

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С
ВНУТРЕННИМИ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Наведено порівняння результатів математичного та фізичного моделювання при дослідженні вентильного електродвигуна з внутрішніми постійними магнітами.

На сегодняшний день прогресс в электромашиностроении определяется появлением современных управляемых преобразователей энергии, к которым относятся вентильные двигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Исследование и 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.

В [1,2] приведены результаты оптимизации активной части вентильных двигателей с постоянными магнитами (ВДПМ). Такие ВДПМ выполнены с явнополюсной структурой магнитопровода статора и магнитами, определенным образом закрепленными на поверхности магнитопровода ротора (рис. 1,а). В то же время часто по условиям эксплуатации требуется применение ВДПМ с магнитами, вставленными в пазы магнитопровода ротора, т.е. с внутренними магнитами (рис. 1,б).

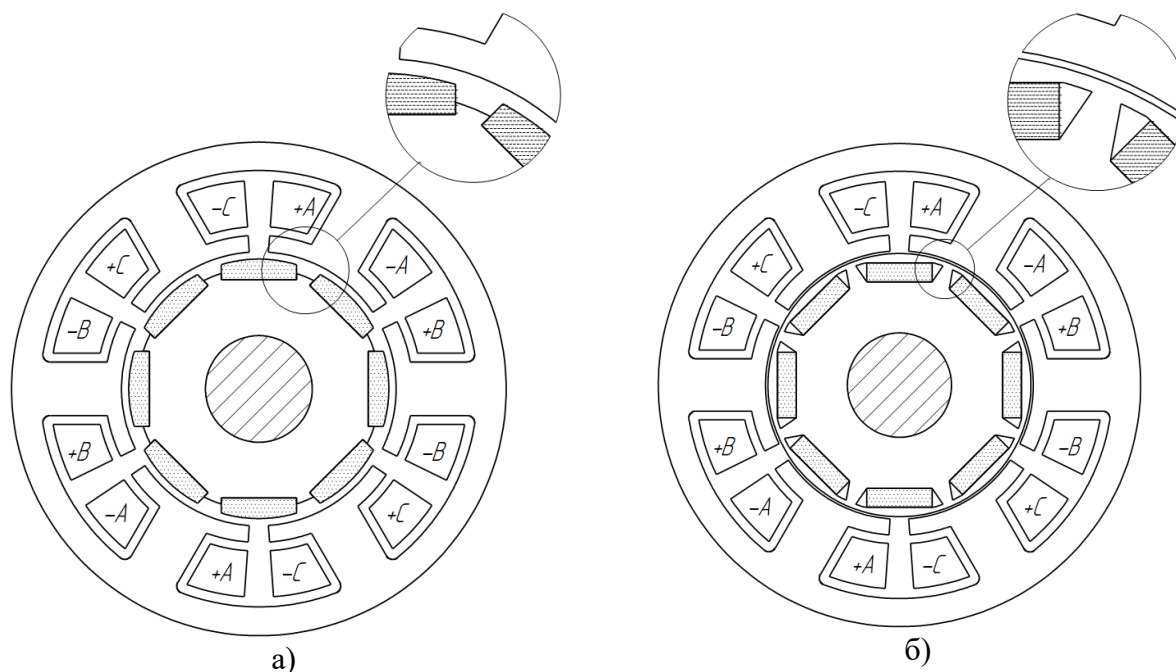


Рис. 1.

В частности, в популярных на сегодняшний день гибридных автомобилях производства компании «Тойота» применяются ВДПМ с внутренними магнитами в связи с тем, что электродвигатели работают с высокой угловой скоростью ротора в условиях повышенного воздействия внешних вибрационных сил [3]. Спецификой конструкции ВДПМ с внутренними магнитами является то, что для снижения потока рассеяния постоянных магнитов, т.е. части потока, не участвующего в процессе преобразования энергии и не сцепленного с обмоткой статора, в местах крепления магнитов на роторе выполняются боковые воздушные полости (см. фрагмент на рис. 1,б).

