

УДК 621.311

С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ВЕНТИЛЬНОГО
ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОГТЕОБРАЗНЫМИ
ПОЛЮСАМИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО
ДЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ПО ПРОИЗВОДСТВУ
БЕСШОВНЫХ ТРУБ**

Представлена методика проектирования вентильного двигателя с когтеобразными полюсами, предназначенного для привода пильгерстана по производству бесшовных труб. Двигатели этого класса нашли широкое применение для приводов малых и средних мощностей, но в мировой практике нет примеров производства таких двигателей с габаритами до 10 м и на мощности несколько мегаватт. Показана целесообразность применения таких крупногабаритных и мощных электродвигателей для приводов, работающих в тяжелых условиях. Это связано с возможностью сборки магнитной системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами без дополнительной дорогостоящей оснастки. При этом следует отметить, что расчет индуктора с когтеобразными полюсами достаточно сложен, так как он имеет много путей для потока рассеяния. Существуют большие технические риски разработать неэффективную конструкцию с малым рабочим потоком. Предлагается разбить задачу на два этапа. На первом этапе решается задача определения оптимальной геометрии на основе методов нелинейного программирования. Предлагается разработанная авторами программа синтеза, реализованная на программном языке Delphi. Программа содержит несколько уровней оптимизации и охватывает большое количество проектных ситуаций, с которыми сталкивается разработчик. На втором этапе реализована задача анализа оптимизированной конструкции двигателя. Для этого используется хорошо проверенная на практике программа Ansys Electronics Desktop. На этом этапе авторы столкнулись с необходимостью использования мощных компьютерных ресурсов и большим (в несколько часов) временем расчета одного варианта. Это связано с тем, что конструкция с когтеобразными полюсами не имеет плоской симметрии и заставляет решать трехмерную полевую задачу. Авторами предлагается эффективный метод решения этой проблемы за счет упрощения расчетной модели без существенного снижения точности расчета. Вентильный двигатель с когтеобразными полюсами заменяется вентильным двигателем с тангенциальными магнитами, который имеет плоскую симметрию, и его можно рассчитать, решая двухмерную полевую задачу. Конструкции статора и магнитные потоки двигателя эталона и двигателя близнеца одинаковые, соответственно потери, токи и напряжения тоже эквивалентны. Эффективность такой замены показана на реальном проекте. Время расчета при приемлемом качестве снижено до нескольких минут. Данный подход рекомендован для создания проектных систем других типов вентильных машин и помогает автоматизировать длительную механическую работу.

Ключевые слова: бесшовные трубы, синтез, анализ, вентильный двигатель, когтеобразные полюса, тангенциальные магниты, двухмерная модель, трехмерная модель, Ansys Electronics Desktop.

S.A. Gandzha, B.I. Kosimov, D.S. Aminov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYZING A DC MOTOR HIGH-POWER WITH CLAW POLES DESIGNED FOR PILGER MILL FOR THE MANUFACTURE OF SEAMLESS PIPES

The article presents the design method of brushless DC motor with claw-type poles designed for the pilger mill drive for producing seamless tubes. Motors of this class are widely used for drives of small and medium capacity, but in world practice there are no examples of the production of such engines with dimensions up to 10 meters and a power of several megawatts. The article shows the feasibility of using such large and powerful electric motors for drives operating in severe conditions. This is due to the possibility of assembling a magnetic system with high-coercive permanent magnets without additional expensive tooling. But it should be noted that the calculation of the inductor with claw-type poles is quite complex. There are great technical risks to develop an inefficient design with a small magnetic flux. The article proposes to divide the problem into 2 stages. At the first stage, the problem of determining the optimal geometry based on nonlinear programming methods is solved. The authors propose a synthesis program implemented in the Delphi. The program contains several levels of optimization and covers a large number of project situations. At the second stage, the task of analyzing the optimized motor design is implemented. We use a well-tested in practice program Ansys Electronics Desktop. At this stage, the authors are faced with the need to use powerful computer resources and a large time in a few hours to calculate one option. This is due to the fact that the construction with claw-like poles does not have 2d symmetry and it is necessary to solve a 3d field problem. The article proposes an effective method of solving this problem. The authors propose a simplification of the computational model without significantly reducing the accuracy of the calculation. A motor with claw-type poles is replaced by a motor with tangential magnets, which has a 2d symmetry and can be calculated by solving a 2d field problem. The design of the stator and the magnetic fluxes of the motor standard motor and identical twins, respectively, losses, currents and voltages are also equivalent. The effectiveness of such a replacement is shown on a real project. Calculation time at acceptable quality is reduced to several minutes. This approach is recommended for the creation of design systems of other types of machines.

Keywords: seamless pipes, synthesis, analysis, brushless motor, claw-poles, tangential magnets, two-dimensional model, three-dimensional model, AnsysElectronics Desktop.

Введение. Нефтегазовая индустрия России является бюджетообразующей отраслью, поэтому все инженерные и научно-исследовательские работы, связанные с совершенствованием систем, обеспечивающих технологическую цепочку по добыче, передаче и потреблению топлива, являются важными и актуальными.

Производство труб различного диаметра, которые должны работать с агрессивными средами в широком температурном диапазоне и при этом обладать высокими показателями надежности, является одной из важнейших задач. Следует отметить, что бесшовные трубы являются одним из вариантов решения этой проблемы.

В настоящее время бесшовные трубы изготавливаются на пилигримовых станах из высококачественной стали. Рост требований к надежности труб заставляет переходить на более совершенные методы производства стали и обработки металла, что возможно только при глубокой реконструкции сталеплавильного производства и разработке новых классов агрегатов прокатного производства, в том числе электродвигателя привода пильгерстана, от работы которого зависит эффективность всего привода.

