

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

Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf>

Статья опубликована 16.08.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шевкунова А.В. Проектирование вентильно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.363 + 06

Шевкунова Анастасия Владимировна

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Россия, Ростов-на-Дону¹
Аспирант кафедры «Электрический подвижной состав»

E-mail: nastya3051990@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=823538

Проектирование вентильно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации

Аннотация. Машиностроительный комплекс является крупнейшим промышленным комплексом и основой научно-технического прогресса России. От развитости отрасли машиностроения зависит техническое состояние других отраслей промышленности. В современном мире уровень развития промышленности определяется интеллектуальной способностью оборудования. Для повышения эффективности производства и уровня развития машиностроительной отрасли необходимо внедрение автоматизированных электроприводов на основе перспективных вентильно-индукторных двигателей.

Была разработана программа автоматизированного проектирования, включающая алгоритм оптимизации активной части вентильно-индукторного двигателя, реализованная с помощью пакета прикладных программ MATLAB, которая осуществляет прямое взаимодействие с программой по расчету и визуализации электромагнитных процессов FEMM. Посредством этой программы была рассчитана геометрия активной части вентильно-индукторного двигателя по критерию максимум среднего значения электромагнитного момента за период коммутации. В качестве методов оптимизации были использованы: стохастический метод Монте-Карло и детерминированный – Нелдера-Мида. Оптимизация проводилась в несколько этапов, чтобы определить какие из геометрических параметров зубцовой зоны двигателя оказывают наибольшее влияние на значение электромагнитного момента, а также чтобы обеспечить гарантированное нахождение глобального экстремума целевой функции.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель; активная часть; зубцовая зона; геометрические параметры; коэнергия; средний электромагнитный момент; метод трапеций; оптимизация; метод Монте-Карло; метод Нелдера-Мида

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

В современном мире производимая электроэнергия в большей своей части потребляется электродвигателями и электроприводами различного типа. Без электродвигателей невозможна работа никакой отрасли промышленности: будь то добывающая или перерабатывающая, легкая или тяжелая. Современные электропривода позволяют практически полностью автоматизировать производство, а уровень промышленности в свою очередь определяется интеллектуальной способностью приводов.

Машиностроительный комплекс, который в нашей стране занимает первое место по развитию, обеспечивает наибольшую занятость населения и занимает одно из центральных мест в экономике России. Подотраслью машиностроения является станкостроение. В настоящее время станочное оборудование – это полностью автоматизированный и роботизированный комплекс, включающий нескольких электроприводов. Основные требования к электроприводам и системам управления работой станков определяются исходя из назначения привода и принадлежности станка к какой-либо группе. Приводы подразделяются на: приводы главного движения, приводы подачи и вспомогательные. Именно эта классификация и формирует главные требования к электроприводам: мощность, диапазон регулирования скорости, плавность регулирования скорости, стабильность, жесткость и линейность характеристик, высокое быстродействие при изменении нагрузки, а также требования к динамике.

Долгое время практически во всех сферах производства, в том числе и в станкостроении, доминировали коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ). Но с повышением требований к электроприводам этот тип двигателей утратил свою ценность, в связи со своими конструктивными и эксплуатационными недостатками (наличием щеточно-коллекторного узла и всеми вытекающими отсюда негативными последствиями). Затем на смену ДПТ пришли двигатели переменного тока – в основном асинхронные (АД), которые получили широкое применение во многих отраслях промышленности. Благодаря своим преимуществам они заняли достойное место и в машиностроении. Для обеспечения высокоэффективного производства АД работают в составе частотно-управляемого автоматизированного электропривода.

Альтернативой электроприводам с АД для ряда применений в машиностроении стали автоматизированные приводы на основе вентильно-индукторных двигателей (ВИД) [1, 2, 3]. По сравнению с АД ВИД не является самодостаточным двигателем, т.е. он не способен работать без системы управления и силового полупроводникового преобразователя. Однако, исходя из предъявляемых требований к современным станкам, это условие вовсе не является недостатком. ВИД хорошо адаптирован к работе с электронной цифровой техникой, что в ряде случаев упрощает электронные блоки управления и делает их компактнее и дешевле по сравнению с АД.

Вентильно-индукторные приводы могут быть использованы как приводы главного движения, так и в качестве приводов подачи, которые обеспечивают помимо основных требований (таких как надежность, ремонтпригодность и низкая себестоимость) еще и другие немаловажные обязательные требования:

- широкий диапазон частот вращения (от 0,1 до 10000 об./мин.);
- значительная перегрузочная способность;
- высокая точность и плавность движения на всех частотах вращения;
- быстродействие;
- хорошие массогабаритные показатели при высоких энергетических характеристиках.

