

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ МОМЕНТОВ В ТЯГОВОМ РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

*Демченко Г.В., аспирант*

Развитие современного электропривода неразрывно связано с качественным улучшением показателей электрических машин. Один из радикальных путей такого улучшения – разработка и внедрение бесконтактных электрических машин.

В настоящее время для привода шахтных аккумуляторных электровозов, как и для электровозов, получающих питание от контактной сети, применяют коллекторные двигатели постоянного тока. Наряду с известными их достоинствами они обладают рядом существенных недостатков [1]. В их числе, прежде всего, наличие напряженного коллекторного узла, значительные затраты меди и т.д. Отрицательно сказываются на эффективности работы также непроизводительные затраты дорогой электроэнергии аккумуляторной батареи на активных сопротивлениях при пуске и регулировании частоты вращения. В значительной мере устранение указанных недостатков возможно путем замены электродвигателя постоянного тока вентильным двигателем (ВД), снабженным электронной системой управления. Современный уровень развития силовых полупроводниковых приборов позволяет создать высоконадежный привод электровозов с ВД [2]. В последние годы наметилась тенденция использовать в схемах управления коммутаторов ВД микропроцессорную технику. Это позволит значительно расширить диапазон регулирования частоты вращения и повысить точность регулирования.

Одним из вариантов может стать привод на базе синхронного двигателя реактивного (индукторного) типа, обмотки которого питаются пульсирующим током. Перспективность тягового двигателя реактивного типа связана со следующими достоинствами: простота и технологичность конструкции; высокая надежность; невысокая стоимость; высокие удельные показатели; низкий удельный расход меди по сравнению с коллекторными двигателями; большая возможность конструктивного решения по сравнению с контактными двигателями; простота силового коммутатора, который питает обмотки статора однополярными импульсами тока, в силу чего исключается возможность внутреннего короткого замыкания преобразователя [3].

Анализируя выполненные разработки в данной области [4, 5], можно рекомендовать в качестве базового варианта следующее: статор выполняется явнополюсным с сосредоточенной обмоткой в виде нескольких катушек, ротор выполняется из магнитомягкой стали, шихтованным без обмотки, имеющий выступающие полюса и впадины.

В Донецком государственном техническом университете изготовлен экспериментальный образец такого двигателя. С целью упрощения изготовления и сопряжения с редуктором для станины электромеханического преобразователя (ЭМП) использован корпус коллекторного двигателя ДРТ-13, в расточке статора которого размещены восемь шихтованных полюсных сердечников. Ширина их принята равной примерно половине полюсного деления. Обмотка статора выполнена в виде катушек, охватывающих полюсные сердечники. Катушки, расположенные на диаметрально противоположных полюсах, соединены последовательно. Ротор выполнен шестиполюсным без обмотки. Благодаря имеющимся на роторе полюсным выступам и впадинам получаем двигатель с переменным магнитным сопротивлением. Ширина полюсов ротора принята такой же, как и полюсов статора.

Из-за несоответствия количества полюсов на статоре и роторе при очередном включении катушек, расположенных по окружности статора, можно железный ротор заставить вращаться. Коммутация фаз обмотки статора производится с помощью управляемого тиристорного преобразователя.

Вращающий момент в РД образуется благодаря стремлению ротора занять положение, соответствующее максимальной магнитной проводимости для потока возбуждения. Вращающий момент равен производной магнитной энергии по углу поворота ротора, однако, его вычисление таким способом требует применения численных методов [4]. Поэтому расчет экспериментального образца был выполнен как синхронного двигателя без возбуждения с учетом активного сопротивления обмотки статора [5, 6] по формуле

$$M = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\omega(x_d x_q + r^2)^2} (\sqrt{(r^2 + x_d^2)(r^2 + x_q^2)} \cdot \sin(2\Theta + \gamma) - r(x_d - x_q)), \quad (1)$$

$$\text{где } \gamma = \arctg \frac{r \cdot (x_d - x_q)}{x_d x_q - r^2};$$

$m$  – число фаз обмотки статора;  $U$  – напряжение питания;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $x_d$ ,  $x_q$  – индуктивные сопротивления соответственно по продольной и поперечной осям статора;  $r$  – активное сопротивление обмотки статора;  $\Theta$  – угол, зависящий от положения ротора.

