

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

С.А. Ганджа, А.С. Мартьянов

Описывается инженерная методика расчета аксиальных машин с сегментными магнитами и трапецидальными катушками. В основу методики легли номограммы по выбору основных размеров, рассчитанные с применением специального программного комплекса, разработанного на кафедре электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ. Зависимыми переменными, однозначно определяющими геометрию модели, являются: наружный диаметр, внутренний диаметр, высота активного слоя, высота магнита, число пар полюсов. Остальные размеры являются зависимыми от основных размеров или определяются технологией изготовления. Разработанная методика расчета ВМАП позволяет проводить оперативную оценку конструкций, что уменьшает время разработки изделия.

Ключевые слова: вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком, синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, методика расчета, инженерная методика.

В настоящее время активно развивается класс электроприводов на основе использования вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) [1]. Ниже представлена инженерная методика проектирования ВМАП с сегментными магнитами и трапецидальными катушками [2]. В основу методики легли номограммы по выбору основных размеров, рассчитанные с применением программного комплекса [3].

Независимыми переменными, однозначно определяющими геометрию модели, являются: наружный диаметр, внутренний диаметр, высота активного слоя, высота магнита, число пар полюсов. Остальные размеры ВМАП являются зависимыми от основных размеров или определяются технологией изготовления.

1. Исходными данными для расчета являются:

P_n – номинальная мощность (Вт);

n_n – номинальная частота вращения (об/мин);

U_n – номинальное фазное напряжение (В);

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности;

η – коэффициент полезного действия;

$m = 3$ – число фаз.

Технологические и эксплуатационные данные:

B_r – остаточная индукция постоянного магнита, 1,1–1,25 Тл;

H_c – коэрцитивная сила постоянного магнита, 840000–900000 А/м;

k_σ – коэффициент рассеяния магнитной системы, 1,15–1,25;

k_μ – коэффициент насыщения магнитной системы, 1,1–1,2;

δ – воздушный зазор, 1,0–1,5 мм;

k_e – коэффициент ЭДС:

$k_e = 1,05$ – $1,25$ – для генераторного режима;

$k_e = 0,85$ – $0,95$ – для двигательного режима.

Для расчета номограмм использовался высший уровень оптимизации – габаритная оптимизация по критерию минимальной массы активных материалов. Номограммы рассчитывались для указанных выше условий проектирования для трехфазной системы и 120-градусной коммутации при рабочей температуре якорной обмотки 100 °С и плотности тока в якорной обмотке 5 А/мм². Расчеты показали, что высота активного слоя и высота магнита для выше названных условий меняются в очень узких пределах. Это позволяет для инженерной методики считать их фиксированными и не включать в номограммы.

2. Определение номинального фазного тока:

$$I_n = \frac{P_n}{m U_n \cos \varphi} \quad \text{– для генератора.}$$

$$I_n = \frac{P_n}{m U_n \cos \varphi \eta} \quad \text{– для двигателя.}$$

3. Определение номинального момента:

$$M_n = \frac{30 P_n}{\pi n}.$$

4. Определение по номограммам (рис. 1 и рис. 2) основных геометрических размеров (наружного диаметра D_n , внутреннего диаметра $D_{вн}$) и числа пар полюсов.

5. Высоту активного слоя выбираем из диапазона: $h_a = 0,0095$ – $0,011$.

6. Высоту постоянного магнита выбираем из диапазона: $h_m = 0,01$ – $0,011$.

* 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.

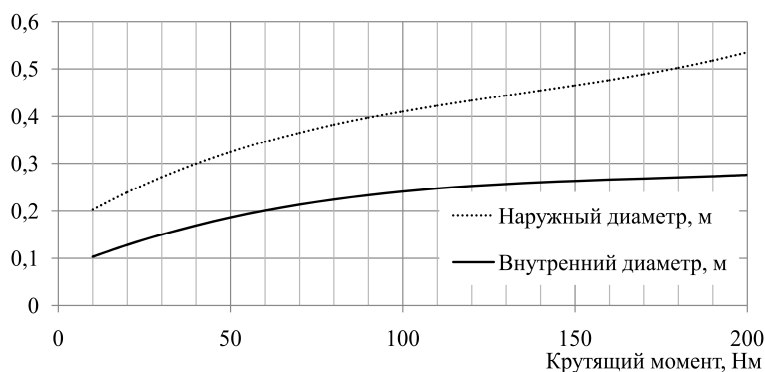


Рис. 1. Номограмма выбора основных размеров

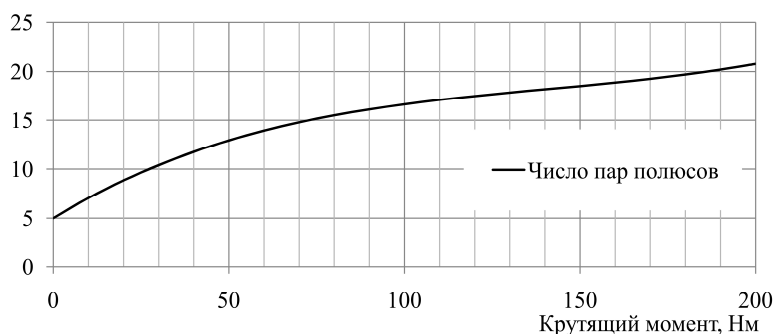


Рис. 2. Номограмма выбора числа пар полюсов

7. Определение частоты ЭДС: $f = \frac{pn}{60}$,

где p – число пар полюсов.