Благодаря возможности работать как на низких, так и на высоких и сверхвысоких частотах вращения, ВИД может быть успешно применен в автоматизированных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Помимо очевидных достоинств вентильно-индукторного привода (ВИП) в целом, неоспоримые преимущества имеет и сама индукторная машина по сравнению с другими известными двигателями (ДПТ и АД): конструктивная простота и высокие экономические и эксплуатационные показатели [4]. До конца нерешенной остается проблема оптимального проектирования ВИД. Ведь именно конфигурация активной части машины отвечает за характеристики проектируемой машины [5, 6]. Благодаря развитию вычислительной техники и программного обеспечения существует возможность совершенствовать зубцово-пазовую зону ВИД посредством оптимизационных алгоритмов.

Целью проводимого исследования является повышение эксплуатационных показателей ВИД в частности увеличения среднего значения электромагнитного момента путем оптимизации геометрии зубцовой зоны двигателя. Поставленная цель решается путем изменения элементов конструкции активной части ВИД с применением алгоритмов оптимизации. Оптимизационная задача является однокритериальной от вариации нескольких основных геометрических размеров активной части ВИД. В качестве рассматриваемого объекта был выбран двигатель с техническими данными, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Технические данные рассматриваемого двигателя

Параметры	Значение
Число полюсов статора	6
Число полюсов ротора	4
Число фаз	3
Наружный радиус статора, мм	74,5
Внутренний радиус статора (по пазам), мм	63,5
Внутренний радиус статора (по коронке зубцов), мм	42,2
Радиус ротора (по пазам), мм	33
Радиус ротора (по коронке зубцов), мм	42
Воздушный зазор, мм	0,2
Радиус отверстия под вал, мм	17,5
Размер магнитопровода в аксиальном направлении, мм	140
Мощность, Вт	4250

Исходя из особенностей работы и конструкции ВИД, исследованию было принято, что катушки статора изготовлены из изолированного медного провода, а активная часть двигателя из стали тонколистовой электротехнической стали 2411.

Материал, из которого изготавливают магнитопровод должен обладать высокой магнитной проницаемостью, для того, чтобы магнитный поток создавался наименьшим значением магнитодвижущей силы (МДС). Поскольку активная часть магнитопровода подвержена перемагничиванию, а это в свою очередь вызывает дополнительные потери на гистерезис и вихревые токи, то помимо высокой магнитной проницаемости необходимы еще и другие требования: повышенное удельное электрическое сопротивление и минимальные потери от перемагничивания.

Именно поэтому, исходя из вышеперечисленных требований было принято, что активная часть двигателя, т.е. статор и ротор машины, выполнена из электротехнической холоднокатаной стали 2411 с содержанием кремния 2,8–3,8%. Такое содержание кремния способствует уменьшению потерь на вихревые токи и гистерезис, не увеличивая при этом

хрупкость стали. Холодная прокатка текстурированной стали улучшает магнитные свойства материала при перемагничивании вдоль направления прокатки. Кривая намагничивания стали 2411 представлена на рисунке 1.

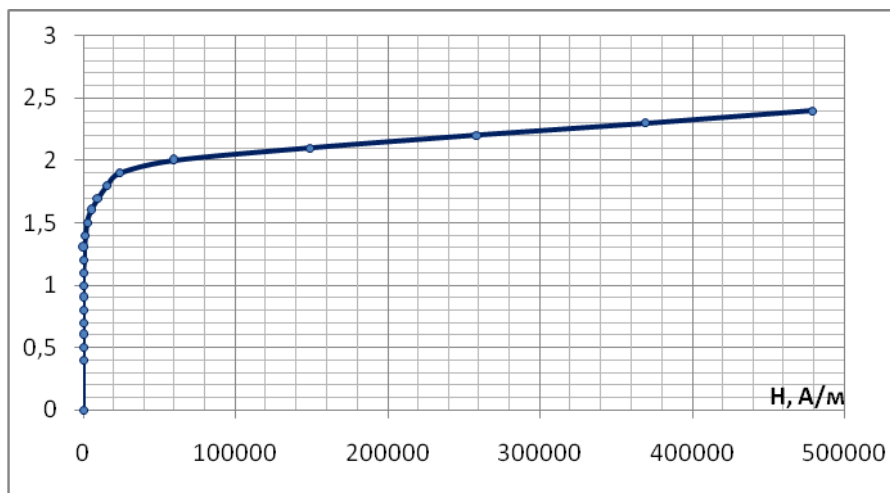


Рисунок 1. Кривая намагничивания стали 2411 (составлено автором)

Расчеты проводились для режимов трогания с места и разгона на малых частотах вращения ВИД. Вращающий момент на валу ВИД для такого режима – один из важнейших показателей двигателя.

Были приняты следующие допущения: ток в активной катушке статора поддерживался постоянным в режиме так называемого «токового коридора»; коммутация фаз считалась мгновенной; питающая сеть принята бесконечной мощности.

