

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

В настоящее время металлургическое производство содержит большое количество морально и физически устаревшего электрооборудования, которое требует модернизации. Для его замены требуются большие капитальные затраты. По этой причине оно медленно внедряется, долго эксплуатируется с целью окупаемости, медленно выводится из производства. В связи с этим новое оборудование должно быть инновационным и по многим параметрам опережать существующий уровень развития отрасли. В статье предлагается такое решение для предприятия ПАО «Челябинский трубопрокатный завод». Для замены существующего коллекторного двигателя привода пильгерстана по производству бесшовных труб, который функционирует с 1928 года и находится в критическом состоянии, предлагается крупногабаритный тихоходный вентильный двигатель с большой встроенной инерционной массой, имеющий магнитную систему с постоянным магнитом и когтеобразными полюсами. Такое техническое решение для приводов этого класса в мире не применялось. Двигатель позволяет исключить существующий 120-тонный маховик, повысить надежность за счет бесконтактности токоподвода, снизить эксплуатационные затраты, исключив потери на возбуждение. Конструкция двигателя позволяет произвести его сборку без дополнительной технологической оснастки, что очень важно для крупных двигателей с постоянными магнитами. Для разработки уникального двигателя была создана проектная система, состоящая из подсистемы синтеза и подсистемы анализа. Подсистема синтеза реализует многоуровневую однокритериальную оптимизацию. В результате ее работы определяется оптимальная геометрия по выбранному критерию. Система анализа подтверждает достоверность расчета по упрощенным методикам оптимизации и окончательно снимает технические риски перед изготовлением промышленного образца. Она построена на основе хорошо отработанной для электрических машин САЕ системы Ansys Electronics Desktop и Ansys Iserac. Анализ имеет несколько этапов и включает в себя электромагнитный и тепловой анализ. Предлагаемая проектная система проверена на реальном проекте и внедрена в качестве расчета магнитного и теплового состояния с учетом динамической нагрузки в АО «Русские электрические двигатели».

Ключевые слова: пильгерстан, САЕ системы, синтез, анализ, тепловой анализ, вентильный электродвигатель, когтеобразные полюса, магнитная система, тангенциальные магниты, двухмерная модель, трехмерная модель.

Введение. Регион Урала традиционно является одним из центров тяжелой индустрии. Исторически на протяжении более чем двух столетий здесь развивалось крупное машиностроение и металлургия. Эти тенденции присутствуют и в наше время. Особенностью развития этой отрасли является инерционность.

Прежде всего это связано с большими капитальными затратами на модернизацию производства. Научные разработки и инновационные решения

гораздо медленнее внедряются в эту сферу, чем в других отраслях. Этим можно объяснить то обстоятельство, что на многих предприятиях тяжелой индустрии России до сих пор эксплуатируется довоенное и послевоенное оборудование. В связи с этим очень важно, чтобы технические решения для этой отрасли в значительной мере опережали время и были инновационными. Они будут медленно внедряться и потом долго работать до морального и физического износа.

Одним из таких примеров является ныне действующий на Челябинском трубопрокатном заводе привод пильгерстана для изготовления бесшовных труб различного диаметра, которые применяются в нефтегазовой сфере. Привод функционирует с 1928 года. Основные параметры синхронного коллекторного двигателя фирмы Siemens приведены ниже, а его общий вид представлен на рис. 1:

- номинальная мощность 2,75 МВт;
- номинальное напряжение питания 6 кВ постоянного тока;

- номинальная частота вращения 35 об/мин.

Электропривод вращает массивный маховик диаметром 9 м и весом 120 тонн.

Продолжительная эксплуатация электродвигателя привела его к физическому и моральному износу. Обнаружены многочисленные дефекты, которые могут стать причиной аварии.

В качестве явных проблем можно отметить появившиеся микротрещины на валу электродвигателя за счёт ударной нагрузки, которые могут привести к разрушению вала.

Учитывая трехфазную работу привода, следует обратить особое внимание на решение вопросов по энергоэффективности и энергосбережению нового электродвигателя и его привода.

Ключевой задачей предприятия в настоящее время является замена существующего коллекторного электродвигателя на более современный, надёжный, энергоэффективный бесконтактный электродвигатель.

Требования, предъявляемые к новому приводу. Согласно условиям заказчика, при замене рассматриваемого электродвигателя должны оставаться неизменными основные узлы и агрегаты существующего привода, а именно:

- двухвалковая клеть с калибром переменного сечения;
- подающий механизм.

Следовательно, должны заменяться только электродвигатель и массивный маховик.

Требования, предъявляемые заказчиком к новому оборудованию, приведены ниже:

- новый агрегат по своим габаритам не должен превышать размеры производственного помещения, где он должен быть размещён;

- для повышения надёжности и уменьшения эксплуатационных расходов новый привод должен иметь бесконтактный токоподвод;

- с целью возможности прокатки труб разных диаметров диапазон регулировки частоты вращения привода должен находиться в пределах 30–45 об/мин, при этом необходимо обеспечивать стабильность выбранной частоты вращения;

- необходимо уменьшить эксплуатационные потери за счёт повышения КПД привода;

- время замены старого привода на новый привод не должно привести к длительной остановке непрерывного производства;

- предлагаемый электродвигатель и его система управления должны иметь минимально возможную стоимость.

Выбор базового варианта двигателя для привода пильгерстана. Анализ тенденций развития современного электромашиностроения позволяет в качестве наиболее перспективного выбрать вентильный электропривод [1–5]. Это связано с тем, что неуклонно повышается мощность, надёжность работы вентильных машин, в том числе и в агрессивных средах. При этом цена таких приво-



Рис. 1. Электродвигатель пильгерстана Челябинского трубопрокатного завода

дов снижается и становится доступной для средних предприятий. Этому способствует развитие производства мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов и силовой электроники на большие токи и напряжения.

Сейчас разработка управляемых преобразователей частоты тока на мощности десятки и сотни мегаватт не представляет практических проблем. Хорошо отработано векторное управление, которое является эффективным с точки зрения массо-энергетических показателей. Появились различные конструкции с эффективными магнитными системами для индуктора. Эти положительные тенденции позволяют проектировать и производить вентильные двигатели и генераторы на десятки и сотни мегаватт.

