

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN217.pdf>

Статья опубликована 13.04.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Петрушин А.Д., Шевкунова А.В., Кашуба А.В. Оптимизационные расчеты и экспериментальные исследования вентильно-индукторной машины // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.363 + 06

Петрушин Александр Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону¹
Заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: alex331685@yandex.ru

Шевкунова Анастасия Владимировна

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Инженер научно-исследовательской части
E-mail: nastya3051990@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=823538

Кашуба Александр Викторович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону
Аспирант кафедры «Электрический подвижной состав»
E-mail: kashuba-av@mail.ru

Оптимизационные расчеты и экспериментальные исследования вентильно-индукторной машины

Аннотация. Машиностроительное производство лежит в основе технологического, а значит и экономического суверенитета страны. Для дальнейшего развития машиностроения в современной конкурентной среде требуется высокотехнологичное автоматизированное производство, основу которого составляет электрический привод. Одним из перспективных в настоящее время электроприводов является вентильно-индукторный, обладающий высокими технико-экономическими показателями. До конца нерешенной остается проблема оптимального проектирования вентильно-индукторного двигателя. Ведь именно конфигурация активной части машины отвечает за характеристики проектируемой машины.

Была проведена оптимизация геометрии активной части вентильно-индукторного двигателя по критерию максимума среднего значения электромагнитного момента за период коммутации с помощью оптимизационных алгоритмов на основе методов Нелдера-Мида и Монте-Карло. Расчет проводился в разработанной авторами программе автоматизированного проектирования «Оптимизация ВИМ», которая осуществляет прямое взаимодействие с программой по расчету и визуализации электромагнитных процессов FEMM. Оптимизация

¹ 344038, Южный федеральный округ, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

проводилась в несколько этапов, чтобы обеспечить гарантированное нахождение глобального экстремума целевой функции.

Проведены экспериментальные исследования с исходной конфигурацией магнитной системы и оптимизированной, с целью верификации полученных результатов. Исследования проводились по специально разработанной программе и методике.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель; активная часть; геометрические параметры; оптимизация; средний электромагнитный момент; метод Монте-Карло; метод Нелдера-Мида; экспериментальная установка

От уровня развития машиностроительного комплекса зависят многие важнейшие показатели Российской Федерации, такие как обороноспособность, материалоёмкость, производительность труда, а значит и конкурентоспособность. В соответствии с целями государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»² одним из приоритетных направлений является создание конкурентоспособной промышленности, в основе которой лежит разработка и внедрение передовых промышленных технологий. Поэтому, развитие отечественного станкостроения является одной из первоочередных задач российского машиностроения.

Электропривод является неотъемлемой и важной единицей станочного оборудования. Одним из перспективных в настоящее время электроприводов является вентильно-индукторный (ВИП) [1, 2], обладающий высокими технико-экономическими показателями. Важным фактором, определяющим эти показатели, является конфигурация магнитной системы вентильно-индукторного двигателя (ВИД). Поэтому нахождение оптимальных размеров зубцово-пазовой зоны ВИД является актуальной задачей.

Целью данной работы является увеличение среднего значения электромагнитного момента путем оптимизации геометрии зубцовой зоны двигателя и верификация полученных результатов путем экспериментального исследования.

Существуют различные методики проектирования систем ВИП [3], однако они не используют в полной мере возможности оптимизационных алгоритмов. Данная статья направлена на совершенствование ВИД как узла системы электропривода с применением оптимизационных алгоритмов.

В качестве объекта исследований был выбран однофазный ВИД с магнитной системой 6/6 (6 зубцов статора и 6 зубцов ротора), опытная партия которых была изготовлена на заводе «Горизонт» в городе Ростове-на-Дону для систем вентиляции. Номинальные значения и основные размеры и другие параметры ВИД указаны в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Номинальные значения исследуемого ВИД 6/6 (составлено авторами)

Наименование параметров двигателя	Значение
Мощность, Вт	234
Момент, Н·м	1,492
Частота вращения, мин ⁻¹	1500
Действующее значение тока, А	4 А
Напряжение питания постоянного тока, В	310

² Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности: Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 328 // Собрание законодательства РФ. - 2014. - 167 с.

