

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

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

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья посвящена выбору оптимального варианта электродвигателя для привода пильгерстана, производящего бесшовные трубы большого диаметра. Представлены четыре группы вариантов: с использованием высокоскоростного электродвигателя с редуктором, с применением тихоходного электродвигателя без редуктора, заменяющего существующий электродвигатель, с использованием маховика в качестве ротора нового электродвигателя, с исключением маховика и заменой его на электродвигатель с эквивалентной инерционной массой. Для всех вариантов была использована программа точного расчета электрических машин на основе метода конечных элементов ANSYS Electronics Desktop. Проведен сравнительный анализ выбранных вариантов. В качестве показателей наилучшего варианта были выбраны минимальный расход активных материалов и энергетические показатели. Для замены существующего морально и физически устаревшего коллекторного электродвигателя постоянного тока предложен привод на базе вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами, который имеет более высокую надежность за счет бесконтактного токоподвода, минимальный расход меди, лучшие энергетические показатели, за счет исключения потерь на возбуждение.

Ключевые слова: пильгерстан, асинхронный электродвигатель, синхронный электродвигатель, тихоходный электродвигатель, вентильный электродвигатель, постоянные магниты, электромагнитное возбуждение, когтеобразные полюса.

Введение

Совершенствование технологии трубопрокатного производства является весьма актуальной задачей для Российской Федерации, поскольку отрасль нефтегазодобычи является бюджетообразующей для страны. Среди разнообразной номенклатуры труб наиболее надежными являются бесшовные трубы. Бесшовные трубы изготавливают разными способами. Пилигримовые станы (пильгерстаны) – двухвалковые трубопрокатные станы для периодической прокатки труб в валках с переменным калибром, являются одним из способов производства таких труб. Конструкция пилигримового стана представляет собой двухвалковую клетку с калибром переменного сечения и подающий механизм. Валки вращаются в противоположном движению заготовки направлении. Металл обжимается в калибре переменного сечения за полуоборот валков. Пилигримовый способ относится к наиболее экономичным и универсальным способам производства бесшовных труб, так как переход на другой размер труб на пильгерстане занимает значительно меньше времени, чем, например, на непрерывном многоклетьевом стане. Поэтому, несмотря на востребованность новых технологий проката, производство труб на пилигримовых агрегатах продолжает оставаться одним из самых перспективных в мире для получения горячеката-

ных труб широкого сортамента по размерам и маркам сталей. В настоящее время эта технология уникальна. Всего три предприятия России имеют действующие пилигримовые производства: Северский трубный завод (пос. Полевской), Первоуральский новотрубный завод (г. Первоуральск), Челябинский трубопрокатный завод (г. Челябинск).

На Челябинском трубопрокатном заводе (ЧТПЗ) пилигримовый стан эксплуатируется с 1928 г. В качестве приводного электродвигателя для стана используется коллекторный электродвигатель постоянного тока GM 900/100 фирмы Siemens со следующими основными параметрами: номинальная мощность 2,75 МВт, номинальное напряжение питания 6 кВ постоянного тока, номинальная частота вращения 35 об/мин. Электродвигатель вращает маховик диаметром 9 м с большой инерционной массой 120 т. Привод параллельно работает на два цеха по производству бесшовных труб. Фотография электродвигателя и маховика приведена на рис. 1.

Длительная эксплуатация привода привела к его физическому и моральному износу. На валу образовались микротрещины, которые могут при ударной нагрузке привести к его разрушению. Коллектор, обмотка возбуждения, обмотка якоря, подшипниковые узлы требуют периодического ремонта и постоянного дорогостоящего обслуживания.



Рис. 1. Электродвигатель, маховик и подшипник пильгерстана ЧТПЗ

На предприятии планируется замена существующего электродвигателя, на более современный, надежный и экономичный вариант бесконтактного электродвигателя.

Данная статья посвящена этой актуальной для предприятия теме: выбору оптимального варианта электродвигателя для привода пильгерстана ЧТПЗ. Анализ силовой электроники и системы управления к приводу представляет собой отдельное исследование, которое будет представлено в последующих публикациях.

1. Требования, предъявляемые к модернизированному приводу

При модернизации основные узлы и агрегаты привода по условию предприятия должны остаться без изменений (двухвалковая клеть с калибром переменного сечения и подающий механизм). Планируется замена только электродвигателя и, возможно, маховика.