Но практика показывает, что мощные и крупногабаритные вентильные машины производят с электромагнитным возбуждением без постоянных магнитов. Это связано с технологией изготовления машин с постоянными магнитами, которые имеют большой диаметр. При сборке электрической машины, когда индуктор вставляется в якорь, возникают очень сильные магнитные тяжения. При применении мощных магнитов эти силы могут достигать нескольких тонн. Ротор притягивается к стенкам статора, и сборка становится практически невозможной. Теоретически возможно спроектировать оснастку для сборки таких электрических машин, но расчеты показывают, что стоимость этих приспособлений может в десятки раз превысить стоимость самого двигателя. Такие же проблемы возникают при разборке индуктора для регламентных и ремонтных работ.

Исследования для решения этой технологической проблемы привели к выбору и анализу вентильной машины с когтеобразными полюсами [6–8]. Конструкция индуктора с когтеобразными полюсами с постоянным магнитом представлена на рис. 2.

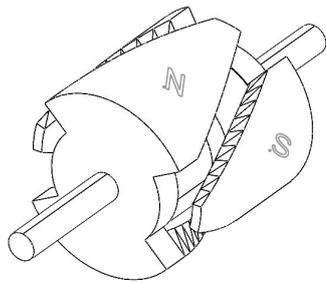


Рис. 2. Общий вид ротора с когтеобразными полюсами и постоянным магнитом

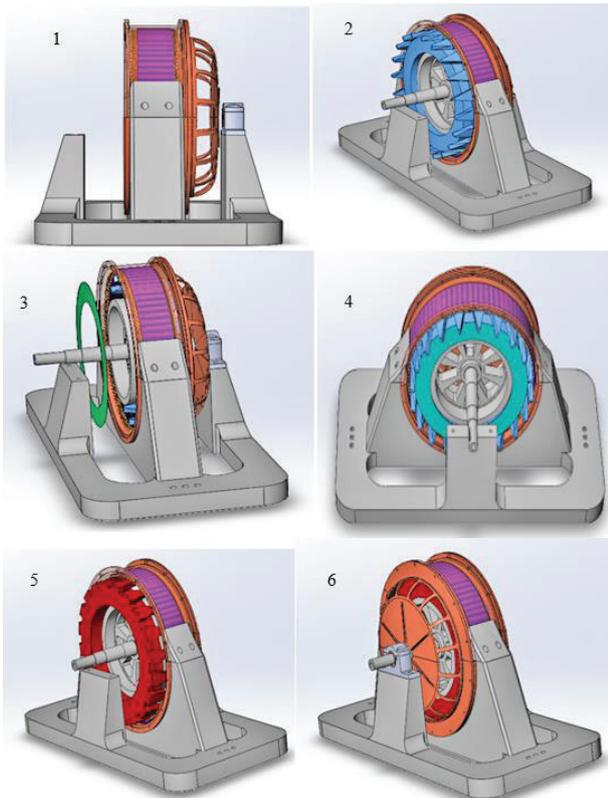


Рис. 3. Технология сборки двигателя
 1 — установка статора в сборе;
 2 — установка первой половины когтеобразного ротора;
 3, 4 — монтаж постоянного магнита;
 5 — установка второй половины когтеобразного ротора;
 6 — окончательная сборка двигателя)

Следует отметить, что магнитную систему с когтеобразными полюсами нельзя назвать эффективной. Она имеет большой поток рассеяния, который насыщает магнитопровод, но не участвует в преобразовании энергии.

При указанном недостатке такая конструкция имеет большое преимущество. Индуктор можно собрать непосредственно в самой электрической машине по частям с использованием следующей технологии:

1. Первоначально в якорь вставляется вал с нижней обоймой когтеобразных полюсов. Эта часть магнитной системы на данном этапе сборки не содержит постоянных магнитов и по этой причине не будет притягиваться к стенкам якоря.

2. На втором этапе сборки в индуктор монтируется постоянный магнит. В зависимости от габаритов он может склеиваться по отдельным частям, а может монтироваться целиком.

3. На третьем этапе в индуктор вставляется верхняя обойма с когтеобразными полюсами. Под действием электромагнитных сил постоянного магнита она должна втянуться в индуктор.

4. На последнем, заключительном, этапе монтаж подшипникового щита завершает сборку.

Технология сборки показана на рис. 3.

Такая технология сборки вентильного двигателя с когтеобразными полюсами (ВДКП) не требует дорогостоящей оснастки и специальных приспособлений и предлагается впервые.

При оптимизации геометрии и правильном выборе размеров кольцевого постоянного магнита магнитную систему можно сделать достаточно эффективной с большим рабочим магнитным потоком.

Магнитные системы с когтеобразными полюсами достаточно хорошо изучены [9–13], но это касается электрических приводов малой и средней мощности. Разработка вентильных машин на несколько мегаватт с диаметром рашотки в несколько метров является уникальной для инженерной практики. В связи с этим актуальной стала задача теоретического исследования и практического внедрения такой конструкции в реальное производство.

Постановка задачи синтеза и анализа вентильной машины с когтеобразными полюсами. Особенностью привода пильгерстана является низкая частота вращения вала при больших ударных нагрузках. Условия эксплуатации не позволяют для двигателя повышающий редуктор из-за больших динамических моментов, поэтому двигатель имеет большие габариты. Применить в данном случае теорию подобия, когда оптимально спроектированный двигатель небольшой мощности пропорционально увеличивается в размерах до заданной мощности, невозможно. В электромашиностроении такой прием не применяется. Это связано с резко нелинейными зависимостями между линейными размерами двигателя, электромагнитными нагрузками и его электромагнитной мощностью.

Проектирование двигателей большой мощности и габаритов связано с большими капитальными затратами. Невозможно проект вести по традиционному пути: создание и исследование макетного образца, опытного образца, серийного изделия. Современное развитие вычислительной техники и программного обеспечения позволяет пройти эти стадии на цифровом двойнике, прежде чем изготовить реальный двигатель. Для этого необходимо создать проектную систему синтеза оптимальной геометрии и анализа полученного электронного прототипа.

Для синтеза необходимо выбрать наиболее подходящий для данной математической модели метод нелинейного программирования.

Для более качественного анализа электрических машин этого класса можно использовать хорошо отработанные и проверенные CAE-системы, на основе метода конечных элементов, такие как Ansys Electronics Desktop.

Такая проектная система для проектирования вентильной машины с когтеобразными полюсами была создана. Функциональная схема проектной системы представлена на рис. 4.

