

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

Петрушин Александр Дмитриевич<sup>1</sup>, Шевкунова Анастасия Владимировна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, alex331685@yandex.ru

<sup>2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, nastya3051990@mail.ru

*Аннотация – Проведены исследования, направленные на оптимизацию активной части вентильно-индукторного двигателя с целью повышения величины среднего электромагнитного момента. Установлена восприимчивость среднего значения электромагнитного момента к изменению геометрических размеров магнитной системы, найденных в процессе оптимизации.*

*Ключевые слова – вентильно-индукторная машина, геометрия активной части, оптимизация, электромагнитный момент.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические преобразователи энергии (ЭМП) составляют основу современного промышленного производства. Постоянно возрастающие требования к динамическим, энергетическим и массогабаритным характеристикам ЭМП требуют совершенствования всех компонентов и прежде всего активных частей, участвующих в электромеханическом преобразовании энергии.

ЭМП вентильно-индукторного типа, обладающий достаточно высокими технико-экономическими показателями, является одним из перспективных в настоящее время. В мировой практике вентильно-индукторные электрические машины (ВИМ) в составе вентильно-индукторных электроприводов (ВИП) применяются во многих областях. Основной причиной расширения области их применения является ряд преимуществ, таких как простота конструкции, надёжность, относительно низкая стоимость в изготовлении, а также высокие энергетические характеристики и массогабаритные показатели. В связи с этим появляется необходимость в совершенствовании их проектирования, в частности магнитных систем с целью повышения технико-экономических показателей. Благодаря наличию высокопроизводительной вычислительной техники и программного обеспечения, существует возможность совершенствовать активную часть ВИМ посредством применения оптимизационных алгоритмов.

В большинстве случаев используются трехфазные и многофазные ВИМ. Однако имеются области применения, где целесообразно применить однофазные ВИМ, например, для бытовой техники [1], для машин и механизмов с вентиляторной нагрузкой, для работы в

генераторном режиме, то есть в случаях, когда нет высоких требований к пусковому моменту, а определяющим аргументом является низкая стоимость.

Вентильно-индукторный двигатель (ВИД) в ряде случаев применяется как встраиваемый объект в технологическую машину, что может повлечь за собой ряд конструктивных ограничений на магнитную систему. Для того, чтобы разработчик имел возможность выбрать для оптимизации определенные параметры, которые оказывают наибольшее влияние на формирование величины электромагнитного момента, было проведено данное исследование.

## II. ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью исследования являлась оптимизация магнитной системы однофазного ВИД 6/6 (рис. 1) по критерию максимума среднего значения электромагнитного момента, а также установление восприимчивости величины электромагнитного момента ВИД к изменению геометрических размеров магнитной системы, найденных в процессе оптимизации.

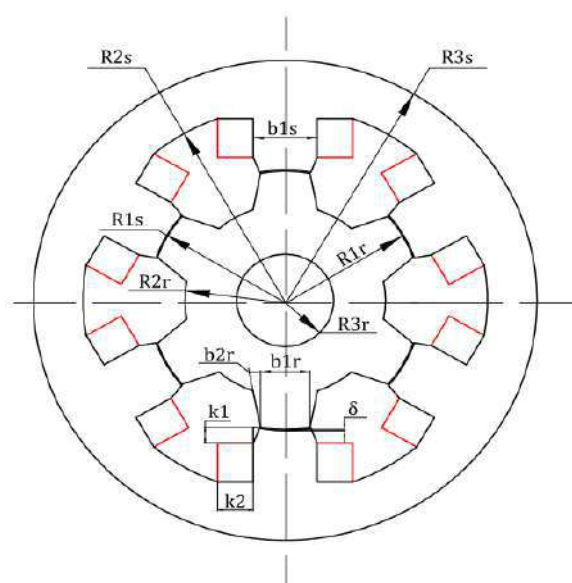


Рис. 1. Магнитная система ВИД 6/6

### III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Объектом исследования выбран ВИД (рис. 2), который изготовлен на заводе «Горизонт» (г. Ростов-на-Дону) и успешно испытан в составе вентиляторной установки.



Рис. 2. Однофазный ВИД

Основные размеры и номинальные значения ВИД представлены в табл. 1, 2. В качестве инструмента для автоматизированного проектирования и непосредственно процесса оптимизации была использована разработанная авторами программа «Оптимизация ВИМ» [2], которая ранее уже использовалась для оптимизации ВИМ с другими типами магнитных систем [3–6].

