

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВНУТРЕННИМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИ ДВУХ СПОСОБАХ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ОБМОТКИ СТАТОРА

*Наведено результати розрахункових та експериментальних досліджень вентильного двигуна з внутрішніми постійними магнітами. Проаналізовано створення електромагнітного моменту та ЕРС при схемах з'єднання фаз обмотки статора "зірка" і "трикутник".*

*Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований вентильного двигателя с внутренними постоянными магнитами. Проанализировано создание электромагнитного момента и ЭДС при схемах соединения фаз обмотки статора "звезда" и "треугольник".*

Прогресс в современной электромеханике характеризуется созданием управляемых электромеханических преобразователей энергии, к которым относятся вентильные двигатели (ВД) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ПМ). Разработка этих электродвигателей требует глубокого изучения протекающих в них процессов, что в дальнейшем позволяет оптимизировать их конструкции или отдельные характеристики в соответствии с функциональным назначением и условиями эксплуатации.

Одно из известных конструктивных исполнений электромеханического преобразователя ВД состоит из статора с явнополюсной структурой магнитопровода и ротора с высококоэрцитивными ПМ, закрепленными либо на поверхности (рис. 1,а), либо внутри (рис. 1,б) магнитопровода ротора [1, 2].

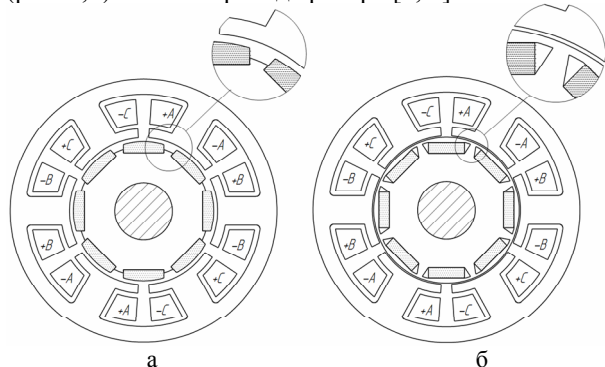


Рис. 1. Поперечное сечение магнитных систем ВДПМ

Обмотка статора рассматриваемых ВД выполняется сосредоточенной катушечной с минимально возможным вылетом лобовых частей. В соответствии с классификацией [3], по способу соединения обмотки статора ВД бывают замкнутые, подобно якорным обмоткам коллекторных машин, и разомкнутые, подобно статорным обмоткам машин переменного тока.

Замкнутые обмотки образуют в трехфазной машине треугольник, вершины которого присоединены к коммутирующему устройству (рис. 2,а), а разомкнутые – трехлучевую звезду (рис. 2,б).

В двигателях с ПМ, закрепленными на поверхности ротора, при оптимальных геометрических соотношениях зубцовой зоны, минимизирующих величину зубцового момента [1], фазные и линейные ЭДС имеют синусоидальную форму, что подтверждается исследованиями авторов [4]. В этом случае обмотка статора может быть соединена как по схеме "звезда", так и по схеме "треугольник".

Для исследования свойств ВД с внутренними ПМ был создан макетный образец двигателя (рис. 3, 4), основные данные которого приведены в табл. 1.

В макетном образце использован существующий штамп статорного листа, применяющегося для производства двигателей с внешними ПМ.

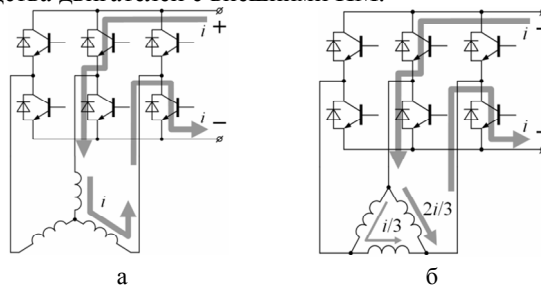


Рис. 2. Способы соединения обмотки статора ВД

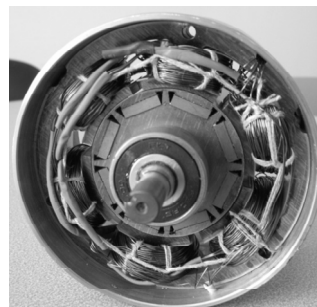


Рис. 3. Макетный образец ВД с внутренними магнитами (снят передний подшипниковый щит)