Главная проблема расчета момента – определение индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям статора

$$x_d = 4\pi \cdot f \cdot W^2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot \lambda_d; \quad (2)$$



$$x_q = 4\pi \cdot f \cdot W^2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot \lambda_q, \quad (3)$$

где  $f$  — частота перемагничивания;  $W$  — число витков обмотки фазы;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $l$  — длина ротора;  $\lambda_d$ ,  $\lambda_q$  — магнитные проводимости в соответствующих осях.

Магнитные проводимости по продольной и поперечной осям  $\lambda_d$  и  $\lambda_q$  определяются соотношением размеров полюсов ротора и статора, а также величиной воздушного зазора между ними по соответствующим осям. Приближенно проводимости вычисляются по формулам

$$\lambda_d = b_{п\delta} / \delta_d, \quad (4)$$

$$\lambda_q = b_{п\delta} / \delta_q, \quad (5)$$

где  $\delta_q$  — величина воздушного зазора по поперечной оси определяется по формуле

$$\delta_q = \delta_d + 0,142 (1 - \alpha), \quad (6)$$

где  $\alpha$  — коэффициент полюсной дуги;  $\tau$  — полюсное деление.

Так как данный экспериментальный образец двигателя разработан и выполнен на основе тягового двигателя ДРТ-13, то основные конструктивные размеры соответствуют размерам базового двигателя. Его размеры, а также измененной части двигателя, следующие (рис. 1):

наружный диаметр двигателя.....	$D_n = 0,485$ м;
диаметр расточки статора.....	$D_c = 0,434$ м;
диаметр якоря.....	$D_a = 0,286$ м;
длина полюса.....	$l_n = 0,15$ м;
ширина полюса.....	$b_n = 0,06$ м;
высота полюса статора.....	$h_{nc} = 0,074$ м;
высота полюса ротора.....	$h_{np} = 0,06$ м;
воздушный зазор.....	$\delta_d = 0,0015$ м.

На основании расчетов по вышеуказанным формулам построена угловая характеристика  $M=f(\theta)$  для экспериментального образца двигателя, который подвергался испытаниям, приведенная на рис.2 (кривая 1).

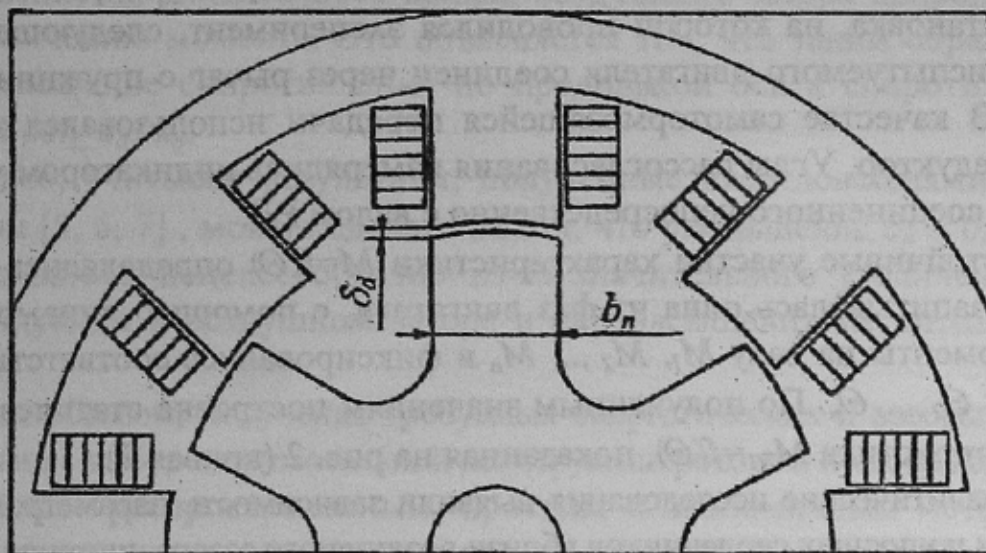


Рисунок 1 – Схема конструкции разработанного двигателя (полюса с параллельными стенками)