8. Определение индукции в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{2h_m H_c}{\frac{2h_m k_{\sigma}}{\mu_r} + \frac{(2\delta + h_a) k_{\mu}}{\mu_0}}$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха;

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c} \text{ – магнитная проницаемость постоянного магнита.}$$

9. Магнитный поток полюса (Вб):

$$\Phi_{\delta} = \alpha_{\delta} \frac{\pi(D_n^2 - D_{вн}^2)}{4} B_{\delta},$$

где коэффициент полюсного перекрытия выбирается из диапазона $\alpha_{\delta} = 0,85-0,92$.

10. Количество витков в фазе: $W_f = \frac{U_n k_e}{4k_B f \Phi_{\delta}}$.

11. Количество витков в секции: $W_c = \frac{W_f}{2p}$.

12. Сечение обмотки якоря (кв. м):

$$q_a = \frac{\pi D_{\text{ср}} h_a k_{\text{змср}}}{2m W_f}.$$

13. Средняя длина витка фазной секции:

$$L_{\text{ср}} = (D_n - D_{\text{вн}}) + \frac{\pi(D_n + 0,01)}{2p} + \frac{\pi(D_{\text{вн}} - 0,01)}{2p}.$$

14. Активное сопротивление фазы (Ом):

$$r_a = \rho_t \frac{L_{\text{ср}} \cdot W_f}{q_a},$$

где ρ_t – удельное сопротивление обмотки якоря при рабочей температуре (Ом/м).

15. Электрические потери в обмотке якоря (Вт): $P_{\text{эл}} = I_a^2 r_a (m-1)$.

16. Потребляемая активная мощность (Вт):

$$P_1 = m(U_n + I_a r_a) I_a \cos \varphi \text{ – для генератора;}$$

$$P_1 = m U_n I_a \cos \varphi \text{ – для двигателя.}$$

17. Полезная мощность на валу (Вт):

$$P_2 = P_1 - P_{\text{эл}}.$$

18. Коэффициент полезного действия: $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

Если полученный КПД отличается от предварительно заданного более чем на 10 %, необходимо уточнить этот параметр и повторить расчет с п. 2.

19. Масса активных частей (кг):

$$\text{масса меди (кг): } M_{\text{меди}} = 8900 L_{\text{ср}} q_a W_c 2pm;$$

$$\text{масса постоянных магнитов (кг):}$$

$$M_{\text{маг}} = 7800 S_{\text{маг}} h_m 4p;$$

$$\text{масса дисков (кг):}$$

$$M_{\text{диск}} = 7800 \frac{\pi(D_n^2 - D_{\text{вн}}^2)}{2} h_{\text{диск}};$$

$$\text{масса активных материалов (кг):}$$

$$M_{\text{ак.мат}} = M_{\text{меди}} + M_{\text{маг}} + M_{\text{диск}}.$$

20. Объем активных частей (куб. м)

$$V_{\text{ак. маг}} = \frac{\pi(D_{\text{н}}^2 - D_{\text{вн}}^2)}{4} (2h_{\text{диск}} + 2\delta + h_a + 2h_m).$$

По результатам расчета необходимо уточнить коэффициент насыщения, коэффициент рассеяния, коэффициент ЭДС. Если они отличаются от предварительно выбранных значений более чем на 10 %, то расчет необходимо повторить с уточненными значениями.

Стендовые испытания опытных образцов показали хорошую сходимость результатов расчета с тестовыми измерениями. Погрешности по ЭДС холостого хода не превысили 7 %, а по номинальной мощности и номинальному напряжению при номинальной частоте вращения составили 5...8 %.

Представленная методика используется в учебном процессе кафедры «Электромеханика и электромеханические системы» Энергетического факультета Южно-Уральского государственного университета при подготовке специалистов по дисциплине «Конструкции, методы расчета и проектирования электромеханических устройств и электромеханических преобразователей».

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

Выводы

1. Разработанная инженерная методика расчета ВМАП на основе использования номограмм по выбору основных размеров позволяет проводить оперативную оценку конструкций, что повышает конкурентоспособность разработок на рынке инженерного труда.

2. Эффективность работы инженерной методики проверена в реальных коммерческих проектах.

Литература

1. Копылов, И.П. *Электрические машины* / И.П. Копылов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.

2. Ганджа, С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»* – 2010. – Вып. 14, № 32. – С. 64–69.

3. Ганджа, С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2009. – Вып. 12, № 34. – С. 68–72.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 85–87*

ENGINEER METHODIC FOR CALCULATION OF 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

An article describes an engineer methodic for calculation of axial gap motors with segment magnets and trapezoid coils based on charts calculated with special program developed in department of electro mechanics and electromechanical systems of Ural South University. Variables to describe the dimensions of motor are outer and inner diameters, height of coils and magnets, number of pole pairs. Other parameters depend on these or supplied by technology. Developed methodic of calculation provides quick time estimation of axial motor design in engineer practice.

Keywords: permanent magnet synchronous machines, axial gap electric machines, engineer methodic, estimation of design.

References

1. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny*, 5th vyp., M.: Vyssh. shk., 2006, 607 p.
2. 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.
3. 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.

Поступила в редакцию 12.09.2013 г.