

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.318.43
DOI 10.17816/transsyst20206130-47

© А. В. Кашуба

Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обоснование: Вентильно-индукторная электрическая машина (ВИМ) является перспективным типом электромеханического преобразователя энергии. Она используется как в двигательном (ВИД), так и в генераторном (ВИГ) режимах. ВИД могут применяться не только в механизмах с вращательным движением, но и в качестве линейных двигателей, в том числе в магнитолевитационных транспортных системах.

Вопросам проектирования ВИД посвящено достаточно много публикаций. В развитие этого направления предлагается дальнейшее совершенствование процесса проектирования ВИД с использованием оптимизационного метода формирования геометрических размеров зубцовой зоны.

Цель: Снижение пульсаций электромагнитного момента ВИД посредством оптимизации геометрических размеров зубцовой зоны.

Материалы и методы: Для моделирования магнитных полей использовалась программа FEMM 4.2. Реализация оптимизационного алгоритма, а также обработка результатов полевых расчетов осуществлялись в программе MATLAB. За основу для разработки оптимизационного алгоритма был взят метод оптимизации Монте-Карло (метод случайного поиска), а его усовершенствование было достигнуто с помощью математических методов, основанных на теории вероятности.

Результаты: В результате проведения оптимизационных расчетов была получена геометрия зубцовой зоны, обеспечивающая снижение пульсаций электромагнитного момента ВИД со 122 % до 40 %.

Заключение: Приведенные в статье исследования позволяют сделать вывод об эффективности применения при проектировании ВИД оптимизационного алгоритма, а также о целесообразности снятия ограничений на форму зубца ВИД и переходе на криволинейную форму, определяемую в процессе решения задачи оптимизации по заданному критерию.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, пусковой режим, пульсации момента, оптимизация, магнитная система, неравномерный воздушный зазор, криволинейная форма зубца.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© **A.V. Kashuba**

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

OPTIMIZATION METHOD FOR CALCULATING THE GEOMETRICAL DIMENSIONS OF THE TOOTH ZONE OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Background: Switched reluctance motor (SRM) is a promising type of electromechanical energy converter. It is used in both motor and generator modes. SRM can be used not only in mechanisms with rotational motion, but also as linear motors, including maglev transport systems.

A lot of publications are devoted to SRM design issues. In development of this direction, further improvement of the SRM design process is proposed using the optimization method of forming the geometrical dimensions of the tooth zone.

Aim: Reducing of electromagnetic torque ripple SRM by optimizing the geometrical dimensions of the tooth zone.

Materials and Methods: To simulate magnetic fields, the FEMM 4.2 program was used. The implementation of the optimization algorithm and the processing of the results of field calculations, was carried out in the MATLAB program. The Monte Carlo optimization methods (they rely on random sampling) was taken as the basis for developing the optimization algorithm, and its improvement was achieved using mathematical methods based on probability theory.

Results: As a result of the optimization calculations, the tooth zone geometry was obtained, which provides a reduction in the pulsation of the SRM electromagnetic torque ripple from 122 % to 40 %.

Conclusion: The studies presented in the paper indicate the effectiveness of using the optimization algorithm in designing SRM, as well as the feasibility of removing restrictions on the shape of the tooth SRM and the use of a curved tooth shape, which is determined in the process of solving the optimization problem by a determined criterion.

Keywords: switched reluctance motor, starting mode, torque ripple, optimization, magnetic system, irregular air gap, curved tooth shape.

ВВЕДЕНИЕ

Вентильно-индукторная электрическая машина (ВИМ) является одним из перспективных типов электромеханических преобразователей энергии. Она используется как в двигательном (ВИД), так и в генераторном режимах (ВИГ).

ВИД имеет возможность работать только в составе электропривода, который представляет собой сочетание следующих основных элементов

(Рис. 1): ВИД, нагрузка (исполнительный орган), система управления электроприводом и силовой преобразователь частоты питающих импульсов. Чаще всего ВИД используется в безредукторных приводах, но в отдельных случаях целесообразно использовать редуктор.

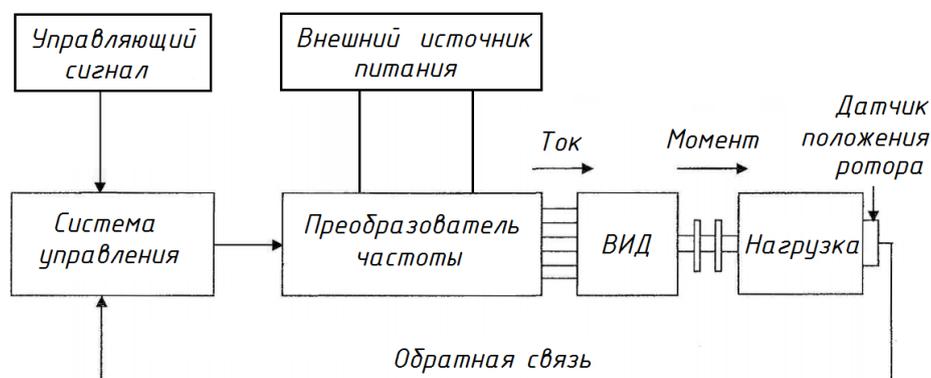


Рис. 1. Структурная схема ВИД [1, 2]

ВИД в составе электропривода выполняет главную функцию – преобразование электрической энергии в механическую. ВИД состоит из статора и пассивного ротора. Шихтованный магнитопровод статора имеет полюса, охваченные фазными катушками сосредоточенного типа. Ротор не содержит обмотки и постоянных магнитов, а только пакет пластин электротехнической стали в аксиальном направлении с выступающими зубцами в радиальном направлении, которые служат для замыкания магнитного потока.

ВИД могут иметь различные варианты исполнения [1]: как однофазные, так и многофазные. Наиболее популярные варианты трехфазного исполнения ВИД представлены на Рис. 2.

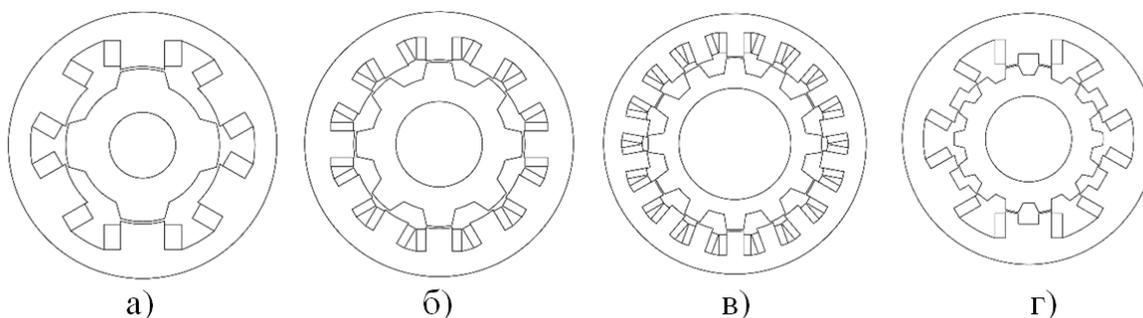


Рис. 2. Схематические изображения магнитной системы различных вариантов трехфазного исполнения ВИД:

- а) конфигурация 6/4;
- б) конфигурация 12/8;
- в) конфигурация 18/12;
- г) конфигурация 12/14

При условном обозначении конфигурации зубцовой зоны числитель дроби указывает на число полюсов статора, знаменатель – на число зубцов ротора.

