

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Радимов И.Н., к.т.н., доц.  
ООО "Завод "Электротехника"  
Украина, 54028, Николаев, ул. Новозаводская, 19  
тел. (048) 738-58-55, E-mail: office@zelnk.com

Рымша В.В., д.т.н., проф., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П.  
Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин  
тел. (048) 738-58-55, E-mail: office@zelnk.com

*Виконано мінімізацію реактивного моменту вентильного двигуна з постійними магнітами шляхом вибору раціональних геометричних співвідношень його активної зони.*

*Выполнена минимизация реактивного момента вентильного двигателя с постоянными магнитами путем выбора рациональных геометрических соотношений его активной зоны.*

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ) на сегодняшний день находят широкое применение в системах автоматизации технологических процессов [1, 4]. Это связано с доступностью высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ) и развитием полупроводниковой техники. При серийном производстве ВДПМ на первый план выходит упрощение технологии их изготовления и, следовательно, снижение себестоимости производства. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является применение в ВДПМ явнополюсного статора с сосредоточенными катушками его обмотки (рис. 1).

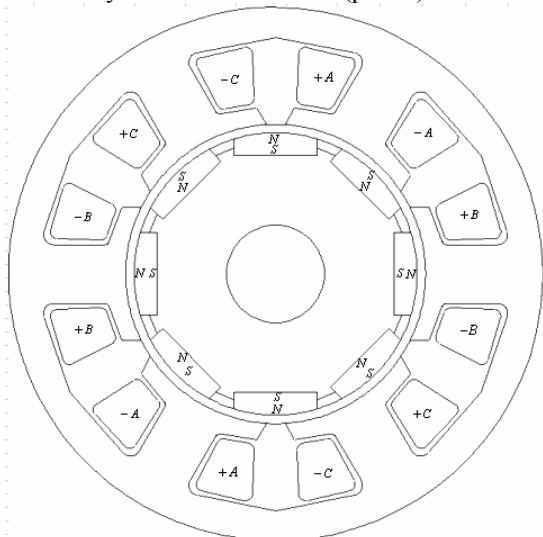


Рис. 1. Поперечное сечение ВДПМ

Для примера (см. рис. 1) при числе зубцов (пазов) статора  $Z_1 = 6$  выполняется обмотка с числом фаз  $m = 3$ . Число полюсов ротора  $2p = 8$ . При этом соблюдается симметрия обмотки статора, имеющей дробное число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{6}{8 \cdot 3} = \frac{1}{4}.$$

Шаг обмотки по пазам:  $y = 1$ , т.е. катушки имеют минимальные по длине лобовые части.

В то же время явнополюсная структура статора ВДПМ и связанная с этим неравномерность воздушного зазора приводит к возникновению реактивных моментов как от действия МДС постоянных магнитов, так и от действия МДС реакции якоря. Наиболее существенное влияние на свойства и характеристики электроприводов с ВДПМ оказывает реактивный момент  $M_p$  от действия МДС постоянных магнитов. Существует несколько способов уменьшения отрицательного влияния этого реактивного момента, а именно: скос зубцов (пазов) статора, либо скос ПМ, находящихся на роторе; сдвиг ПМ в несколько ступеней; вырезы на поверхности полюсного башмака [3,5]. Указанные способы являются достаточно эффективным инструментом в борьбе с реактивным моментом. Однако их применение ведет к усложнению технологии изготовления ВДПМ. В этой ситуации представляется целесообразным таким образом подобрать геометрические соотношения активной зоны двигателя, чтобы получить минимально возможный реактивный момент при токе статора  $I_S = 0$  и, тем самым, избежать необходимости применения способов снижения  $M_p$ , ведущих к удорожанию ВДПМ.

Решение сформулированной задачи проведем для двигателя с наружным диаметром статора 81 мм и длиной пакета 45 мм. Материал постоянных магнитов – NdFeB. Номинальный момент двигателя – 1 Нм.

В качестве исходных варьируемых геометрических размеров примем (рис. 2):

- длину воздушного зазора  $\delta$ ;
- полюсную дугу магнита  $\alpha_{\text{mag}}$ ;
- дугу шлица  $\alpha_{\text{шл}}$ .

Целевой функцией служит минимальная величина амплитуды реактивного момента  $M_{p \max}$ , т.е.  $M_{p \max} \Rightarrow \min$ , определяемая по результатам расчета магнитного поля ВДПМ методом конечных элементов (рис. 3).

Для обзора области исследования пределы изменения варьируемых переменных приняты следующими (табл. 1).