К новому приводу руководством предприятия были сформулированы следующие основные требования:

- привод должен вписаться в габариты помещения, в котором находится существующий агрегат. План размещения привода представлен на рис. 2;

- для повышения надежности и снижения эксплуатационных затрат привод должен иметь бесконтактный токоподвод;

- привод должен иметь возможность регулировки частоты вращения в диапазоне 30–45 об/мин для прокатки труб разных диаметров из различных сталей, при этом заказчик требует обеспечить постоянство частоты вращения без ее динамического регулирования;

- необходимо проработать вариант разделения существующего привода, обслуживающего параллельно два цеха, то есть на два независимых привода меньшей мощности. При этом упростятся регламентные работы по обслуживанию и ремонту;

- необходимо улучшить КПД привода для снижения эксплуатационных потерь;

- необходимо предусмотреть минимальные сроки демонтажа старого привода и замену его новым приводом. Прерывать на долгий срок действующую технологическую линию недопустимо;

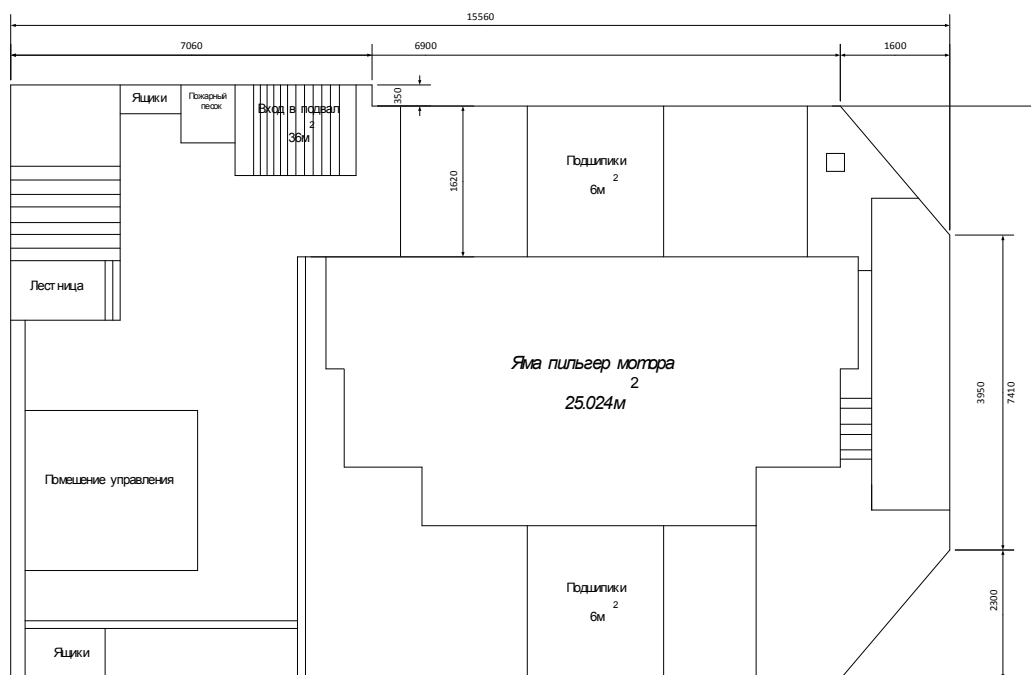


Рис. 2. План размещения существующего привода

– электродвигатель и система управления должны иметь минимально возможную стоимость.

2. Постановка задачи

Жесткие и противоречивые требования заказчика заставляют рассмотреть наибольшее количество возможных конструктивных исполнений.

Класс реактивных электродвигателей [1–6] был исключен из рассмотрения на начальном этапе, так как эти электрические машины в одинаковых габаритах и при одноклассовых условиях эксплуатации проигрывают машинам с активным возбуждением по КПД и другим энергетическим показателям, что теоретически подтверждено и доказано в классическом курсе электрических машин [7–9].

Исходя из принципа действия, предлагается рассмотреть следующие группы вариантов.

Первая группа вариантов связана с использованием высокоскоростного электродвигателя и понижающего редуктора.

Вторая группа вариантов связана с использованием прямого безредукторного привода и низкоскоростного электродвигателя. В качестве низкоскоростного бесконтактного электродвигателя возможны варианты асинхронного, синхронного или вентильного электродвигателей [10–19, 21, 22].