Рис. 4. Ротор макетного образца ВД с внутренними ПМ

Таблица 1

Величина	Значение
Внешний диаметр статора, мм	102
Внутренний диаметр статора, мм	56,5
Односторонний воздушный зазор, мм	0,5
Длина пакета статора, мм	25
Число витков катушки обмотки статора	50
Сопrotивление фазы обмотки, Ом	0,2
Число зубцов статора	6
Число полюсов ротора	8
Марка магнитов	NdFeB

Как показали экспериментальные исследования данного макетного образца ВД, проведенные с помощью цифрового осциллографа GDS-840S фирмы Instek, при соединении обмотки статора по схеме "звезда" зависимость линейной ЭДС  $E_L$  от угла поворота ротора  $\Theta$  при вращении с постоянной скоростью имеет несинусоидальную форму (рис. 5) [2].

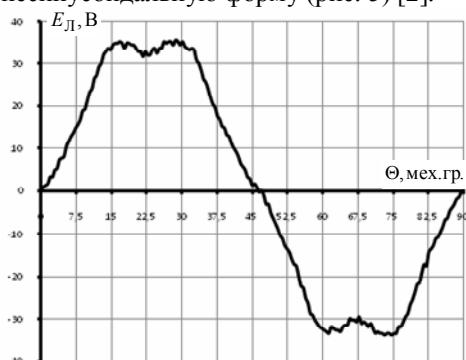


Рис. 5. Зависимость  $E_L = f(\Theta)$  при частоте вращения  $n = 2070$  об/мин

Гармонический анализ зависимости  $E_L = f(\Theta)$ , представленной на рис. 5, показывает наличие в ней значимой 5-ой гармоники, имеющей амплитуду 3,2 В, что составляет около 9 % от основной (рис. 6).

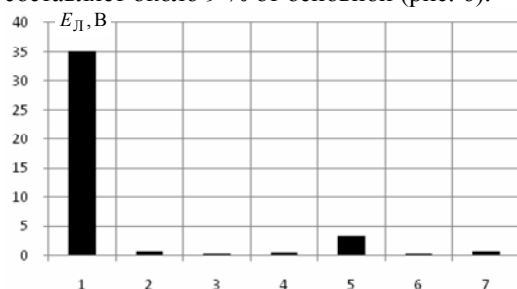


Рис. 6. Гармонический анализ зависимости  $E_L = f(\Theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "звезда"

Аналогично экспериментально снятой линейной ЭДС выглядит и расчетный (полученный модифицированным методом натяжений по результатам численного моделирования магнитного поля в программе FEMM [5]) электромагнитный момент  $M$ , имеющий небольшой провал в зоне коммутации  $\Theta_{\text{КОММ}}$  (рис. 7). Наличие данного провала объясняется доминированием той же 5-ой гармонической, что четко иллюстрируется рис. 8. В то же время следует отметить, что уровень пульсаций электромагнитного момента на периоде коммутации составляет 18 %, что лишь на 4 % больше, нежели в случае синусоидальной зависимости  $M = f(\Theta)$ .

