

В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, И.В. Меркулов

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MOTORSOLVE: ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Розглянуто деякі можливості програмного комплексу MotorSolve для моделювання і аналізу вентильних двигунів з постійними магнітами. Наведено результати розрахунку параметрів і характеристик вентильного двигуна з відомими геометричними розмірами і даними обмотки статора. Результати розрахунку зіставлені з результатами експериментальних досліджень. Бібл. 4, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: вентильний двигун з постійними магнітами, обмоткові дані статора, експериментальні дослідження.

Рассмотрены некоторые возможности программного комплекса MotorSolve для моделирования и анализа вентильных двигателей с постоянными магнитами. Представлены результаты расчета параметров и характеристик вентиального двигателя с известными геометрическими размерами и обмоточными данными статора. Результаты расчета сопоставлены с результатами экспериментальных исследований. Библ. 4, табл. 2, рис. 10.

Ключевые слова: вентиальный двигатель с постоянными магнитами, обмоточные данные статора, экспериментальные исследования.

Введение. Одной из передовых компьютерных систем для проектирования и анализа электрических машин является система MotorSolve компании Mentor Siemens, представляющая собой программный комплекс, который позволяет моделировать и рассчитывать параметры и характеристики электрических машин различного типа [1]. Использование системы MotorSolve существенно ускоряет процесс проектирования за счет наличия готовых шаблонов разновидностей конструктивных исполнений статоров и роторов асинхронных машин, коллекторных машин постоянного тока, вентильно-реактивных машин и вентильных машин с постоянными магнитами, а также обширной библиотеки материалов, применяемых в электрических машинах.

Моделирование электрической машины в программе MotorSolve, а также определение ее параметров и характеристик производится на основе цепно-полевой модели. При этом магнитное поле машины рассчитывается методом конечных элементов, также как и в общеизвестной программе FEMM. Однако программа FEMM не приспособлена для непосредственного расчета параметров и характеристик проектируемых электрических машин без дополнительных вычислений за рамками программы.

В настоящее время популярным типом электрических машин для специальных применений являются вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ). Существует ряд публикаций, посвященных теоретическим исследованиям ВДПМ в программном комплексе MotorSolve, например [2, 3]. Однако публикаций, посвященных верификации результатов расчета таких машин в MotorSolve с результатами эксперимента крайне мало и это, в основном, разрозненные материалы в сети Интернет. Верификация представляет интерес еще и потому, что модели и алгоритмы, заложенные в программе MotorSolve, закрыты для пользователя, что не дает возможности оценить точность результатов, получаемых при расчете.

В связи с этим, **целью статьи** является сопоставление результатов расчета в лицензионном про-

граммном комплексе MotorSolve вентиального двигателя, имеющего известные геометрические размеры и обмоточные данные, с результатами эксперимента.

Объект исследования. Объектом исследования является ВДПМ, который был спроектирован в ООО «Электротехника – Новые технологии» (г. Одесса) и в настоящее время выпускается серийно (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид исследуемого ВДПМ

Для работы от однофазной сети переменного тока 220В 50Гц ВДПМ оснащен датчиком положения ротора и электронным преобразователем, представляющим собой управляемый электронный коммутатор и выпрямительное устройство. Электронный коммутатор по сигналам датчика положения ротора обеспечивает работу ВДПМ в режиме бесколлекторного двигателя постоянного тока со 120-градусной коммутацией фаз.

Геометрические размеры активной части исследуемого ВДПМ и его обмоточные данные приведены в табл. 1.

© В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, И.В. Меркулов

Таблица 1
Геометрические размеры и обмоточные данные ВДПМ

Наименование	Значение
Внешний диаметр статора, мм	82
Внутренний диаметр статора, мм	50
Число фаз m	3
Число пазов статора Z	12
Число полюсов ротора $2P$	10
Зазор между статором и ротором, мм	0,25
Длина пакета статора, мм	42
Высота магнитов, мм	2,5
Ширина магнитов, мм	12
Марка магнита	N38SH
Схема соединения обмотки	Y
Число витков в катушке	80
Диаметр провода, мм	0,5

Создание модели ВДПМ в программном комплексе MotorSolve. На рис. 2 представлено поперечное сечение активной части исследуемого ВДПМ, полученное в программном комплексе MotorSolve.