Ниже приводится список вариантов, которые были проанализированы.

1. Высокоскоростной асинхронный электродвигатель с редуктором 2750 кВт.

2. Замена существующего электродвигателя постоянного тока на варианты:

- асинхронный электродвигатель 2750 кВт;
- синхронный электродвигатель 2750 кВт.

3. Встраивание нового электродвигателя в маховик:

- асинхронный радиальный электродвигатель 2750 кВт;
- асинхронный торцевой электродвигатель 2750 кВт.

4. Исключение маховика и замена его электродвигателем большого диаметра с эквивалентной инерционной массой:

- асинхронный электродвигатель 1375 кВт;
- синхронный электродвигатель с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами 1375 кВт.

Таким образом, необходимо провести анализ выбранных вариантов, с точки зрения их эффективности по потребляемой энергии при минимальных затратах на замену существующего привода.

Рассмотрим последовательно все перечисленные варианты.

3. Вариант редукторного привода с высокоскоростным асинхронным электродвигателем 2750 кВт

Для данного варианта используются высокоскоростной малогабаритный электродвигатель и

понижающий редуктор с передаточным числом 1 : 100. В качестве элемента редуктора можно применить существующий маховик, если на его наружном диаметре сделать зубья (или использовать накладку с зубьями).

Преимущество этого варианта заключается в возможности поставки готового серийного высокоскоростного электродвигателя как покупного изделия. При этом не требуется затрат на его разработку и изготовление.

Недостатками данного варианта являются:

- изготовление нового редуктора, который, как показал проведенный поиск по сети Internet, приобрести в качестве комплектующего компонента невозможно;
- необходимость смазки и обслуживания крупногабаритного редуктора;
- снижение долговечности редуктора из-за больших нагрузок и больших моментов;
- отсутствие места в существующем цехе для второго привода.

Для большей наглядности варианта на рис. 3 представлена его трехмерная модель.

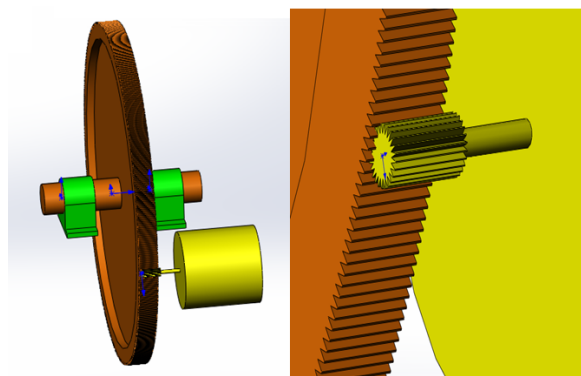


Рис. 3. Трехмерная модель редукторного привода

Следует отметить, что данный вариант рассматривался техническими специалистами предприятия. Был даже закуплен серийный асинхронный электродвигатель, но в дальнейшем этот вариант был отклонен из-за перечисленных выше недостатков: невозможности обеспечить смазку открытых шестерен, недолговечности и ненадежности работы зубьев при больших ударных нагрузках.

4. Варианты прямого безредукторного привода

Для вариантов прямого привода необходима разработка нового электродвигателя, поскольку скоростные и нагрузочные параметры привода уникальны и не существуют под эти характеристики производства серийных электродвигателей. Все нижеприведенные варианты электродвигателей были рассчитаны на кафедре теоретических основ электротехники ЮУрГУ с применением лицензионной программы Ansys Electronics Desktop [20].

Замена существующего электродвигателя на асинхронный электродвигатель 2750 кВт, 600 В, 35 об/мин

Преимуществом данного варианта является использование существующего маховика и стояковых подшипников, при этом заменяется только сам электродвигатель. Это во многом экономит средства на модернизацию.

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются хорошо изученными и широко распространенными электродвигателями в современных системах электрического привода [7–9]. При наличии современной системы управления асинхронные электродвигатели не уступают по регулировочным свойствам как электродвигателям постоянного тока, так и другим типам электродвигателей. Однако такие машины имеют худшие массогабаритные показатели, чем рассматриваемые ниже синхронные машины с постоянными магнитами и вентильные электродвигатели [7–9, 12–14], поскольку возбуждение электродвигателя осуществляется обмоткой статора, и, соответственно, эта обмотка должна иметь больший объем.