Таблица 1

Основные исходные размеры исследуемой ВИМ 6/6

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 ( $\delta$ ), 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

Таблица 2

Номинальные значения исследуемого ВИД 6/6

Наименование параметров двигателя	Значение
Мощность, Вт	234
Момент, Н·м	1,492
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	1500
Действующее значение тока, А	4 А
Величина напряжения импульса постоянного тока, В	310

Ниже представлена табл. 3 с результатами, полученными в ходе исследования. Оптимизация проводилась в два этапа (для более точного определения численного значения момента): сначала фрагменты магнитной системы были оптимизированы методом Монте-Карло (для исключения нахождения локального экстремума), а затем с помощью метода Нелдера – Мида (для уточнения полученного значения). В качестве оптимизируемых геометрических элементов за основу были взяты пять параметров, выделенные в табл. 1.

Таблица 3

Результаты проведенной оптимизации

Оптимизируемые параметры	Метод Монте-Карло, мм	Метод Нелдера – Мида, мм	Увеличение момента (от исходного), %
	Средний момент $M$ , Н·м	Средний момент $M$ , Н·м	
$b2s, b1s, R2r, b2r, b1r$	$b2s = 8,35;$ $b1s = 12,59;$ $R2r = 17,86;$ $b2r = 14,84;$ $b1r = 9,92$ $M = 2,14$	$b2s = 6,62;$ $b1s = 13,86;$ $R2r = 16,48;$ $b2r = 14,26;$ $b1r = 10,69$ $M = 2,143$	30,37

Для наглядности итогового результата на рис. 3 представлены две геометрии: черным цветом изображена геометрия исходного двигателя, а красным – оптимизированного.

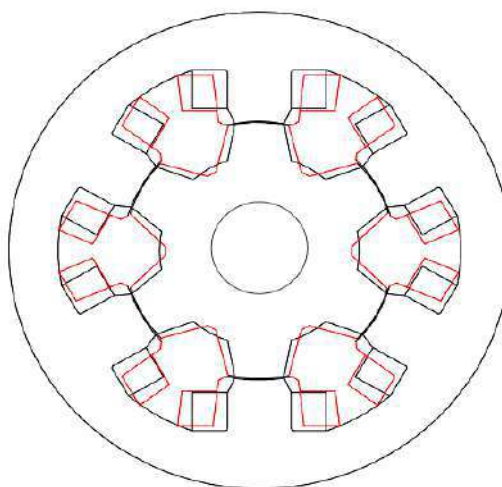


Рис. 3. Поперечные разрезы исходной и оптимизированной активной части ВИД 6/6

Как видно из рис. 3, зона для прохождения магнитного потока в зубцовой зоне оптимизированного варианта ВИД шире чем исходного, что влечет за собой уменьшение магнитного сопротивления, степени насыщения магнитной системы и увеличение среднего электромагнитного момента. Однако дальнейшее расширение этой зоны ведет к снижению разности между индуктивностью фазы в согласованном и рассогласованном положениях, что приведет к снижению среднего электромагнитного момента.

Поскольку оптимизационный процесс затрагивает ряд параметров ВИД, то физическое обоснование геометрии, полученной в результате оптимизации, должно быть согласовано с этими параметрами. Метод конечных элементов, который лежит в основе программы FEMM, позволяет учесть особенности расчета ВИД, поэтому полученная после оптимизации геометрия машины обеспечивает максимум целевой функции, при этом противоречивые друг другу требования согласованы.

Для определения чувствительности электромагнитного момента к изменению геометрических величин пяти параметров (см. табл. 3, столбец 3) магнитной системы ВИД 6/6 были проведены следующие действия:

1 В программе «Оптимизация ВИМ» проводился расчет среднего значения электромагнитного момента при изменении одного из пяти параметров (остальные четыре размера оставались неизменными) на величину  $\pm 1-5\%$  (с шагом 1%).

2 Строилась зависимость момента от вариаций значений рассматриваемого геометрического параметра.

В результате проведенного исследования были получены следующие значения среднего момента и геометрических размеров (табл. 4).

По данным, приведенным в табл. 4, получены зависимости, представленные на рис. 4. На данных графиках красными точками обозначены исходные величины электромагнитного момента и изменяемого размера фрагмента магнитной системы.

Полученные зависимости расположены в порядке снижения влияния изменения размеров на значение момента. Проведем анализ данных графиков.