Пилигримовый стан на Челябинском трубопрокатном заводе (ЧТПЗ) эксплуатируется с 1928 г. В качестве приводного электродвигателя для пильгерстана используется электродвигатель постоянного тока GM 900/100 фирмы Simens со следующими основными параметрами: номинальная мощность 2,75 МВт, номинальное напряжение питания 6 кВ, номинальная частота вращения 35 об/мин. Электродвигатель вращает маховик диаметром 9 м с большой инерционной массой 120 т. Фотография привода представлена ниже (рис. 1).



Рис. 1. Электродвигатель, маховик и подшипники привода

Долгие годы эксплуатации электродвигателя привели к его физическому и моральному износу. У электродвигателя возник ряд технических проблем, которые ставят под угрозу его дальнейшую надежную работу. Так, на валу электродвигателя от ударных нагрузок появились микротрещины, которые могут привести к разрушению вала. При длительной эксплуатации в 3 смены возникает проблема энергосбережения самого двигателя и привода в целом. В настоящее время остро стоит вопрос о замене существующего двигателя на более современный вариант. Выбор оптимального варианта электродвигателя привода

пильгерстана для технологии получения бесшовных труб более подробно описан в работах [1–3].

В таблице представлен сравнительный анализ различных типов электродвигателей, которые были проанализированы применительно к приводу.

Анализ вариантов электродвигателя

№ п/п	Наименование варианта	Масса меди, кг	КПД
1	Замена существующего электродвигателя постоянного тока на асинхронный электродвигатель 2750 кВт	11570	0,955
2	Замена существующего электродвигателя постоянного тока на синхронный электродвигатель 2750 кВт с электромагнитным возбуждением	6600	0,945
3	Встраивание нового асинхронного радиального электродвигателя 2750 кВт в маховик	11860	0,945
4	Исключение маховика и замена его двумя асинхронными электродвигателями 1375 кВт большого диаметра с эквивалентной инерционной массой	11870	0,955
5	Исключение маховика и замена его двумя вентильными электродвигателями с когтеобразными полюсами 1375 кВт большого диаметра с эквивалентной инерционной массой	5600	0,97

Из представленной таблицы видно, что вариант вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами (ВДКП) является лучшим с точки зрения расхода активных материалов и КПД. Исследования, представленные в данной статье, посвящены разработке метода синтеза и анализа этого класса машин большой мощности применительно к производству бесшовных труб.

1. Постановка задачи. Существуют разные методы анализа бесщеточных двигателей с постоянными магнитами. При этом следует отметить, что все современные методы оптимального проектирования основаны на большом количестве итерационных циклов. Очень часто мощные вычислительные комплексы, такие как Ansys, Comsol, Cedgat (Magsoft), Infolitica, VectorFields, Elcut и другие, не могут в разумный временной интервал рассчитать оптимальную геометрию при большом числе анализируемых вариантов, особенно если модель имеет большие размеры [4, 5, 13, 14].

На рис. 2 представлена логическая схема проектирования вентильной машины с когтеобразными полюсами, разработанная авторами. На первом этапе реализуется задача синтеза. В основе ее лежит упрощенная методика с применением схем замещения, которая определяет оптимальную геометрию машины. Такой подход позволяет применить методы нелинейного программирования с большим числом перебора вариантов. Однако эта методика имеет целый ряд ограничений и допущений. При этом погрешность расчета основных характеристик достигает 10–15 %, что приводит к техническим рискам при изготовлении макетного и опытного образца.

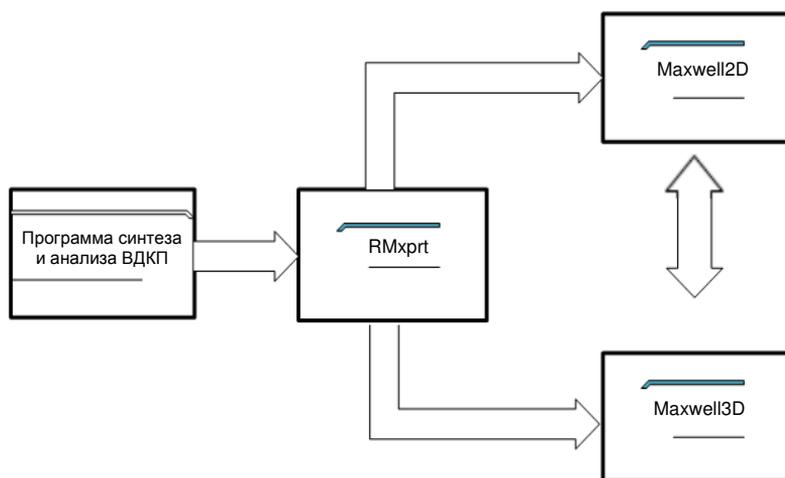


Рис. 2. Проектирование электрических машин

Для уменьшения этих рисков в системе предусмотрен этап анализа с применением сложных САД-систем на основе метода конечных элементов. Авторы используют комплекс программ Ansys.

Конструкция машин с когтеобразными полюсами имеет особенность. Она не имеет плоской симметрии, и для анализа необходимо рассматривать трехмерную модель. Практика показывает, что это во многом осложняет задачу анализа. Тестовые расчеты показали, что с применением программы Ansys Electronics Desktop в режиме решения динамической задачи Transient ожидание результатов расчета основных характеристик составляет от 8 до 15 ч. Это неприемлемо, когда речь идет об отладке модели или переборе конструктивных вариантов. В то же время практика показала, что для плоской двухмерной модели решение подобной задачи для вентильной машины составляет от 20 до 40 мин.

Для разрешения данного противоречия было принято решение о замене реальной конструкции вентильной машины с когтеобразными полюсами на конструкцию вентильной машины с эквивалентными энергетическими характеристиками, которая имеет плоскую симметрию. Наиболее близким аналогом оказалась вентильная машина с тангенциальной системой возбуждения. Эта машина имеет аналогичный якорь. Конструкция индуктора имеет отличия, но в индукторе нет электрических и магнитных потерь, все электромагнитные процессы по преобразованию энергии происходят в якоре. Если подобрать магнитный поток вентильной машины таким же, как для машины с когтеобразными полюсами, то мы получим практически машину-близнец, имея в виду магнитные и электрические потери якоря, наводимые ЭДС в фазных обмотках, электромагнитный момент и другие основные параметры.