На рис. 4 показана трехмерная модель активных частей асинхронного электродвигателя и результаты расчёта его энергетических параметров.

Электродвигатель имеет габариты существующего электродвигателя постоянного тока (около 6 м по наружному диаметру).

Покажем преимущества данного варианта:

- электродвигатель вписывается в существующие габариты электродвигателя постоянного тока;
- электродвигатель имеет бесконтактный токоподвод, то есть обладает высокой надежностью, как все асинхронные электродвигатели.

К недостаткам данного варианта следует отнести следующее обстоятельство: электродвигатель имеет не очень высокие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности). При больших номинальных мощностях и длительной непрерывной работе это приведет к повышенным затратам на эксплуатацию привода.

Замена существующего электродвигателя на синхронный электродвигатель с электромагнитным возбуждением 2750 кВт, 600 В, 35 об/мин

Как и для предыдущего рассмотренного варианта, замене подвергается только электродвигатель. Маховик и подшипники остаются без изменений. Данный вариант был проанализирован потому, что из теории электрических машин хорошо известно, что синхронный электродвигатель, при прочих равных условиях, имеет лучшие удельные показатели по сравнению с асинхронным электродвигателем. Он имеет высокую перегрузочную способность и жесткую механическую характеристику, слабо зависящую от напряжения питания и нагрузки [12, 13]. На рис. 5 приведена конструкция электродвигателя и показаны укрупненно фрагменты основных конструктивных элементов.

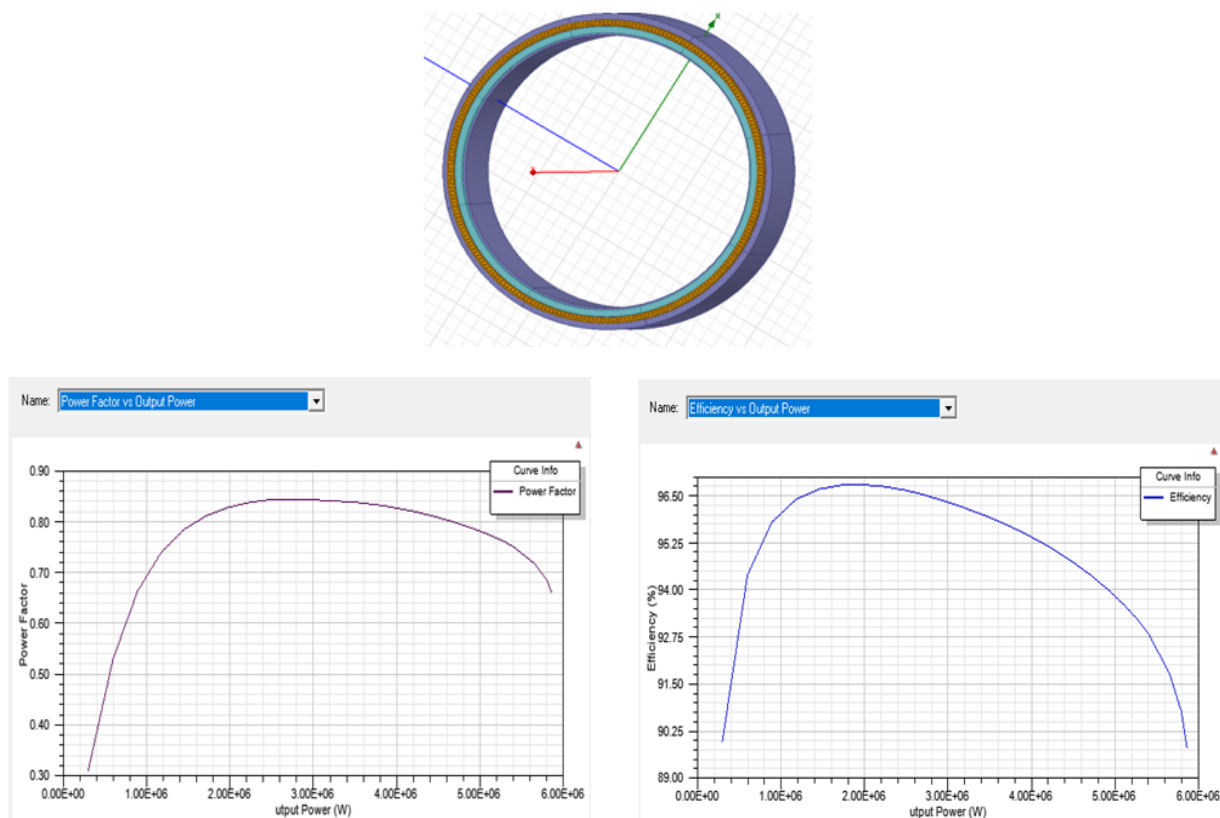


Рис. 4. Трехмерная модель активных частей асинхронного электродвигателя, коэффициент мощности и КПД

