

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПАЗОВОЙ ОБМОТКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Клабуков Р.П.

Научный руководитель: Муравлёв О.П., д.т.н., профессор  
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [KlabukovRP@gmail.com](mailto:KlabukovRP@gmail.com)

Вентильный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ) является на сегодня одним из самых перспективных исполнительных электродвигателей. Необходимость разработки быстродействующих ВДПМ обусловлено требованием специальных устройств автоматики.

Качество электропривода с ВДПМ определяется рядом параметров, к которым относят точность воспроизведения закона перемещения рабочего органа, устойчивость, быстродействие, энергопотребление, массогабаритные показатели и др. Для этого электрическая машина заданной мощности проектируется с максимально допустимой по механической устойчивости длиной ротора при минимальном его диаметре [1].

В системах точного электропривода помимо высокого быстродействия ВДПМ должны обеспечивать высокую плавность хода (минимальные пульсации момента на валу), особенно в зоне малых частот вращения, и широкий диапазон регулирования.

Целью данной работы является исследование беспазовой обмотки быстродействующего вентильного двигателя с постоянными магнитами.

Стоит отметить, что конструктивное исполнение статора оказывает значительное влияние на быстродействие ВДПМ. Вентильные электродвигатели в исполнении с беспазовым статором обладают следующими качествами:

- высокая технологичность пакета статора в связи с отсутствием зубцовой зоны;
- снижение пульсаций момента за счёт отсутствия пульсаций магнитного потока в зубцах, более высокая глубина регулирования и плавность хода;
- низкое значение индуктивного сопротивления обмотки в связи с отсутствием индуктивности от потоков пазового рассеяния, а также снижение электромагнитной постоянной времени  $T_s$ ;

Сравнительно большой уровень (до  $0,1M_n$ ) остаточного электромагнитного момента реактивного происхождения имеют ВДПМ с пазовой обмоткой статора. Данный недостаток препятствует использованию их в высокоточных электроприводах. Зубцовая зона в сердечнике статора так же может служить причиной возникновения пульсации магнитной индукции на холостом ходу в массиве постоянных магнитов, что приводит к их недопустимому нагреву. Разбиение магнита по длине на отдельные участки служит средством борьбы с этим недостатком.

Отсутствие зубцов статора может, сказаться на увеличении диаметра ротора, что приведёт при прочих равных условиях к увеличению электромагнитного момента, а так же увеличение номинального тока двигателя может быть достигнуто за счёт отсутствия повышенных магнитных потерь в зубцах. Очевидное снижение магнитной индукции в воздушном зазоре при этом типе обмотки статора может ухудшить использование двигателя [3]. В случае расположения обмотки в расточке беспазового статора ВДПМ немагнитный зазор увеличится. Для обеспечения необходимого магнитного потока в воздушном зазоре требуется увеличение объема магнитов, что приводит к увеличению момента инерции ротора и снижению динамических характеристик ВДПМ. Так же необходимо отметить, что при использовании беспазовой обмотки расположенной в воздушном зазоре в зоне максимальных индукций, необходимо разделение провода на элементарные проводники с целью снижения дополнительных потерь в меди от вихревых токов.

Анализ показывает, что ВДПМ с индукторами имеющими магнитомягкие полюса на роторе и с зубцовым статором обладают значительными пульсациями частоты вращения. Снижение пульсаций можно добиться, применив индукторы с дугообразными постоянными магнитами, которые обеспечивают трапецеидальный закон распределения индукции в рабочем зазоре и значительно меньшую модуляцию индуктивности фаз статора ВДПМ [4].

В поиске вариантов ВДПМ была использована математическая модель, представляющая собой ряд уравнений, связывающие исходные данные, независимые и зависимые параметры. Уравнения записаны на базе теории электрических, магнитных и тепловых сетей. Модель предназначена для оптимизационных расчётов ВДПМ различных конструктивных схем.

В соответствии с предложенной моделью электромагнитный момент ВДПМ

$$M_{\Sigma} = apj\Phi Q_0,$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивной схемы ВДПМ, числа фаз и схемы соединения обмоток якоря;  $p$  – число пар полюсов индуктора;  $\Phi$  – магнитный поток в рабочем зазоре;  $Q_0$  – площадь сечения якоря, занятая обмоткой;  $j$  – плотность тока в обмотке якоря;

Магнитный поток в рабочем зазоре ВД можно определить:

$$\Phi = \frac{B_r \frac{\pi \alpha_i}{2p} \lambda D_{и.р}^{*2} D_{я.р}^* (1 - F_{адН}^*) D_{баз}^2}{\mu_B^* k_\mu \delta_p^* / h_{м.р}^{*1} + k_\sigma \frac{\pi \alpha_i}{2p} D_{я.р}^* / b_{м.р}^*},$$

$$F_{адН}^* = \frac{\alpha k_0 k_{з.м} j Q_0}{4 p H_c m h_{м.р}^{*1} D_{и.р}^* D_{баз}^*},$$