Таблица 2
Основные размеры и другие параметры исследуемого ВИД 6/6 (составлено авторами)

Наименование параметра	Значение
Число зубцов статора	6
Число зубцов ротора	6
Число фаз	1
Длина пакета статора (ротора), мм	50
Внешний радиус статора ($R3s$), мм	44,2
Радиус статора по пазам ($R2s$), мм	35,5
Радиус расточки статора ($R1s$), мм	24
Ширина зубца статора ($b1s$), мм	11,2
Угол наклона боковой поверхности зубца статора ($b2s$), град.	0
Воздушный зазор (δ), мм	0,2
Внешний радиус ротора ($R1r$), мм	23,8
Радиус ротора по пазам ($R2r$), мм	17,6
Радиус отверстия под вал ($R3r$), мм	8,5
Ширина коронки зубца ротора ($b1r$), мм	8,7
Угол наклона боковой поверхности зубца ротора ($b2r$), град.	11
Ширина катушки ($k2$), мм	6,25
Возвышение зубца статора над катушкой ($k1$), мм	3,02
Число витков, n	130

Поставленная цель решалась путем изменения размеров элементов магнитной системы ВИД с применением алгоритмов оптимизации - детерминированного метода Нелдера-Мида и стохастического - Монте-Карло [4-7]. Оптимизация магнитной системы рассматриваемого объекта проводилась с помощью программы «Оптимизация ВИМ» [8] в которой изменяемыми параметрами были: $b2s$, $b1s$, $R2r$, $b2r$, $b1r$, обозначение которых представлено на рисунке 1. Критерием оптимизации служил максимум среднего значения электромагнитного момента за период коммутации обмотки статора.

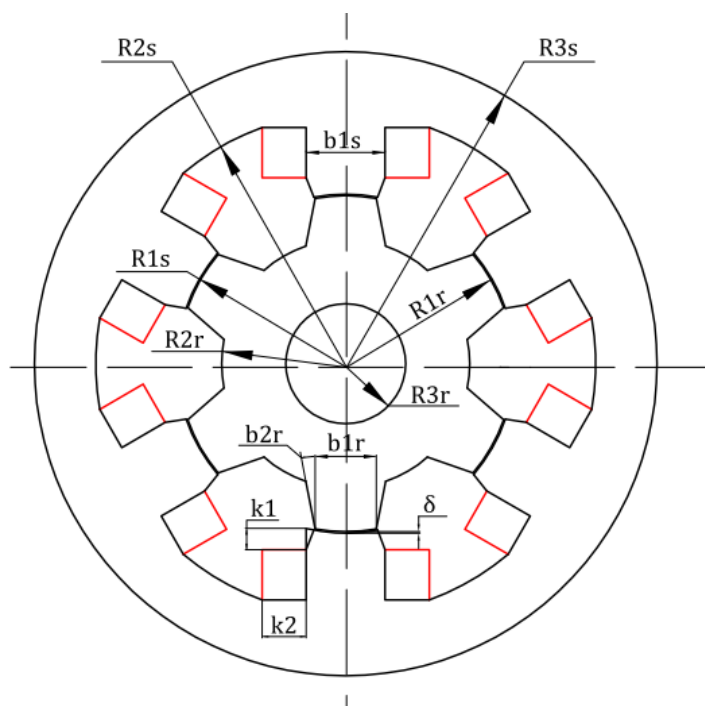


Рисунок 1. Поперечный разрез активной части ВИД 6/6 (составлено автором)

В результате проведенной оптимизации были получены следующие результаты (табл. 3).

Таблица 3

Результаты проведенной оптимизации (составлено авторами)

Размеры исходной магнитной системы, мм	Среднее значение электромагнитного момента до оптимизации, Н·м	Размеры оптимизированной магнитной системы, мм	Среднее значение электромагнитного момента после оптимизации, Н·м	Увеличение, %
$b_{2s} = 0;$ $b_{1s} = 11,2;$ $R_{2r} = 17,6;$ $b_{2r} = 11;$ $b_{1r} = 8,7$	1,492	$b_{2s} = 6,62;$ $b_{1s} = 13,868;$ $R_{2r} = 16,48;$ $b_{2r} = 14,268;$ $b_{1r} = 10,69$	1,929	22,65

Из представленной таблицы видно, что в результате проведенной оптимизации увеличение момента составило 22,65%. Поскольку в расчетах был принят ряд упрощающих допущений, которые могут повлиять на точность расчетов, то были проведены экспериментальные исследования.