Разделение проектной системы на две части: синтез и анализ — объясняется следующими причинами. Оптимизация геометрии предполагает большое количество итераций при изменении независимых

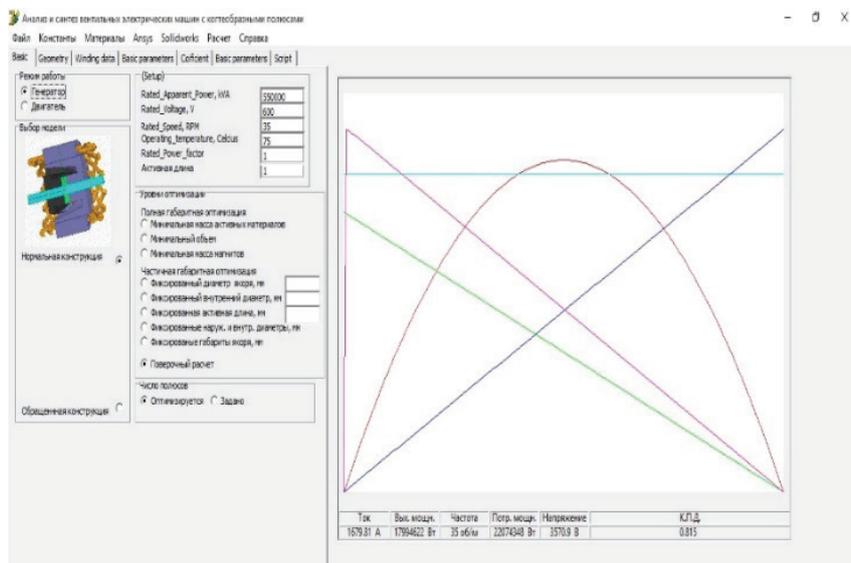


Рис. 4. Программа оптимизации геометрии вентильной машины с когтеобразной магнитной системой

переменных. Количество циклов расчета математической модели в зависимости от выбранного метода может составлять до нескольких тысяч. Понятно, что при этом методы оптимального проектирования могут работать только с очень упрощенной моделью с большим числом ограничений [14, 15]. Оставлять эту модель в качестве конечной, даже после процедуры оптимизации, нельзя из-за больших рисков по капитальным затратам на разработку конструкторско-технологической документации и изготовление образца. Необходимо тщательный анализ полученных результатов на основе более точных методик цифровых двойников. Эту задачу выполняет система анализа.

Объем статьи не позволяет подробно описать обе системы. Работа системы синтеза представлена в ряде уже опубликованных статей [16]. Кратко отметим, что в основе системы синтеза лежит метод схем замещения. Задача оптимального проектирования сформулирована в виде многоуровневой однокритериальной задачи. Для алгоритма перебора независимых переменных выбран метод, который сочетает в себе метод покоординатного спуска Гаусса – Зейделя при переходе к оптимуму с методом Фибоначчи при выборе шага. В алгоритм встроен метод штрафных функций при поиске оптимума на границе.

Построение системы анализа и результаты ее работы опишем более подробно, поскольку при ее разработке было принято несколько инновационных решений.

Как было отмечено, для системы анализа из многочисленных возможных вариантов был выбран программный комплекс Ansys Electronics Desktop [8, 17–19]. Он содержит большое количество хорошо отработанных методик типовых конструкций электрических машин. Вентильная машина с когтеобразными полюсами входит в перечень этих машин. Программный комплекс позволяет сделать предварительный анализ этой машины в режиме RMXprt. Этот режим делает расчеты на основе метода схем замещения. Для этого достаточно заполнить табличные формы с геометрией машины, материалами и параметрами номинального режима, что во многом облегчает анализ машины. При этом следует отметить, что в последней версии програм-

мы можно провести анализ только генераторного режима работы. Для привода пильгерстана требуется анализ двигательного режима работы. В силу специфики работы привода, он может существенно отличаться от генераторного режима, что приводит к техническим рискам при внедрении привода в производство.

Программный комплекс позволяет развернуть задачу в 3D модель. Программа это делает автоматически при выборе режима Create Maxwell 3D Design. Развернуть задачу анализа вентильной машины в 2D модель нет возможности, так как геометрия машины не имеет плоскую симметрию.

На этом этапе построения системы разработчики встретили очень большую проблему. Тестовые расчеты показали, что при использовании программы Ansys Electronics Desktop для 3D-модели в режиме решения переходной динамической задачи Transient для машины с когтеобразной магнитной системой ожидание результатов расчета основных характеристик составляло от 8 до 15 часов. Следует отметить, что для решения задачи применялся мощный суперкомпьютер университета. Процедура распараллеливания решения задачи на несколько ядер процессора существенным образом не улучшила результат. Одной из вероятных причин явилось то обстоятельство, что формирование расчетной сетки шло от воздушного зазора в несколько миллиметров, а габариты всего двигателя составляли более 6 метров. Генератор сеток разбивал расчетную область на очень большое количество элементов. При этом для сходимости процесса сетка многократно перестраивалась.

Из существующих типовых конструкций вентильных машин в программном комплексе Ansys Electronics Desktop, наиболее близкой к вентильному двигателю с когтеобразными полюсами оказалась конструкция вентильной машины типа BLDC с тангенциальными полюсами. Эта вентильная машина имеет аналогичный якорь. Индукторы этих машин различаются, но в индукторе отсутствуют электрические и магнитные потери. Отмеченное выше позволяет утверждать то, что в случае выбора идентичного магнитного потока в индукторе вентильной машины с тангенциальной системой возбуждения и полностью одинакового якоря можно