Увеличение электромагнитного момента было получено посредством изменения геометрии активной части двигателя с применением оптимизационных алгоритмов на основе методов Нелдера-Мида (деформируемого многогранника) и Монте-Карло (статических испытаний). В качестве оптимизируемых параметров были выбраны следующие геометрические размеры: величина воздушного зазора (δ , мм), угловой размер зубца статора ($b2s$, мм), ширина коронки зубца статора ($b1s$, мм), ширина коронки зубца ротора ($b1r$, мм), угловой размер зубца ротора ($b2r$, мм) и внутренний радиус статора ($R2s$, мм). Исходные значения этих величин представлены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные значения оптимизируемых параметров

Параметры	Значение
Воздушный зазор (δ), мм	0,2
Угловой размер зубца статора ($b2s$), град.	0
Ширина коронки зубца статора ($b1s$), мм	18,2
Угловой размер зубца ротора ($b2r$), град.	12
Ширина коронки зубца ротора ($b1r$), мм	17,3
Внутренний радиус статора (по пазам), мм	63,5

Оптимизация методами Монте-Карло и Нелдера-Мида проводилась в следующей последовательности.

В основе алгоритма, базирующегося на методе Монте-Карло, лежит использование моделей возможных результатов. При создании этих моделей любой параметр, носящий

характер неопределенности, заменяется диапазоном некоторых значений (распределением вероятностей).

Применяя распределение вероятностей переменные могут иметь различные вероятности наступления последствий. Так, например, в данном алгоритме использовано нормальное распределение (или «гауссова кривая»), которое имеет симметричную форму в виде «колокола» (рис. 2).

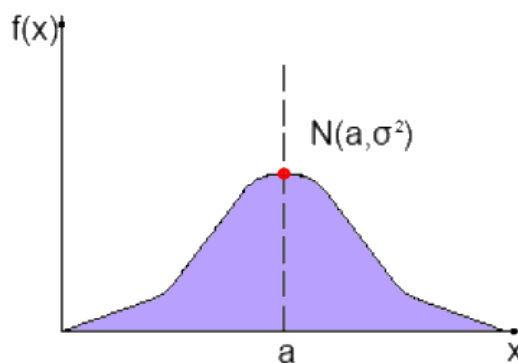


Рисунок 2. Гауссова кривая (составлено автором)

Главной особенностью нормального распределения является то, что все остальные законы стремятся приблизиться к этому распределению, т.е. Гауссов закон можно назвать «предельным законом».

Непрерывная случайная величина x имеет нормальный закон распределения (закон Гаусса) с параметрами a и σ , если ее плотность вероятности определена на всей числовой оси и имеет вид (1):

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

Согласно графику (рис. 2) максимум достигается в точке $x = a$, т.е. на середине распределения. Это среднее значение называется математическим ожиданием (M). Значит, параметр a в плотности вероятности Гауссова закона равен математическому ожиданию случайной величины: $M(x) = a$.

Существует также еще один необходимый параметр – среднеквадратичное отклонение (σ), которое определяется как $\sigma^2 = D(x)$ (D – дисперсия, которая характеризует разброс случайной величины относительно среднего значения). Именно это значение характеризует форму гауссовой кривой. Чем меньше будет значение σ , тем точнее будет результат среднего значения в выборке. Если среднеквадратичные отклонения достаточно велики, то принято считать, что среднее значение лежит в каком-то диапазоне чисел, а не есть конкретное число.

Для данного алгоритма было принято распределение случайной величины при равной плотности вероятности.

Принцип работы алгоритма изображен на блок-схеме, представленной на рисунке 3.

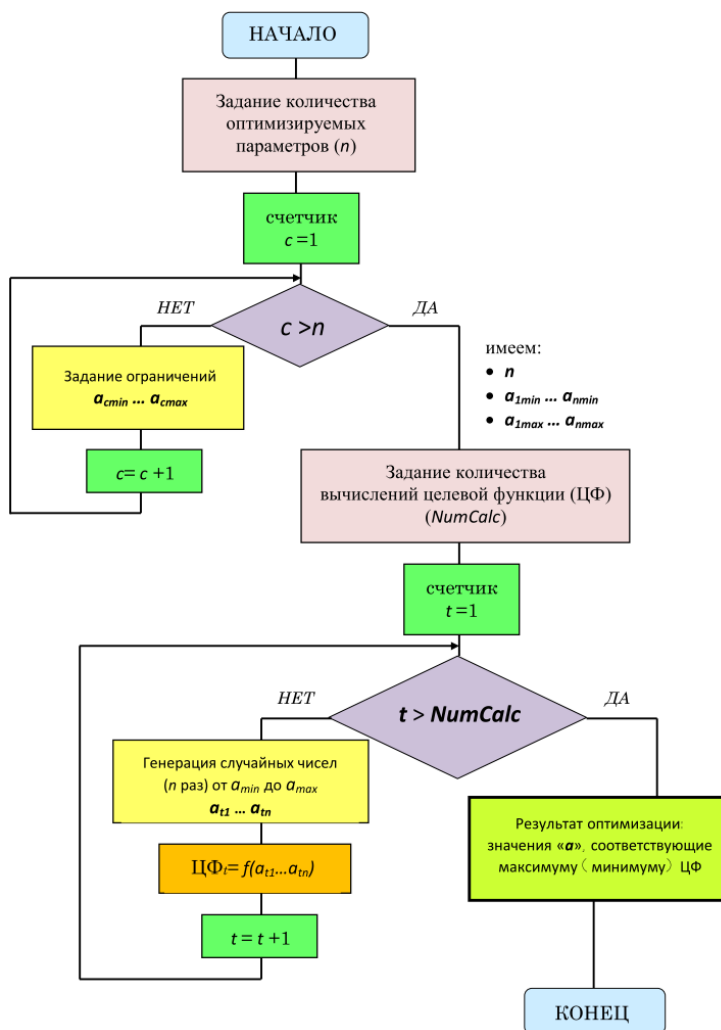


Рисунок 3. Блок-схема метода Монте-Карло (составлено автором)