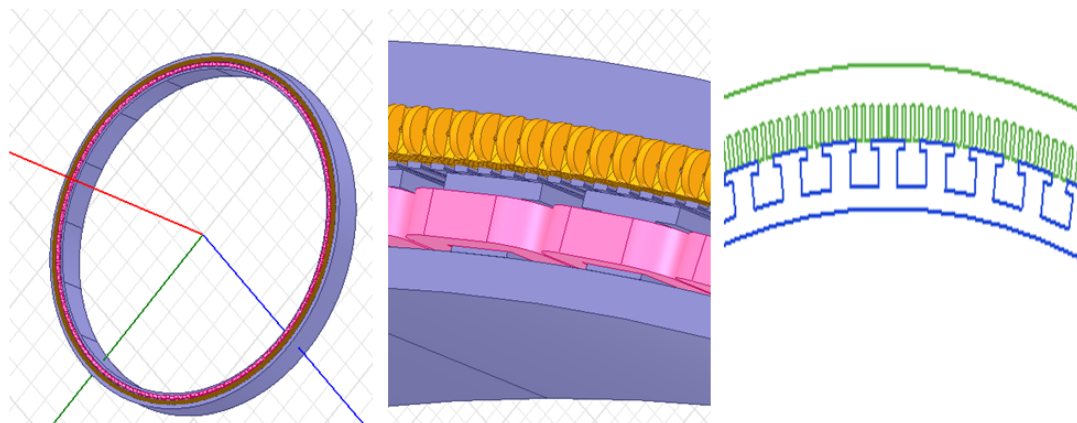


Рис. 5. Конструкция синхронного электродвигателя с электромагнитным возбуждением

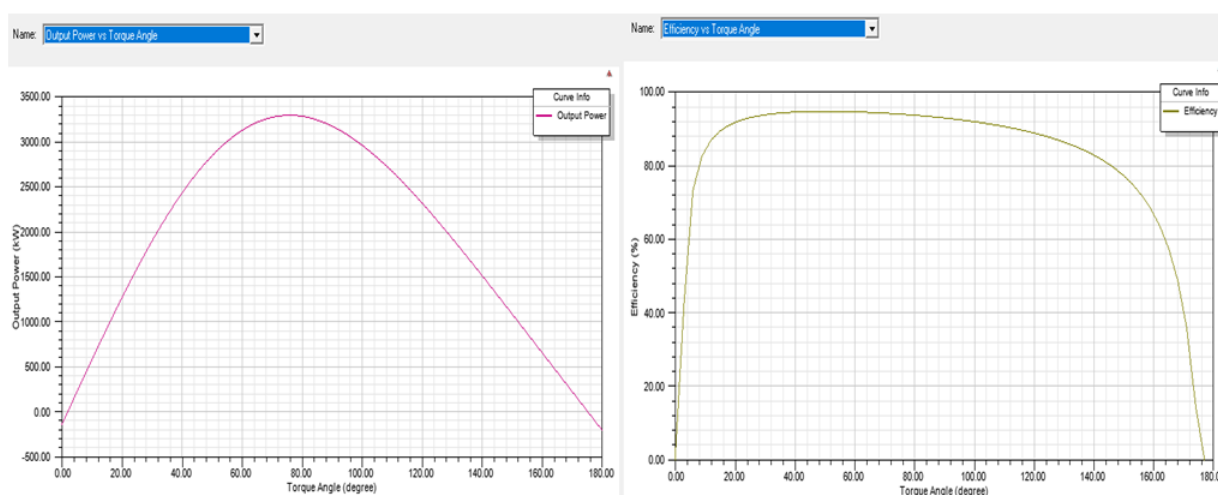


Рис. 6. Зависимость мощности и КПД от угла нагрузки

На рис. 6 представлены зависимости выходной мощности и КПД электродвигателя.