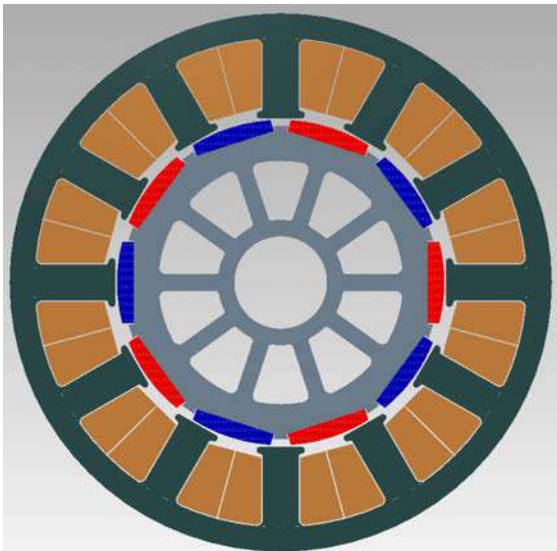


Рис. 2. Поперечное сечение активной части ВДПМ

Для уменьшения массы и момента инерции ротор ВДПМ выполнен в виде колеса со спицами и малой высотой ярма. Статор ВДПМ имеет открытые пазы и обмотку с дробным числом пазов на полюс и фазу: $q = \frac{Z}{2p \cdot m} = \frac{12}{10 \cdot 3} = \frac{2}{5}$. Полюсное деление:

$$\tau = m \cdot q = 3 \cdot \frac{2}{5} = 1 \frac{1}{5}$$

Тогда шаг обмотки равен 1 и каждая из катушек охватывает один зубец. В этом случае катушечная статорная обмотка имеет короткие лобовые части, что улучшает температурный режим обмотки и, кроме того, снижает возможность ее пробоя из-за отсутствия перекрытия фаз в зоне лобовых частей. Схема обмотки статора приведена на рис. 3.

Исходными данными для процедуры формирования обмотки в программе MotorSolve являются ее тип и схема соединения, диаметр провода, число параллельных ветвей и число витков в катушке обмотки.

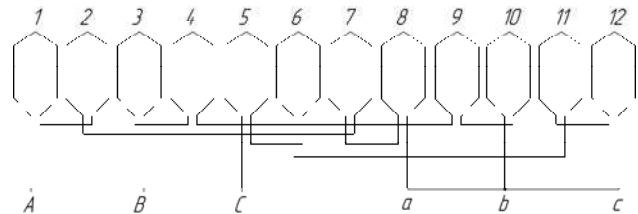


Рис. 3. Схема обмотки статора ВДПМ

После задания геометрических размеров, выбора активных и конструктивных материалов, а также формирования обмотки, программа позволяет визуализировать магнитное поле в виде силовых линий для выбранного положения ротора двигателя (рис. 4).

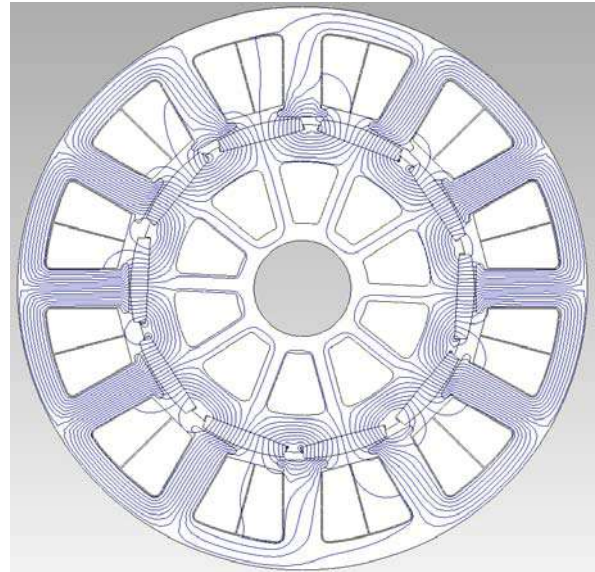


Рис. 4. Силовые линии магнитного поля ВДПМ

Анализ распределения магнитного поля двигателя позволяет произвести проверку модели ВДПМ на отсутствие ошибок при ее формировании. Из рис. 4 видно, что распределение магнитного поля соответствует физике процесса, протекающего в электрических машинах.