В результате для проектирования вентильных машин с когтеобразными полюсами была разработана следующая расчетная цепочка. По техническому заданию заказчика с применением разработанной авторами программы решается задача многоуровневой оптимизации. Программа написана с применением языка Delphi. При этом определяются оптимальная геометрия машины и обмоточные данные. Далее результаты передаются в программу Ansys Electronics Desktop с использованием заранее подготовленных скриптов.

В программе Ansys Electronics Desktop в режиме RMXprt проводится анализ оптимальной машины с использованием модели с когтеобразными полюсами, которая заложена в эту программу. При этом проверяется корректность решения оптимизационной задачи по основным параметрам (КПД, потоку в зазоре, потерям, моменту, индуцируемым ЭДС в фазах). При несоответствии какого-то параметра делается корректировка модели с повторением цикла.

После этого этапа, не выходя из режима RMXprt, данные передаются из модели с когтеобразными полюсами в модель вентильной машины с тангенциальными магнитами, при этом внутренний диаметр машины аналога подбирается таким образом, чтобы магнитный поток, проходящий из индуктора в якорь, был эквивалентным. При этом проверяется идентичность всех характеристик обеих машин.

После этого этапа используются возможности Ansys Electronics Desktop по автоматическому переходу задачи из режима RMXprt в режим Maxwell 2D Design. При этом происходит анализ машины

на основе метода конечных элементов с расчетом всех параметров электромагнитного поля. Время расчета на этом этапе составляет 20–40 мин. При необходимости модель корректируется.

На заключительном этапе происходит анализ реальной трехмерной модели машины с когтеобразными полюсами. В автоматическом режиме модель из режима RMXprt переходит в режим Maxwell 3DDesign. Происходит анализ реальной модели с определением всех необходимых характеристик на основе метода конечных элементов. Время анализа составляет от 12 до 20 ч, но это вполне допустимо, так как модель прошла отладку на предыдущих этапах.

Ниже представлены результаты работы данной системы на примере проектирования вентильного двигателя с когтеобразными полюсами 2.5 MW, 600 V, 40 RPM для привода пильгерстана.

3. Проектная система для вентильных двигателей с когтеобразными полюсами. На сегодняшний день известны различные конструктивные исполнения вентильных двигателей: индукторные, реактивные, с постоянными магнитами, с когтеобразными полюсами [6–19].

Для привода пильгерстана представляет интерес вентильный двигатель с когтеобразными полюсами, несмотря на то, что до настоящего времени этот класс электрических машин не применялся для мощных электроприводов. Это связано с тем, что только этот тип электрической машины с постоянными магнитами позволяет сделать сборку для больших диаметров ротора.

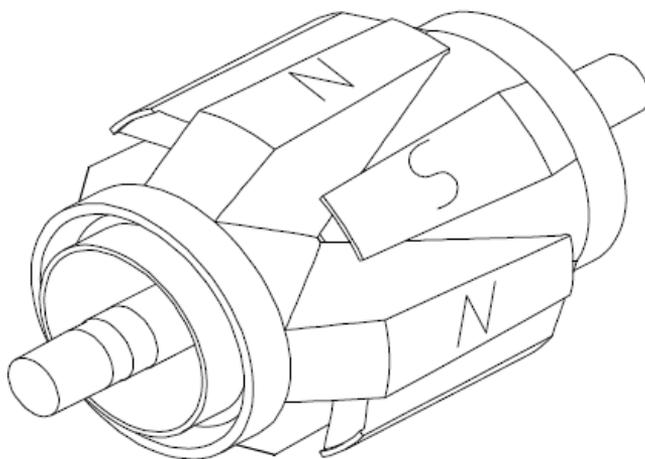


Рис. 3. Общий вид ротора с когтеобразными полюсами

Бесконтактная конструкция синхронных машин с когтеобразными полюсами впервые была предложена А.Г. Иосифьяном и Б.М. Каган [1]. Конструкция статора и якорной обмотки вентильного двигателя с когтеобразными полюсами такая же, как и в обычных традиционных синхронных и асинхронных машинах. Индуктор имеет существенные отличия. Он собирается из двух деталей с полюсами, имеющими форму когтей. Между ними располагается кольцевой постоянный магнит из высококоэрцитивного магнитного материала. Наличие мощного магнита позволяет обеспечить лучшие энергетические показатели с наименьшими потерями в машине. Двигатель бесконтактный, что важно для приводов, работающих в тяжелых условиях.

Сборка машины осуществляется по следующей технологической цепочке: в обмотанный статор вставляется первая часть когтеобразного полюса, далее в ротор помещается кольцевой магнит, на заключительном этапе вставляется вторая часть когтеобразного полюса. Такая сборка исключает сильные односторонние тяжения, которые не позволяют осуществить сборку для других конструкций индукторов.

Разработка двигателя начинается с оптимизации геометрии в специальной программе. При этом в соответствии с техническим заданием заказчика и выбранными материалами выбираются уровень оптимизации и критерий качества. Подробно программный комплекс описан в литературе [20–24]. Оболочка программы с результатами расчета представлена на рис. 3.