Практически все принятые допущения обычно используются разработчиками в подобных случаях, однако некоторые из них следует рассмотреть отдельно, поскольку, на наш взгляд, они вносят наибольший вклад в расхождение результатов расчета и эксперимента. Среди них следующие:

- использована кривая намагничивания электротехнической стали (сталь 2411) [5] по информации завода-изготовителя. Значения индукции, полученные в расчетной модели, превышающие имеющиеся данные получены методом экстраполяции;
- воздушный зазор принят равномерным.

Первое допущение было принято ввиду того, что свойства реальной стали в некоторой степени могут отличаться от данных, представленных заводом-изготовителем. Ведь в каждом технологическом процессе изготовления могут присутствовать те или иные отклонения от технологического процесса для электротехнических сталей, изготовленных в разное время и на разных предприятиях (например, температура, давление, состав и количество примесей и др.), что оказывает влияние на магнитные свойства стали в допустимых нормативными документами пределах. В свою очередь это обстоятельство скажется на выходных параметрах электропривода (электромагнитном моменте, мощности) и даст некоторое расхождение расчетных и экспериментальных данных.

В качестве второго допущения был принят равномерный воздушный зазор. Величина воздушного зазора оказывает непосредственное влияние на формирование значения электромагнитного момента. В расчетной модели был принят «идеально равномерный» воздушный зазор, но в процессе изготовления ВИД создание равномерного воздушного зазора не представляется возможным, ввиду наличие допусков на изготовление и постоянного влияния различных факторов [9].

Определение значений момента было выполнено с помощью экспериментальной установки, изображенной на рисунке 2. Эксперимент проводился при разных значениях тока. Величина тока составляла 1, 2, 3 и 4 А. Целью экспериментального исследования являлось сопоставление расчетных и экспериментальных статических характеристик ВИД. Под

статической характеристикой здесь понимается зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора при заданном токе обмотки статора.

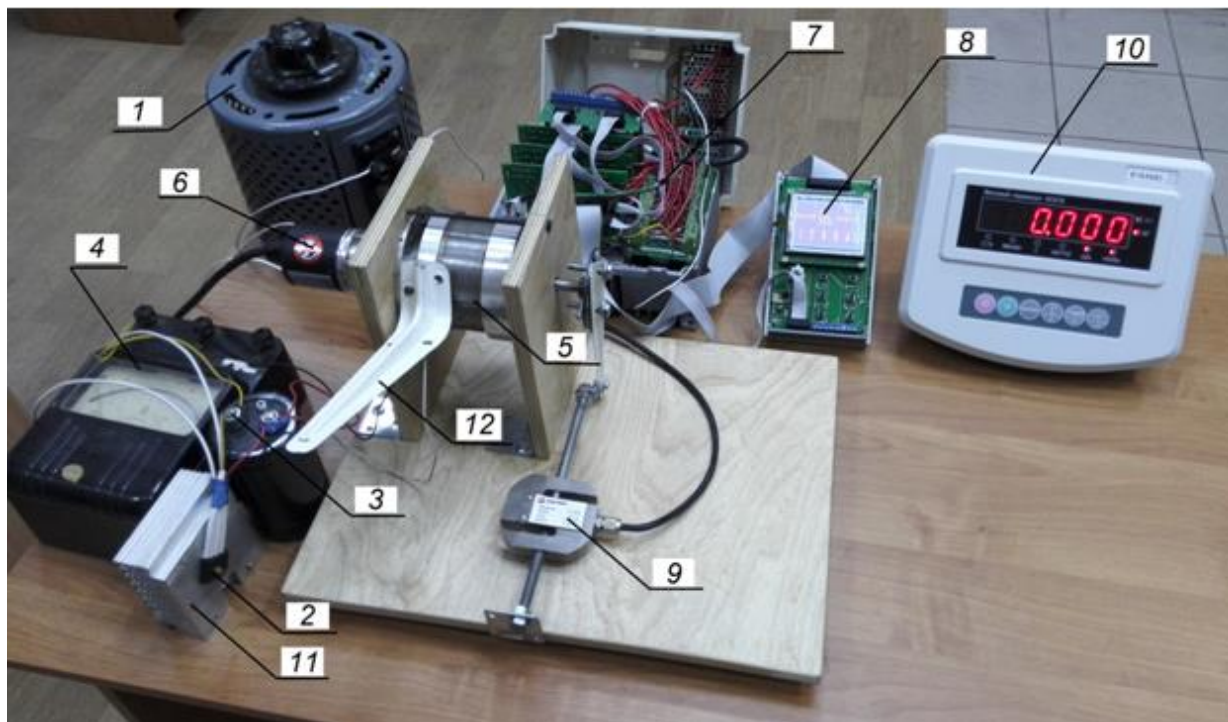


Рисунок 2. Общий вид испытательной установки: 1 - лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР); 2 - диодный мост; 3 - конденсатор; 4 - амперметр; 5 - испытуемый ВИД; 6 - энкодер; 7 - преобразователь; 8 - дисплей преобразователя; 9 - тензодатчик; 10 - весовой терминал; 11 - радиатор; 12 - рычаг (составлено автором)