Принцип действия ВИД основан на свойстве ферромагнитных тел ориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы пронизывающий их магнитный поток принимал максимальное значение [1]. При подаче питания на фазные обмотки в нужный момент времени и при своевременном снятии питания становится возможным обеспечить непрерывное однонаправленное вращение ротора. Подача и снятие питания осуществляются по сигналу, поступающему от датчика положения ротора.

В двигательном режиме работы питание фазы должно осуществляться при координатах ротора, соответствующих сближению зубцов, (возрастание индуктивности фазы, $dL/d\theta > 0$, Рис. 3), в генераторном режиме – наоборот, при отдалении зубцов друг от друга, что соответствует убыванию индуктивности фазы ($dL/d\theta < 0$, Рис. 3).

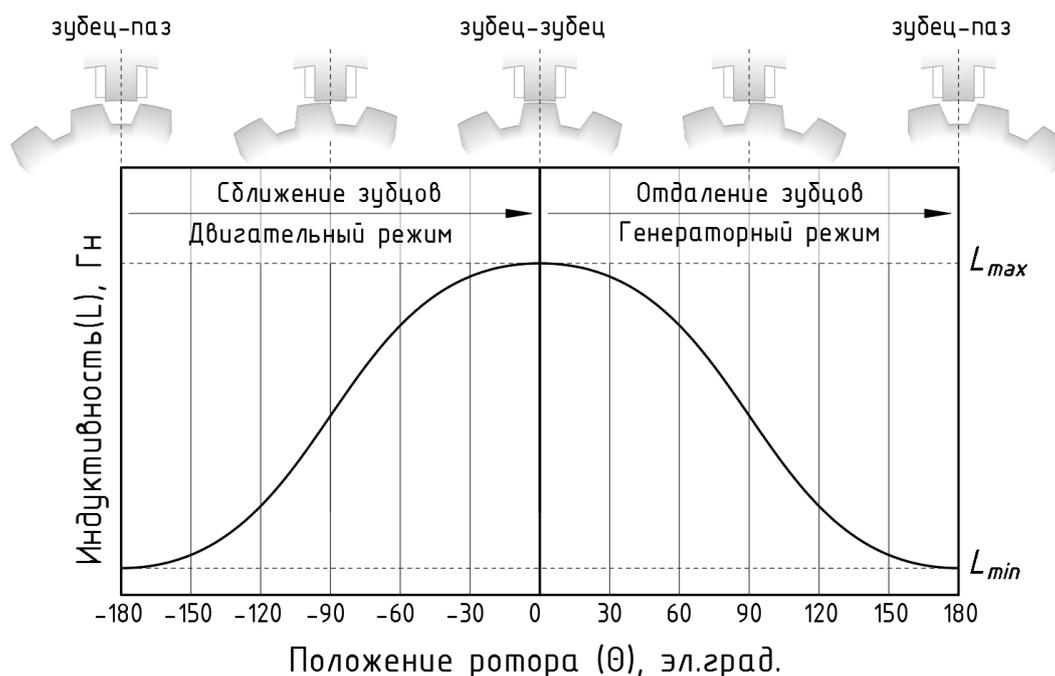


Рис. 3. Характерная для ВИМ зависимость индуктивности одной фазы от положения ротора

ВИД, как и двигатели других типов, могут применяться не только в механизмах с вращательным движением, но и в качестве линейных двигателей для различных транспортных систем, в том числе магнитолевитационных [3]. В магнитолевитационном транспорте наибольшее распространение получили линейные синхронные (ЛСД) и асинхронные (ЛАД) двигатели [4–7]. Линейные ВИД также имеют

перспективы применения в этом виде транспорта. Взаимное притяжение зубцов подвижной и неподвижной части линейных ВИД позволяет реализовывать как тяговое усилие, так и обезвешивание экипажной части, решать вопросы его вертикальной стабилизации.

Вентильно-индукторные двигатели обладают рядом достоинств по сравнению с электрическими машинами других типов [1, 2, 8]:

- простота конструкции;
- высокая надежность;
- технологичность изготовления активной части;
- отсутствие скользящего контакта и коллекторного узла;
- возможность регулирования частоты вращения в широком диапазоне.

Однако для дальнейшего совершенствования характеристик ВИД необходимо решить ряд задач, в числе которых снижение пульсаций электромагнитного момента. Существует немало электроприводов, к двигателям которых предъявляются требования пониженных пульсаций момента:

- тяговый привод транспортных средств [8–13] (пульсации момента в пусковом режиме могут вызвать нестабильность трогания с места транспортного средства и боксование);
- приводы, исполнительный орган которых непосредственно или косвенно взаимодействует с человеком: например, электроусилитель руля автомобиля [9, 14–16] (нестабильность крутящего момента порождает неприятные для человека вибрации).

При снижении пульсаций момента ВИД существенно расширяется их область применения в перечисленных выше электроприводах.

Основные способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента ВИД можно разделить на основные группы:

- введение специальных алгоритмов в систему управления ВИД [12, 17, 18];
- увеличение числа фаз машины [19];
- выполнение магнитопроводов ВИД специальной формы (возможны варианты как со скосом зубцов [4, 9–12], так и без скоса [13, 20]).

Данная работа посвящена последнему способу из перечисленных выше: выполнение магнитопроводов ВИД специальной формы (без скоса), определяемой в процессе решения задачи оптимизации по заданному критерию.

Изготовление магнитопроводов по рассчитанным оптимальным геометрическим размерам не усложняет конструкцию машины и технологию её изготовления.

В статье рассмотрены вопросы формирования геометрии зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя с применением оптимизации по критерию: минимум пульсаций электромагнитного момента.

В предложенном алгоритме учтены также возможности оптимизации активной части ВИД по двум и более критериям. Выражение целевой функции может содержать различные переменные, отражающие приоритет той или иной эксплуатационной характеристики машины в зависимости от требований технического задания, например, средний уровень электромагнитного момента, КПД, нагрев, материалоемкость, стоимость изготовления, и др. Однако в таком случае многокритериальная оптимизация может потребовать проводить компьютерное моделирование в разных программных средах, что, безусловно, скажется на продолжительности проведения расчетов.

В данной статье рассмотрена оптимизация по одному критерию. Ценность изложенных исследований заключается в том, что полученные результаты оптимизации позволяют обозначить предельные возможности по снижению пульсаций момента ВИД за счет изменения геометрии магнитопровода и сформулировать общие рекомендации для выбора геометрических размеров зубцовой зоны при проектировании ВИД.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

В основу разработанного алгоритма оптимизации положен существующий метод оптимизации Монте-Карло (метод случайного поиска). Основным отличием разработанного алгоритма является плавный переход в процессе оптимизационных расчетов от случайной величины с равномерной плотностью вероятности к случайной величине с нормальным распределением плотности вероятности.