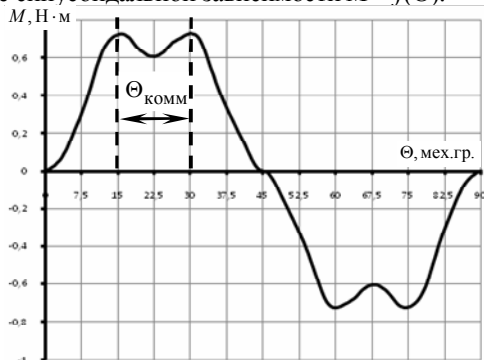


Рис. 7. Зависимость  $M = f(\Theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "звезда"

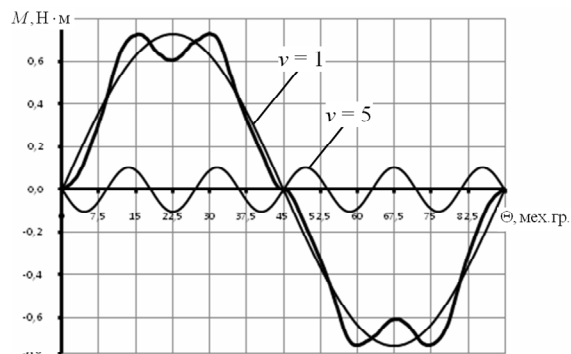


Рис. 8. Составляющие ряда Фурье для зависимости  $M = f(\Theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "звезда"

При этом двигатель, имея скалярное управление, обладает достаточно приемлемыми энергетическими показателями для электрической машины малой мощности. В частности, КПД, с учетом потерь в электронном блоке управления, при номинальном моменте 0,6 Нм и частоте вращения 870 об/мин (полезная мощность равна 54 Вт) составляет 68 %.

Применяя изложенный выше порядок исследований, оценим свойства ВД при соединении его обмотки статора по схеме "треугольник". Дело в том, что при таком способе соединения обмотки статора существует вероятность появления внутреннего контурного тока, приводящего к дополнительным электрическим потерям.

Для подтверждения или опровержения выказанного выше предположения были проведены экспериментальные исследования макетного образца ВД, которые показали, что форма фазной ЭДС  $E_\Phi$  существенно отличается от синусоиды (рис. 9).

Гармонический анализ зависимости  $E_\Phi = f(\Theta)$ , представленной на рис. 9, показывает наличие в ней значимой 5-ой гармоники с амплитудой 1,9 В, что составляет, как и в случае соединения обмотки статора по схеме "звезда", около 9 % от основной гармоники (рис. 10).

Зависимость  $M = f(\Theta)$ , полученная расчетным путем, подтверждает несинусоидальный характер изменения фазной ЭДС (рис. 11).

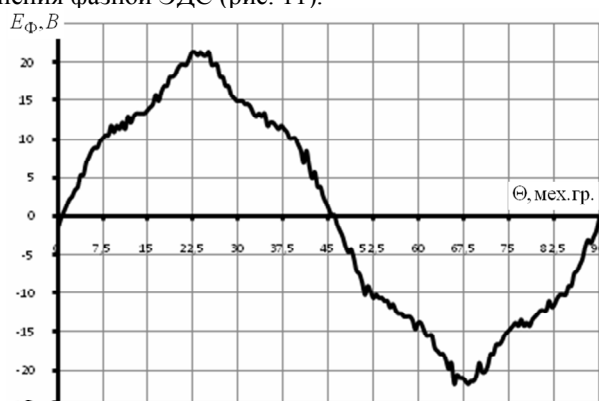


Рис. 9. Зависимость  $E_\Phi = f(\Theta)$  при  $n = 1950$  об/мин

Разложение зависимости  $M = f(\Theta)$  в ряд Фурье также демонстрирует присутствие значимой 5-ой гармонической (рис. 12). Однако, в отличие от "звезды", 5-я гармоника вызывает не провал, а всплеск в кривой момента в зоне коммутации.