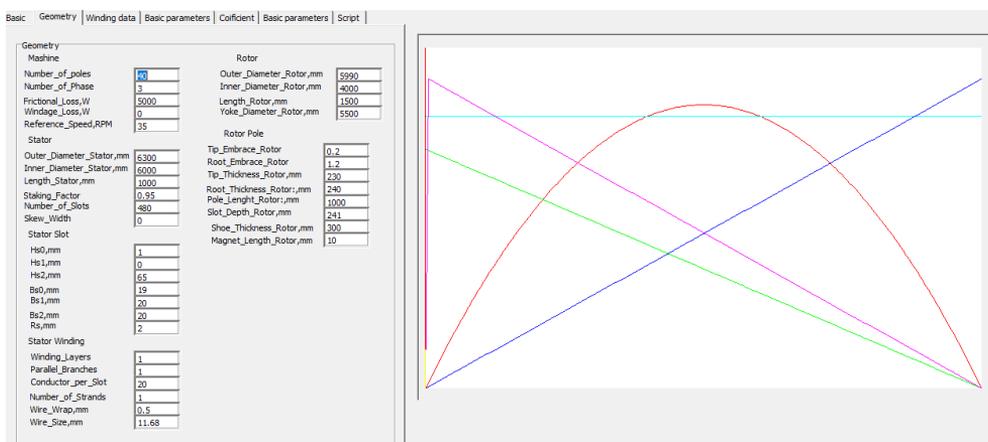


Рис. 4. Оболочка программы оптимизации вентильной машины с когтеобразными полюсами

Далее результаты расчета оптимальной геометрии и обмоточных данных передаются в программу Ansys Electronics Desktop при помощи предварительно разработанного скрипта. В этой программе в режиме RMXprt проводится проверка рассчитанных параметров. Программа Ansys имеет отработанную методику анализа этого типа машин (Claw-Pole Synchronous Machine). Результаты работы на этом этапе представлены на рис. 5.

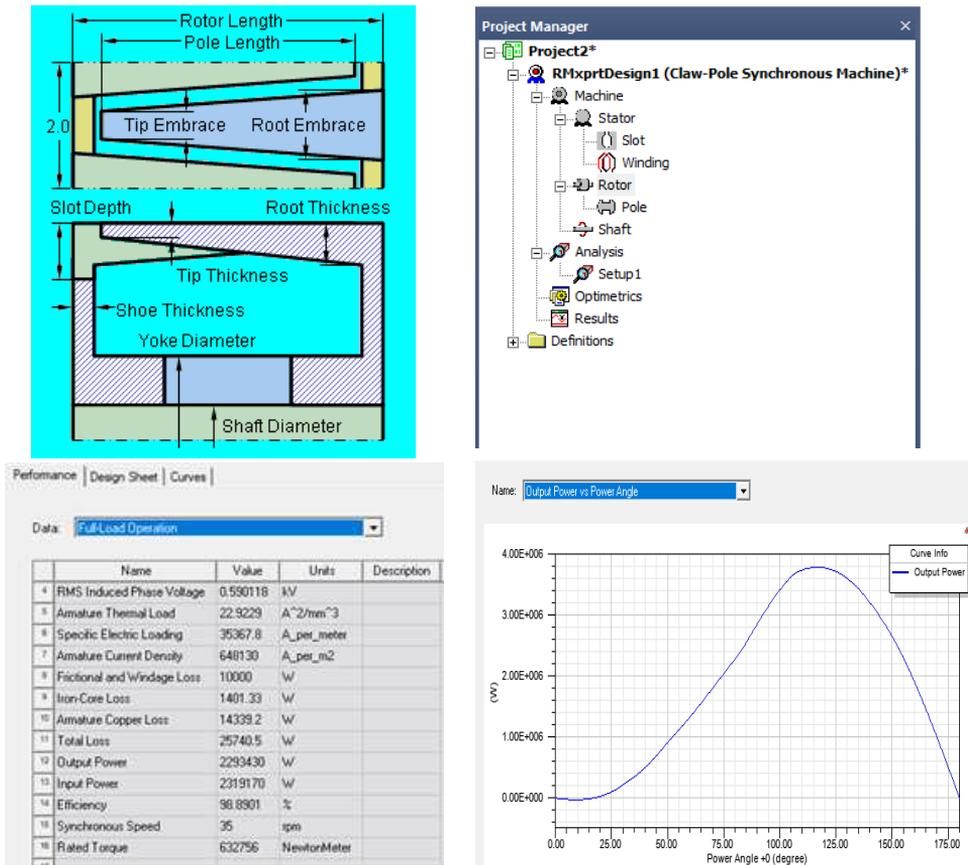


Рис. 5. Результаты расчета вентильной машины с когтеобразными полюсами в RMXprt

После этого в режиме RMXprt инициируется расчет вентильного двигателя с тангенциальным индуктором (Brushless Permanent-Magnet DC Motor). При этом все размеры статора и его обмоточные данные принимаются аналогичными предыдущему варианту. Магнитный поток с помощью внутреннего диаметра подбирается одинаковым с магнитным потоком когтеобразного индуктора. Результаты анализа этого этапа представлены на рис. 6.