Суть разработанного алгоритма заключается в следующем (Рис. 4). На начальном этапе оптимизации всем оптимизируемым параметрам присваиваются случайные значения («вбросы») с равномерной плотностью вероятности. После нескольких «вбросов» координаты «лучшей точки» служат математическим ожиданием μ для случайной величины уже с нормальным распределением (1). После каждого вычисления целевой функции дисперсия случайной величины уменьшается, математическое ожидание – корректируется. Таким образом, обеспечивается самоадаптация поиска экстремума. По истечении всех отведенных вычислений целевой функции за результат оптимизации принимаются координаты «лучшей точки» из всех имеющихся.

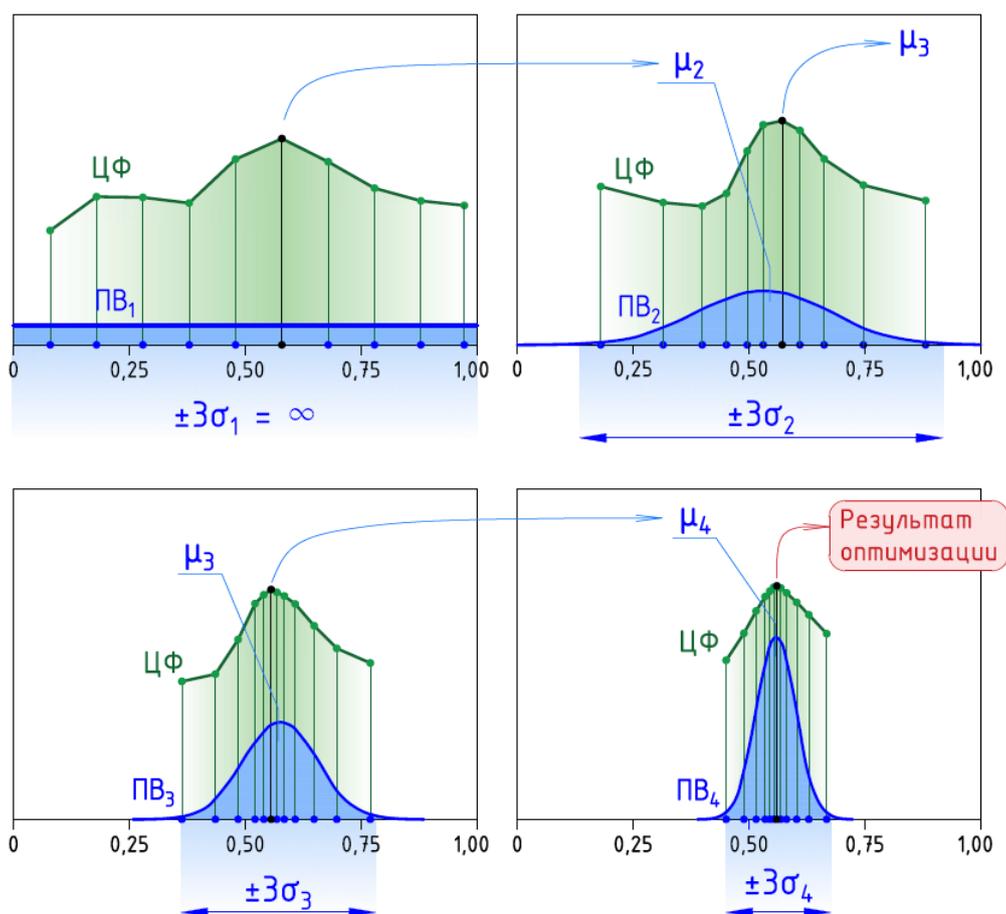
$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ – математическое ожидание;
 σ – среднеквадратическое отклонение;
 σ^2 – дисперсия случайной величины.

Разработанный на основе метода Монте-Карло алгоритм позволяет находить глобальный экстремум целевой функции с точностью, достаточной для ряда практических задач, связанных с проектированием ВИД, за сравнительно небольшое время.

ЦФ – целевая функция
 ПВ – плотность вероятности случайной величины
 μ – математическое ожидание случайной величины

$\pm 3\sigma$ – область наиболее вероятного (99,7 %) значения случайной величины, имеющей нормальное распределение



Ось абсцисс: значения оптимизируемого параметра
 (относительные единицы: 0–min; 1–max)

Рис. 4. Иллюстрация принципа разработанного алгоритма оптимизации

В рамках данного исследования целевая функция в задаче оптимизации выражается следующим образом:

$$Ц(\Delta M) = \Delta M = \frac{\max(M_{\text{э}}) - \min(M_{\text{э}})}{\frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{э}} dt} \cdot 100\% \rightarrow \min,$$

где $Ц$ – целевая функция;

ΔM – величина пульсаций электромагнитного момента, %;

$M_{\text{э}}$ – мгновенное значение электромагнитного момента, Нм;

T – интервал повторяемости электромагнитного момента, эл.град;
для трехфазных ВИД при парной коммутации $T = 120$ эл.град.

Пульсации особенно нежелательны при пуске двигателя и при вращении на низких частотах. Поэтому для оптимизации геометрических размеров была выбрана форма тока, характерная для пускового режима ВИД (прямоугольная форма тока): питание подается на фазу в рассогласованном положении, а снятие питание происходит в согласованном положении для каждой фазы.