После создания модели ВДПМ программа MotorSolve производит расчет масс активных материалов и общей массы двигателя, сопротивления его обмотки, момента инерции ротора, а также ряда других величин.

Среди результатов расчета имеется рекомендация о целесообразности выполнения скоса (skew) магнитопровода статора для устранения зубцового реактивного момента (cogging torque). Для рассматриваемого ВДПМ рекомендован скос магнитопровода статора на угол 0,2 зубцовых деления или на 6 механических градусов (30 эл. град.). Здесь необходимо отметить, что такая же величина скоса была определена на основании полевых расчетов в программе FEMM при проектировании серийного ВДПМ и заложена в конструкторскую документацию на электродвигатель. Как показала практика, в серийно выпускаемых электродвигателях зубцовый реактивный момент практически отсутствует.

Верификация параметров, конструктивных постоянных и характеристик ВДПМ. Результаты

расчета параметров и постоянных исследуемого ВДПМ в программе MotorSolve представлены на рис. 5.

	Prototype Design
Ke (peak line-line Back-EMF over speed) (V/krpm)	116
Kt (derived from Ke) (N·m/A)	1.36
Ld (d-axis inductance) (mH)	6.55
Lq (q-axis inductance) (mH)	8.76
Llmin (minimum line-line inductance) (mH)	13.1
Llmax (maximum line-line inductance) (mH)	17.5
Rs (stator phase resistance) (Ω)	3.27
Rll (stator line-line resistance) (Ω)	6.54
Phi_m (magnet d-axis flux linkage) (Wb)	0.123

Рис. 5. Отчет программы MotorSolve после расчета параметров ВДПМ

Верификацию параметров ВДПМ целесообразно начать с индуктивностей, значения которых необходимы при расчетах переходных процессов, электромагнитной постоянной времени и реактивной составляющей электромагнитного момента.

На рис. 5: $L_{l\min}$ (minimum line-line inductance) – индуктивность обмотки статора по продольной (d) оси, а $L_{l\max}$ (maximum line-line inductance) – индуктивность обмотки статора по поперечной (q) оси. Значения этих индуктивностей в два раза больше значений индуктивностей фазы обмотки статора, обозначенных на рис. 5 как L_d и L_q соответственно ($L_{l\min} = 2 \cdot L_d$, $L_{l\max} = 2 \cdot L_q$).

Проведем сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Измерения индуктивностей серийного ВДПМ проводились с помощью LCR-метра DT-9935 и механического устройства, позволяющего повернуть вал двигателя на заданный угол. Результаты сравнения индуктивностей сведены в табл. 2.

Таблица 2

Индуктивности ВДПМ

Величина	Расчет	Эксперимент
$L_{l\min}$, мГн	13,1	13,8
$L_{l\max}$, мГн	17,5	18,1

Из табл. 2 видно, что результаты расчета и эксперимента имеют хорошую сходимость. Кроме того, как известно, особенностью ВДПМ (в отличие от синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением) является то, что индуктивность обмотки статора по оси d меньше, чем индуктивность обмотки статора по оси q , что и подтверждается данными рис. 5 и табл. 2.

Рассмотрим соответствие расчетных и экспериментальных данных потокосцепления обмотки статора двигателя, величина которого входит в уравнение для расчета активной (основной) составляющей электромагнитного момента ВДПМ [4]. В результате расчета в MotorSolve получено значение потокосцепления фазы обмотки при ее ориентации по оси d (на рис. 5 – Φ_{i_m}) $\Psi_f = 0,123$ Вб. В этом случае имеет место максимальное сцепление фазы обмотки с потоком, созданным постоянными магнитами ротора. При соединении обмотки по схеме «Y» две последовательно включенные фазы обмотки смещены в магнитном поле постоянных магнитов на угол 60 эл.

град. В этом случае значение потокосцепления обмотки больше потокосцепления фазы в $\sqrt{3}$ раз, т.е. $\Psi_{MS} = \sqrt{3}\Psi_f = 0,213$ Вб.

Для экспериментального определения потокосцепления обмотки статора ротор серийного ВДПМ вращался с постоянной скоростью от гонного электродвигателя (режим генератора без присоединения нагрузки). При этом, с помощью цифрового осциллографа ADS1062CM, была зафиксирована осциллограмма изменения линейной ЭДС обмотки статора ВДПМ от времени $e = f(t)$ (рис.6).