В результате между этими воздушными полостями и внешним контуром ротора образуются тонкие магнитные участки (мостики). Высота магнитного мостика h_{MC} должна быть достаточной для обеспечения механической прочности фиксации магнита без деформации оболочки ротора, и, в то же время, должна выбираться как можно меньшей с целью снижения потока рассеяния магнита (рис. 2).

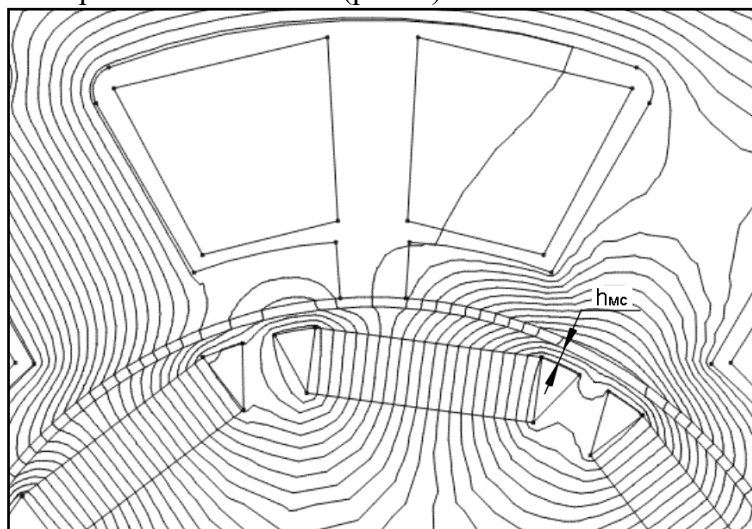


Рис. 2.

Очевидно, что степень насыщения мостика оказывает влияние на характеристики электромеханического преобразователя. Учитывая высокую степень насыщения мостика в реальных электродвигателях, задача расчета ВДПМ с внутренними магнитами решается на основе моделирования магнитного поля в нелинейной постановке. Целью настоящего исследования является оценка адекватности разработанной полевой математической модели ВДПМ с внутренними магнитами.

Моделирование выполнялось для ВДПМ с расчетным номинальным моментом 0,6 Нм. Основные данные двигателя представлены в таблице.

Величина	Значение
Внешний диаметр статора, мм	102
Внутренний диаметр статора, мм	56,5
Воздушный зазор, мм	0,5
Длина пакета статора, мм	25
Высота мостика, мм	0,9
Число витков катушки обмотки статора	50
Число зубцов статора	6
Число полюсов ротора	8
Марка магнитов	NdFeB

Высота мостика выбиралась исходя из возможностей последующего изготовления экспериментального пакета ротора на технологическом комплексе лазерной резки и была принята равной $h_{MC} = 0,9 \text{ мм}$. Геометрия магнитопровода статора соответствует геометрии, заложенной в вентильном электродвигателе РМ-108 [4].

Магнитное поле рассчитывалось методом конечных элементов в программе FEMM [5]. По результатам расчетов магнитного поля определялась зависимость зубцового электромагнитного момента M_z от положения ротора относительно статора Θ . Зубцовый момент возникает от действия поля постоянных магнитов при отсутствии тока в обмотке статора. Расчетное значение амплитуды зубцового момента равно 0,06 Нм, что составляет 10% от номинального момента ВДПМ.

Для снижения амплитуды зубцового момента M_z необходимо уменьшать магнитную проводимость по пути замыкания потока рассеяния. С этой целью в полевой модели постоянные магниты были смещены к центру ротора на 1 мм. При этом высота мостика осталась неизменной.

В результате смещения магнитов амплитуда зубцового момента снизилась до 0,015 Нм (4% от номинального момента) (рис. 3).