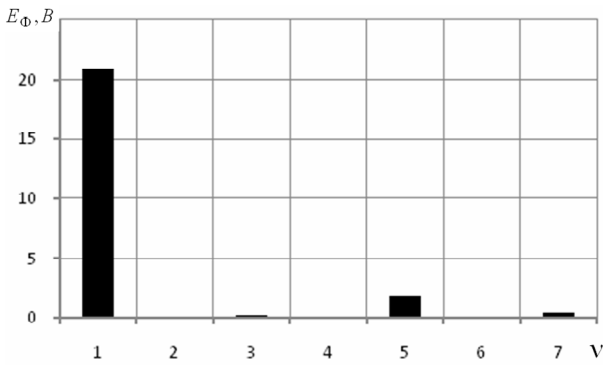


Рис. 10. Гармонический анализ зависимости  $E_{\phi} = f(\theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "треугольник"

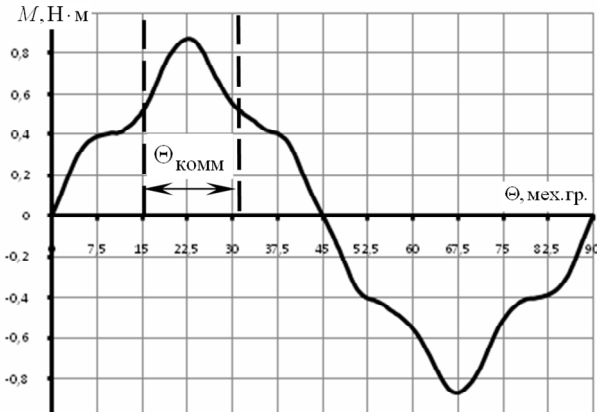


Рис. 11. Зависимость  $M = f(\theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "треугольник"

Расчет уровня пульсаций электромагнитного момента в этом случае показывает, что на периоде коммутации эта величина составляет 50 %, т.е. является достаточно высокой по отношению к уровню пульсаций синусоидальной зависимости.

В то же время, благодаря наличию лишь одного максимума в кривой момента, ВД с соединением обмотки статора по схеме "треугольник" (в отличие от схемы "звезда", где имеют место два максимума в кривой момента, см. рис. 7) может быть рекомендован к применению в электроприводах с векторным управлением. Вместе с тем необходимо провести дополнительные исследования ВД с внутренними ПМ с целью снижения величины пульсаций электромагнитного момента и ЭДС.

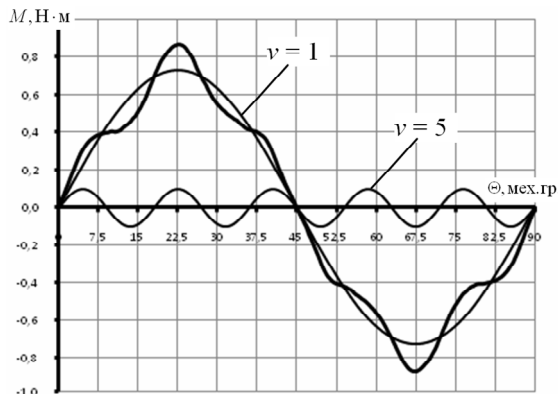


Рис. 12. Составляющие ряда Фурье для зависимости  $M = f(\theta)$  при соединении обмотки статора по схеме "треугольник"

Понятно, что при соединении фаз обмотки статора по схеме "треугольник" все гармонические составляющие ЭДС внутри контура соединения, не кратные 3, взаимно уничтожаются. Следовательно, для разработанного макетного образца ВД с внутренними ПМ такая схема соединения не приводит к ухудшению его свойств и характеристик, т.к. амплитуда 3-й гармоники в кривой фазной ЭДС составляет всего 0,88 % от амплитуды фазной ЭДС.

Также при исследованиях одновременно экспериментально определялись ЭДС, наведенные в контуре разомкнутого "треугольника"  $E_T = f(\theta)$  и в фазе обмотки статора  $E_{\phi} = f(\theta)$  (рис. 13).