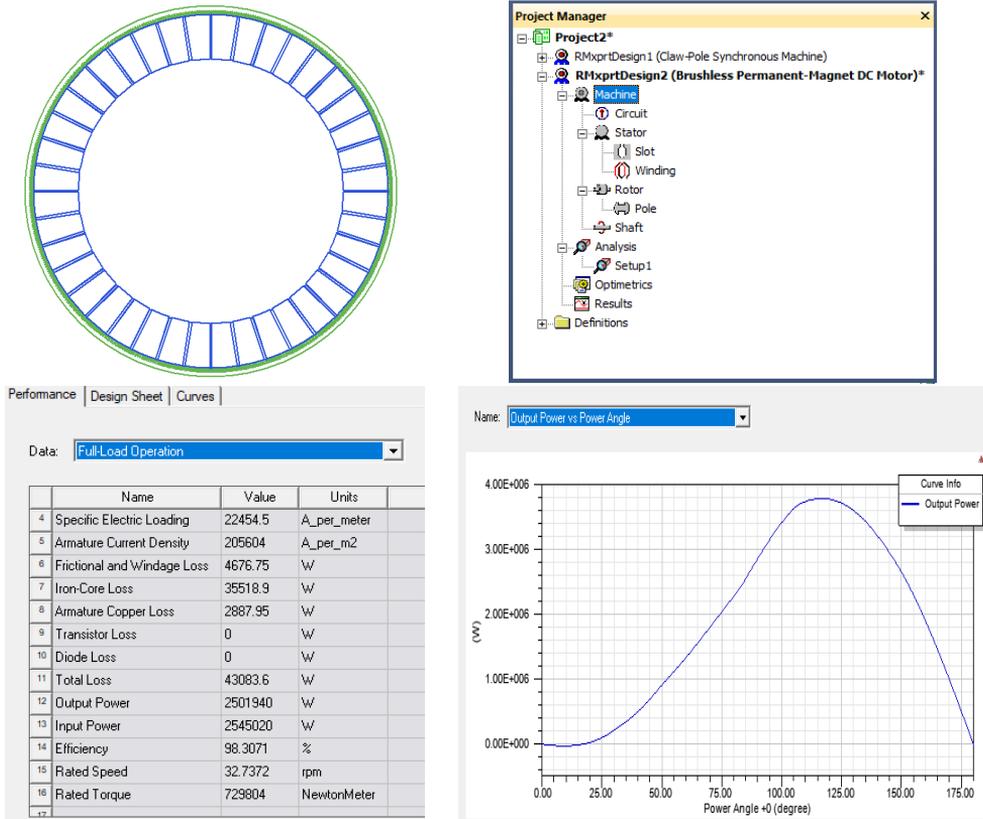


Рис. 6. Результаты расчета вентильного двигателя с тангенциальными магнитами в RMxprt

Следующим этапом анализа является развертывание конструкции Brushless Permanent–Magnet DC Motor в плоскую двухмерную модель для анализа магнитного поля по методу конечных элементов. Данная модель является точной копией модели Claw-Pole Synchronous Machine, поскольку имеет одинаковый якорь и магнитный поток. Анализ характеристик проводится с имитатором электронного коммутатора. Результаты анализа этого этапа представлены на рис. 7.

На рис. 8–10 представлены расчетные кривые ЭДС-фаз, токов в фазах, электромагнитного момента. На последнем этапе из режима RMxprt модель Claw-Pole Synchronous Machine автоматически с использованием возможностей программы Ansys Electronics Desktop разворачивается в трехмерную модель для анализа магнитного состояния и окончательного определения основных параметров и характеристик. Результаты анализа представлены на рис. 11–12.

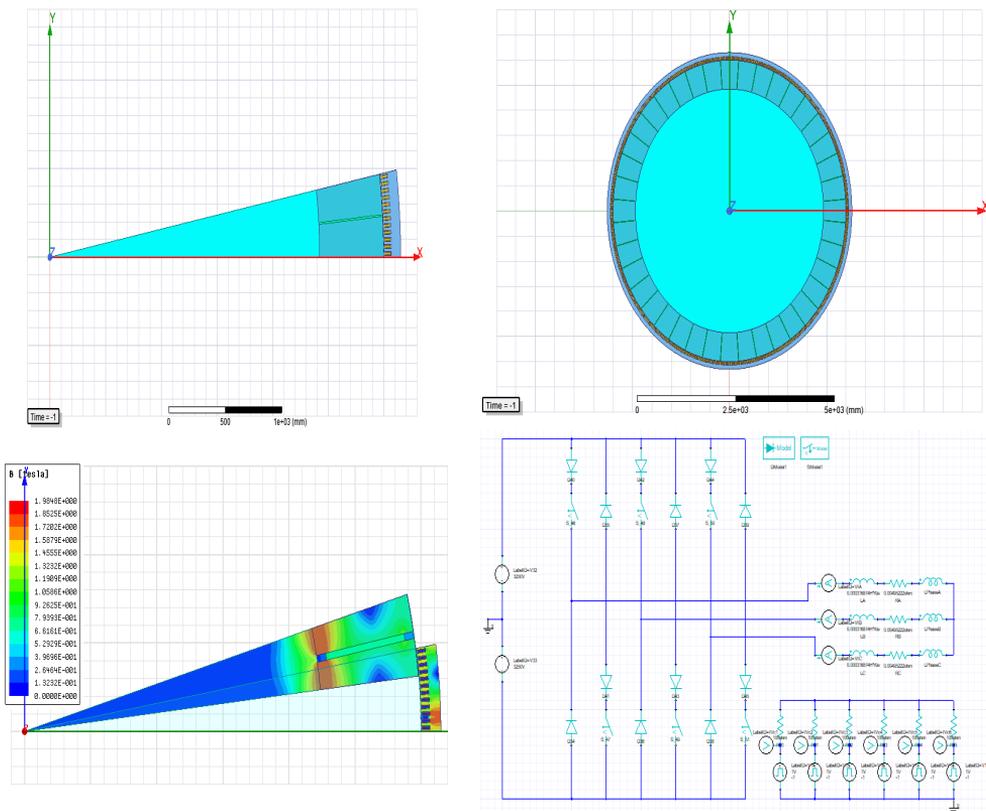


Рис. 7. Моделирование вентильного двигателя с тангенциальными магнитами в Maxwell 2D Design

