

УДК 621.313.2

*Л.П. ГАЛАЙКО*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков  
*А.А. ЧАЛЬИЙ*, магистрант, НТУ "ХПИ", Харьков

### **ВЫБОР ШИРИНЫ ПОЛЮСА СТАТОРА И ВЕЛИЧИНЫ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА В ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА**

В статті розглянуто вибір ширини полюсу статора та величини немагнітного проміжку вентильно-індукторного двигуна для рудничного електровоза потужністю 13 кВт, частотою обертів 615 об/хв з урахуванням критеріїв: максимум ккд, максимум енергетичного коефіцієнта, мінімум максимального струму фази, мінімум коефіцієнта пульсацій моменту. При зменшенні ширини полюсу статора зростає ширина котушки, інші розміри двигуна не змінюються. Кількість витків, діаметр проводу котушки та параметри підключення розраховувались необхідними для забезпечення заданої потужності. Наведено аналіз впливу таких геометричних розмірів як ширина полюса статора та величина немагнітного проміжку на обрані критерії.

В статье рассматривается выбор ширины полюса статора и величины воздушного зазора вентильно-индукторного двигателя для рудничного электровоза мощностью 13 кВт, частотой вращения 615 об/мин с учетом критериев: максимум кпд, максимум энергетического коэффициента, минимум максимального тока фазы, минимум коэффициента пульсаций момента. При уменьшении ширины полюса статора увеличивается ширина катушки, остальные размеры двигателя не изменяются. Количество витков, диаметр провода катушки и параметры питания рассчитываются так, чтобы обеспечить заданную мощность. Проведен анализ влияния таких геометрических размеров как ширина полюса статора и величина воздушного зазора на выбранные критерии.

**Введение.** Вентильно-индукторные двигатели (в зарубежной литературе Switched Reluctance Motors (SRM)) являются наиболее простыми и технологичными электромеханическими преобразователями энергии, имеют также ряд других существенных достоинств по сравнению с традиционными двигателями. Это обусловило бурное их развитие начиная с восьмидесятих годов прошлого столетия. За это время был накоплен определенный опыт проектирования этих двигателей и в литературе появились различные рекомендации по выбору их геометрических размеров [1-5], однако обоснование этих рекомендаций в

различных работах существенно отличается.

В работе [1] приведены общие рекомендации без учета их влияния на различные критерии. В работе [2] выбор геометрии магнитной системы производится с учетом режима работы двигателя в электроприводе в основном по одному критерию: получение максимального момента. Наиболее широко анализируется этот вопрос в работе [3]. Однако большое количество принятых в работе допущений не позволяют в полной мере использовать приведенные рекомендации. В частности, не учитывается влияние размеров зубцового слоя на пульсации момента. Приняты также допущения: при изменении размеров полюсов масса меди обмотки остается постоянной, зубцы статора и ротора выполнены одинаковыми. В работе [4] рассматривается двигатель малой мощности и, очевидно, результаты проведенного анализа не могут в полной мере использоваться для двигателей средней и большой мощности. В работе [5] анализ проведен на основании расчета момента одной фазы при постоянной величине тока, что не отражает реальные условия работы двигателя.

**Цель работы:** проведение расчетных исследований для определения влияния ширины полюса статора и величины воздушного зазора ВИД средней мощности на выбранные критерии.

**Описание расчетного эксперимента.** Исследования проведены на примере четырехфазного ВИД мощностью 13 кВт, частотой вращения 615 об/мин, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока ДРТ-13, который выпускается серийно. Расчеты были проведены для трех вариантов ширины полюса статора  $b_s$  (43 мм, 45,5 мм, 48 мм) и двух вариантов величины воздушного зазора  $\delta$  (0,5 мм и 1 мм). На рис. 1 приведена геометрия одного из вариантов.

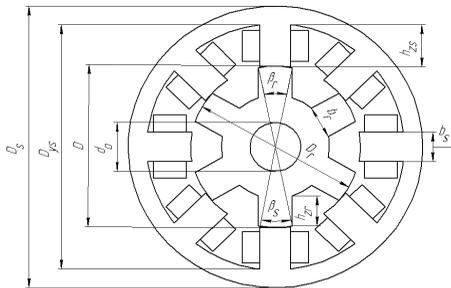


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы.

Геометрические размеры одного из вариантов ВИД. Внешний диаметр статора  $D_s = 434$  мм. Внутренний диаметр статора  $D = 250$  мм. Диаметр ярма статора  $D_{ys} = 379,4$  мм. Диаметр ротора  $D_r = 248$  мм. Длина пакета статора  $l = 250$  мм. Угловой размер полюса статора  $\beta_s = 21$  град. Угловой размер полюса ротора  $\beta_r = 23$  град. Высота полюса статора  $h_{cs} = 64,7$  мм. Высота полюса ротора  $h_{cr} = 45,3$  мм. Ширина полюса статора  $b_s = 45,5$  мм. Ширина полюса ротора  $b_r = 49,4$  мм. Величина воздушного зазора  $\delta = 0,5$  мм. Диаметр вала  $d_o = 75$  мм.

В качестве критериев для выбора вариантов приняты:

1 – амплитуда фазного тока  $I_{max}$  (определяет стоимость преобразователя частоты);

2 – коэффициент эффективности преобразования энергии  $K_p$  (отношение энергии обмотки, которая идет на совершение механической работы, ко всей энергии поступившей в обмотку);

3 – коэффициент пульсаций момента  $K_r$  (отношение среднего момента к максимальному);

4 – КПД  $\eta$ .