Отметим достоинства этого варианта:

- электродвигатель вписывается в существующие габариты электродвигателя постоянного тока;

- электродвигатель имеет улучшенные энергетические показатели: КПД и коэффициент мощности.

К недостаткам варианта следует отнести следующее:

- электродвигатель имеет контактный токоподвод для возбуждения, что снижает надежность и требует дополнительного обслуживания;

- электродвигатель имеет габариты, не позволяющие разместить такой же второй независимый привод.

5. Варианты электродвигателей, которые используют существующий маховик в качестве ротора электродвигателя

Известно, что мощность электродвигателя зависит от диаметра в квадрате [7]. Большие габариты маховика (9 м) позволяют рассмотреть возмож-

ность использовать его в качестве ротора электродвигателя. Этот вариант привлекателен тем, что можно практически не останавливать производство, ведя монтаж в цехе нового электродвигателя вокруг маховика и эксплуатируя старый электродвигатель. При этом снижаются технические риски на случай, если новый электродвигатель не подтвердит свои характеристики.

В этой группе вариантов рассмотрим радиальное исполнение и торцевое исполнение электродвигателей. Из-за сложности монтажа ротора с постоянными магнитами, обусловленного односторонним магнитным тяжением, синхронные электродвигатели были исключены из рассмотрения.

Радиальный асинхронный электродвигатель 2750 кВт, 600 В, 35 об/мин, встраиваемый в существующий маховик

Максимальное радиальное биение маховика по замерам специалистов завода составило 10 мм. Это обстоятельство необходимо было учесть при выборе воздушного зазора.

На рис. 7 показана трехмерная модель варианта. Результаты расчета электродвигателя представлены на рис. 8.

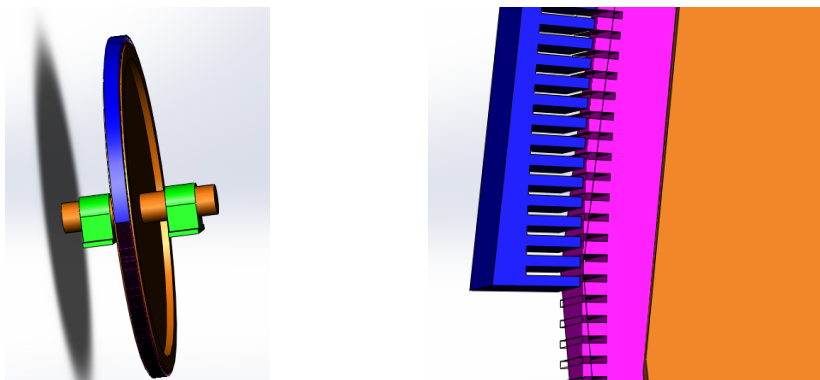


Рис. 7. Трехмерная модель асинхронного электродвигателя, встроенного в маховик

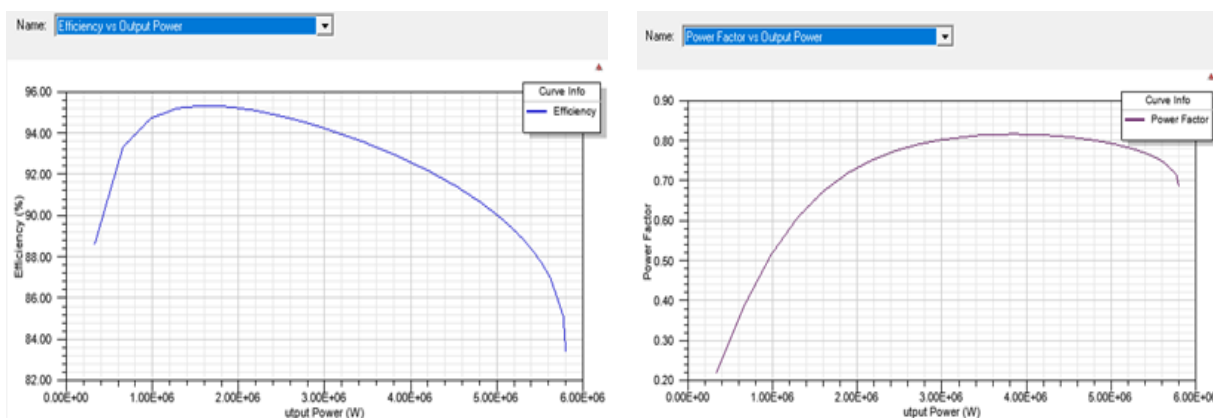


Рис. 8. Коэффициент мощности и КПД радиального асинхронного электродвигателя 2750 кВт, встраиваемого в маховик