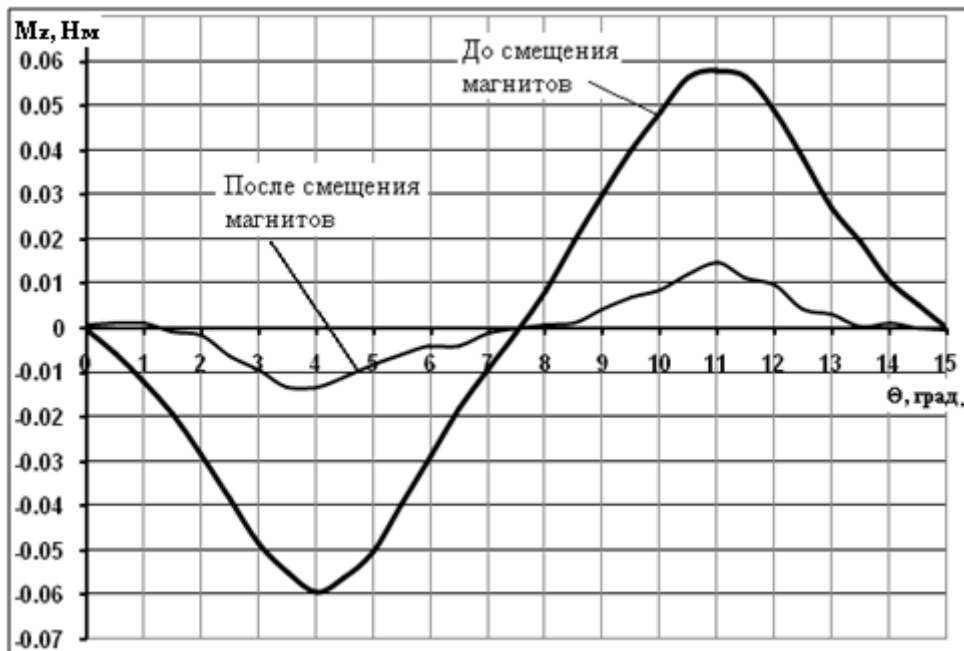


Рис. 3.

Помимо зубцового момента по результатам расчета магнитного поля определялся также электромагнитный момент M_3 при наличии тока в обмотке статора. МДС обмотки статора принималась равной 240 А. Зависимости $M_3 = f(\theta)$ на полупериоде изменения момента представлены на рис. 4.

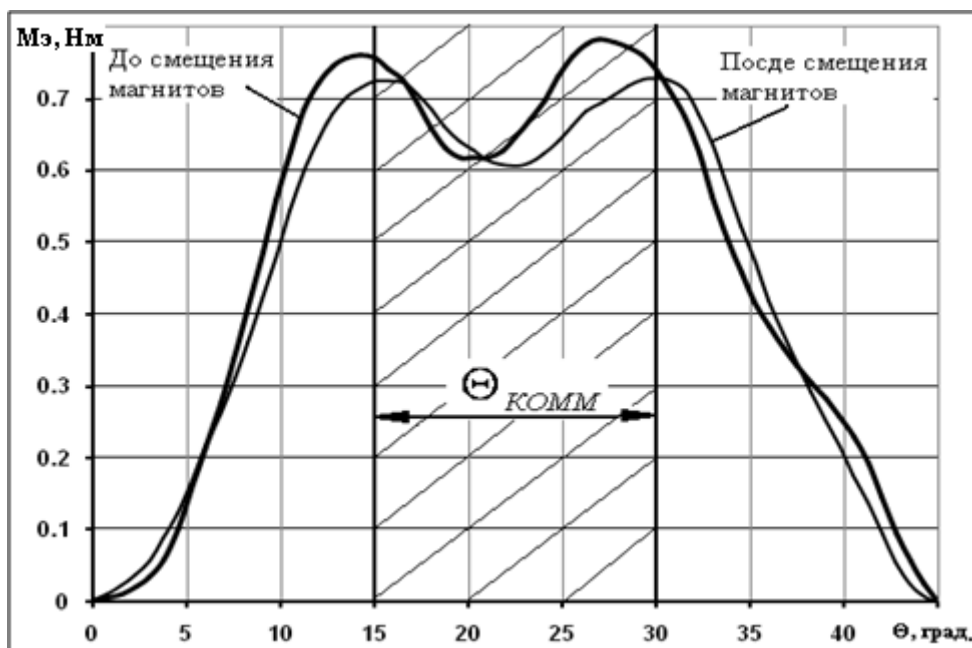


Рис. 4.