Одним из основных условий оптимизации является задание количества оптимизируемых параметров (т.е. переменных – n) и задание ограничений ($a_{1min} \dots a_{nmin}$; $a_{1max} \dots a_{nmax}$). После того, как начальные условия сформированы для запуска программы необходимо задать количество вычислений ($NumCalc$), которое, как упоминалось выше, должно быть достаточно большим. Далее следуя алгоритму (рис. 3), в процесс вступает генератор случайных чисел, который производит случайный вброс значений параметров в заданных ограничениях по следующей формуле:

$$a = a_{min} + (a_{max} - a_{min}) \cdot rand ,$$

Где $rand$ – случайное число в диапазоне от 0 до 1.

На следующем этапе производится вычисление целевой функции в зависимости от вброшенных значений параметров: $ЦФ_i = f(a_1, \dots, a_n)$. Таким образом, действия будут повторяться пока счетчик t не станет больше $NumCalc$: $t > NumCalc$.

Результатом оптимизации будут являться значения a , соответствующие максимуму (или минимуму) целевой функции.

Описание метода Нелдера-Мида, его достоинства, недостатки и блок-схема алгоритма представлены в работе [7].

Оптимизация геометрии двигателя была реализована с помощью разработанной программы в среде MATLAB («Оптимизация ВИМ» номер регистрации 2016618039, дата регистрации 20.07.2016) и программы FEMM 4.2. В основе программы FEMM 4.2 лежит полевой метод расчета, основанный на методе конечных элементов. Для расчета параметров магнитного поля производится разбиение расчетной области элементами в виде треугольников, которые в результате перекрывают всю область. В случае расчета рассматриваемого двигателя число конечных элементов составило 5 337. Фрагмент рассчитываемого двигателя в программе FEMM с сеткой конечных элементов представлен на рисунке 4.

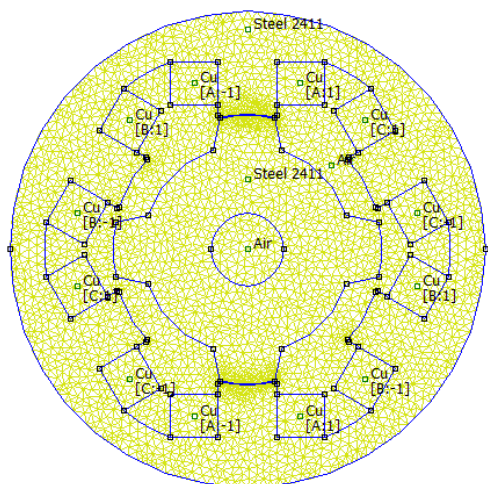


Рисунок 4. ВИД 6/4 в программе FEMM 4.2 (составлено автором)

Расчет момента и сил в программе FEMM заключается в сведении формулы Пуассона (2) к задаче решения системы алгебраических уравнений, количество которых пропорционально числу конечных элементов разбиения.

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}, \quad (2)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z};$$

где

\mathbf{A} – векторный магнитный потенциал;

μ – магнитная проводимость;

\mathbf{J} – вектор суммарной плотности тока, включающий в себя токи проводимости и токи электрического смещения.

В дальнейших расчетах поле ВИД в магнитной системе принято плоскопараллельным. Для такого случая определяется только составляющая векторного магнитного потенциала перпендикулярная плоскости, в которой рассматривается поле ВИД.

После того, как рассчитаны параметры магнитного поля – векторный магнитный потенциал \mathbf{A} и вектор магнитной индукции \mathbf{B} , используя соотношение (3) производится расчет моментов и сил, действующих в ВИМ.

$$\text{rot} \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

где \mathbf{B} – вектор магнитной индукции.

Для получения оптимизированной геометрии необходимо сформировать исходные геометрические размеры и ограничения в пределах которых будет проводиться поиск

экстремума целевой функции, т.е. среднего электромагнитного момента. Для начала оптимизации также необходимо указать величину тока или плотность тока и материалы, из которых изготовлена расчетная область двигателя (названия материалов должны полностью совпадать с названиями, имеющимися в библиотеке FEMM.В противном случае необходимо создать нужный материал). После задания начальных условий для оптимизации геометрии производится выбор метода оптимизации (Монте-Карло или Нелдера-Мида), на основании которого рассчитывается средний момент на валу двигателя для каждого положения ротора с определенным угловым шагом. Вычисление момента производилось через производную от коэнергии [8, 9], в результате которого была получена зависимость момента от угла поворота ротора $M=f(\Theta)$. Для получения среднего значения момента проводилось численное интегрирование этой кривой методом трапеций (рис. 5).