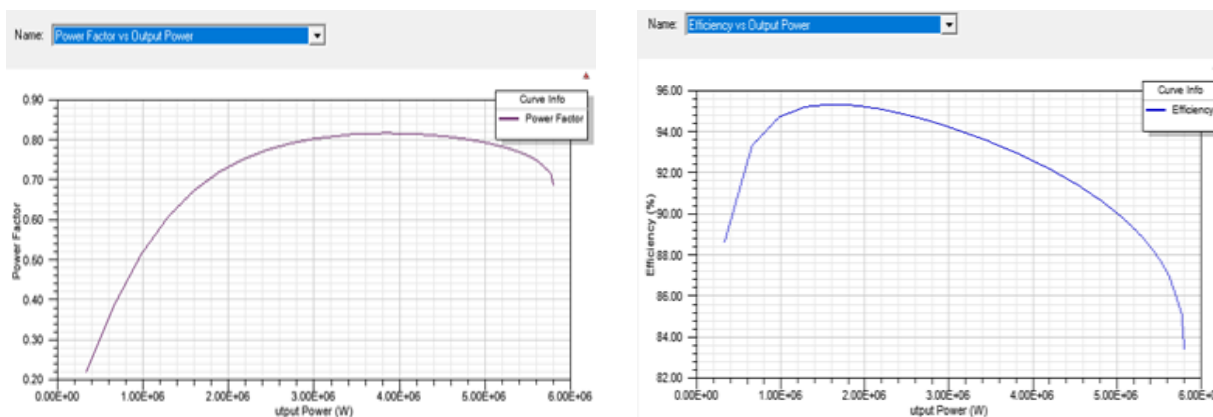
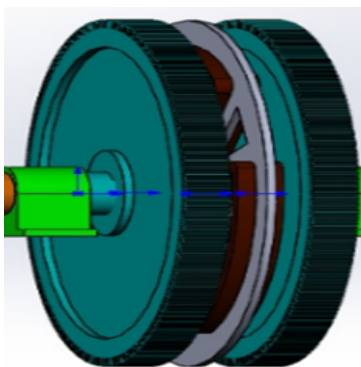


Рис. 9. Трехмерная модель, коэффициент мощности и КПД асинхронного электродвигателя 2750 кВт, встраиваемого в маховик

Вариант имеет следующие основные достоинства:

- минимальные затраты на электродвигатель, так как для монтажа используются существующие детали;
- габариты позволяют разместить два независимых привода;
- вариант имеет небольшие технические риски, так как в случае невыполнения им своих функций остается работоспособным старый привод.

К недостаткам варианта следует отнести следующее:

- существующие замеренные биения заставляют делать большой воздушный зазор. Это снижает коэффициент мощности, что приводит к увеличению намагничивающего тока, повышению электрических потерь, снижению КПД;
- большая трудоемкость монтажа электродвигателя из сегментов на рабочем месте, сложность регулировки воздушного зазора.

Торцевой асинхронный электродвигатель 2750 кВт, 600 В, 35 об/мин, встраиваемый в существующий маховик

Большой диаметр маховика позволяет рассмотреть возможность встраивания в него торцевого электродвигателя. Особенностью торцевых машин является сильное одностороннее осевое тяжение, которое приводит к дополнительной на-

грузке на подшипники [16–19]. Для исключения этого фактора было принято решение использовать два торцевых электродвигателя, которые располагаются с двух сторон маховика и взаимно компенсируют это осевое тяжение.

Результаты расчета торцевых асинхронных электродвигателей представлены на рис. 9. Воздушный зазор был принят 10 мм, поскольку замеры торцевого биения маховика составили 6 мм.

Торцевой электродвигатель имеет аналогичные характеристики по сравнению с радиальным электродвигателем и такие же достоинства и недостатки.