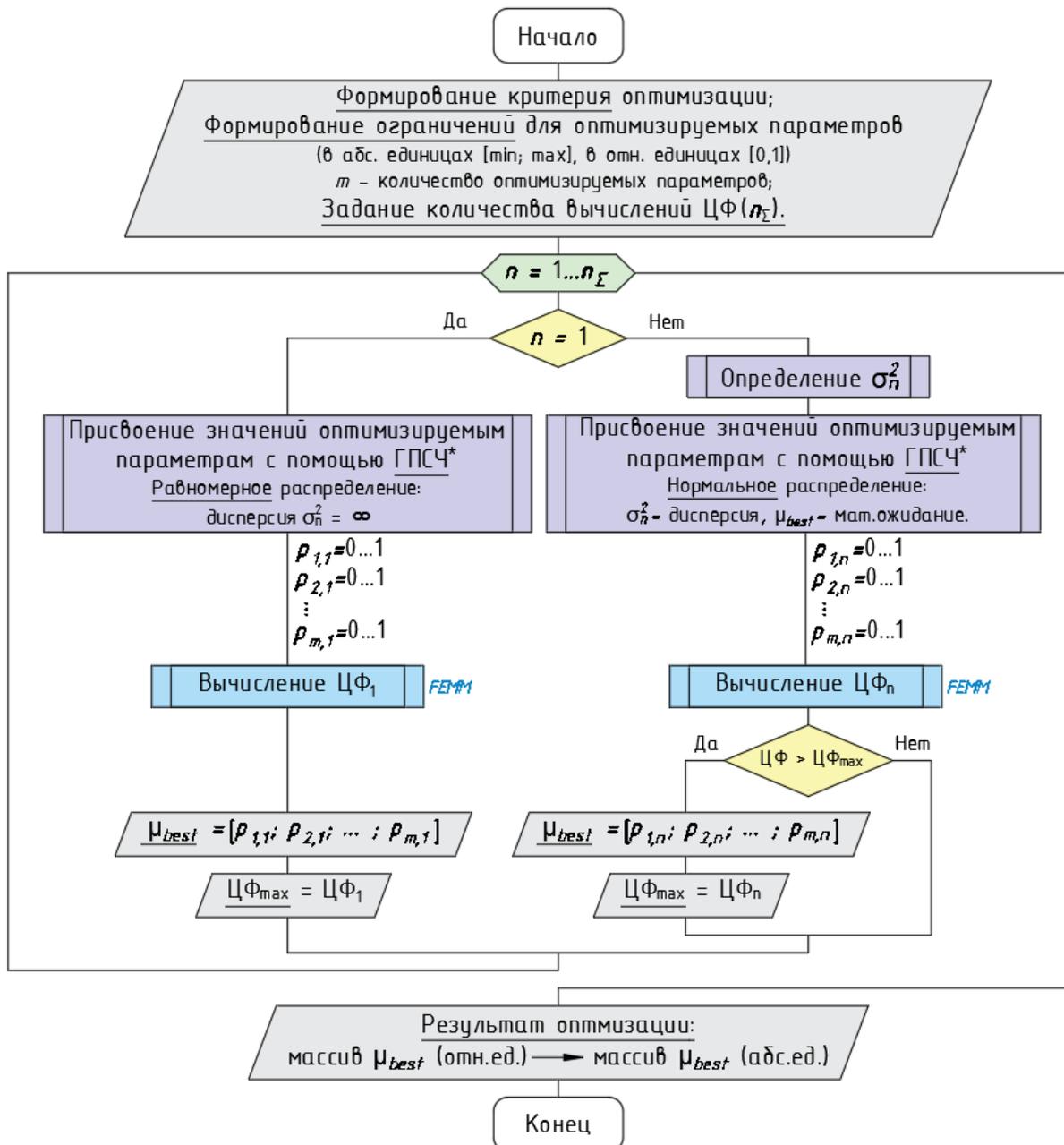
Предлагаемый алгоритм оптимизации активной части может быть использован не только применительно к ВИД вращательного движения, но и к вариантам линейного исполнения.

В случае оптимизации геометрических размеров тягового линейного магнитолевитационного транспорта целесообразно формировать комплексный критерий оптимизации, учитывающий требования: плавности хода, высокого значения КПД, минимального веса.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

Численная реализация разработанного алгоритма выполнена на языке программирования MATLAB. Блок-схема алгоритма оптимизации изображена на Рис. 5.

В рамках данного исследования в качестве исходного варианта для оптимизации был взят трехфазный ВИД конфигурации 6/4, выполненный в корпусе асинхронного двигателя АИР-80, и спроектированный с применением энергетического подхода [1, 2, 8].



*ГПСЧ - генератор псевдослучайных чисел

Рис. 5. Блок-схема разработанного алгоритма оптимизации

В статье рассмотрено два примера оптимизации геометрических размеров ВИД 6/4:

1. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с традиционной формой зубцов ротора: подразумевает наличие прямолинейных и дугообразных участков контура магнитопровода (Рис. 6);

В первом примере в качестве оптимизируемых параметров приняты:

- ширина зубца ротора (по вершинам) $b1r$;
- наклон боковой поверхности зубца $b2r$;
- радиус, образующий глубину паза $R2r$.

2. Оптимизация геометрических размеров ротора ВИД с криволинейной формой зубцов ротора: контур магнитопровода представляет собой произвольную изогнутую кривую (Рис. 7).

Во втором примере в качестве оптимизируемых параметров выступают уже соотношения, указывающие какую часть общей длины определяющего отрезка занимает магнитопровод ($p_1 - p_1$). Предлагаемое расположение определяющих отрезков обеспечивает гладкость контура магнитопровода в вершине зубца (p_1 , красный цвет) и в центре паза (p_{21} , синий цвет).

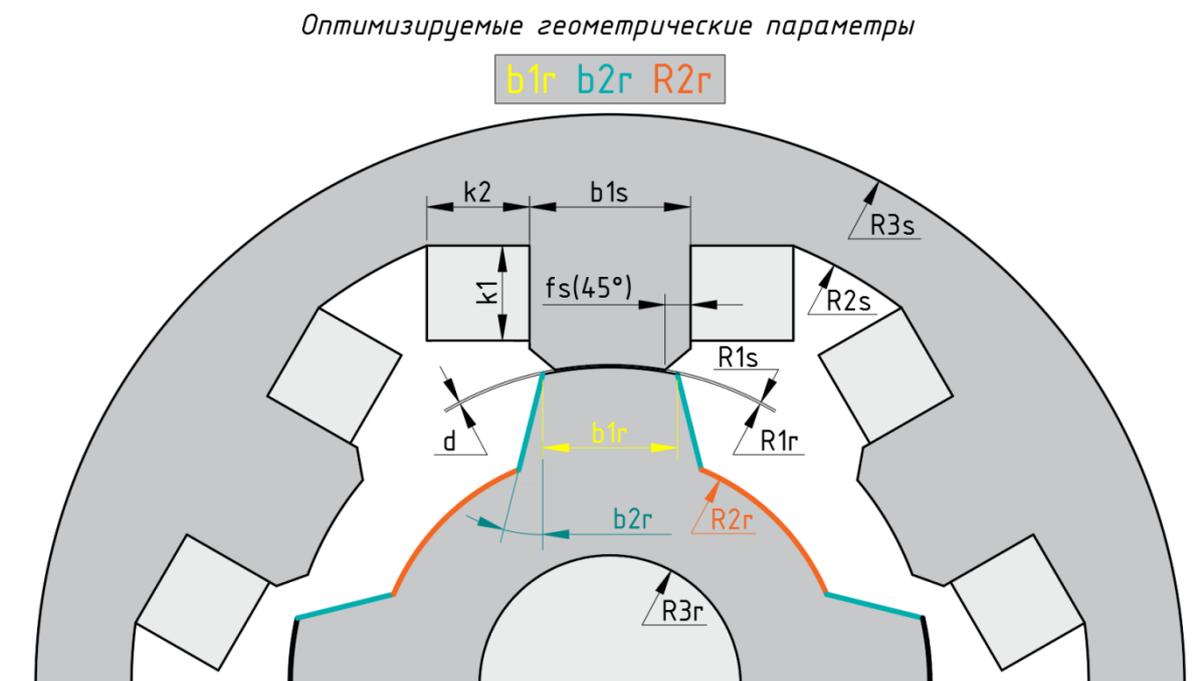


Рис. 6. Геометрия магнитной системы и оптимизируемые геометрические размеры (пример № 1)

Остальные геометрические размеры (указаны без выделения цветом в обоих случаях) в оптимизации не участвуют. В Табл. приведены числовые значения указанных на Рис. 6 и Рис. 7 размеров.