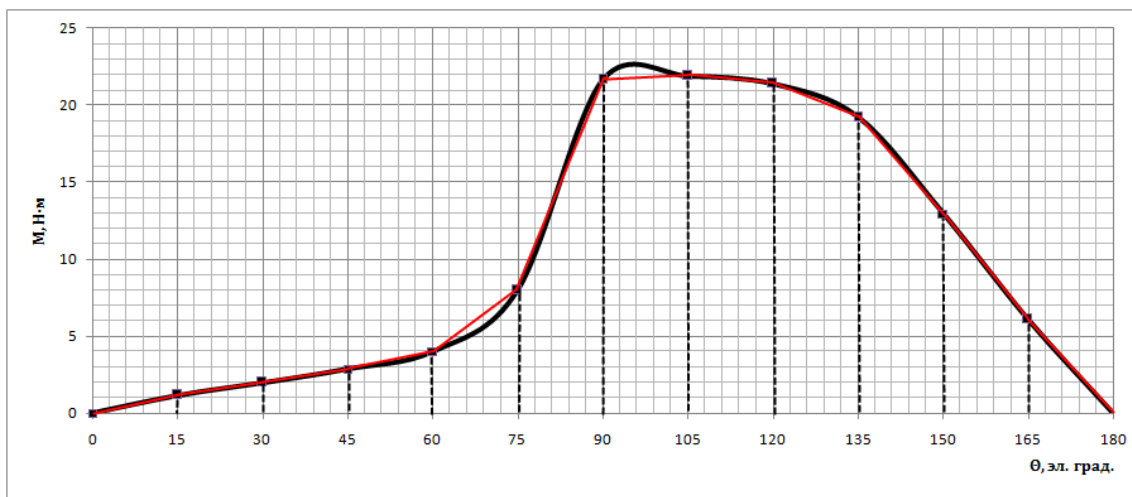


Рисунок 5. Кривая электромагнитного момента ВИД 6/4 (составлено автором)

На рисунке 5 черным изображена действительная кривая момента, а красным – аппроксимация этой кривой, с помощью которой производился расчет площади n -го участка под кривой. Формула для n -го участка выглядит следующим образом (4):

$$S(n) = \frac{(M(n) + M(n+1)) \cdot \text{угловое деление от } n \text{ до } n+1}{2} \quad (4)$$

После того как оптимизация завершилась, программа выдает численные значения целевой функции и параметров, при которых эта функции достигает своего экстремума (в данном случае максимума).

Расчет и оптимизация рассматриваемого объекта (ВИД 6/4) проводились в несколько этапов [10]. На первом этапе были проведены расчеты момента только с двумя различными переменными, используя метод статических испытаний (стохастический метод). Далее, на втором этапе была проведена оптимизация двигателя по четырем параметрам, при которых на первом этапе момент был максимален. Последним этапом стала оптимизация объекта с более узкими границами для расчета, используя метод деформируемого многогранника (детерминированный метод), т.е. полученные значения и стали результатом проведенной работы. Решение поставленной задачи и полученные результаты представлены в таблице 3 и рисунке 6.

Таблица 3

Решение задачи и результат оптимизации

Переменные параметры	Ограничения		Лучшее сочетание конструктивных параметров, мм	Значение среднего момента, Н·м	Увеличение момента по сравнению с исходным, %
	минимум, мм	максимум, мм			
Исходные (табл. 2)	-	-	-	12,591	-
<i>Метод Монте-Карло</i>					
δ $b2s$	0,2 0	1,5 10	0,21 3,37	12,603	0,09
δ $b1s$	0,2 13,2	1,5 23,2	0,23 17,41	12,612	0,17
δ $b1r$	0,2 12,3	1,5 22,3	0,22 18,9	12,607	0,13
δ $b2r$	0,2 7	1,5 17	0,2 15	12,623	0,25
δ $R2s$	0,2 58,5	1,5 68,5	0,22 65,61	13,427	6,23
δ $b1s$ $b2r$ $R2s$	0,2 16,2 10 60,5	1,5 20,2 17 66,5	0,22 17,38 11,26 65,32	13,64	7,69
<i>Метод Нелдера-Мида (уточнение)</i>					
δ $b1s$ $b2r$ $R2s$	0,2 16,3 10 64,5	0,3 18,3 13 66,5	0,2 17,02 11,27 65,83	13,87	9,22