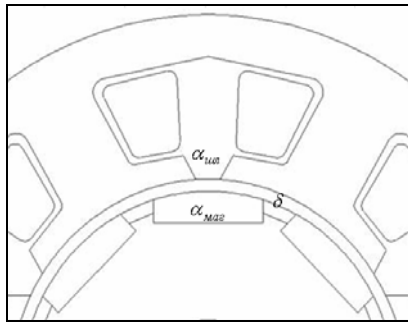


Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения ВДПМ

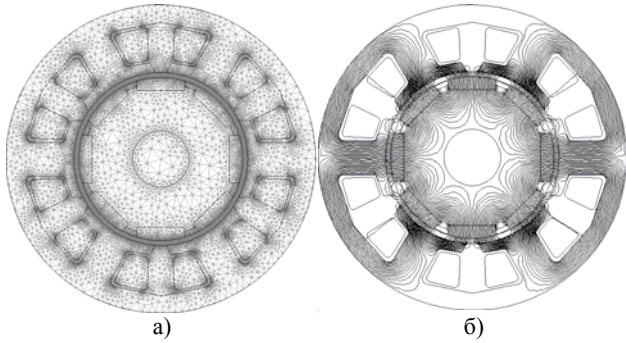


Рис. 3. Разбивка расчетной области на конечные элементы (а) и распределение магнитного поля для одного из расчетных вариантов (б)

Таблица 1

| Переменная            | Размерность | Минимальное значение | Максимальное значение |
|-----------------------|-------------|----------------------|-----------------------|
| $\delta$              | мм          | 0,7                  | 1,6                   |
| $\alpha_{\text{маг}}$ | град.       | 32                   | 36                    |
| $\alpha_{\text{шл}}$  | град.       | 6                    | 12                    |

Первоначально, методом случайного поиска, был определен ряд из 19 вариантов сочетания варьируемых переменных, для которых проводился расчет зависимости  $M_p = f(\Theta)$  при изменении угла поворота ротора ВДПМ в пределах ( $\Theta = 0 \div 45$ ) градусов с шагом 0,5 градуса. По результатам расчетов вычислялась амплитуда  $M_{p \max}$ .

Исходные данные и результаты расчетов величины  $M_{p \max}$  сведены в табл. 2.

Как следует из представленных в табл. 2 данных, лучшим вариантом является вариант № 19, для которого  $M_{p \max} = 0,0092$  Нм.

Анализ полученных результатов показывает целесообразность сужения области поиска в окрестность значений  $\delta = 1,3$  мм,  $\alpha_{\text{маг}} = 34$  град.,  $\alpha_{\text{шл}} = 7$  град., принадлежащих варианту № 19.

Исходя из этого, второй этап расчетных исследований был проведен с применением методики рационального планирования эксперимента [2] при вариации переменных на 5 уровнях (табл. 3). Классическая схема полного исследования влияния трех факторов, каждый из которых может принимать пять различных значений, требует расчета  $5^3 = 125$  различных вариантов. В соответствии с [2] выбрана схема планирования, при которой надо исследовать только 25 вариантов (табл. 4).

Таблица 2

| № вар. | $\delta$ , мм | $\alpha_{\text{маг}}$ , град. | $\alpha_{\text{шл}}$ , град. | $M_{p \max}$ , Нм |
|--------|---------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1      | 0,7           | 35                            | 9                            | 0,218             |
| 2      | 1,3           | 35                            | 12                           | 0,029             |
| 3      | 1,5           | 34                            | 7                            | 0,016             |
| 4      | 1,3           | 33                            | 10                           | 0,057             |
| 5      | 1,4           | 33                            | 11                           | 0,069             |
| 6      | 0,7           | 35                            | 8                            | 0,22              |
| 7      | 1,1           | 34                            | 11                           | 0,029             |
| 8      | 0,7           | 32                            | 11                           | 0,155             |
| 9      | 1,6           | 36                            | 7                            | 0,037             |
| 10     | 1,3           | 34                            | 8                            | 0,011             |
| 11     | 1,1           | 35                            | 8                            | 0,075             |
| 12     | 1,6           | 35                            | 10                           | 0,011             |
| 13     | 0,9           | 35                            | 6                            | 0,136             |
| 14     | 1,6           | 33                            | 6                            | 0,027             |
| 15     | 1,5           | 34                            | 11                           | 0,037             |
| 16     | 1,1           | 32                            | 10                           | 0,11              |
| 17     | 1,2           | 34                            | 10                           | 0,021             |
| 18     | 1,3           | 32                            | 11                           | 0,11              |
| 19     | 1,3           | 34                            | 7                            | 0,0092            |

Таблица 3

| Переменная            | Размерность | Уровни факторов |      |     |      |     |
|-----------------------|-------------|-----------------|------|-----|------|-----|
|                       |             | 1               | 2    | 3   | 4    | 5   |
| $\delta$              | мм          | 1,2             | 1,25 | 1,3 | 1,35 | 1,4 |
| $\alpha_{\text{маг}}$ | град.       | 33              | 33,5 | 34  | 34,5 | 35  |
| $\alpha_{\text{шл}}$  | град.       | 6               | 6,5  | 7   | 7,5  | 8   |

Результаты полевых расчетов – значения амплитуды реактивного момента  $M_{p \max}$  – приведены в столбце 5 табл. 4.