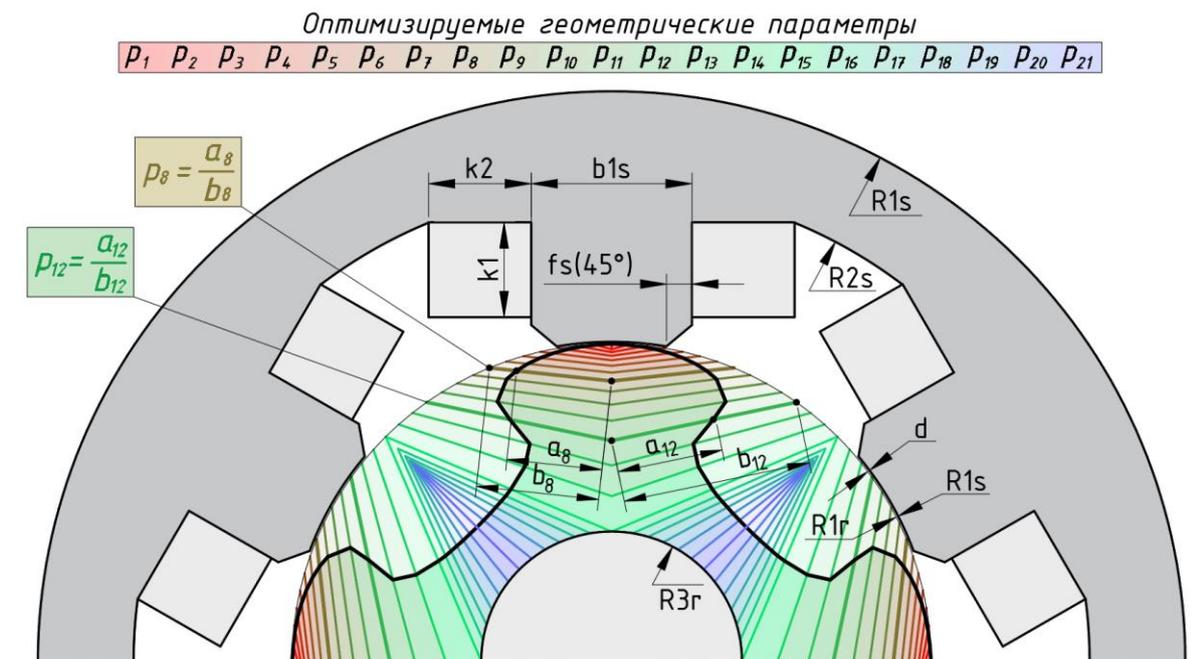


Рис. 7. Геометрия магнитной системы и оптимизируемые геометрические размеры (пример № 2)

Таблица. Геометрические размеры магнитной системы исходного двигателя и ограничения для оптимизации

Геометрический размер	Единицы измерения	Исходный вариант	Ограничения для оптимизации	
			Пример №1	Пример №2
$b1r$	мм	15,5	10 ... 35	–
$b2r$	град.	15	–10 ... 20	–
$R2r$	мм	29	17 ... 32	–
p_1 ⋮ p_{21}	о.е.	–	–	0 ... 1
d	мм	0,25	<i>const</i>	$d_{min} = d$
$b1s$	мм	18,5	<i>const</i>	<i>const</i>
f_s	мм	2,9	<i>const</i>	<i>const</i>
$k1$	мм	11	<i>const</i>	<i>const</i>
$k2$	мм	11,8	<i>const</i>	<i>const</i>
$R1s$	мм	37	<i>const</i>	<i>const</i>
$R2s$	мм	55	<i>const</i>	<i>const</i>
$R3s$	мм	66	<i>const</i>	<i>const</i>
$R1r$	мм	36,75	<i>const</i>	<i>const</i>
$R3r$	мм	15	<i>const</i>	<i>const</i>
Длина пакета магнитопровода	мм	110	<i>const</i>	<i>const</i>

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В ходе проведения оптимизации геометрических размеров в обоих примерах вызов целевой функции осуществлялся 600 раз. Один вызов целевой функции представляет собой 14 расчетов магнитного поля в программе FEMM [21] для разных положений ротора. На Рис. 8 показан результат оптимизации для двух примеров в виде геометрии магнитной системы.

Как видно из Рис. 8 для двух примеров оптимизации имеются общие геометрические особенности:

- более широкий зубец ротора по сравнению с исходным вариантом;
- более глубокий паз ротора по сравнению с исходным вариантом;
- верхняя часть зубца ротора шире нижней части.

Учитывая, что для двух примеров оптимизации используются принципиально разные способы построения геометрии, указанные выше геометрические особенности могут служить рекомендациями для снижения пульсаций момента ВИД 6/4 в пусковом режиме.

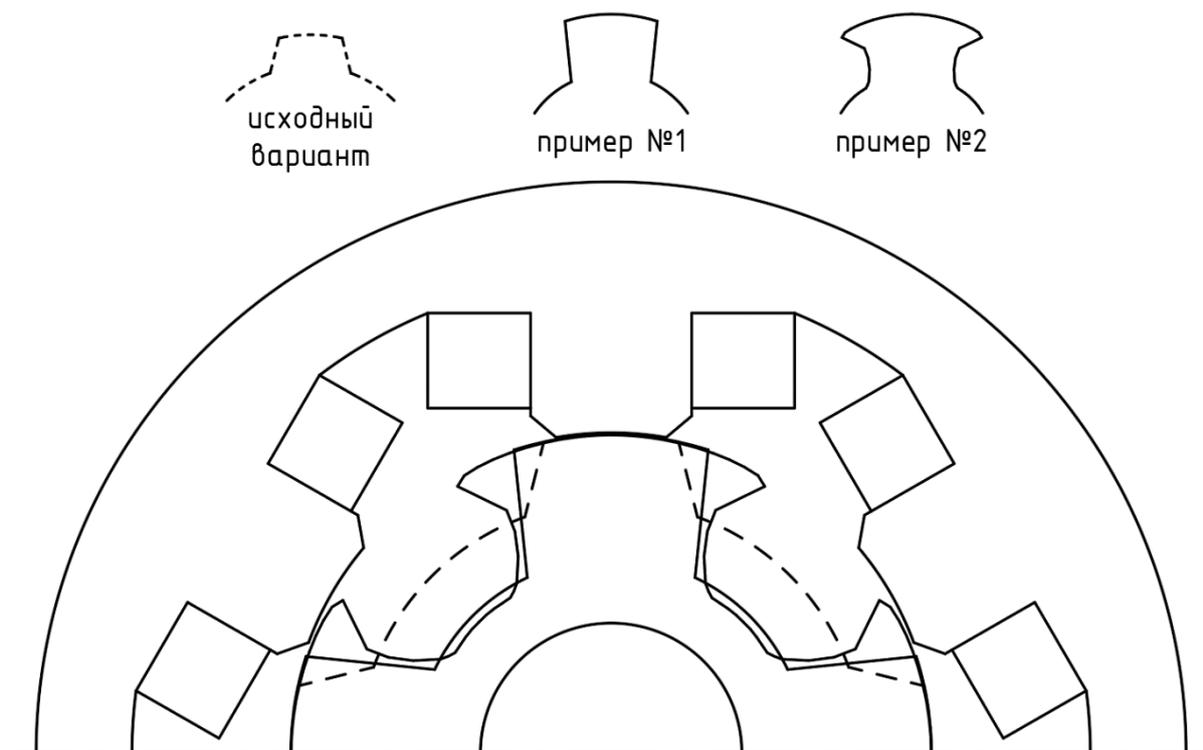


Рис. 8. Геометрические размеры магнитной системы исходного двигателя и сравнение с результатами оптимизации

На Рис. 9 и 10 показана картина распределения магнитного поля для двух результатов оптимизации.