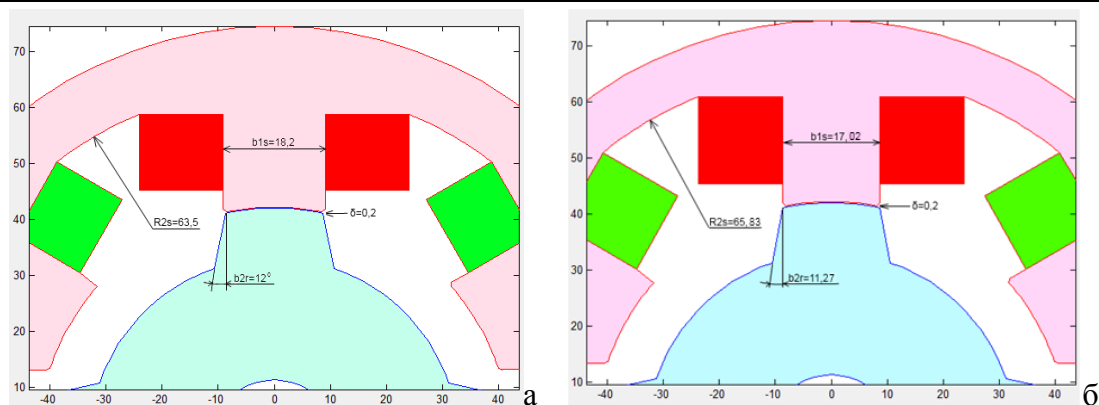


Рисунок 6. Оптимизируемые геометрические параметры до и после оптимизации:
 а) до оптимизации; б) после оптимизации (составлено автором)

На рисунках ниже представлены кривые моментов двигателя в трех случаях (исходного, после оптимизации методом Монте-Карло по четырем переменным и уточненный вариант после оптимизации методом Нелдера-Мида) и сходимости решений для оптимизируемых геометрических параметров при оптимизации, выполненной методом Нелдера-Мида (156 итераций) (рис. 7, 8).

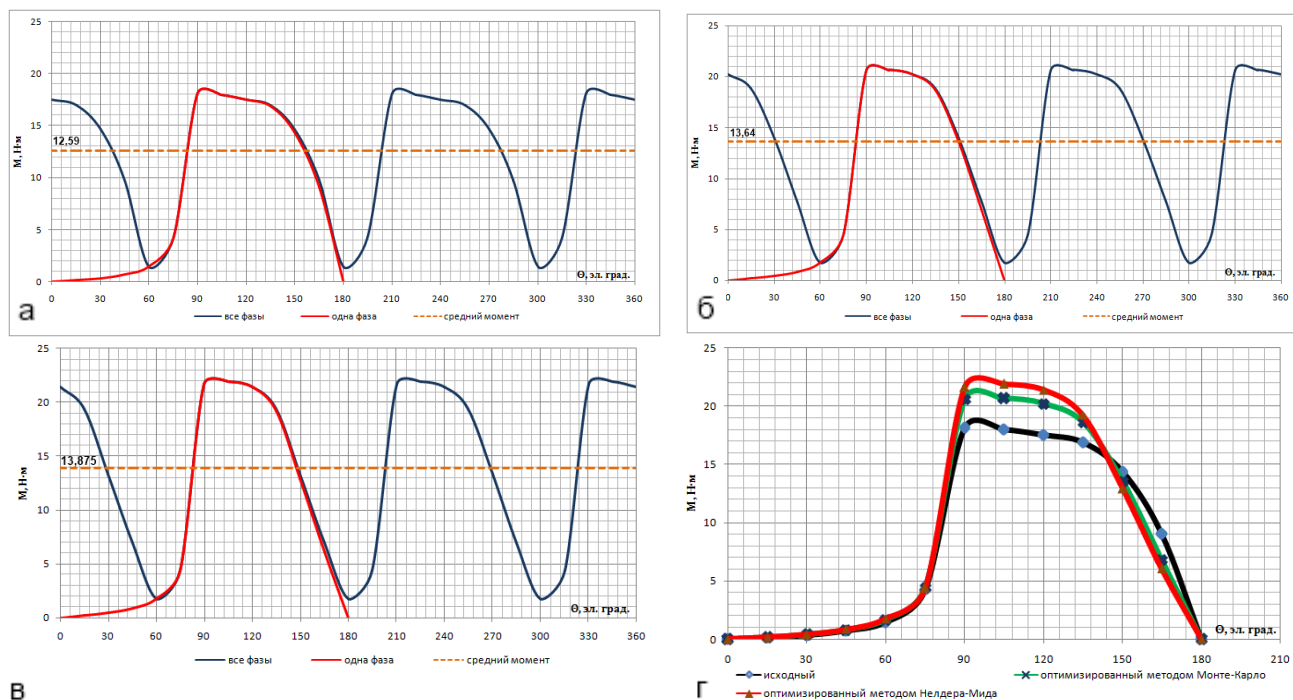


Рисунок 7. Кривые моментов оптимизируемого двигателя: а) при исходной геометрии; б) после оптимизации методом Монте-Карло; в) после оптимизации методом Нелдера-Мида; г) кривые моментов для трех случаев одной фазы (составлено автором)