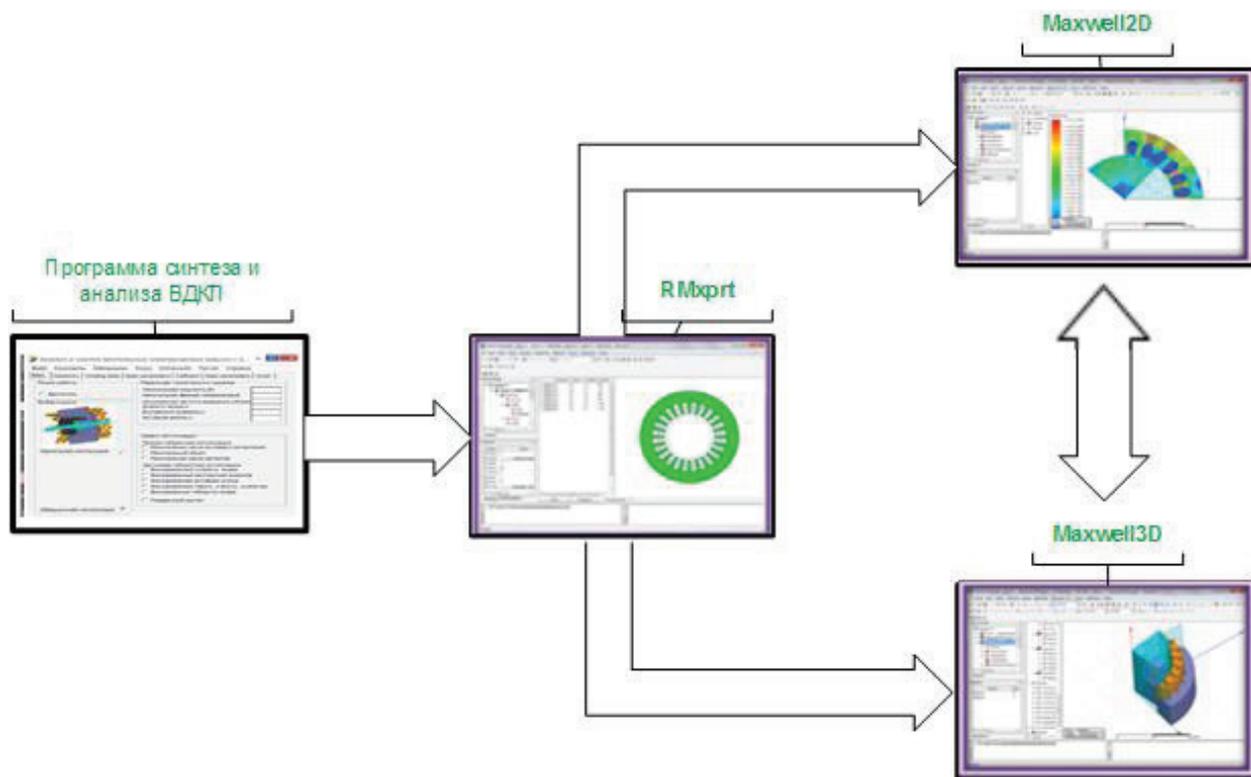


Рис. 5. Функциональная схема проектной системы для вентильной машины с когтеобразной магнитной системой

получить практически машину-близнеца для анализа основных характеристик.

При этом анализ BLDC можно проводить в двумерной постановке задачи, что сокращает время расчета до 25–45 минут.

При написании программы синтеза и анализа проектируемой электрической машины с когтеобразными полюсами обоснованные принципы замены производились на этапе синтеза и анализа, описание которого рассмотрено ниже.

Описание программного комплекса по проектированию вентильных машин с когтеобразными полюсами. Реализация задачи начинается с синтеза. На этом этапе определяется оптимальная геометрия машины и обмоточные данные реальной вентильной машины с когтеобразными полюсами. Полученные результаты расчетов оптимизации по заранее подготовленному скрипту передаются в программу Ansys Electronics Desktop. Корректность рассчитанных данных проверяется в режиме RMxprt, в котором заложена эта конструкция. Одновременно с этим проверяется точность решения оптимизационной задачи по основным параметрам (КПД, потерям, потоку в зазоре, моменту, индуцируемому ЭДС в фазах).

При расхождении отмеченных основных параметров в подсистеме синтеза и анализа, процедура повторяется с корректировкой этих данных в подсистеме синтеза, поскольку подсистема анализа считается эталонной.

После оптимизации по основным параметрам без выхода из режима RMxprt реальная машина с когтеобразными полюсами CPSM заменяется машиной-аналогом BLDC. Для замены полученные данные из модели с когтеобразными полюсами передаются в модель вентильной машины с тангенциальной системой возбуждения. При этом внутренний диаметр якоря машины BLDC подбирается таким образом, чтобы основной магнитный поток,

проходящий из ротора в статор, совпадал с магнитным потоком якоря CPSM.

Одновременно проверяем идентичность характеристик обеих машин.

После выполнения всех задач происходит автоматический переход из режима RMxprt в режим Maxwell 2D Design, в этом режиме строится геометрия машины и производится анализ по методу конечных элементов. Время вычисления параметров электромагнитного поля составляет 20–40 минут.

На заключительном этапе производится анализ трехмерной (3D) модели машины с когтеобразными полюсами CPSM с соответствующими реальными параметрами. Время расчета составляет несколько часов, но для одноразового расчета это вполне приемлемо.

Ниже показана одна из вкладок разработанной программы оптимизации, реализованной в языке программирования Delphi для примера вентильного двигателя с когтеобразной магнитной системой со следующими параметрами: 2,5 МВт, 600 В, 40 об/мин для привода пильгерстана.

На рис. 5 представлены результаты работы первого этапа (программы синтеза). Программа представляет собой авторскую разработку и написана на программном языке Delphi. Она определяет оптимальную геометрию машины по техническому заданию заказчика.

Для проверки корректности рассчитанных на этом этапе параметров они передаются в программу Ansys Electronics Desktop в режим RMxprt по заранее подготовленному скрипту.

Результаты расчета машины с когтеобразными полюсами в режиме RMxprt представлены на рис. 6.

Для получения результатов расчета данных вентильного электродвигателя с тангенциальным индуктором (BLDC) за исходные данные принимаем аналогичные параметры (размеры статора и данные его обмотки) соответствующей машины с когте-