Из представленных в таблице 4 данных следует, что лучшим вариантом является вариант № 17, для которого  $M_{p \max} = 0,0088$  Нм при следующих геометрических размерах:  $\delta = 1,25$  мм,  $\alpha_{\text{маг}} = 34$  град.,  $\alpha_{\text{шл}} = 8$  град. Очевидно, что второй этап поиска не дал существенного снижения величины  $M_{p \max}$ . И на первом, и на втором этапах отношение момента  $M_{p \max}$  к номинальному моменту в лучших вариантах составляет менее 1%, что свидетельствует о нецелесообразности проведения дальнейших поисковых исследований с целью снижения величины  $M_{p \max}$ .

Определенный интерес представляет оценка влияния геометрических соотношений на форму и амплитуду реактивного момента. Как показано в [5] для снижения величины  $M_{p \max}$  увеличивают частоту изменения функции  $M_p = f(\Theta)$ .

Для этого на полюсных наконечниках статора выполняют различное количество вырезов прямоугольной или овальной формы. Такой путь приводит к усложнению конструкции штампа для вырубki пластин статора ВДПМ.

Покажем, что эффект увеличения частоты и снижения величины  $M_{p \max}$  наблюдается без усложнения технологии производства.

Таблица 4

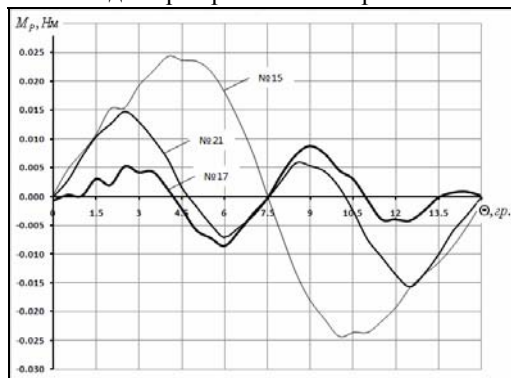
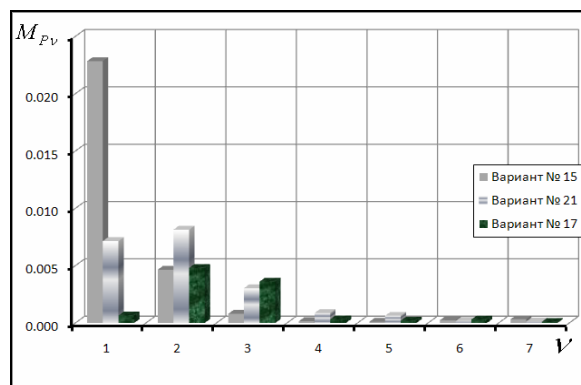
| № вар. | $\delta$ , мм | $\alpha_{\text{маг}}$ , град. | $\alpha_{\text{шл}}$ , град. | $M_{P \text{ max}}$ , Нм |
|--------|---------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1      | 2             | 3                             | 4                            | 5                        |
| 1      | 1,2           | 34,5                          | 7                            | 0,03718                  |
| 2      | 1,25          | 33                            | 7,5                          | 0,03329                  |
| 3      | 1,3           | 35                            | 6                            | 0,03999                  |
| 4      | 1,35          | 33,5                          | 8                            | 0,02318                  |
| 5      | 1,4           | 34                            | 6,5                          | 0,00934                  |
| 6      | 1,2           | 33                            | 6,5                          | 0,02361                  |
| 7      | 1,25          | 35                            | 7                            | 0,04700                  |
| 8      | 1,3           | 33,5                          | 7,5                          | 0,01954                  |
| 9      | 1,35          | 34                            | 6                            | 0,01118                  |
| 10     | 1,4           | 34,5                          | 8                            | 0,01228                  |
| 11     | 1,2           | 35                            | 8                            | 0,05241                  |
| 12     | 1,25          | 33,5                          | 6,5                          | 0,01434                  |
| 13     | 1,3           | 34                            | 7                            | 0,00922                  |
| 14     | 1,35          | 34,5                          | 7,5                          | 0,01929                  |
| 15     | 1,4           | 33                            | 6                            | 0,02435                  |
| 16     | 1,2           | 33,5                          | 6                            | 0,01113                  |
| 17     | 1,25          | 34                            | 8                            | 0,00879                  |
| 18     | 1,3           | 34,5                          | 6,5                          | 0,02665                  |
| 19     | 1,35          | 33                            | 7                            | 0,03144                  |
| 20     | 1,4           | 35                            | 7,5                          | 0,03008                  |
| 21     | 1,2           | 34                            | 7,5                          | 0,01569                  |
| 22     | 1,25          | 34,5                          | 6                            | 0,03286                  |
| 23     | 1,3           | 33                            | 8                            | 0,03958                  |
| 24     | 1,35          | 35                            | 6,5                          | 0,03500                  |
| 25     | 1,4           | 33,5                          | 7                            | 0,02058                  |