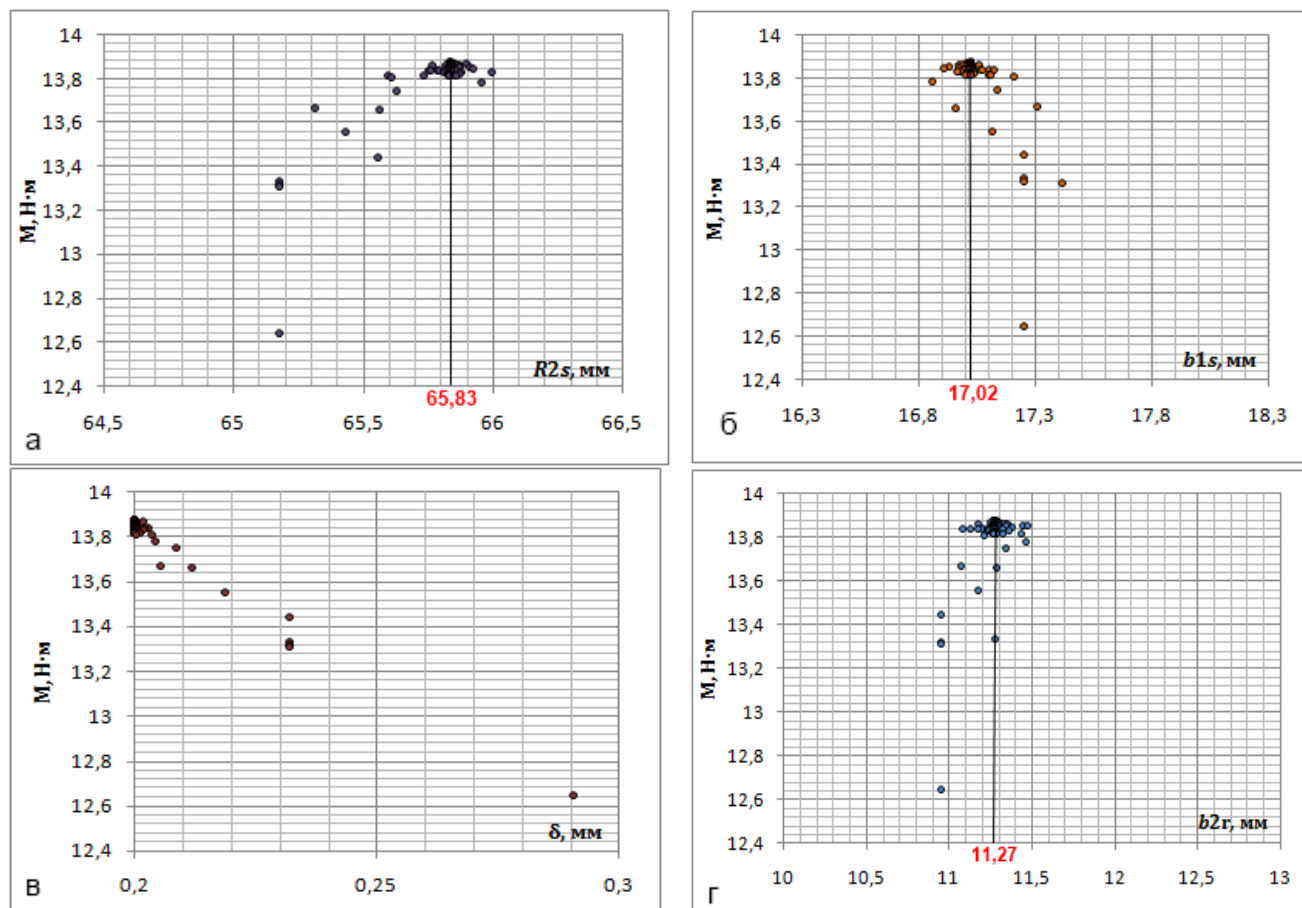


Рисунок 8. Сходимость решений оптимизируемых геометрических параметров: а) $R2s$; б) $b1s$; в) δ ; г) $b2r$ (составлено автором)

Выводы

Применение оптимизационных алгоритмов способствует совершенствованию эксплуатационных показателей электродвигателя, что было показано на примере расчета ВИД 6/4.