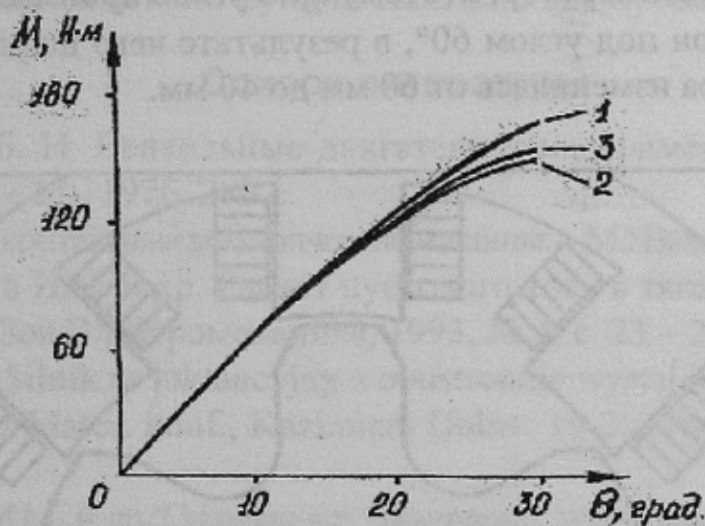


Рисунок 2 – Статические моментные характеристики исследуемого ВРД

В лаборатории университета проведены экспериментальные исследования РД. Одним из важных опытов было исследование статического момента и получение его характеристики  $M=f(\theta)$ . Для ее получения двигатель фиксируют неподвижно в положении равновесия при возбуждающем нормированном токе, поданном в одну из фаз. Положение ротора при отсутствии нагрузки – это равновесие или конечное положение. В этом опыте определялась зависимость между моментом, приложенным к валу, и отклонением от положения равновесия.



При исследовании был использован метод прямого измерения момента на валу при разных рассогласованиях магнитных осей статора и ротора.

Установка, на которой проводился эксперимент, следующей конструкции: вал испытуемого двигателя соединен через рычаг с пружинным динамометром. В качестве самотормозящейся передачи использовался точный червячный редуктор. Углы рассогласования измерялись индикатором углового положения, соединенного непосредственно с валом РД.

Устойчивые участки характеристики  $M=f(\Theta)$  определялись следующим образом: запитывалась одна из фаз двигателя, с помощью динамометра измерялись моменты на валу  $M_1, M_2, \dots, M_n$  и фиксировались соответствующие значения  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ . По полученным значениям построена статическая моментная характеристика  $M_{31}=f(\Theta)$ , показанная на рис. 2 (кривая 2).

Аналитические исследования выявили зависимость параметров РД от конфигурации полюсных сердечников вблизи воздушного зазора, ширины сердечников  $-b_n$ , величины воздушного зазора по продольной  $-\delta_d$  и поперечной  $-\delta_q$  осям.

В лаборатории ДГТУ проведены экспериментальные исследования по измерению статического момента РД при различных формах полюса вблизи воздушного зазора. Одним из вариантов уменьшения размера  $b_n$  может быть срез углов полюса вблизи воздушного зазора. В условиях лаборатории проще было модернизировать ротор, поэтому срез углов произведен на полюсе ротора (рис. 3). Сделан он под углом  $60^\circ$ , в результате чего ширина полюса  $b_n$  вблизи воздушного зазора изменилась от 60 мм до 40 мм.