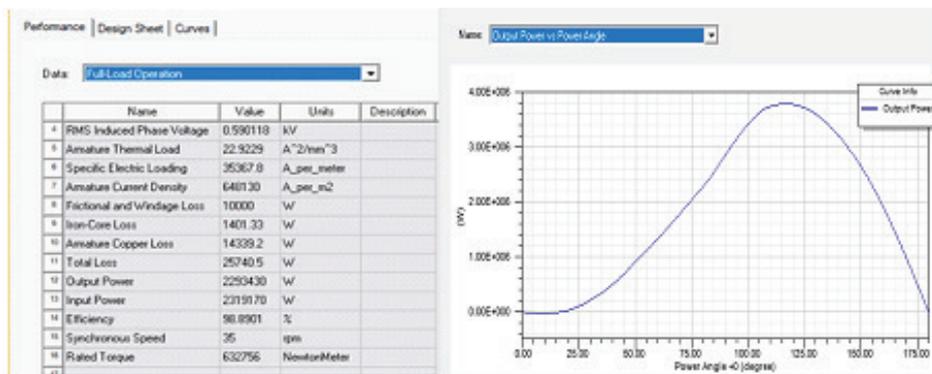


Рис. 6. Результаты расчета машины с котгеобразными полюсами в режиме RMxprt

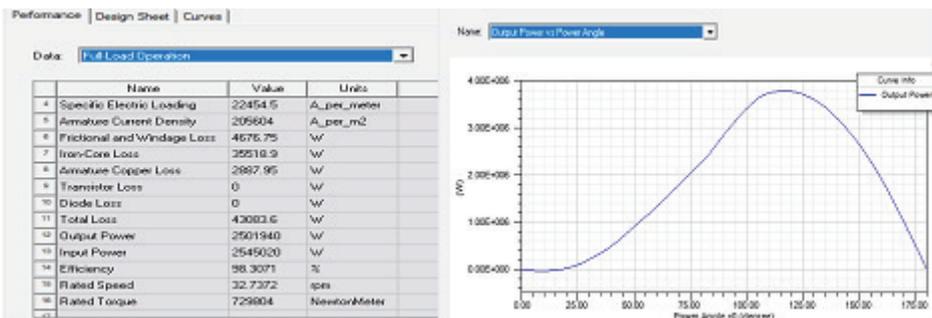


Рис. 7. Результат анализа расчётных данных вентильной машины с тангенциальной системой в режиме RMxprt

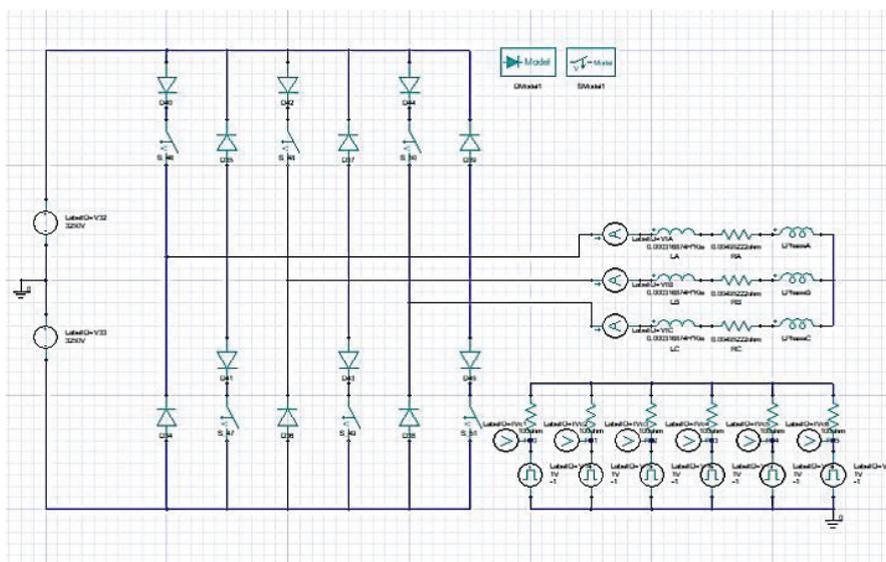
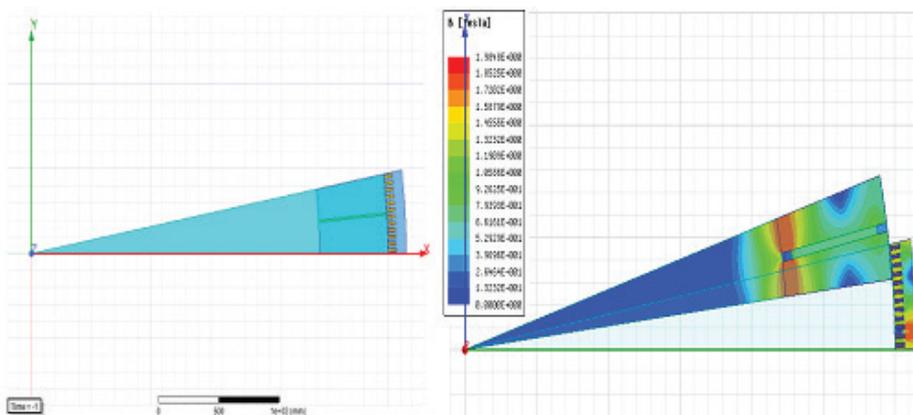


Рис. 8. Моделирование двигателя BLDC с тангенциальными магнитами в Maxwell 2D Design

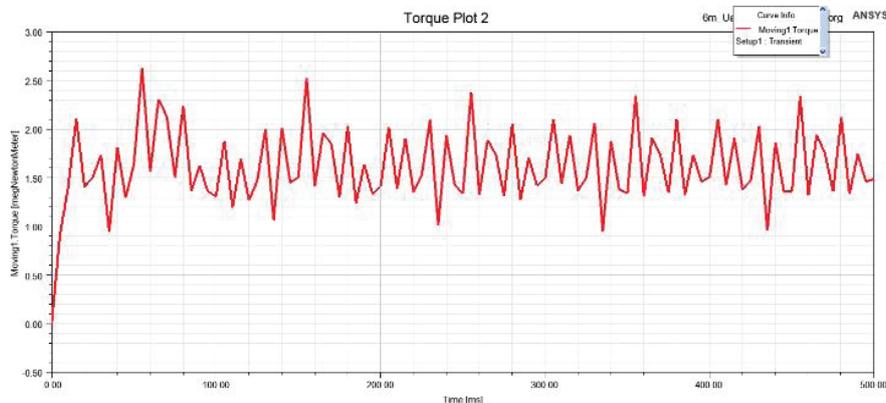


Рис. 9. Кривая электромагнитного момента

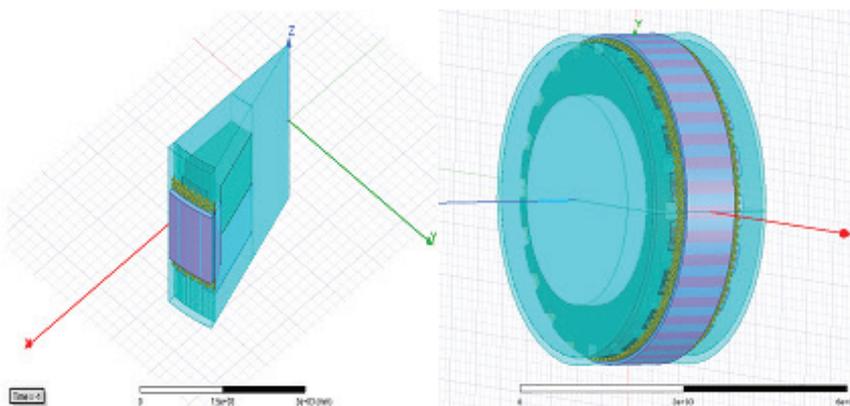


Рис. 10. 3D моделирование машины с когтеобразной магнитной системой (CPSM)