Расчеты проведены с помощью пакета прикладных программ FEMM и разработанной одним из авторов программы на языке Паскаль, описанной в работах [6, 7]. С помощью пакета FEMM проведены расчеты магнитного поля методом конечных элементов и определены магнитные характеристики для всех вариантов. Затем эти магнитные характеристики в виде массивов загружались в программу на языке Паскаль. Расчеты по программе проводились по следующему алгоритму. При уменьшении ширины полюса статора увеличиваем ширину катушки. Для каждого варианта ширины катушки определяем число витков, диаметр провода и рассчитываем сопротивление катушек фазы  $R_c$ . Затем считаем по программе, подбираем параметры питания для обеспечения заданной мощности 13 кВт. В качестве параметров питания рассматриваем угол между полюсами статора и ротора, при котором подается напряжение на катушки фаз  $\Theta_{om}$ , и длительность импульса напряжения  $\Delta\Theta$ . Результаты расчеты приведены в табл. 1.

В табл. 1 приняты обозначения:  $p_{el}$  – электрические потери в катушках фазы;  $p_m$  – магнитные потери в сердечниках статора и ротора.

#### **Анализ результатов.**

1. Анализ влияния ширины полюса статора на характеристики ВИД. Как следует из таблицы, изменение ширины полюса статора в выбранных пределах не приводит к значительному влиянию на большинство характеристик. Кроме того, это влияние на выбранные критерии не является однозначным.

Таблица 1 – Результаты расчета

| Параметр              | $\delta = 0,5$ мм |                  |                | $\delta = 1,0$ мм |                  |                |
|-----------------------|-------------------|------------------|----------------|-------------------|------------------|----------------|
|                       | $b_s=43$<br>мм    | $b_s=45,5$<br>мм | $b_s=48$<br>мм | $b_s=43$<br>мм    | $b_s=45,5$<br>мм | $b_s=48$<br>мм |
| $\theta_{от}$ , град  | 26,6              | 27,2             | 27,6           | 26,8              | 27,4             | 28             |
| $\Delta\theta$ , град | 16,6              | 16,8             | 17,4           | 17                | 17,4             | 17,4           |
| $I_{эф}$ , А          | 67,74             | 67,38            | 66,3           | 79,61             | 79,07            | 78,3           |
| $I_{max}$ , А         | 139,7             | 137,6            | 131,6          | 166,1             | 160              | 156,7          |
| $P_{ев}$ , Вт         | 512,5             | 553,5            | 576            | 711,3             | 756,5            | 776            |
| $P_m$ , Вт            | 304,5             | 309              | 312            | 311,9             | 322,5            | 332            |
| $K_r$                 | 1,21              | 1,16             | 1,15           | 1,15              | 1,13             | 1,1            |
| $K_p$                 | 0,77              | 0,77             | 0,77           | 0,67              | 0,66             | 0,67           |
| $\eta$ , о.е..        | 0,933             | 0,9312           | 0,931          | 0,918             | 0,915            | 0,914          |

Так, уменьшение ширины полюса приводит с одной стороны к увеличению  $\eta$  за счет уменьшения потерь, а, с другой стороны, к увеличению  $I_{max}$  (увеличению стоимости преобразователя) и увеличению коэффициента пульсаций  $K_r$ , (ухудшению виброакустических характеристик).

2. Анализ влияния величины воздушного промежутка  $\delta$  на характеристики ВИД.

При увеличении значения  $\delta$  существенно увеличиваются  $I_{max}$  и следовательно стоимость преобразователя, уменьшается КПД  $\eta$  и  $K_p$ , то есть, ухудшаются энергетические показатели двигателя, с другой стороны, уменьшается коэффициент пульсаций момента  $K_r$  (улучшаются виброакустические характеристики).

### Выводы.

1. Влияние ширины полюса статора и величины воздушного зазора на выбранные критерии является неоднозначным.

2. При проектировании ВИД необходимо корректировать эти размеры с учетом технических требований, предъявляемым к данному двигателю.

**Список литературы:** 1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Особенности проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – №1. – С. 60-68. 2. Пахомин С.А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вен-

тильно-реактивного индукторного двигателя // Известия вузов. Электромеханика. 2000. – №1. – С. 30-36. **3. Красовский А.Б.** Выбор внутренних геометрических параметров вентильно-индукторной машины с учетом режимов работы в электроприводе. // Электричество. 2006, № 6. – С. 48-55. **4. Галайко Л.П.** Выбор размеров зубцового слоя в вентильно-индукторном двигателе малой мощности // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – №45. – С. 13-17. **5. Пуило Г.В., Порайко А.С., Радимов И.Н., Рымиа В.В.** Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя // Вісник НУ "Львівська політехніка". Тем. вып.: Електроенергетическіе и электромеханические системы. – № 485. – С.112-117. **6. Галайко Л.П.** Расчет зависимостей тока и момента вентильно-индукторного двигателя различными методами // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – №17. – С. 33-35. **7. Галайко Л.П.** Математическая модель вентильно-индукторного двигателя с учетом магнитных потерь // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №3. – С. 57-60.

*Поступила в редколлегию 08.04.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Милых В.И.*