Полученные зависимости отличаются от синусоиды, причем основное отличие наблюдается в зоне коммутации при $\Theta_{КОММ} = (15 \div 30)$ градусов. Видно, что смещение магнитов к центру ротора при значительном уменьшении зубцового момента приводит к не столь заметному изменению среднего момента двигателя на периоде коммутации. Средний момент составил 0,704 Нм без смещения и 0,672 Нм – при смещении, т.е. снизился на 4,5%. В то же время пульсации электромагнитного момента $M_{э}$ на периоде коммутации сократились в 1,3 раза (с 23% до 18%). Здесь же отметим, что в случае синусоидальной зависимости пульсации составляют 14%, а также то, что вопрос минимизации уровня пульсаций в ВДПМ с внутренними постоянными магнитами и явнополюсным статором в данной статье детально не рассматривается и является темой дальнейших исследований.

По результатам представленных выше исследований был изготовлен макетный образец ВДПМ со смещенными к центру внутренними постоянными магнитами. На данном макетном образце выполнены исследования, в том числе и для оценки адекватности разработанной полевой математической модели электромеханического преобразователя с высоким уровнем насыщения участков магнитной цепи. Адекватность модели оценивалась путем сопоставления величины зубцового момента, а также экспериментальной и расчетной зависимостей линейной ЭДС обмотки статора при неизменной частоте вращения ротора.

В эксперименте выполнено разделение суммарного момента холостого хода на составляющие: момент трения в подшипниках и зубцовый момент. Момент трения составил 0,022 Нм, а амплитуда зубцового момента – 0,017 Нм, что в достаточной степени коррелируется с расчетным значением этой амплитуды.

Линейная ЭДС обмотки статора записывалась на цифровом осциллографе при вращении ротора с частотой 737 об/мин (рис. 5) и обрабатывалась при помощи цифрового фильтра.

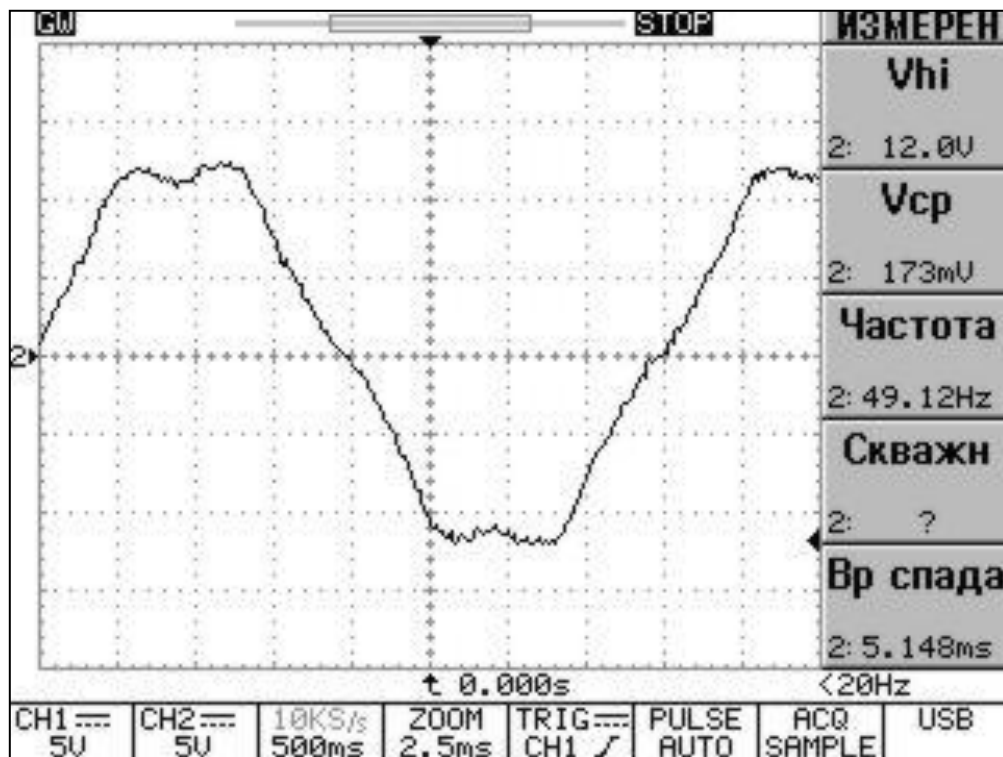


Рис. 5.