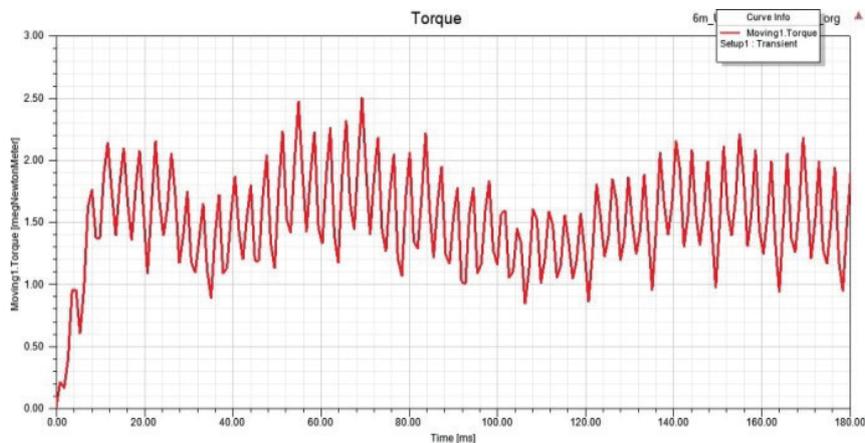


Рис. 11. Кривую электромагнитного момента машины с когтеобразной магнитной системой в трехмерной модели из режима Maxwell 3D Design

образными полюсами (CPSM). При этом магнитный поток машины-близнеца с помощью внутреннего диаметра подбираем равным магнитному потоку машины с когтеобразными полюсами (CPSM).

Результаты анализа расчётных данных вентильной машины с тангенциальной системой в режиме RMXprt представлены на рис. 7.

Последующие действия производятся в Maxwell 2D Design. Для выполнения данного действия конструкция бесщеточного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами (BLDC) разворачивается в плоскую двумерную модель. Данная модель имеет аналогию с машиной с когтеобразными полюсами, т.е. у нее такой же якорь и магнитный поток. Ими-

тирование электронной схемы для анализа характеристик осуществляется в Ansys Citrix Circuit.

Результаты моделирования двигателя BLDC с тангенциальными магнитами в Maxwell 2D Design, а также схемы её имитатора показаны на рис. 8.

Расчётная кривая электромагнитного момента представлена на рис. 9. На заключительном этапе после окончательного определения оптимальной геометрии и обмоточных данных происходит переход к режиму RMXprt для машины с когтеобразными полюсами. Из этого режима с помощью опций программы Ansys Electronics Desktop строится реальная трехмерная модель машины для окончательного анализа и построения основных характеристик.

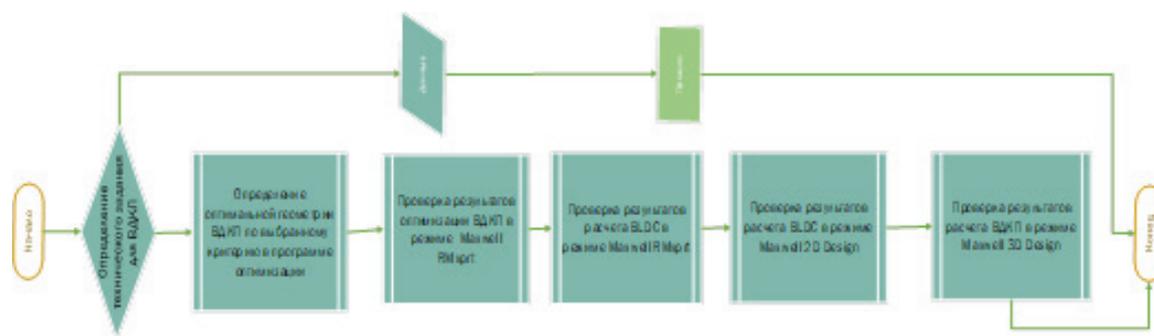


Рис. 12. Алгоритмическая схема функционирования проектной системы

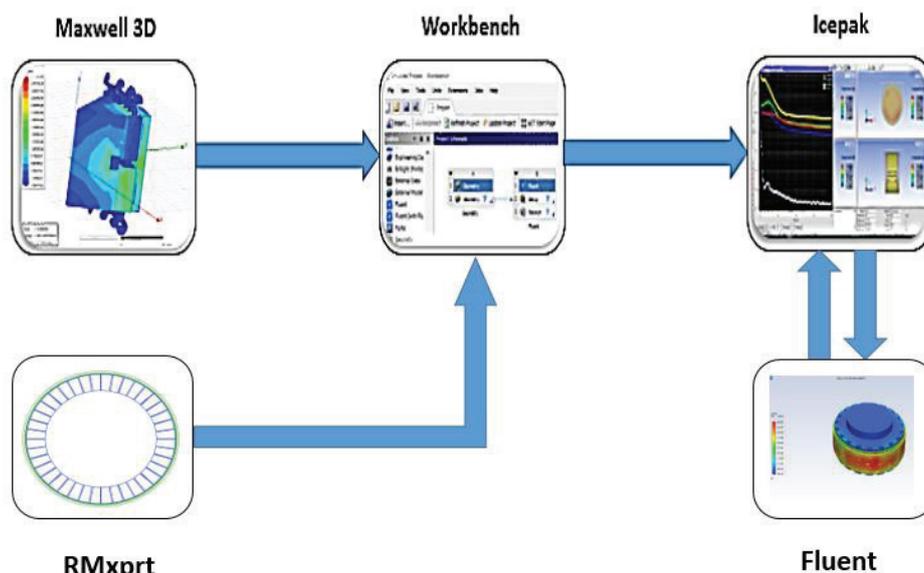


Рис. 13. Схема теплового расчета

Трехмерная модель в режиме Maxwell 3D Design показана на рис. 10.

Кривая электромагнитного момента машины с когтеобразной магнитной системой, рассчитанная для трехмерной модели в режиме Maxwell 3D Design, представлена на рис. 11.