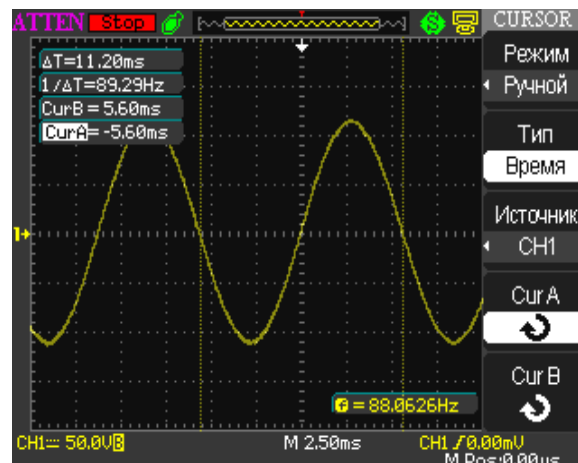


Рис. 6. Экспериментальная осциллограмма $e = f(t)$

Масштабы на осциллограмме: по вертикали – 50 В/дел., по горизонтали – 2,5 мс/дел.

Как видно из рис. 6, линейная ЭДС имеет форму, близкую к синусоидальной. На основании представленной экспериментальной осциллограммы рассчитаем потокосцепление обмотки статора ВДПМ:

$$\Psi_E = \frac{E_{\max} \cdot \Delta T}{2\pi} = \frac{118,5 \cdot 10^{-3}}{2\pi} = 0,211 \text{ Вб}, \quad (1)$$

где E_{\max} – амплитудное значение ЭДС; ΔT – период изменения ЭДС.

Таким образом, подтверждается практическое совпадение с результатом расчета потокосцепления обмотки статора, полученное в программном комплексе MotorSolve $\Psi_{MS} = 0,213$ Вб.

Зная потокосцепление, можно определить постоянную ЭДС электродвигателя K_e и постоянную момента электродвигателя K_t . Данные постоянные характеризуют электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах. Они численно равны друг другу при применении единой системы единиц.

Постоянная ЭДС K_e равна произведению числа пар полюсов p на потокосцепление обмотки статора. По данным эксперимента постоянная K_e при расчете через потокосцепление:

$$K_e = p \cdot \Psi_E = 5 \cdot 0,211 = 1,055 \text{ В·с}, \quad (2)$$

а полученная в программе MotorSolve:

$$K_e = p \cdot \Psi_{MS} = 5 \cdot 0,213 = 1,065 \text{ В·с}. \quad (3)$$

С другой стороны, согласно рис. 5, постоянная $K_e = 116 \text{ В}/1000 \text{ мин}^{-1}$, или $K_e = 116 \cdot \frac{9,55}{1000} = 1,107 \text{ В·с}$.

Таким образом, расхождение между постоянной ЭДС K_e , полученной двумя способами на основании расчетных данных MotorSolve, приведенных на рис. 5, составляет 3,9 %. Такое отличие, скорее всего, связано с погрешностью вычислений в MotorSolve ЭДС, получаемой путем дифференцирования потокосцепления обмотки статора. К сожалению, в программе MotorSolve отсутствует возможность оценить степень соответствия синусоиде формы потокосцепления обмотки статора.

Постоянная момента K_t , численно равная постоянной ЭДС K_e , которая рассчитана через потокосцепление обмотки из программы MotorSolve, составляет $K_t = 1,065 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$.

Что касается постоянной момента $K_t = 1,36 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$, приведенной на рис. 5, то она определяется искусственно из постоянной ЭДС K_e путем деления на $\sqrt{3}/2$, и поэтому не является параметром ВДПМ. В то же время указанные выше другие параметры, полученные расчетным путем в программе MotorSolve, имеют хорошую сходимость с экспериментом.

Представляет интерес сравнить расчетные и экспериментальные механические характеристики исследуемого ВДПМ, а также изменение тока двигателя во времени при заданной нагрузке на валу. Экспериментальное определение механической характеристики производилось на стенде с гистерезисным динамометром АНД-603, с помощью которого осуществлялась нагрузка ВДПМ (рис. 7).

Расчеты и экспериментальное определение характеристик проводились при неизменном («гладком») напряжении в звене постоянного тока электронного коммутатора 270 В для исключения влияния схемы выпрямления на характеристики ВДПМ. На рис. 8 приведены расчетная (в MotorSolve) и экспериментальная «естественные» механические характеристики исследуемого ВДПМ, полученные при работе двигателя без регулирования частоты вращения (заполнение сигнала ШИМ равно 1).