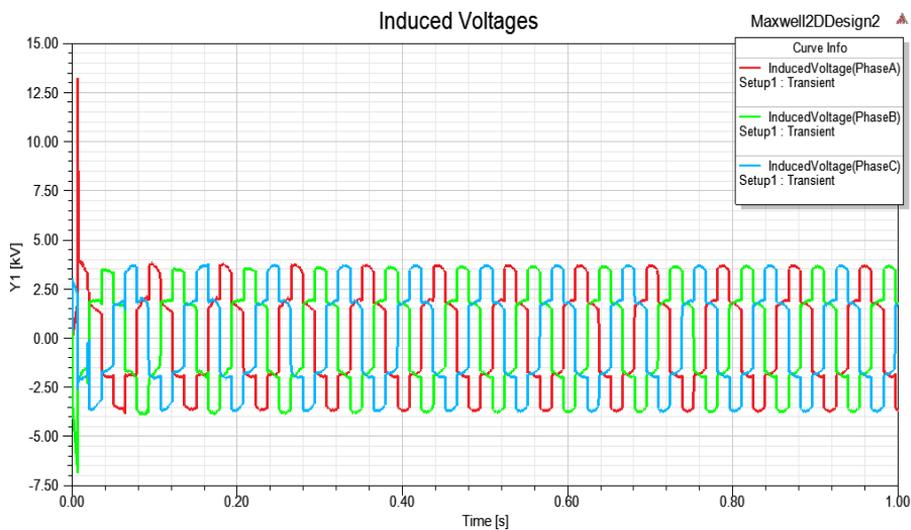


Рис. 8. Расчет ЭДС в фазах

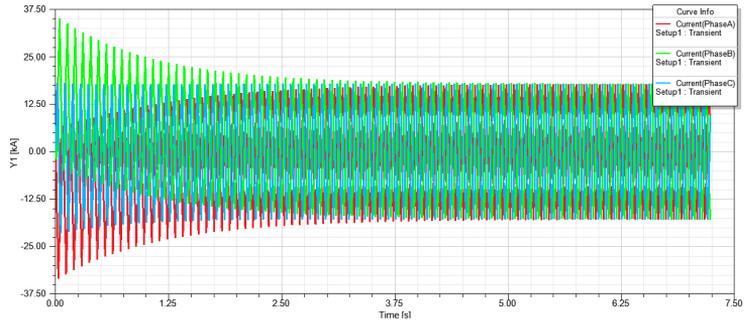


Рис. 9. Расчет токов в фазах

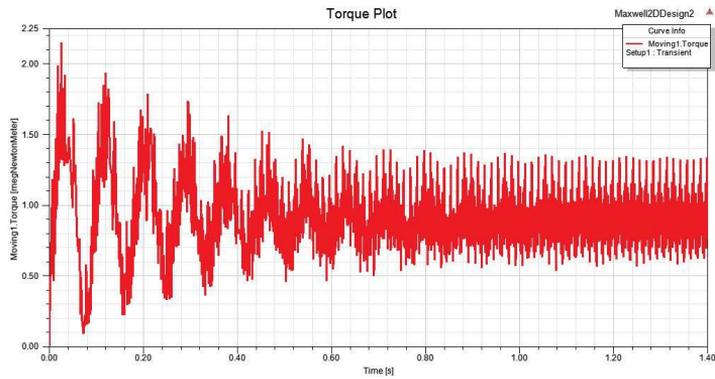


Рис. 10. Расчет электромагнитного момента

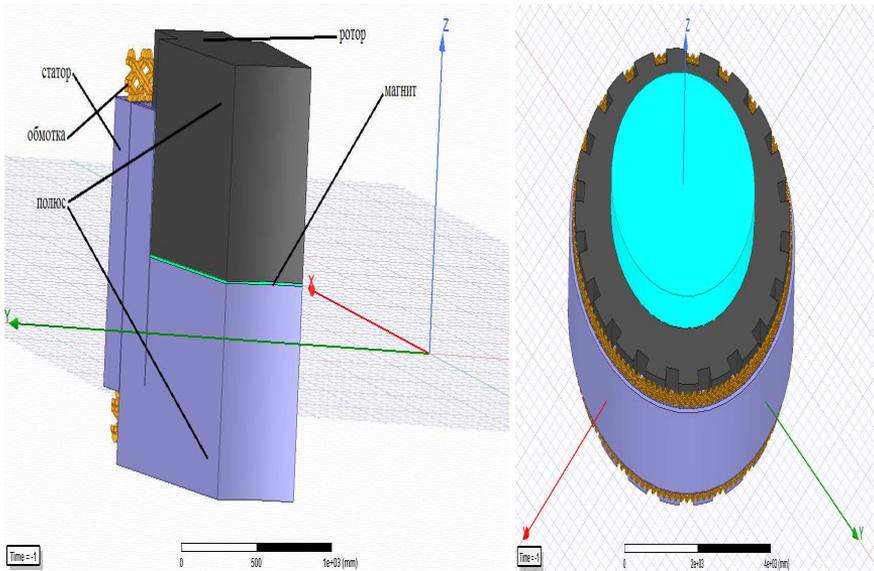


Рис. 11. Моделирование вентильного двигателя с когтеобразными полюсами в Maxwell 3D Design

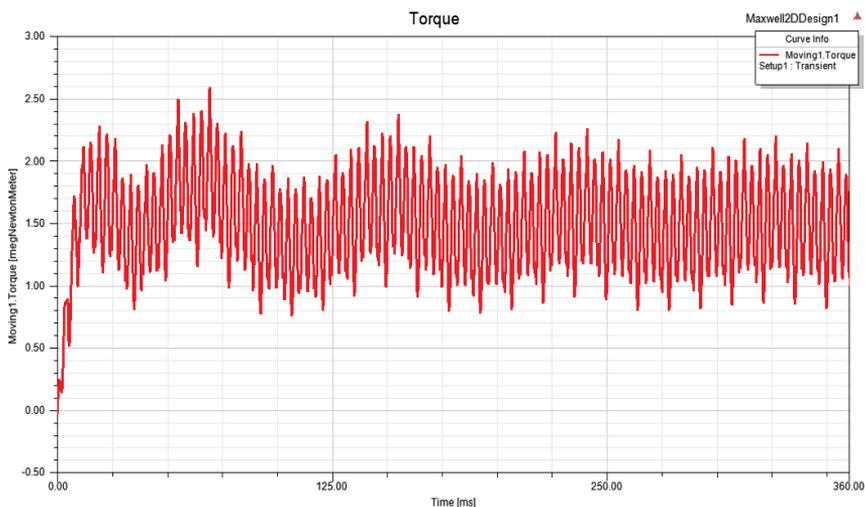


Рис. 12. Расчетная кривая электромагнитного момента двигателя с когтеобразными полюсами

По расчетной кривой двигателя с когтеобразными полюсами видно, что характеристики анализируемого двигателя и двигателя аналога близки и находятся в пределах погрешности расчета.