Из рис. 10 видно, что расчетная кривая момента двигателя с когтеобразной магнитной системой (CPSM) практически совпадает с аналогичной кривой для двигателя (BLDC) (см. рис. 8).

На рис. 12 для более ясного понимания функционирования проектной системы показаны ее этапы в виде следующей алгоритмической схемы.

Таким образом, с применением данной проектной системы можно провести синтез и многоступенчатый анализ электрической машины с когтеобразной магнитной системой.

Тепловой анализ состояния ВДКП с применением программного комплекса Ansys Icepak. Расчет теплового состояния вентильных двигателей большой мощности является очень важным этапом анализа. Для его оценки требуется применение точных современных программ на основе метода конечных элементов. Эти расчеты являются трудоемкими, но они значительно уменьшают технические риски перед изготовлением опытного образца [17–19]. Следует отметить следующую положительную тенденцию при создании современных САЕ систем. Появляется возможность соединения различных программ в единую модель для решения связанной задачи через программную оболочку Ansys

Workbench. Воспользуемся этой возможностью и создадим расчетную тепловую модель по следующей расчетной схеме. Первоначально выполним расчет электромагнитного состояния ВДКП в программе Ansys Electronics Desktop. По результатам этого расчета более точно определим потери в стали и в меди обмотки якоря. Далее передадим данные в программную оболочку Workbench. Она является связующим звеном с программой теплового расчета. На следующем этапе передадим данные непосредственно в программу расчета теплового поля Icepak.

Таким образом, решаются связанная магнитодинамическая и термодинамическая задачи.

Данная расчетная схема представлена на рис. 13.

В программе Icepak производится окончательная настройка тепловой задачи:

- уточняются материалы с учетом их термодинамических свойств;
- задаются размеры области, в которой осуществляется теплообмен;
- задаются скорость охлаждающего агента и характер его движения (ламинарное, турбулентное);
- настраивается расчетная сетка.

Тепловой расчет осуществляется итерационным способом, в процессе которого уточняется сетка разбиения на конечные элементы и определяется сходимость вычислительного процесса.

В результате расчета определяется температура в каждом элементе, на которые разбита модель двигателя. Таким образом, мы можем рассчитывать поле

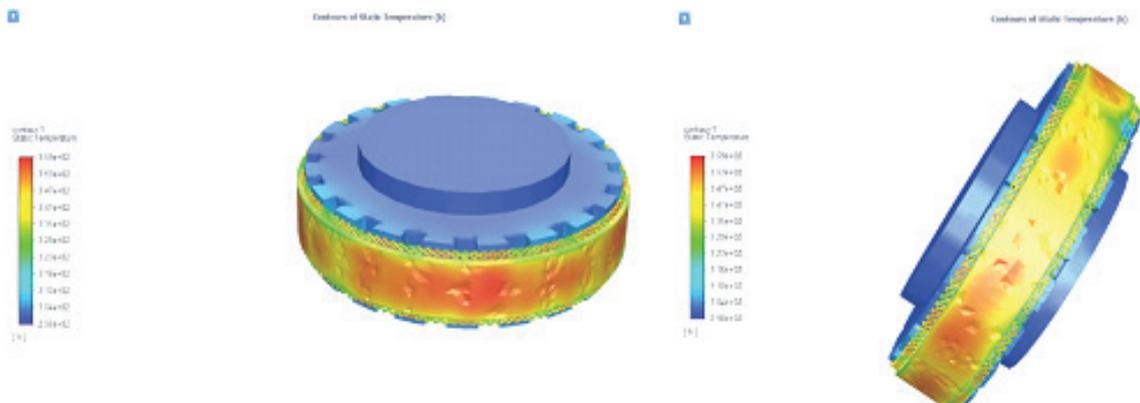


Рис. 14. Поле температур ВДКП, рассчитанное в программном комплексе Ansys Iserpak

температур в отличие от интегральной температуры, которая определяется методом эквивалентных тепловых схем замещения. Распределение температуры для 3D модели показано на рис. 14. На рисунке показана максимальная расчетная температура 359 в градусах Кельвина. При пересчете на градусы Цельсия эта величина составит 86 °С. Таким образом, тепловой расчет методом конечных элементов дает точную картину по нагреву ВДКП.

Положительные результаты моделирования окончательно снимают технические риски по результатам разработки ВДКП, что позволяет перейти к окончательному этапу — созданию трехмерной твердотельной модели и разработке конструкторской документации для создания опытного образца.

Анализ результатов. Современные прикладные программы CAE-системы позволяют рассчитывать и анализировать параметры и характеристики электрических машин.

Следует отметить, что эти программы требуют очень высокой производительности и больших ресурсов компьютера. Не каждый инженер и исследователь может позволить себе такие возможности. Одной из главных проблем в ходе вычисления является длительность процесса расчета.

Практика показывает, что разработчику электрических машин не всегда надо усложнять расчетную модель. Для получения точных результатов трехмерные объекты можно представить в виде двухмерных моделей, которые не требуют больших вычислительных ресурсов.

Данный подход был применен для вентильной машины с когтеобразной магнитной системой. После этапа синтеза, где производилась оптимизация упрощенной модели с представлением в виде схемы замещения, анализ результатов оптимизационных данных производился в программной среде Ansys Electronics Desktop, в котором последовательно решалась задача вычисления магнитного поля для двухмерной модели (Maxwell 2D Design) и трехмерной модели (Maxwell 3D Design).

Различия основных параметров (КПД, электромагнитный момент, скорость, магнитные потоки, ЭДС вращения) функциональной схемы проектной системы для вентильной машины с когтеобразной магнитной системой представлены ниже:

- погрешность между полученными расчетными параметрами в программе Delphi и RMXprt для машины с когтеобразными полюсами составила от 5 до 9 %;

- погрешность между результатами в RMXprt для машины с когтеобразными полюсами и резуль-

татов RMXprt для вентильной машины с тангенциальными магнитами составила 3–5 %;

- погрешность между результатами расчета в режиме Maxwell 2D для вентильного двигателя с тангенциальными магнитами и результатами расчета в Maxwell 3D для машины с когтеобразными полюсами составила 5–7 %;

- погрешность между результатами этапа синтеза и результатами этапа анализа в Maxwell 3D Design машины с когтеобразными полюсами составила 9–12 %.

Полученную точность расчета для такой сложной магнитной системы, как машина с когтеобразными полюсами, следует признать хорошим результатом. Такой подход можно рекомендовать для разработки других типов электрических машин, не имеющих плоскую симметрию.