где  $B_r$  – остаточная индукция магнита, Тл;  
 $H_c$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м;  
 $\mu_B^* = B_r / (\mu_0 H_c)$  – относительное значение коэффициента возврата кривой размагничивания;  
 $k_0$  – коэффициент обмотки;  $k_{з.м}$  – коэффициент заполнения индуктора магнитом;  $D_{и}$  – диаметр индуктора;  $k_\mu$  – коэффициент магнитной цепи;  $\lambda = l / D_{и}$  – конструктивный коэффициент;  $D_{я.р}^* = D_{я.р} / D_{баз}$  – расчётное значение диаметра якоря;  $\delta_p^* = \delta_p / D_{баз}$  – расчётное значение воздушного зазора;  $l$  – активная длина машины, м;  $\alpha_i$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  $k_\sigma$  – коэффициент рассеяния индуктора;  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $b_{м.р}^{*1}, h_{м.р}^{*1}$  – расчетные значения ширины магнита и высоты магнита [5].

Для оценки зависимости момента инерции и объёма ротора от выбора магнитов с более высокими энергетическими показателями пазового и беспазового ВДПМ были проведены расчеты на базе вентильного двигателя ДВ-40 в беспазовом исполнении (рис. 1 и 2).

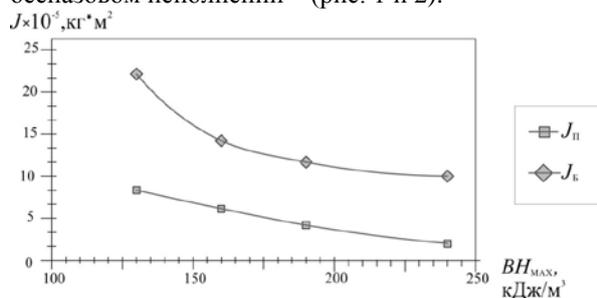


Рис. 1. Зависимость момента инерции пазовых и беспазовых ВДПМ от максимального энергетического произведения  $BH_{max}$ .

Анализ показывает, при использовании беспазовой обмотки в ВДПМ наблюдается динамика уменьшения момента инерции и электромеханической постоянной времени при увеличении максимального энергетического произведения  $BH_{max}$ . В беспазовых ВДПМ по отношению к пазовым двигателям момент инерции в среднем выше в 2-3 раза (рис. 1).

Вследствие использования беспазовой обмотки возможно увеличение немагнитного зазора ВДПМ, что требует увеличение объёма ротора

$V_{рот}$ , примерно, в 1,5 раза по сравнению с использованием пазовой (рис. 2).  
 $V_{рот} \times 10^4, мм^3$

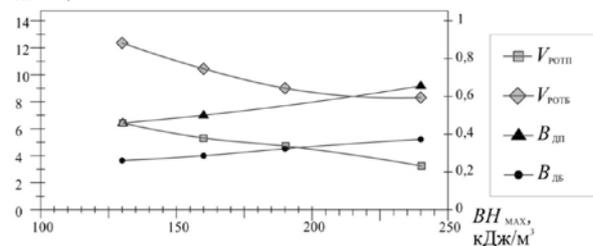


Рис. 2. Зависимость объёма ротора  $V_{рот}$ , и индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  пазовых и беспазовых ВДПМ от максимального энергетического произведения  $BH_{max}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Выбор беспазовой обмотки при проектировании ВДПМ позволяет уменьшить пульсации момента на валу вследствие снижения влияние электромагнитного момента реактивного происхождения.

2. В процессе исследования магнитной системы можно сделать вывод, что для обеспечения необходимых динамических показателей и снижения момента инерции при использовании беспазовой обмотки необходимо уменьшение диаметр ротора с сохранением его объёма. Данное условие приведёт к уменьшению главных размеров статора ВДПМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коков Е.Г., Жибинов А.С., Гейнц Э.Р., Цехмestрюк Г.С. Магнитное поле и ЭДС малоинерционных магнитоэлектрических машин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 158-162.
2. Волокитина Е.В., Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Чебоксары, 2006. – 20 с.
3. Афанасьев А.А., Бабак А.Г., Волокитина Е.В., Головизнин С.Б., Нестерин В.А., Никифоров В.Е, Николаев А.В., Чихняев В.А. Малоинерционный высокоскоростной магнитоэлектрический беспазовый вентильный двигатель // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 28–35.
4. Каган В.Г. Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. – М.: Энергия, 1985. – 192 с.
5. Куликов Н.И., Елизарова Т.А., Куликова Т.В., Сухов Д.В., Хрупачев О.Ю. Исследование и разработка быстродействующих вентильных двигателей // Электричество. – 2002. – № 5. – С. 23–32.