В составе данной установки имеется однофазный ЛАТР, обеспечивающий требуемый уровень напряжения для питания испытуемого ВИД, диодный мост 2 (с радиатором 11, отводящим тепло) - для преобразования переменного тока, имеющегося на выходе ЛАТР, в пульсирующий. Параллельно к нему подсоединен конденсатор 3 емкостью 2200 мкФ, выполняющий роль фильтра - он служит для сглаживания пульсаций напряжения. Таким образом, питание обмоток ВИД осуществляется постоянным током. Также установлен амперметр 4 для индикации величины питающего тока, который варьируется в ходе эксперимента посредством ЛАТР (от 1 до 4 А). Под номером 5 изображен испытуемый ВИД, ротор которого статичен, а статор подвижен, что позволит вращать его, посредством рычага 12.

С левой стороны ВИД закреплен энкодер абсолютного типа 6, необходимый для определения угла поворота ротора. Благодаря тому, что выдаваемый энкодером цифровой код достаточно точен для углового положения ротора относительно статора в пределах 0,5 градуса, это дает несомненное преимущество в проведении эксперимента. Значение, полученное от энкодера посредством преобразователя 7 выводится на дисплей 8.

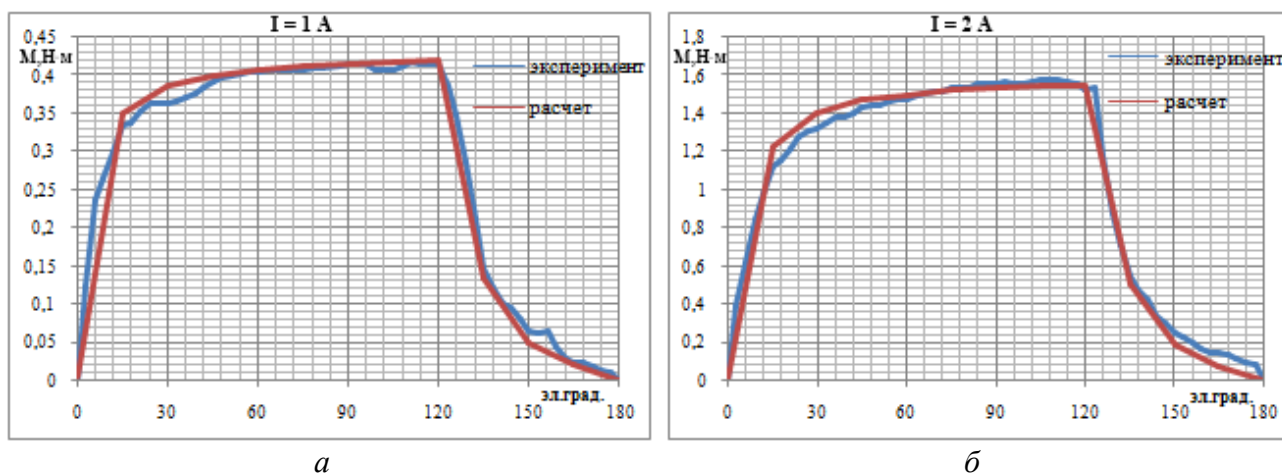
С правой стороны ВИД имеется тензометрический датчик 9, жестко закрепленный на основании установки. Он предназначен для измерения силы, действующей на ротор. Тяга, соединенная с тензодатчиком и тяга, соединенная с валом ВИД расположены под углом 90°. Величина тяги от центра вала до соединения с тягой тензометрического датчика составляет 113 мм. Тяга имеет ребро жесткости для исключения ее изгиба при наличии значительного момента на валу двигателя (рис. 3).