Заключение. Морально и физически устаревшее оборудование металлургического производства требует замены на приводы, в которых заложены инновационные решения. Вложенные в модернизацию средства достаточно долго окупаются, и далеко не каждое производство может позволить себе его частую замену. В связи с этим возникает задача внедрения передовых инновационных решений, которые будут работать длительное время.

В статье предложено техническое решение, которое в мире еще не применялось. В качестве приводного двигателя для привода пильгерстана по производству бесшовных труб предлагается применить тихоходный безредукторный вентильный двигатель большого диаметра и требуемой инерционной массой с когтеобразными полюсами и мощным постоянным магнитом. Такое решение позволяет убрать существующий 120-тонный маховик, уменьшив габариты, поскольку необходимая инерционная масса заложена в ротор, повысить КПД за счет исключения потерь на возбуждение, снизить эксплуатационные затраты за счет отсутствия коллекторного узла. Данное предложение содержит большое количество технических рисков. Для их уменьшения была разработана проектная система по созданию электрических машин этого класса. Система содержит две основные части: подсистему синтеза и подсистему анализа. Подсистема синтеза определяет оптимальную геометрию машины на основе реализации задачи многоуровневой однокритериальной оптимизации, построенной на основе метода Гаусса–Зейделя, метода Фибоначчи и метода штрафных функций. Подсистема анализа представляет собой многоэтапный процесс с использованием хорошо зарекомендовавшего себя CAE комплекса Ansys

Electronics Desktop. При этом используются минимальные компьютерные ресурсы и расчетное время, поскольку на промежуточном этапе анализируется плоская задача и только на заключительном этапе трехмерная задача. Также тепловой анализ трехмерной модели машины методом конечных элементов в программе Ansys Icerak подтвердил возможность применения ВДКП в качестве привода пильгерстана.

Проектная система активно использовалась при разработке привода пильгерстана по производству бесшовных труб Челябинского трубопрокатного завода.

Благодарности

Работа выполнена в ЮУрГУ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00327). Автор благодарит руководство университета за возможность провести данное исследование.

Библиографический список

- Desanti A. F., Sidharta I., Erwantono H. [et al.]. Design of Performance and Parameter Measurement System for Brushless Direct Current (BLDC) Motor // 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2018: proc. P. 175–179. DOI: 10.1109/ISITIA.2018.8710896.
- Park H.-S., Park S.-W., Kim D.-Y. [et al.]. Hybrid phase excitation method for improving efficiency of 7-phase BLDC motors for ship propulsion systems // Journal of Power Electronics. 2019. Vol. 19, Issue 3. P. 761–770. DOI: 10.6113/JPE.2019.19.3.761.
- 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 2018: proc. P. 282–287. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544320.
- Ганджа С. А., Косимов Б. И., Аминов Д. С. Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 1. С. 5–17. DOI: 10.14529/power190101.
- Ганджа С. А., Косимов Б. И., Аминов Д. С. [и др.]. Сравнительный анализ электродвигателей привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб. Выбор оптимальной конструкции // Вестник ПНИПУ Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 79–101.
- Omri R., Ibala A., Masmoudi A. Characterization on the no-and on-load operations of an improved claw pole machine // 13th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies. 2018. P. 1–8. DOI: 10.1109/EVER.2018.8362336.
- Rebhi R., Ibala A., Masmoudi A. MEC-based sizing of a hybrid-excited claw pole alternator // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, Issue 1. P. 211–223. DOI: 10.1109/TIA.2014.2331418.
- Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Development of engineering method for calculation of magnetic systems for brushless motors based on finite element method // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742976.
- Zhang F. G., Bai H.-J., Liu Y. Leakage magnetic calculation on claw pole machine with outer permanent magnet rotor // Dianji yu Kongzhi Xuebao/Electric Machines and Control. 2009. Vol. 13, Issue 4. P. 548–552.
- Njeh A., Trabelsi H. New design of the claw-pole transverse flux permanent magnet machine // 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2018. 2018. P. 1311–1316. DOI: 10.1109/SSD.2018.8570579.
- Bai H., Pekarek S. D., Tichenor J. [et al.]. Analytical derivation of a coupled-circuit model of a claw-pole alternator with concentrated stator windings // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2002. Vol. 17, Issue 1. P. 32–38. DOI: 10.1109/60.986434.
- Cristian B., Constantin O., Chiver O. [et al.]. The advantages of numerical analysis for claw pole alternator // Proc. of the 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2014. P. 353–357. DOI: 10.1109/ICEPE.2014.6969928.
- Jurca F., Martis C. Claw-Pole generator parameters and steady-state performances analysis // International Review on Modelling and Simulations. 2013. Vol. 6, Issue 1. P. 41–48.
- Bramerdorfer G. Tolerance Analysis for Electric Machine Design Optimization: Classification, Modeling and Evaluation, and Example // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55, Issue 8. 8688464. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2903029.
- Wang Q., Li J., Qu R., Lu Y. Design and Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Machine for Low Vibration and Noise Applications // ICEMS 2018 — 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. 2018. P. 280–284. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549128.
- Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019. 19080051. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877650.
- Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. [et al.]. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. 8570132. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
- Zheng P., Wu Q., Zhao J. [et al.]. Performance analysis and simulation of novel brushless double rotor machine for power-split HEV Applications // Energies. 2012. Vol. 5, Issue 1. P. 119–137. DOI: 10.3390/en5010119.
- Gandzha S., Kosimov B., Aminov D. Application of the Ansys Electronics Desktop Software Package for Analysis of Claw-Pole Synchronous Motor // Machines. 2019. Vol. 7, Issue 4. DOI: 10.3390/machines7040065.

КОСИМОВ Бахтиёр Исмагуллоевич, ассистент кафедры «Электрические станции» Института энергетики Таджикистана, г. Курган-Тюбе, Таджикистан; инженер-исследователь, аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-уральского государственного университета, г. Челябинск.
SPIN-код: 6308-2390
AuthorID (РИНЦ): 899807
ORCID: 0000-0001-8807-3260
AuthorID (SCOPUS): 57205378323
Адрес для переписки: kosimov.energy@mail.ru

Для цитирования

Косимов Б. И. Применение программного комплекса ANSYS для электромагнитного и теплового анализа электродвигателя привода пильгерстана технологии изготовления бесшовных труб // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 57–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-57-66.

Статья поступила в редакцию 07.07.2020 г.
© Б. И. Косимов