Для этого рассмотрим изменение формы функции  $M_P = f(\Theta)$  для трех вариантов из табл. 4: № 15 ( $\delta=1,4$  мм,  $\alpha_{\text{маг}}=33$  град.,  $\alpha_{\text{шл}}=6$  град.), № 21 ( $\delta=1,2$  мм,  $\alpha_{\text{маг}}=34$  град.,  $\alpha_{\text{шл}}=7,5$  град.), № 17 ( $\delta=1,25$  мм,  $\alpha_{\text{маг}}=34$  град.,  $\alpha_{\text{шл}}=8$  град.) (рис. 4).

Наибольшая амплитуда реактивного момента наблюдается в варианте № 15, где величина первой (основной) гармоники составляет 93,8% от  $M_{P \text{ max}} = 0,0244$  Нм.

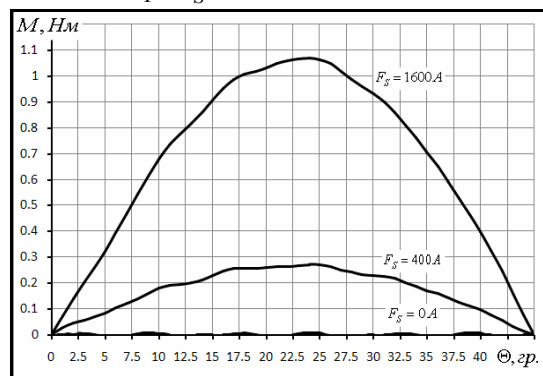
При переходе к варианту № 21 функция  $M_P = f(\Theta)$  имеет уже две весомые гармоники – первую и вторую (соответственно 45,5% и 51,8% от  $M_{P \text{ max}} = 0,0157$  Нм). В варианте № 17 амплитуда первой гармоники становится пренебрежимо малой, а основной вклад вносят вторая и третья гармоники с процентным отношением 54,6% и 41% к величине  $M_{P \text{ max}} = 0,0088$  Нм.

Сказанное выше проиллюстрировано на рис. 5, где показана гистограмма амплитуд гармоник  $M_{Pv}$ , содержащихся в зависимости  $M_P = f(\Theta)$ , от номера гармоники  $v$  для трех расчетных вариантов.

Рис. 4. Зависимости  $M_P = f(\Theta)$ Рис. 5. Гармонический анализ зависимостей  $M_P = f(\Theta)$ 

Таким образом, варьируя геометрическими размерами активной зоны ВДПМ, можно получить уменьшение периода изменения функции  $M_P = f(\Theta)$  и, соответственно, существенное снижение амплитуды реактивного момента.

На рис. 6 представлено семейство зависимостей электромагнитного момента  $M = f(\Theta)$  при различных значениях МДС обмотки статора  $F_S$ , рассчитанных для сочетания геометрических размеров, соответствующих варианту № 17. Из данных зависимостей видно, что проведенная минимизация  $M_{P \text{ max}}$  позволила практически исключить влияние реактивного момента на форму  $M = f(\Theta)$  в рабочей зоне тока статора  $I_S$ .

Рис. 6. Зависимости  $M = f(\Theta)$  при  $F_S = \text{var}$ 

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
- [2] Протождяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
- [3] Радимов И.Н., Рымша В.В., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хьонг Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины // Электротехника и электромеханика. – 2008. - № 1. – С. 41-43.
- [4] Ткачук В. Электромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.
- [5] Bolognani S., Bianchi N., Malesani L., Zigliotto M., Cervaro S. Brushless motor drives for ventilation // Department of Electrical Engineering, University of Padova, Italy, 2003.

Поступила: 08.04.2008