Представленные механические характеристики показывают приемлемую сходимость расчета с экспериментом. Частота вращения холостого хода расчетной характеристики меньше частоты вращения холостого хода, полученной экспериментальным путем, на 3,3 %. В то же время жесткость расчетной механической характеристики несколько больше жесткости экспериментальной механической характеристики.

На рис. 9 и 10 приведены соответственно расчетные и экспериментальные осциллограммы фазного тока ВДПМ при его работе с противодействующим моментом нагрузки на валу 1 Н·м.

Расчетная характеристика определялась при частоте вращения 2270 об/мин. При этом среднее значение тока составляло 1,04 А.

Сравнение осциллограмм на рис. 9 и 10 позволяет сделать вывод о том, что расчетные и экспериментальные значения токов соответствуют физическим представлениям о переходных процессах при коммутации фаз обмотки статора, коррелируются по форме и амплитуде, а также еще раз подтверждают адекват-

ность расчета параметров ВДПМ в программном комплексе MotorSolve.

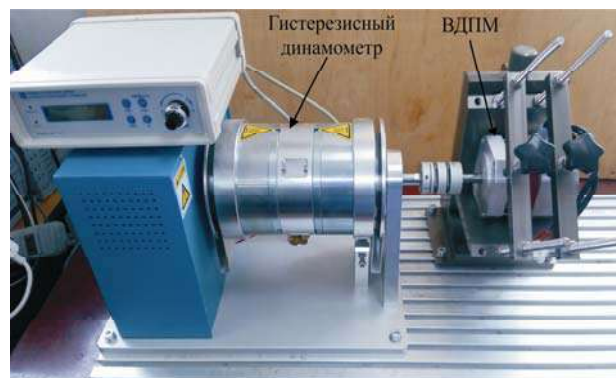


Рис. 7. Общий вид экспериментального стенда

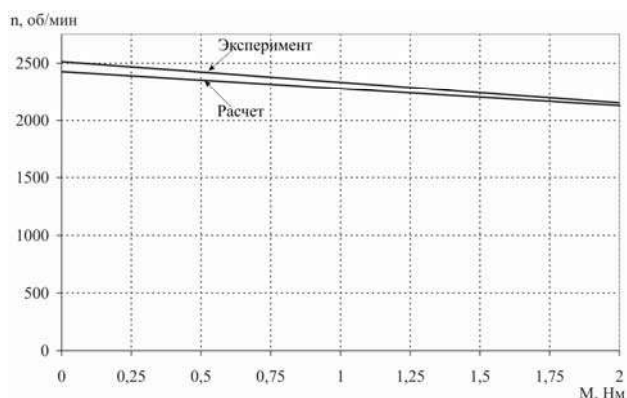


Рис. 8. «Естественные» механические характеристики ВДПМ

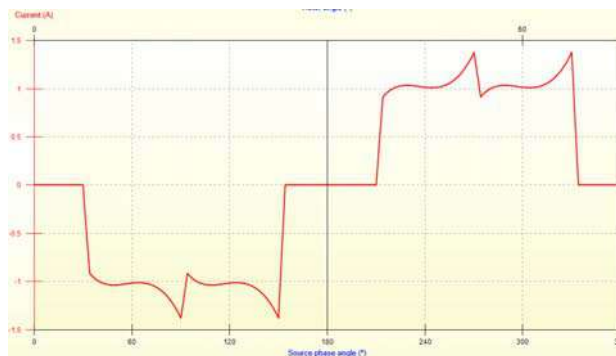


Рис. 9. Расчетная осциллограмма фазного тока ВДПМ при работе ВДПМ с нагрузкой 1 Н·м