Таким образом, осуществляются синтез и многоступенчатый анализ электрических машин с когтеобразными полюсами.

4. Анализ результатов. В настоящее время появились мощные САД-системы для анализа электрических машин, которые имеют возможности для точного расчета их параметров и характеристик.

Следует иметь в виду, что эти системы предъявляют к компьютерам очень высокие требования по быстродействию и оперативной памяти. Не всегда у разработчика имеются такие возможности. Одна из проблем – это ожидание результатов расчета в течение длительного времени для сложных магнитных систем при необходимости рассмотрения большого количества вариантов.

Практика показывает, что не всегда есть необходимость усложнения расчетной модели. Очень часто с достаточной точностью можно проводить анализ плоских задач вместо трехмерных.

Представленная проектная система разработана как раз в этой логической схеме. После этапа синтеза, где оптимизация осуществлялась на упрощенной модели по схемам замещения, задача переходит к этапу анализа в программной среде Ansys. Далее поэтапно решается сначала плоская задача расчета магнитного поля, а затем трехмерная зада-

ча расчета магнитного поля. Максимальные расхождения по основным параметрам (КПД, момент, частота вращения, магнитные потоки, индуцируемые ЭДС) представлены ниже:

– между результатами Delphi и RMxprt для Claw Pole Synchronous Machine 5–9 %;

– между результатами RMxprt для Claw-Pole Synchronous Machine и результатами RMxprt для Brushless Permanent–Magnet DC Motor 3–5 %;

– между результатами Maxwell 2D Design для Brushless Permanent–Magnet DC Motor и результатами Maxwell 3D Design для Claw-Pole Synchronous Machine 5–7 %;

– между результатами Delphi для Claw-Pole Synchronous Machine и результатами Maxwell 3D Design для Claw-Pole Synchronous Machine 9–12 %.

Эту точность расчета для такой сложной магнитной системы, какой является машина с когтеобразными полюсами, следует признать хорошей.

Выводы. Основной проблемой для анализа вентильных машин со сложной геометрией магнитной системы является необходимость использования сложных программ, для которых требуются большие компьютерные ресурсы. Очень часто в этом нет острой необходимости. Анализ практических задач показывает, что часто можно существенно упростить задачу с получением приемлемого по точности результата. В статье приводится такая возможность для вентильной машины с когтеобразными полюсами большой мощности. Представленная проектная система показала свою эффективность на реальном проекте по разработке привода для пильгерстана, предназначенного для изготовления бесшовных труб. Авторы статьи считают, что данный подход может быть эффективным при разработке проектных систем для других типов электрических машин.

Библиографический список

1. Иосифьян А.Г., Каган Б.М. Основы следящего привода. – М.: Госэнергоиздат, 1957.

2. Ганджа С.А., Косимов Б.И., Аминов Д.С. Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–17. DOI: 10.14529/power190101

3. Сравнительный анализ электродвигателей привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб. Выбор оптимальной конструкции / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов, Р.Р. Ниматов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30. – С. 79–101.

4. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных электродвигателей // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 6. – С. 50–53.

5. Мартьянов А.С., Неустроев Н.И. Анализ электромеханических систем с помощью Ansys Maxwell // Альтернативная энергетика и экология: междунар. науч. журнал. – 2014. – № 19(159). – С. 47–52.

6. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Р.Р. Ниматов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 58–74.

7. Design of Performance and Parameter Measurement System for Brushless Direct Current (BLDC) Motor / A.F. Desanti, I. Sidharta, H. Erwantono, H. Suryoatmojo, M. Wahyudi // International Seminar on Intelligent Technology and Its Application (ISITIA). – 2018. – P. 175–179.

8. Analytical derivation of a coupled-circuit model of a claw-pole alternator with concentrated stator windings / H. Bai, S.D. Pekarek, J. Tichenor, R.J. Krefta, S.J. Shields // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2002. – Vol. 17, № 1. – P. 32–38.

9. Jurca F., Martis C. Claw-Pole generator parameters and steady-state performances analysis // International Review on Modelling and Simulations. – 2013. – Vol. 6, № 1. – P. 41–48.

10. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

11. Апсит В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. – Рига: Изд-во АН ЛатвССР, 1959. – 300 с.

12. Друбецкий А.Е. Особенности конструкции вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами // Вісник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 32. – С. 166–171.

13. Козаченко В.Ф., Корпусов Д.Е. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением // *Электронные компоненты*. – 2005. – № 6. – С. 60–64.

14. Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Selecting optimal design of electric motor of pilgrim mill drive for manufacturing techniques seamless pipe // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019)*; Sochi, Russia, 25–29 March 2019.

15. Копылов И.П. Электрические машины: учебник. – 5-е изд. – М.: Высшая школа, 2006. – 607 с.

16. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills // *Procedia Engineering*. – December 2015. – Vol. 129. – P. 191–194.

17. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного электродвигателя: монография. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 200 с.

18. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе / Б.Н. Тихменев, Н.Н. Горин, В.А. Кучумов [и др.]. – М.: Транспорт, 1976. – 280 с.

19. Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров [и др.]. – М.: Транспорт, 1976. – 623 с.

20. Куцевалов В.М. Бесконтактные синхронные двигатели. Ч. 1: Бесконтактные электрические машины. – М., 1966. – С. 42–50.

21. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux / S. Gandzha, D. Aminov, I. Kiessh, B. Kosimov // *Global Smart Industry Conference, GloSIC*. – Chelyabinsk, 2018. – P. 1–6.

22. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on finite element method // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019)*; Sochi, Russia, 25–29 March 2019.

23. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms // *International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*. – Chelyabinsk, 2018. – P. 282–287.

24. The design of the low-speed brushless motor for the winch which operates in sea-water / S Gandzha., A. Sogrin, A. Martyanov, I. Kiessh // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM). – Sofia, Bulgaria, 2017. – Vol. 17. – P. 783–790.

References

1. Iosif'ian A.G., Kagan B.M. Osnovy slediashchego privoda [Fundamentals of servo drive]. Moscow: Gosenergoizdat, 1957.

2. Gandzha S.A., Kosimov B.I., Aminov D.S. Vybora optimal'noi konstruktsii elektrodvigatelei privoda pil'gerstana dlia tekhnologii izgotovleniia besshovnykh trub [Optimizing the Design of a Pilger Mill Motor to Produce Seamless Pipes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 5-17. DOI: 10.14529/power190101

3. Gandzha S.A., Kosimov B.I., Aminov D.S., Nimatov R.R. Sravnitel'nyi analiz elektrodvigatelei privoda pil'gerstana dlia tekhnologii izgotovleniia besshovnykh trub. Vybora optimal'noi konstruktsii [Comparative analysis of electric motors of pilger mill drive for technology of manufacturing seamless pipes. Choice optimal design]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 30, pp. 79-101.

4. Gollandtsev Iu.A. Sravnenie mekhanicheskikh kharakteristik asinkhronnykh i ventil'nykh induktorno-reaktivnykh elektrodvigatelei [Comparison of Mechanical Characteristics of Asynchronous and Switched Reluctance Inductor-Reactive Electric Motors]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 6, pp. 50-53.

5. Mart'ianov A.S., Neustroev N.I. Analiz elektromekhanicheskikh sistem s pomoshch'iu Ansys Maxwell [Analysis of Electromechanical Systems Using Ansys Maxwell]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*, 2014, no. 19(159), pp. 47-52.

6. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R. Razrabotka inzhenernoi metodiki rascheta magnitnykh sistem s postoiannymi magnitami na osnove metoda konechnykh elementov [Development of engineering method based on finite element method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 29, pp. 58-74.

7. Desanti A.F., Sidharta I., Erwantono H., Suryoatmojo H., Wahyudi M. Design of Performance and Parameter Measurement System for Brushless Direct Current (BLDC) Motor Proceeding - 2018. *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application (ISITIA)*, 2018, pp. 175-179.

8. Bai H., Pekarek S.D., Tichenor J., Krefta R.J., Shields S.J. Analytical derivation of a coupled-circuit model of a claw-pole alternator with concentrated stator windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 32-38

9. Jurca F., Martis C. Claw-Pole generator parameters and steady-state performances analysis. *International Review on Modelling and Simulations*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 41-48.

10. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow: Energiia, 1980. 928 p.

11. Apsit V.V. *Sinkhronnye mashiny s kogteobraznymi poliusami* [Synchronous machines with claw poles]. Riga: Akademiia Nauk Latviiskoi SSR, 1959. 300 p.

12. Drubetskii A.E. Osobennosti konstruksii ventil'nogo elektrodvigatelia s kogteobraznymi poliusami [Design features of a valve motor with claw-shaped poles]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazariana*, 2010, no. 32, pp. 166-171.

13. Kozachenko V.F., Korpusov D.E. Elektroprivod na baze ventil'nykh induktornykh mashin s elektromagnitnym vozbuzhdeniem [Electric Drive on the Basis of Switched Reluctance Motors with Electromagnetic Excitation]. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 6, pp. 60-64.

14. Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Selecting optimal design of electric motor of pilgrim mill drive for manufacturing techniques seamless pipe. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019)*; Sochi, Russia, 25-29 March 2019.

15. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. 5nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2006. 607 p.

16. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills. *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, pp. 191-194.

17. Guliaev I.V., Tutaev G.M. Sistemy vektornogo upravleniia elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventil'nogo elektrodvigatelia [Motor Vector Control Systems Based on Asynchronous BLDC Motor]. Saransk: Mordovskii universitet, 2010. 200 p.

18. Tikhmenev B.N., Gorin N.N., Kuchumov V.A. et al. Ventil'nye dvigateli i ikh primeneniye na elektropodvizhnom sostave [Application brushless motor in electric rolling stock]. Moscow: Transport, 1976. 280 p.

19. Nakhodkin D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I. et. al. Proektirovaniye tiagovykh elektricheskikh mashin [Design of electric traction machines]. Moscow: Transport, 1976. 623 p.

20. Kutsevalov V.M. Beskontaktnye sinkhronnye dvigateli. Chast' 1. Beskontaktnye elektricheskie mashiny [Contactless synchronous motors. Part 1. Contactless electric machines]. Moscow, 1966, pp. 42-50.

21. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Kosimov B. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. *Global Smart Industry Conference, GloSIC*. Chelyabinsk, 2018, pp. 1-6.

22. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on finite element method. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2019); Sochi, Russia*, 25–29 March 2019.

23. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. *International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*. Chelyabinsk, 2018, pp. 282-287.

24. Gandzha S., Sogrin A., Martyanov A., Kiessh I. The design of the low-speed brushless motor for the winch which operates in sea-water. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM)*. Sofia, Bulgaria, 2017, vol. 17, pp. 783-790.

Сведения об авторах

Ганджа Сергей Анатольевич (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Косимов Бахтиёр Исматуллоевич – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

Аминов Дилшод Саидович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

About the authors

Gandzha Sergey Anatolyevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Kosimov Bakhtiyor Ismatulloevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

Aminov Dilshod Saidovich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

Получено 30.10.2019