Рисунок 3. Положение установки тензодатчика (составлено автором)

Такое положение установки, при котором статор подвижен, а ротор неподвижен в процессе проведения эксперимента создает неизменяемый угол между тягами, который составляет 90° . Это позволяет упростить измерения при изменении взаимного расположения ротора и статора. В противном случае, когда статор неподвижен, а ротор изменяет свое угловое положение, угол между тягами меняется и необходимо будет рассчитывать электромагнитный момент как произведение силы на плечо с учетом изменяющегося угла между плечом и силой. Числовое значение измеренной силы, изображается на экране весового терминала 10 в кг. Максимальный предел измерений составляет 20 кг.

В результате проведенного исследования по верификации расчетных данных с помощью вышеописанной установки получены следующие кривые электромагнитного момента: для двигателя с исходной магнитной системой на рисунке 4, для с двигателя с оптимизированной магнитной системой - рисунок 5.



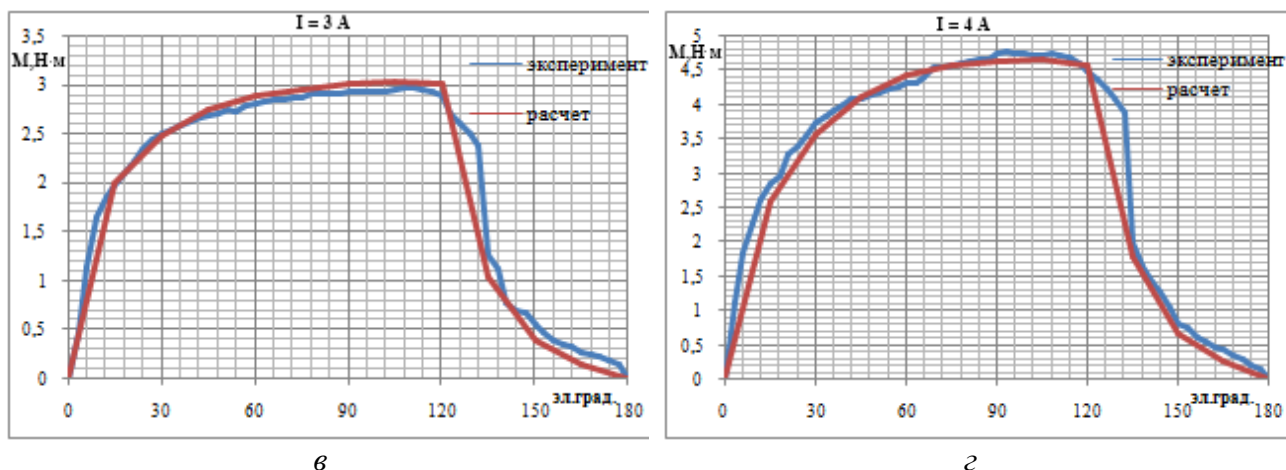


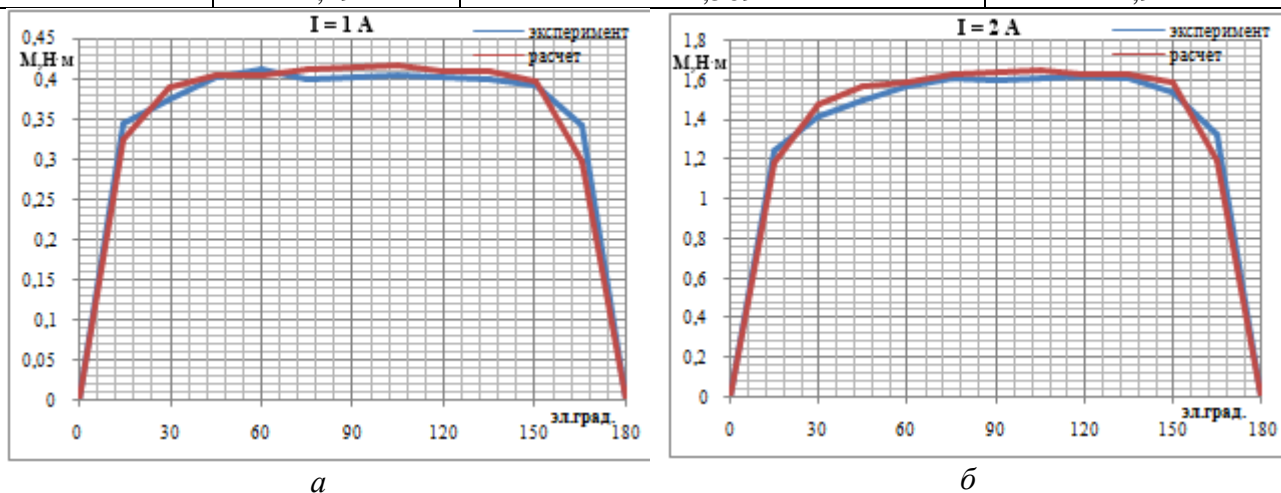
Рисунок 4. Расчетная и экспериментальная кривая момента для двигателя с исходной магнитной системой при: а - $I = 1$ А; б - $I = 2$ А; в - $I = 3$ А; г - $I = 4$ А (составлено автором)