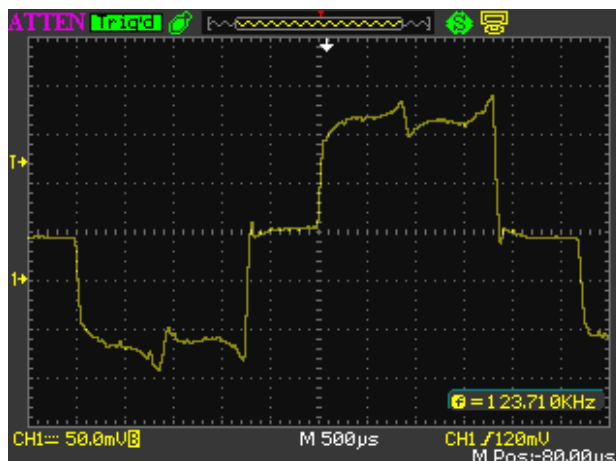


Рис. 10. Экспериментальная осциллограмма фазного тока при работе ВДПМ с нагрузкой 1 Н·м

Экспериментальная осциллограмма фазного тока получена с помощью цифрового осциллографа ADS1062CM при использовании датчика тока на резисторе с сопротивлением 0,1 Ом. Масштабы на экспериментальной осциллограмме: по вертикали – 0,5 А/дел., по горизонтали – 0,5 мс/дел. В эксперименте частота вращения ВДПМ составляла 2330 об/мин, а среднее значение тока – 1,1 А.

Выводы.

1. С помощью программного комплекса MotorSolve проведен расчет параметров и характеристик серийно выпускаемого ВДПМ. Результаты расчета имеют незначительное отличие от данных, полученных экспериментально, что подтверждает высокую эффективность программного комплекса MotorSolve.

2. В отличие от общеизвестных программ расчета магнитного поля, например FEMM, программный комплекс MotorSolve полностью обеспечивает расчет параметров, переходных процессов и характеристик электрической машины без использования дополнительного программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.mentor.com/products/mechanical/motorsolve/>.
2. Гребеников В.В. Сопоставление характеристик электродвигателей на постоянных магнитах с внешним и внутренним ротором // Гідроенергетика України. – 2018. – №3-4. – С. 46-50.
3. Гребеников В.В., Прымак М.В. Сравнительный анализ систем электродвигателей с постоянными магнитами для электробуса // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2016. – №11(1183). – С. 42-48.
4. Hendershot J.R., Miller T.J.E. Design of brushless permanent-magnet motors. – Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994. – 579 p.

REFERENCES

1. Available at: <https://www.mentor.com/products/mechanical/motorsolve/> (accessed 10 April 2019).
2. Grebenikov V.V. Comparison of characteristics of electric motors with permanent magnets with external and internal rotors. *Hydropower Ukraine*, 2018, no.3-4, pp. 46-50. (Rus).
3. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Comparative analysis of magnetic electric motors with permanent magnets for electric buses. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2016, no.11(1183). – pp. 42-48. (Rus).
4. Hendershot J.R., Miller T.J.E. *Design of brushless permanent-magnet motors*. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994. 579 p.

Поступила (received) 12.04.2019

Рышша Виталий Викторович¹, д.т.н., проф.,
Радимов Игорь Николаевич², к.т.н., доц.,
Гульи Михаил Викторович², к.т.н.,
Меркулов Игорь Викторович¹, ст. преподаватель,
¹ Одесский национальный политехнический университет,
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1,
тел/phone +380 48 7385855,
e-mail: rimsha61@gmail.com, miv080452@gmail.com
² ООО «Электротехника – Новые технологии»,
65005, Одесса, ул. Мельницкая, 26/2,
e-mail: igor.radimov@gmail.com, mv.skbs@gmail.com

V.V. Rymsha¹, I.N. Radimov², M.V. Gulyy², I.V. Merkulov¹
¹ Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
² Ltd. «Electrical Engineering – NewTechnology»,
26/2, Melnitskaya Str., Odessa, 65005, Ukraine.

MotorSolve software package: verification of parameters and characteristics of the brushless permanent magnet motor.

Purpose. The purpose of this paper is to include comparison of results of the modeling and calculation in the Mentor Siemens software MotorSolve and experiment of the brushless permanent magnet motor. **Methodology.** Numerical investigation using licensed software MotorSolve is performed. Calculations of motor parameters and characteristics are made using Finite Element Method. The experimental investigations were made on the hysteresis dynamometer AHD-603. **Results.** The results of the investigations show that the calculations of the parameters and characteristics of the motor in MotorSolve software almost match with the results of the experiments. **Practical value.** The high efficiency of the MotorSolve software for the modeling, calculation and research of the brushless permanent magnet motors are confirmed. References 4, tables 2, figures 10.

Key words: brushless permanent magnet motor, stator winding data, experimental investigations.