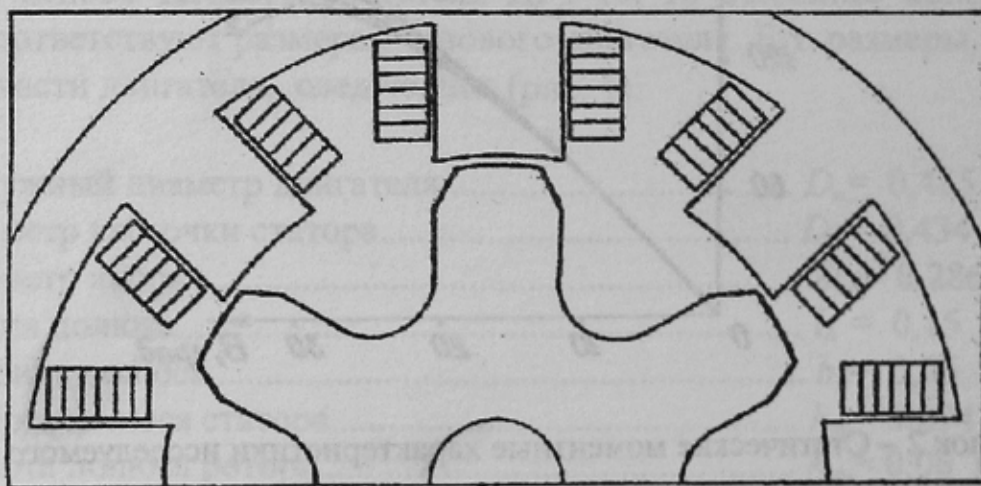


Рисунок 3 – Схема конструкции разработанного двигателя с трапециевидными стенками полюсов ротора вблизи воздушного зазора

По выше описанной методике исследования статического момента был проделан аналогичный опыт при новых конструктивных размерах. По полученным значениям  $M_n$  и  $\Theta_n$  построена новая моментная статическая характеристика  $M_{32}=f(\Theta)$  рис. 2 (кривая 3).

Анализируя характеристики, приведенные на рис. 2, можно отметить, что уменьшение ширины полюса вблизи воздушного зазора приводит к некоторому увеличению момента. Это объясняется тем, что таким образом увеличивается отношение сопротивления по продольной оси к сопротивлению по поперечной оси  $x_d/x_q$ .

Однако, учитывая результаты, полученные исследователями в данном направлении [5, 6, 7], можно сделать вывод, что уменьшение  $b_n < 0,4 \tau$  вблизи воздушного зазора нецелесообразно из-за значительного увеличения максимальной индукции в воздушном зазоре и перенасыщения магнитных путей в роторе.

Таким образом, получение требуемых энергетических и весовых показателей РД связано с выбором оптимальной конструкции ротора и полюсов статора.

Наиболее распространенным, простым и экономичным методом изготовления сердечников электрических машин является сборка их из штампованных листов электротехнической стали. Аналогичная технология применена и при создании рассматриваемого образца РД.

Проведенные исследования и расчеты показали, что в данном объеме взрывозащищенного корпуса мощность тягового РД может быть увеличена с 13 кВт до 16-18 кВт, т. е. на 25-30 % по сравнению с мощностью базового двигателя, что существенно для конструкции шахтного электровоза.

### Список литературы

1. Тихменев Б. Н. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе. – М., 1976, 280 с.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990, 413 с.
3. Коломейцев И.П. и др. Расчет пускового тока в тяговом индукторном двигателе // Изв. ВУЗов Электромеханика, 1993, № 4, с. 23 – 26.
4. Pelikant A. Silnik re luktancyjny z obustronnie wystajacymi zasilany przez faliownik niezalezny / Mater. konf., Kazimiers Dolny, 19-20 wrzes, 1985, s.a. 170-179 (пол.)
5. Постников И.М. и др. Синхронные реактивные двигатели. – К.: Техніка, 1970, 148 с.
6. Кононенко Е.В. Синхронные реактивные машины. – М.: Энергия, 1970, 208 с.