Средние значения электромагнитного момента для ВИД с исходной магнитной системой, полученные расчетным и экспериментальным путем представлены в таблице 4.

Таблица 4

Средние значения электромагнитного момента ВИД 6/6 с исходной магнитной системой (составлено авторами)

Величина тока, А	Расчетное среднее значение момента, Н·м	Экспериментальное среднее значение момента, Н·м	Погрешность, %
1	0,142	0,143	0,7
2	0,521	0,527	1,14
3	0,985	1,011	2,57
4	1,492	1,569	4,9



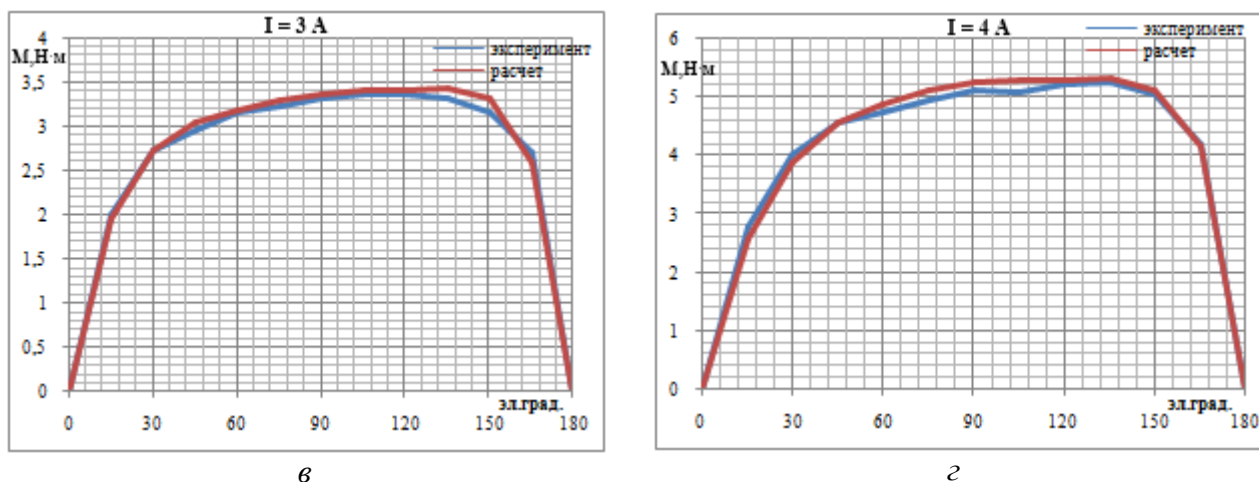


Рисунок 4. Расчетная и экспериментальная кривая момента для двигателя с оптимизированной магнитной системой при: а - $I = 1 \text{ А}$; б - $I = 2 \text{ А}$; в - $I = 3 \text{ А}$; г - $I = 4 \text{ А}$ (составлено автором)

Средние значения электромагнитного момента для ВИД с оптимизированной магнитной системой представлены в таблице 5.

Таблица 5

Средние значения электромагнитного момента ВИД 6/6 с оптимизированной магнитной системой (составлено авторами)

Величина тока, А	Расчетное среднее значение момента, Н·м	Экспериментальное среднее значение момента, Н·м	Погрешность, %
1	0,176	0,177	0,56
2	0,698	0,692	0,86
3	1,402	1,383	1,35
4	2,143	2,119	1,2

Полученные экспериментальные данные для двух вариантов конфигураций магнитных систем свидетельствуют об адекватности реальной магнитной системы ВИД и ее расчетной модели. Максимум погрешности вычислений составил 4,9%. Все расчеты производились методом конечных элементов с помощью программы FEMM 4.2 [10, 11].

