power of axial gap motors is proportional to magnetic flux and cross section of wires in the coil. Equation for electromagnetic power states that the power does not depend on axial length of motor notable. More important factor is an inner diameter for given outer diameter of motor. If inner diameter gets close to outer then the magnetic flux becomes lesser. In the case when inner diameter of motor is small the room for wires is not enough. So there is an optimal inner diameter for given outer dimension which provides a maximum power. The research presents and proves optimal ratio between inner and outer diameters of axial gap machines for rectangle and segment shape magnets.

*Keywords: permanent magnet synchronous machines, axial gap electric machines, inner outer diameter ratio, outline dimension definition.*

### References

1. Gandja, S.A. Optimum designing of electric drives on the base of axial gap electrical machines, *Bulletin of the South Ural state university. Series Power Engineering*, 2009, Issue 12, no. 34, pp. 68–72.
2. Kindryashov A.N., Martyanov A.S., Solomin E.V. Electrical machines for vertical axis wind turbines, *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, Scientific Technical Centre "TATA", 2013, no. 1, pp. 59–62.
3. Gandja S.A. The analysis of electromagnetic capacity for various designs of valve cars with the axial stream, *Bulletin of the South Ural state university. Series Power Engineering*, 2010, Issue 14, no. 32, pp. 64–69.

*Поступила в редакцию 01.03.2013 г.*