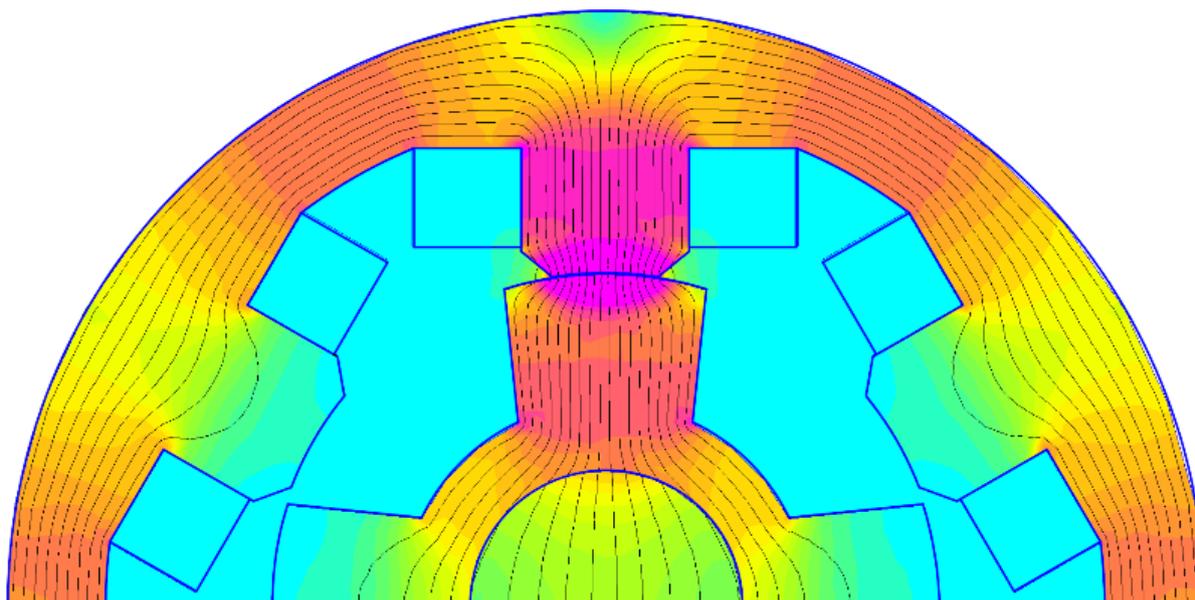


Рис. 9. Магнитное поле для геометрии, полученной в результате оптимизации (пример № 1), скриншот работы программы FEMM [21]

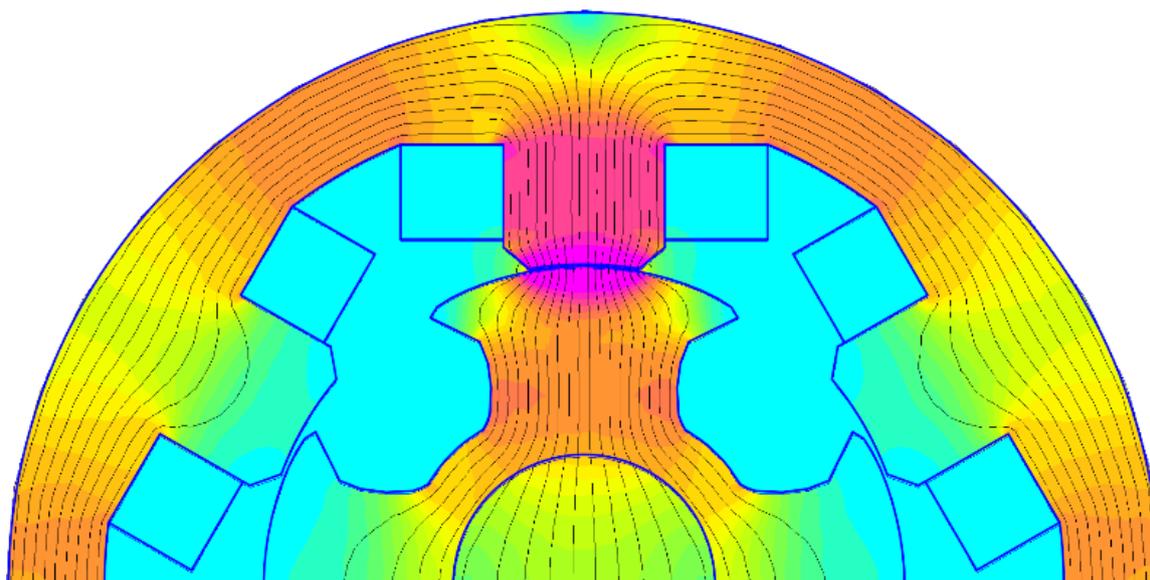


Рис. 10. Магнитное поле для геометрии, полученной в результате оптимизации (пример № 2), скриншот работы программы FEMM [21]

Отдельный интерес в полученной геометрии активной части ВИД (пример № 2) представляет воздушный зазор. Он имеет неравномерный характер и изменяется с минимального значения 0,25 мм до 1,5 мм (Рис. 11).

На Рис. 12 дано сравнение кривых момента для оптимальной геометрии (примеры № 1 и № 2) и исходного варианта.