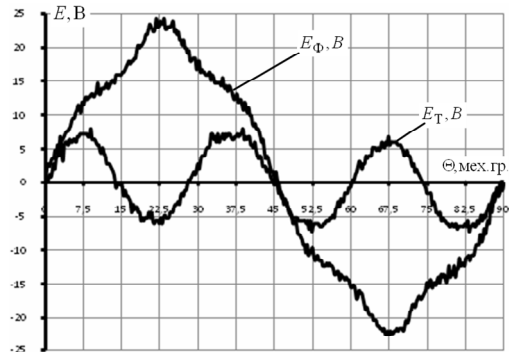


Рис. 13. Зависимости  $E_T = f(\theta)$  и  $E_{\phi} = f(\theta)$  при частоте вращения  $n = 2040$  об/мин

Для наглядности значения ЭДС  $E_T$  на рис. 13 увеличены в 10 раз.

Из рис. 13 видно, что в случае разомкнутого "треугольника" амплитуда 3-й гармоники ЭДС мала (около 0,6 В). Измерения контурного тока при замыкании схемы показали, что этот ток практически отсутствует.

Для сопоставления свойств макетного образца ВД при двух способах соединения фаз обмотки статора были экспериментально сняты его рабочие характеристики, а именно: механическая  $n = f(M_B)$ , где  $M_B$  – момент на валу (рис. 14), электромеханическая  $I = f(M_B)$  (рис. 15), где  $I$  – ток источника питания, зависимости КПД  $\eta = f(M_B)$  (рис. 16) и  $\eta = f(P_2)$  (рис. 17), где  $P_2$  – полезная мощность. В эксперименте напряжение источника питания составляло 24 В.

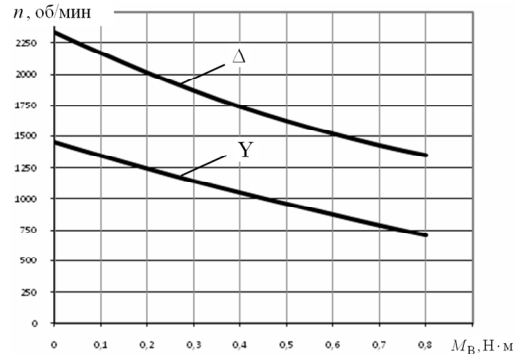


Рис. 14. Механические характеристики образца ВД

Из графиков, представленных на рис. 14 следует, что механические характеристики ВД имеют примерно одинаковую жесткость. Частота вращения в режиме холостого хода при способе соединения "треугольник" больше в 1,6 раза, чем при способе соединения "звезда", а при номинальном моменте, равном 0,6 Нм, частоты вращения ротора отличаются в 1,74 раза.

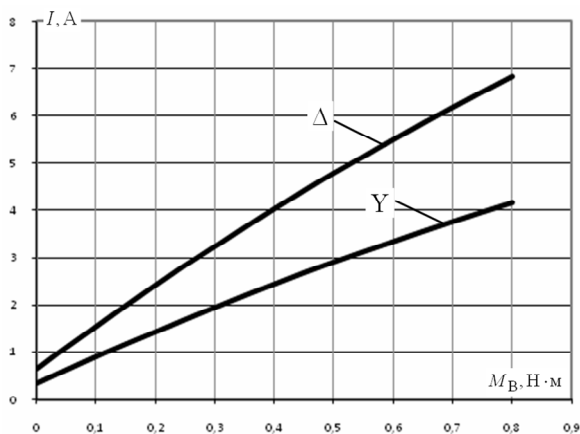


Рис. 15. Электромеханические характеристики образца ВД

Исходя из того, что частота вращения при способе соединения "треугольник" выше, чем при способе соединения "звезда", то и токи как в режиме холостого хода, так и при номинальной нагрузке при соединении фаз обмотки статора в "треугольник" больше, чем при соединении фаз обмотки статора в "звезду" (рис. 15).

Из графиков на рис. 16 видно, что при номинальном моменте ВД его КПД при способе соединения "треугольник" составляет 72,2 %, что больше на 4,2 %, чем при способе соединения "звезда".