Расчетная зависимость изменения линейной ЭДС в функции времени определялась по результатам моделирования магнитного поля путем дифференцирования потокосцепления обмотки статора по времени с дальнейшей обработкой данных при помощи цифрового

фильтра. Сопоставление экспериментальной и расчетной зависимостей линейной ЭДС от положения ротора при его вращении с частотой 737 об/мин приведено на рис. 6.

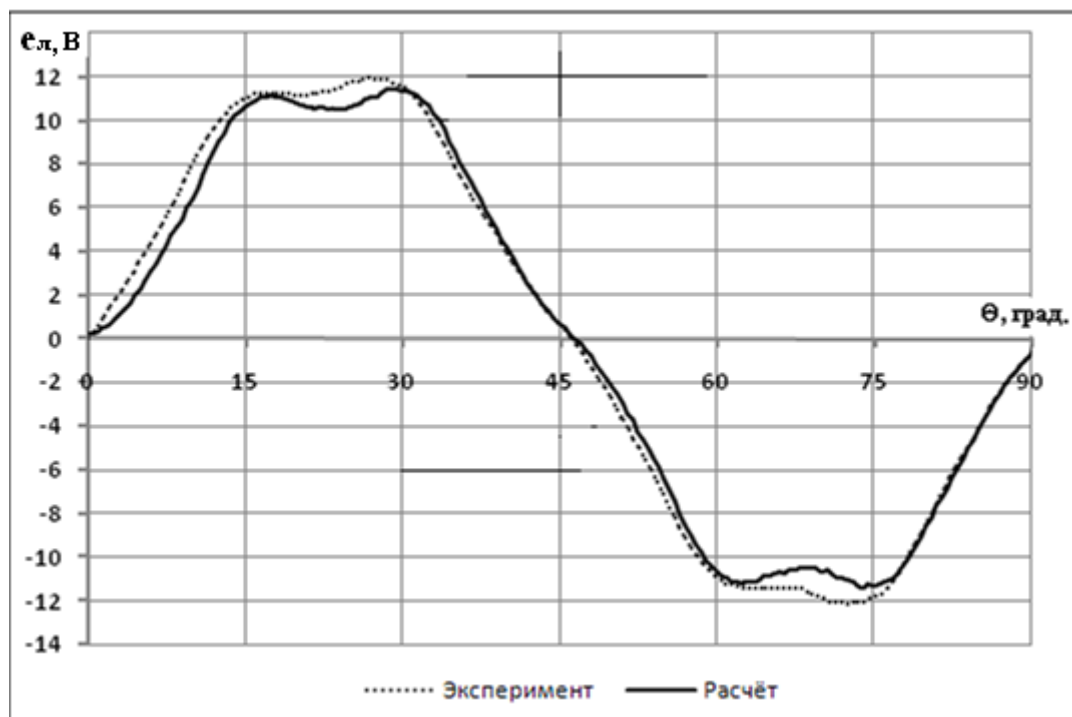


Рис. 6.

Из полученных результатов следует, что разработанная полевая математическая модель ВДПМ с внутренними постоянными магнитами может использоваться в дальнейших исследованиях, т.к. показывает достаточно близкое совпадение с результатами эксперимента.

Представлено сравнение результатов математического и физического моделирования при исследовании вентильного электродвигателя с внутренними постоянными магнитами.

The comparison of the results of the mathematical and physical modeling on the research of the brushless DC motor with inner permanent magnets are offered.

1. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами / И. Н. Радимов, В. В. Рымша, Чан Тхи Тху Хыонг [и др.] // Электротехніка та електромеханіка. – 2008. - № 5. – с. 26-28.

2. Радимов И. Н. Проектный синтез вентильного двигателя с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины / И. Н. Радимов, В. В. Рымша, Чан Тхи Тху Хыонг // Електромашинобуд. та електрообладн. – 2008. – Вип. 71. – С. 32-37.

3. PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application / R. H. Staunton, S. C. Nelson, P. J. Otaduy [and e.t.c.] // Oak Ridge National Laboratory, 2004, source: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=885638.

4. <http://ukrainemotors.com>.

5. <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.