В качестве целевой функции был рассмотрен электромагнитный момент, а в качестве переменных – геометрические размеры активной части двигателя. Оптимизация проводилась в несколько этапов методами Монте-Карло и Нелдера-Мида. В результате оптимизации увеличение среднего электромагнитного момента составило 9,22% при сохранении неизменными внешнего диаметра ВИД и длины магнитопровода в аксиальном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Налбатов И.И., Налбатова Е.И. Современное состояние машиностроительного комплекса России и уровень конкурентоспособности машиностроительных предприятий / И.И. Налбатов, Е.И. Налбатова // Научный альманах. – 2015. – №7 (9). – С. 147–156.
2. Вентильно-индукторный привод – перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / В.Ф. Козаченко [и др.]. – Новости теплоснабжения, 2011. – №11 (135) [Электронный ресурс]: http://www.ntsnn.ru/11_2011.html.
3. Miller Y.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.
4. Рымша В.В. Влияние конфигурации зубцовой зоны статора на электромагнитный момент и радиальные электромагнитные силы вентильно-реактивного электродвигателя / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, Чан Тхи Тху-Хыонг // Электротехника и электромеханика. – 2006. – №1. – С. 51–53.
5. Пахомин С.А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вентильного реактивного индукторного двигателя / С.А. Пахомин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – №1. – С. 30–36.
6. Петрушин А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя методом Нелдера-Мида / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Известия Томского политехнического университета инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – №6. – С. 83–93.
7. Optimization of energy conversion loop in switched reluctance motor for efficiency improvement / L. Jian, Q. Ronghai, C. Zhichu, C. Yun-Hyun // J. Electr. Eng. Technol. – 2013. – V. 8. – №3. – P. 565–571.
8. Miller T.J.E. Optimal design of switched reluctance motors // IEEE Transactions on industrial electronics. – February, 2002. – V. 49. – №1. – P. 15–27.
9. Петрушин А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного электропривода / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба // Вестник РГУПС. – 2016. – №1(61). – С. 61–65.
10. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г.К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – №3. – С. 23–33. URL: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5/> (дата обращения: 15.07.2016).

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

Design of switched-reluctance motor as a unit controlled drive system with the use of optimization algorithms

Abstract. The machine building complex is the largest industrial complex and the basis of scientific and technical progress of Russia. From the development machine building industry depends on the technical condition of other industries. In the modern world of industrial development level is determined by the ability of intellectual equipment. To improve the efficiency of production and the level of development of the machine building industry it is necessary to introduce automated electric drives on the basis of advanced switched-reluctance motors. Program was developed automated design, including optimization algorithm active part of the switched-reluctance motor implemented using MATLAB software package that performs direct interaction with the program for the calculation and visualization of electromagnetic processes FEMM. Through this program, they calculated the geometry 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. As optimization methods were used: a stochastic Monte Carlo and deterministic - Nelder-Mead. Optimization was carried out in several stages in order to determine which of the geometric parameters of the tooth of the engine area have the greatest impact on the value of the electromagnetic torque, as well as to ensure guaranteed to find the global extremum of the objective function.

Keywords: the switched-reluctance motor; the active part; tooth zone; geometric parameters; koenergiya; the average electromagnetic torque; trapezoids method; optimization; Monte-Carlo method; Nelder-Mead method

REFERENCES

1. Nalbatov I.I., Nalbatova E.I. Sovremennoe sostoyanie mashinostroitel'nogo kompleksa Rossii i uroven' konkurentosposobnosti mashinostroitel'nykh predpriyatiy / I.I. Nalbatov, E.I. Nalbatova // Nauchnyy al'manakh. – 2015. – №7 (9). – S. 147–156.
2. Ventil'no-induktornyiy privod – perspektivnoe napravlenie razvitiya sovremennogo reguliruemogo elektroprivoda / V.F. Kozachenko [i dr.]. – Novosti teplosnabzheniya, 2011. – №11 (135) [Elektronnyy resurs]: http://www.ntsni.ru/11_2011.html.
3. Miller Y.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.
4. Rymsha V.V. Vliyanie konfiguratsii zubtsovoy zony statora na elektromagnitnyy moment i radial'nye elektromagnitnye sily ventil'no-reaktivnogo elektrodvigatelya / V.V. Rymsha, I.N. Radimov, Chan Tkhi Tkhu-Khyong // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2006. – №1. – S. 51–53.
5. Pakhomin S.A. Vliyanie geometrii zubtsovogo sloya i parametrov pitaniya na pokazateli ventil'nogo reaktivnogo induktornogo dvigatelya / S.A. Pakhomin // Izv. vuzov. Elektromekhanika. – 2000. – №1. – S. 30–36.
6. Petrushin A.D. Optimizatsiya aktivnoy chasti ventil'no-induktornogo dvigatelya metodom Nelder-Mida / A.D. Petrushin, A.V. Shevkunova, A.V. Kashuba // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta inzhiniring georesurov. – 2016. – T. 327. – №6. – S. 83–93.
7. Optimization of energy conversion loop in switched reluctance motor for efficiency improvement / L. Jian, Q. Ronghai, C. Zhichu, C. Yun-Hyun // J. Electr. Eng. Technol. – 2013. – V. 8. – №3. – R. 565–571.
8. Miller T.J.E. Optimal design of switched reluctance motors // IEEE Transactions on industrial electronics. – February, 2002. – V. 49. – №1. – R. 15–27.
9. Petrushin A.D. Optimizatsiya aktivnoy chasti ventil'no-induktornogo elektroprivoda / A.D. Petrushin, A.V. Kashuba // Vestnik RGUPS. - 2016. - №1(61). - S. 61-65.
10. Ptakh G.K. Ventil'no-induktornyiy reaktivnyy elektroprivod sredney i bol'shoy moshchnosti: zarubezhnyy i otechestvennyy opyt / G.K. Ptakh // Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. – 2015. – T. 2. – №3. – S. 23–33. URL: <http://electrical-engineering.ru/issues/2015/2015-3-5/> (data obrashcheniya: 15.07.2016).