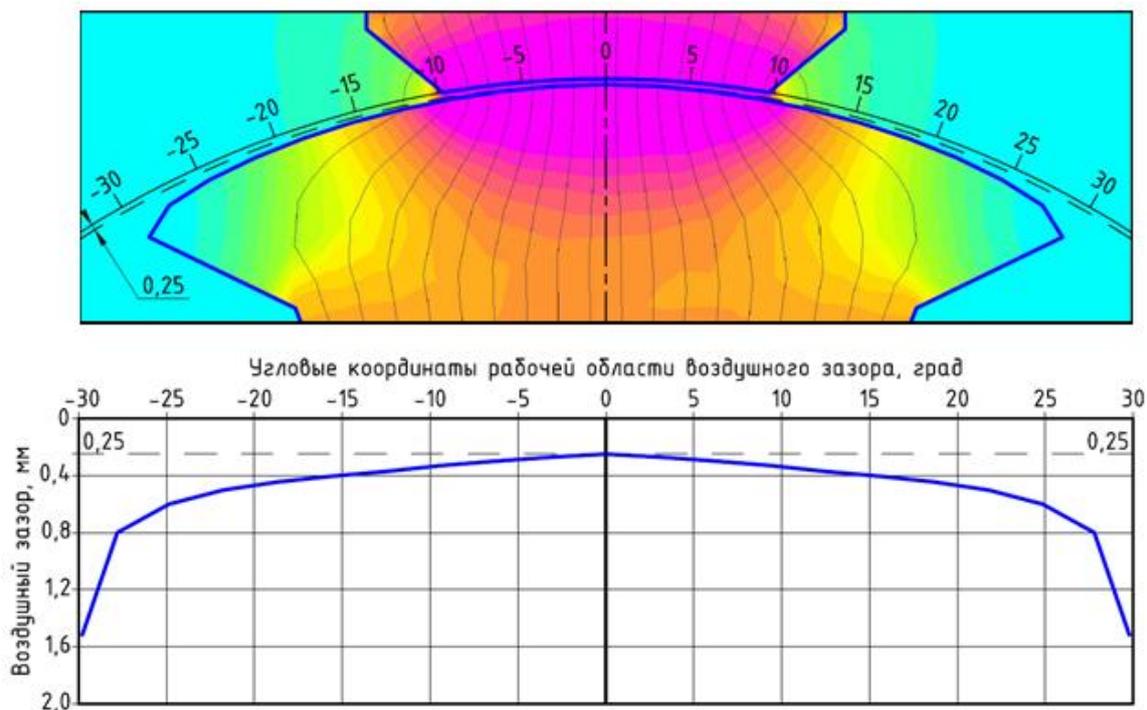


Рис. 11. Неравномерность воздушного зазора (пример № 2)

Справа показаны минимальные, максимальные и средние значения кривой момента за интервал повторяемости (120 эл. град.), а также приведены значения пульсаций для трех вариантов геометрии. Нулевое положение ротора соответствует согласованному положению фазы «А».

В интервале $(-60; 0)$ эл. град. питание подается на фазы «А» и «В». В интервале $(0; 60)$ эл. град. питание подается на фазу «В». Эти законы управления характерны для пускового режима при симметричной парной коммутации ВИД.

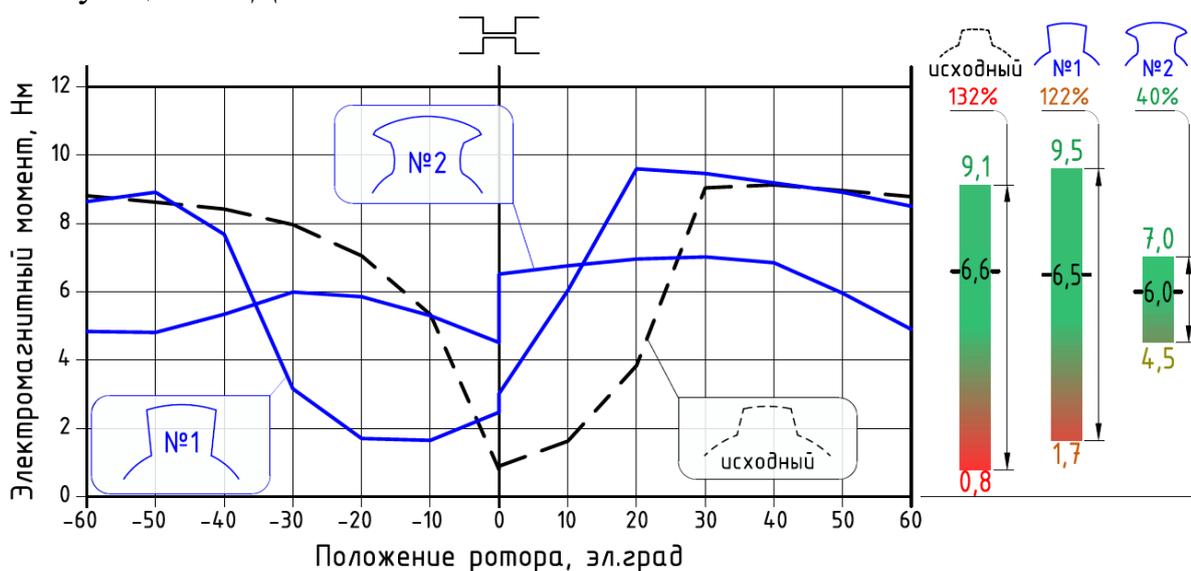


Рис. 12. Сравнение кривых момента, соответствующих пусковому режиму оптимальной геометрии (примеры № 1 и № 2) и исходного варианта

Как видно из Рис. 12, оптимизация *криволинейной* формы зубца ротора ВИД позволяет существенно снизить пульсации момента в пусковом режиме, как по сравнению с исходным вариантом (со 132 % до 40 %), так и по сравнению с оптимизацией *традиционной* формы зубца, задающейся с помощью дуг и отрезков (со 122 % до 40 %). Это объясняется тем, что контур криволинейного зубца расширяет возможности оптимизации. Зубец может принимать практически любую форму, т.к. отсутствуют ограничения, обусловленные его прямолинейностью и дугообразностью. Использование криволинейной формы зубца предопределило формирование неравномерного воздушного зазора в ВИД. Это открывает дополнительные возможности для снижения пульсаций момента ВИД 6/4 в пусковом режиме по сравнению с оптимизацией традиционной формы зубца.

Для обоих случаев (пример 1 и 2) наблюдается некоторое снижение среднего значения электромагнитного момента. Но подобный отрицательный эффект не является характерным [13], и может быть устранен при многокритериальной оптимизации.

Для ВИД с исходной геометрии характерен существенный провал мгновенного значения момента до 0,8 Нм при среднем значении 6,6 Нм. Это обстоятельство ограничивает область применения данного двигателя в приводах, где по условиям эксплуатации возможен высокий момент сопротивления при пуске. Геометрические размеры активной части, полученные в результате оптимизации криволинейной формы зубца, открывают возможности применения ВИД таких приводах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье исследования доказывают эффективность применения оптимизационного алгоритма при проектировании ВИД и подтверждают целесообразность использования криволинейной формы зубцов ВИД.

Использование криволинейной формы зубцов позволило снизить пульсации пускового момента ВИД 6/4 более чем в три раза (со 132 % до 40 %).

Предложенный способ формирования геометрии активной части ВИД может быть использован не только для изменения формы зубцов ротора, но и статора, учитывая ограничения, вносимые расположением обмотки. Это открывает дальнейшие перспективы по снижению пульсаций электромагнитного момента ВИД.