Причинами расхождения расчетных и экспериментальных данных могли стать вышеизложенные принятые допущения при расчетах, а также не учтенная сила трения в подшипниках и погрешность измерительных приборов. Несмотря на то, что все задействованные приборы прошли необходимую поверку, однако нельзя не учитывать погрешности их показаний.

Выводы

1. В результате оптимизации конфигурации магнитной системы однофазного ВИД 6/6 прирост среднего электромагнитного момента составил 30,36% при сохранении внешних габаритов и длины магнитопровода, что свидетельствует об эффективности применения данных оптимизационных алгоритмов с целью повышения эксплуатационных показателей.
2. Данные математического моделирования и экспериментальные результаты достаточно близки. Погрешность не превышает 5%, что свидетельствует об адекватности математической модели и корректности принятых допущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза [Электронный ресурс] / В.В. Панкратов // Электронные компоненты. - 2007. - №2. - Режим доступа: http://www.erasib.ru/user_images/File/papers/vent.pdf (дата обращения: 17.03.2017).
2. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт [Электронный ресурс] // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. - 2015. - Т. 2. - №3. - С. 23-33. - Режим доступа: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5/> (дата обращения: 17.03.2017).
3. Петрушин А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя методом Нелдера-Мида / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Известия ТПУ. - 2016. - Т. 327. - №6. - С. 83-92.
4. Шевкунова А.В. Выбор метода оптимизации для зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / А.В. Шевкунова // Новая наука: Проблемы и перспективы. - 2016. - №3-2 (67). - С. 248-251.
5. Шевкунова А.В. Проектирование вентильно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации [Электронный ресурс] / А.В. Шевкунова // Интернет-журнал «Науковедение». - 2016 - Т. 8. - №4. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf> (дата обращения: 17.03.2017).
6. Численные методы. Использование MATLAB / Под ред. Ю.В. Козаченко, 3-е изд.: Пер. с англ. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. - 720 с.
7. Miller T.J.E. Optimal design of switched reluctance motors / T.J.E. Miller // IEEE Transactions on industrial electronics - February, 2002. - V. 49. - №1. - P. 15-27.
8. «Оптимизация ВИМ» / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова. - № 2016618039; Заявка № 2016615739; дата поступления 30.05.2016; дата регистрации 20.07.2016.
9. Мирошниченко Е.Е. Алгоритм расчета и исследование сил одностороннего магнитного притяжения в вентильно-индукторной электрической машине при неравномерном воздушном зазоре: дис. ... кандидата техн. наук:05.09.01 / Е.Е. Мирошниченко. - Новочеркасск, 2015. - 117 с.
10. Петрушин А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного электропривода / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба // Вестник РГУПС. - 2016. - №1 (61). - С. 61-65.
11. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Д.А. Статовой, А.С. Лыков // Вестник ДГТУ. - 2016. - №2 (85). - С. 51-58.

Petrushin Alexander Dmitrievich

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: alex331685@yandex.ru

Shevkunova Anastasiya Vladimirovna

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: nastya3051990@mail.ru

Kashuba Alexandr Viktorovich

Rostov state transport university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: kashuba-av@mail.ru

Optimization calculations and experimental studies of the switched-reluctance machine

Abstract. Machinery production is the basis of technological and hence economic sovereignty of the country. For the further development of engineering in today's competitive environment requires high-tech automated production, which is based on electric drive. One of the most promising at present of the actuators is a switched-reluctance with high technical and economic indicators. Unsolved remains the problem of optimal design of switched-reluctance motor. After all, the configuration of the active parts of the machine responsible for the performance of the designed machine.

Was carried out geometry optimization of the active part of the switched-reluctance motor according to the criterion of maximum average value of the electromagnetic torque over the switching period with the help of optimization algorithms based on the methods of Nelder-Mead and Monte-Carlo. The calculation was carried out in the authors program for automatic design Optimization «SRM», which engages directly with the program for the calculation and visualization of electromagnetic processes FEMM. Optimization was performed in several stages, to ensure guaranteed of finding a global extremum of the target function.

Experimental studies of the initial configurations of the magnetic system and optimized for the purpose of verification of the results. The studies were conducted under specially developed program and methodology.

Keywords: the switched-reluctance motor; the active part; geometric parameters; optimization; average electromagnetic torque; method of Monte Carlo; method of Nelder-Mead; experimental setup