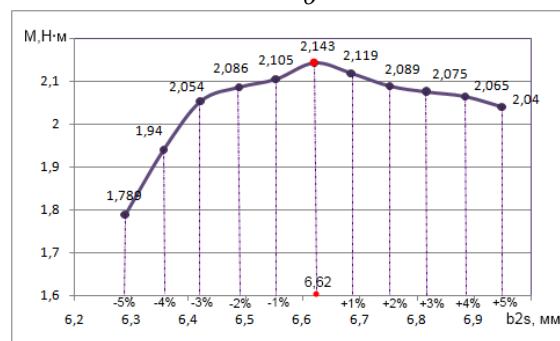
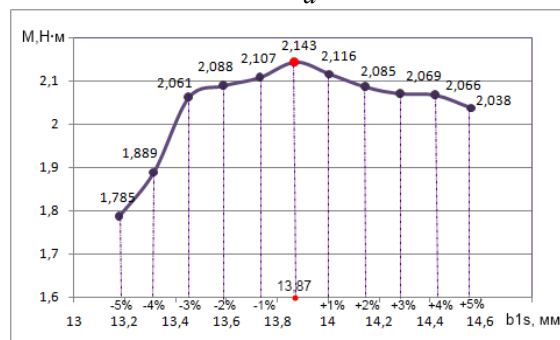
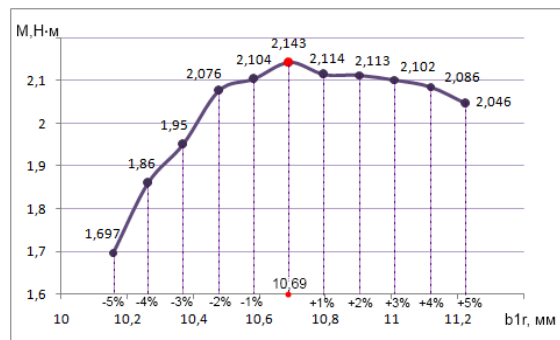


Рис. 4. Зависимость среднего значения электромагнитного момента от вариаций геометрических размеров магнитной системы ВИД 6/6: а – b1r; б – b1s; в – b2s (начало)

Таблица 4

Значения среднего электромагнитного момента при изменении геометрических размеров фрагментов магнитной системы

	-5 %	-4 %	-3 %	-2 %	-1 %	Исх. знач.	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
<b>b1r</b>	10.156	10.263	10.37	10.477	10.584	<b>10.69</b>	10.79	10.903	11.01	11.117	11.224
<b>M</b>	1.697	1.86	1.95	2.076	2.104	<b>2.143</b>	2.114	2.113	2.102	2.086	2.046
<b>b1s</b>	13.177	13.316	13.454	13.59	13.73	<b>13.87</b>	14.00	14.147	14.28	14.424	14.563
<b>M</b>	1.785	1.889	2.061	2.088	2.107	<b>2.143</b>	2.116	2.085	2.069	2.066	2.038
<b>b2s</b>	6.289	6.356	6.422	6.488	6.554	<b>6.62</b>	6.686	6.752	6.818	6.884	6.95
<b>M</b>	1.789	1.94	2.054	2.086	2.105	<b>2.143</b>	2.119	2.089	2.075	2.065	2.04
<b>R2r</b>	15.656	15.821	15.986	16.151	16.316	<b>16.48</b>	16.64	16.81	16.97	17.139	17.304
<b>M</b>	2.141	2.1415	2.142	2.1425	2.1428	<b>2.143</b>	2.142	2.1425	2.142	2.141	2.139
<b>b2r</b>	13.557	13.7	13.842	13.985	14.128	<b>14.27</b>	14.41	14.55	14.69	14.84	14.98
<b>M</b>	2.139	2.14	2.1405	2.141	2.142	<b>2.143</b>	2.142	2.1423	2.142	2.141	2.14

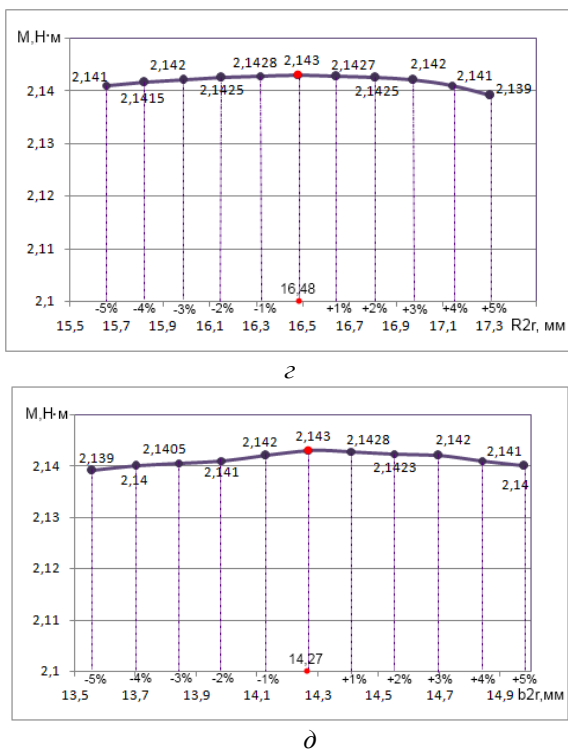


Рис. 4. Зависимость среднего значения электромагнитного момента от вариаций геометрических размеров магнитной системы ВИД 6/6:  $\varepsilon$  –  $R2r$ ;  $\delta$  –  $b2r$  (окончание)