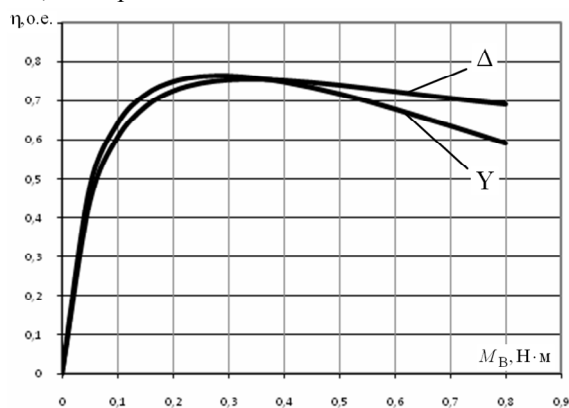


Рис. 16. Характеристики образца ВД  $\eta = f(M_B)$

Максимальное значение КПД при способе соединения "треугольник" ниже, чем при способе соединения "звезда" (рис. 17). Это связано с большей величиной потерь в стали при более высокой частоте вращения многополюсного ротора ВД.

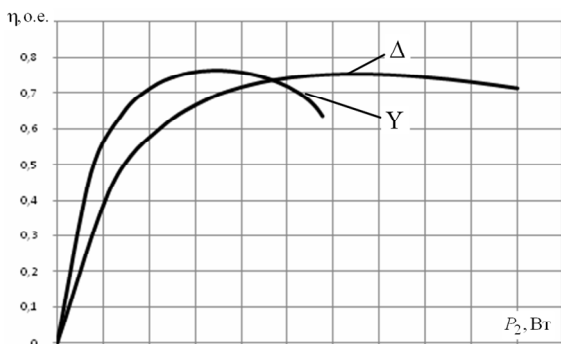


Рис. 17. Характеристики образца ВД  $\eta = f(P_2)$

КПД рассматриваемого ВД может быть повышен за счет применения тонколистовой электротехнической стали взамен используемой в данном макетном образце стали марки 2211 толщиной 0,5 мм.

Также для улучшения свойств и характеристик ВД с явнополюсным статором и внутренними ПМ необходимо проведение исследовательских работ в направлении оптимизации геометрических размеров двигателей на базе полевых математических моделей высокой точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами / И. Н. Радимов, В. В. Рымша, Чан Тхи Тху Хыонг [и др.] // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 5. – с. 26-28.
2. Исследование вентильного электродвигателя с внутренними постоянными магнитами / Радимов И.Н., Рымша В.В., Демяненко С.К., Кравченко П.А. // *Праці ІЕД НАН України*.: Зб. наук. пр. – 2010. – № 25. – с. 64-67.
3. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
4. Параметры вентильного двигателя с постоянными магнитами / И. Н. Радимов, М. В. Гулый, В. В. Рымша, Чан Тхи Тху Хыонг // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 6. – с. 40-43.
5. David Meeker. Finite element method magnetics version 4.2: [Электронный ресурс] / Meeker David // *User's manual*. – 2007. – 155 p.

Поступила 26.07.2010

*Радимов Игорь Николаевич, к.т.н., доц.  
Рымша Виталий Викторович, д.т.н., проф.  
Гулый Михаил Викторович, к.т.н.  
Кравченко Петр Алексеевич, магистрант*  
Одесский национальный политехнический университет  
кафедра электрических машин  
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1  
тел. (048) 738-58-55, e-mail: office@ukrainemotors.com,  
www.ukrainemotors.com

#### *I.N. Radimov, V.V. Rymsha, M.V. Gulyy, P.A. Kravchenko* **Investigation of a brushless dc motor with interior permanent magnets at two modes of the stator phase winding connection.**

Results of calculation and experimental investigations of a brushless DC motor with interior permanent magnets are described. Generation of electromagnetic torque and EMF in "star" and "triangle" wiring schemes of the stator phase winding is analyzed.

**Key words – brushless DC motor, interior and exterior permanent magnets, finite element method, electromagnetic torque, electromotive force.**