Предлагаемый алгоритм оптимизации может быть применен не только к ВИД вращательного движения, но и к двигателям линейного

исполнения, в том числе для линейных тяговых ВИД магнитолевитационного транспорта.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2003. [Kuznetsov VA, Kuzmichev VA. Ventil'no-induktornyye dvigateli: schoolbook. Moscow: MEI; 2003. (In Russ.)].
2. Miller T. Switched Reluctance Motors And Their Control. Oxford: Magna Physics; 1993.
3. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Высокоскоростная контейнерная транспортная система // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 5-18. [Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. High-speed container transport system. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):5-18 (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst2018425-18
4. Гулин С.А., Никитин В.В., Середа Г.Е., Середа Е.Г. Системы электроснабжения собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом // Транспортные системы и технологии. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 70–83. [Gulin SA, Nikitin VV, Sereda GE, Sereda EG. Auxiliary power supply systems for high speed maglev vehicles with linear synchronous traction motors. *Transportation Systems and Technology*. 2017;2(3):70-83. (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20162370-83
5. Поляков В.А., Хачапуридзе Н.М. Интегративная модель тяговой силы магнитолевитирующего поезда // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 58–68. [Polyakov VA, Nachapuridze NM. Integrative model of a magnetically levitated train's traction force. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(1): 58-68. (In Russ, Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20173158-68
6. Соломин В.А., Соломин А.В., Чехова А.А., и др. Линейные асинхронные двигатели без продольного краевого эффекта // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 60–69. [Solomin VA, Solomin AV, Chekhova AA, et al. Linear Induction Motors without Longitudinal Edge Effect. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):60-69. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst20195260-69
7. Соломин В.А., Бичилова А.А., Замшина Л.Л., Трубицина Н.А. Регулируемый линейный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой для магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. - 2017. – Т. 3. – №4. – С. 127–149. [Solomin VA, Bichilova AA, Zamshina LL, Trybitsina NA. Adjustable squirrel-cage linear induction motor for magnetic levitation transport. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(4):127-149. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201734127-149
8. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design And Applicationsotor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications.; 2001. doi:10.1201/9781420041644

9. Пахомин С.А. Развитие теории и практики проектирования энергосберегающих вентильно-индукторных электроприводов: дис.... д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2001. – 386 с. [Pakhomin SA. Razvitiye teorii i praktiki proyektirovaniya energosberegayushchikh ventil'no-induktornykh elektroprivodov [dissertation]. Novocherkassk; 2001. 386 p. (In Russ)].
10. Щербаков В.Г., Петрушин А.Д., Хоменко Б.И. и др. Тяговые электрические машины: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. [Shherbakov VG, Petrushin AD, Homenko BI, et al. *Tyagovye jelektricheskie mashiny*. Moscow: “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte”; 2015. (In Russ.)].
11. Бочаров В.И., Захаров В.И., Коломейцев Л.Ф. и др. Тяговые электродвигатели электровозов / под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агенство «Наутилус», 1998. – 672 с. [Bocharov VI, Zaharov VI, Kolomejcev LF, et al. *Tyagovye jelektrodvigateli jelektrovozov*. Shherbakov VG, editor. Novocherkassk: Agenstvo “Nautilus”; 1998. 672 p. (In Russ.)].
12. Шайхиев А.Р. Улучшение тяговых свойств электроподвижного состава с вентильно-индукторным тяговым электроприводом с учётом ограничения по сцеплению: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2004. – 120 с. [Shaikhiyev AR. *Uluchsheniye tyagovykh svoystv elektropodvizhnogo sostava s ventil'no-induktornym tyagovym elektroprivodom s uchotom ogranicheniya po stsepleniyu* [dissertation]. Rostov-on-Don; 2004. 120 p. (In Russ)].
13. Петрушин А.Д., Щербаков В.Г., Кашуба А.В. Оптимизация магнитной системы вентильно-индукторного электродвигателя // Известия высших учебных заведений Электромеханика. – 2017. – № 1. – С. 20–27. [Petrushin AD, Shherbakov VG, Kashuba AV. Magnetic system optimization of switched reluctance motor. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2017;4:20-27. (Russ., Engl.). doi: 10.17213/0136-3360-2017-1-20-27
14. Пахомин С.А., Сулейманов У.М., Крайнов Д.В., Дувакин А.В. Вентильно-индукторный электропривод усилителя рулевого управления для автомобилей семейства «Калина» / Труды V Международной (16-й Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. 18-21 сентября 2007; СПб. 2007. – С. 477–479. [Pakhomin SA, Sulejmanov UM, Krajnov DV, Duvakin AV. Ventil'no-induktornyj jelektroprivod usilitel'ja rulevogo upravlenija dlja avtomobilej semejstva “Kalina”. Proceedings of the Fifth International (Sixteen All-Russian) conference on the electric drive. 2007 Sept 18-21; St. Petersburg. 2007. p. 477-479. (In Russ.)].
15. Сулейманов У.М., Крайнов Д.В. Вентильно-индукторный электропривод электро-мехнического усилителя рулевого управления // Известия высших учебных заведений: Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 56–59. [Sulejmanov UM, Krajnov DV. The Rectifier-Inductor Electric Drive of the Steering Electromechanical Amplifier. *Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics*. 2005;2:56-59 (In Russ., Engl.)].
16. Патент РФ на изобретение № 2158692/ 16.09.1999. Бюл. № 9. Коломейцев Л.Ф., Сулейманов У.М., Пахомин С.А., Арабов Н.Я., Бакулин Н.Ф., Адамов Ц.А. Электроусилитель руля автомобиля. [Pat. RUS № 2158692/ 16.09.99. Byul. № 9. Kolomeytsev LF, Suleymanov UM, Pakhomin SA, Arabov NYa, Bakulin NF, Adamov TsA. *Elektrousilitel' rulya avtomobilya*. (In Russ.)] Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/215/2158692.html>. Дата

обращения: 15.03.2020.

17. Sahoo N, Xu J, Panda S. Determination of current waveforms for torque ripple minimisation in switched reluctance motors using iterative learning: an investigation. *IEE Proceedings Electric Power Applications*. 1999;146(4):369. doi: 10.1049/ip-epa:19990384
18. Карнаухов Н.Ф., Филимонов М.Н., Статовой Д.А., Лыков А.С. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования. // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 2. – С. 51–58. [Karnauhov NF, Filimonov MN, Statovoj DA, Lykov AS. A review of torque ripple reducing methods based on mathematical simulation. *Vestnik of Don State Technical University*. 2016;(2):51-58. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.12737/19688
19. Гребенников Н.В. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами: дис.... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2012. – 148 с. [Gebennikov NV. *Dinamika i energoeffektivnost' perspektivnykh yedinit podvizhnogo sostava, osnashchayemykh ventil'no-induktornymi elektricheskimi mashinami* [dissertation]. Rostov-on-Don; 2012. 148 p. (In Russ.)].
20. Рымша В.В., Радимов И.Н., Чан Тхи Тху Хьонг. Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентильно-реактивного электродвигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 56–58. [Rymsha VV, Radimov IN, Chan TTH. Influence of stator tooth zone configuration on electromagnetic torque and radial electromagnetic forces in a switched reluctance motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2006;2:56-58. (In Russ., Engl.)].
21. Finite Element Method Magnetics: HomePage [Internet]. [cited 2020 March 15]. Available from: <http://www.femm.info/wiki/HomePage/>.

Сведения об авторах:

Кашуба Александр Викторович, аспирант;

344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2;

eLibrary SPIN:4086-1671; ORCID: 0000-0002-6529-1895;

E-mail: kashuba-av@mail.ru

Information about the authors:

Alexander Kashuba; postgraduate;

344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2;

eLibrary SPIN: 4086-1671; ORCID: 0000-0002-6529-1895;

E-mail: kashuba-av@mail.ru

Цитировать:

Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 30–47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47

To cite this article:

Kashuba AV. Optimization Method for calculating the Geometrical Dimensions of the tooth Zone of the Switched Reluctance Motor. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):30-47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47