На рис. 4, а изображена зависимость среднего электромагнитного момента от значений фрагмента магнитной системы  $b1r$  в интервалах  $\pm 1$ –5%. На графике видно, что оптимальной точкой является точка с координатами (10,69; 2,143), и любое отклонение от величины  $b1r = 10,69$  мм влево или вправо влечет за собой уменьшение момента. Наибольшая крутизна кривой наблюдается при значениях от  $-1\%$  до  $-5\%$   $b1r$ . Это означает, что уменьшение ширины зубца ротора ( $b1r$ ) может привести к сокращению численного значения момента приблизительно на 20%, а увеличение значения  $b1r$  – на 4,5%.

На рис. 4, б, в представлены зависимости момента от ширины зубца и угла наклона боковой поверхности зубца статора ( $b1s$  и  $b2s$ ). Формы данных кривых практически аналогичны рис. 4, а. Это свидетельствует о том, что уменьшение величин  $b1s$  и  $b2s$  приведет к наибольшему сокращению значения момента (на 17% –  $b1s$  и на 16% –  $b2s$ ), нежели увеличение значения этого параметра (на 5% –  $b1s$  и на 4,7% –  $b2s$ ). Изменение размеров данных параметров меньше оказывает влияние на значение среднего момента, что видно из результатов, полученных при  $\pm 5\%$  от размеров рассматриваемых фрагментов.

На рис. 4, г, д представлены кривые зависимостей среднего момента от  $R2r$  и  $b2r$ , имеющие практически пологую форму. Это говорит о том, что варьирование значениями данных параметров магнитной системы оказывает незначительное влияние на формирование среднего значения момента ( $\pm 0,2\%$ ).

#### IV. ВЫВОДЫ

Результатом применения оптимизационного алгоритма стал прирост среднего электромагнитного момента на 30,36% при сохранении внешнего диаметра и длины магнитопровода, что свидетельствует об эффективности применения оптимизационных алгоритмов с целью повышения эксплуатационных показателей.

Проведенное исследование о восприимчивости электромагнитного момента к изменению геометрических параметров магнитной системы рассматриваемого объекта показали, что наибольшее влияние на величину момента оказывает изменение элемента  $b1r$  (ширины зубца ротора). Менее чувствительно значение момента к изменению параметров  $b1s$  и  $b2s$  и совсем незначительное влияние оказывает варьирование элементами  $R2r$  и  $b2r$ . Эти результаты могут быть использованы разработчиками в условиях, когда магнитная система является встраиваемой и изменение какого-либо геометрического параметра активной части влечет за собой повышение или снижение эксплуатационных показателей ВИД. Кроме этого, выявленная связь между изменением геометрических размеров и величиной среднего электромагнитного момента может быть использована при разработке технологии изготовления ВИМ и назначении допусков в конструкторской документации на элементы конструкции.

#### V. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Патент 2040096 Российская федерация. МПК H02K19/06. Однофазный электродвигатель индукторного типа / Пахомин С.А., Коломейцев Л.Ф., Звездунов Д.А., Коломейцев В.Л., Сулейманов У.М. – № 92011863/07 ; заявл. 14.12.1992 ; опубл. 20.07.1995.
- [2] «Оптимизация ВИМ» / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова. – № 2016618039 ; Заявка № 2016615739 ; дата поступления 30.05.2016; дата регистрации 20.07.2016.
- [3] Петрушин, А.Д. Оптимизационные расчеты и экспериментальные исследования вентильно-индукторной машины [Электронный ресурс] / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Интернет-журнал «Наукоедение». – 2017. – Т. 9. – №2. – Режим доступа : <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN217.pdf>
- [4] 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.
- [5] Петрушин, А.Д. Оптимизация магнитной системы вентильно-индукторного двигателя / А.Д. Петрушин, В.Г. Щербаков, А.В. Кашуба // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 20–27.
- [6] Кашуба, А.В. Оптимизация магнитной системы вентильно-индукторного электродвигателя при работе в одноимпульсном режиме / А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова // Труды РГУПС. – 2017. – № 2 (39). – С. 26–31.