6. Исключение маховика и замена его электродвигателем большого диаметра с эквивалентной инерционной массой

Преимущество данных электродвигателей заключается в том, что они изготавливаются и испытываются на специализированных предприятиях. При этом технические риски изготовления электродвигателя с несоответствующими параметрами сводятся к минимуму. Кроме этого, исключение маховика как отдельного конструктивного элемента позволяет экономить место для монтажа и в результате разместить два независимых привода.

Асинхронный электродвигатель 1375 кВт с эквивалентной инерционной массой

Результаты анализа данного варианта представлены на рис. 10, 11.

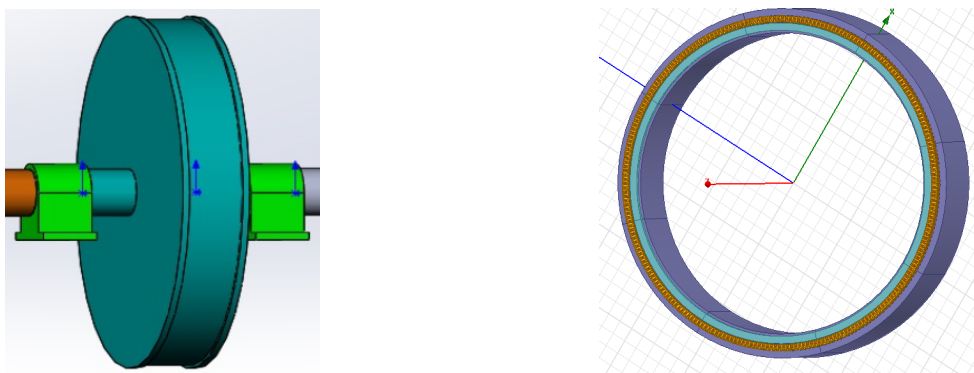


Рис. 10. Трехмерная модель асинхронного электродвигателя 1375 кВт и его активных частей

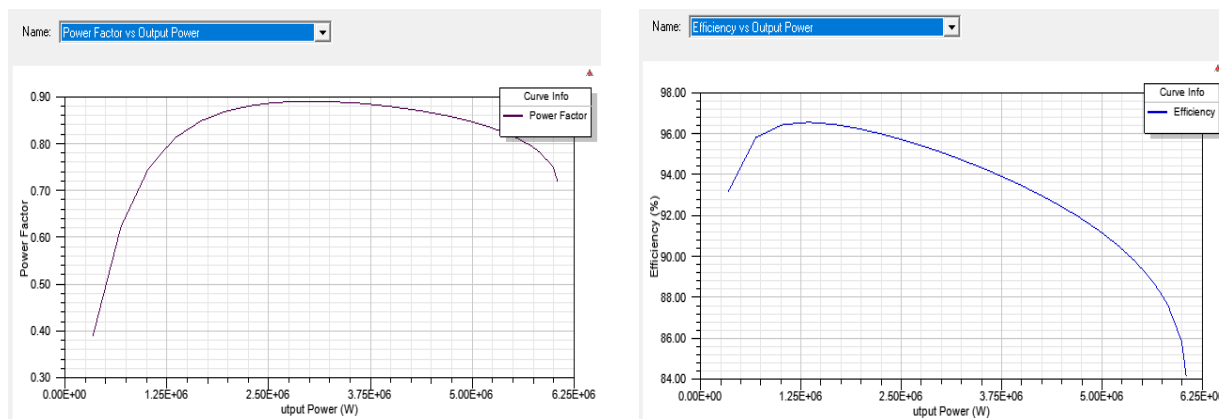


Рис. 11. Коэффициент мощности и КПД асинхронного электродвигателя с эквивалентной инерционной массой 1375 кВт

Достоинства варианта:

- электродвигатель изготавливается на специализированном предприятии с гарантией, поставляется как готовое комплектующее изделие;
- габариты позволяют разместить второй независимый привод;
- электродвигатель имеет закрытое исполнение, что уменьшает шум, повышает безопасность и надежность;
- асинхронные электродвигатели на данную мощность могут изготовить в Челябинске на предприятии АО «Российские электрические электродвигатели» (АО «РЭД»), которое имеет для этого все необходимое технологическое оборудование.

К недостатку варианта следует отнести низкий коэффициент мощности, что приводит к увеличению намагничивающего тока, увеличению потерь и снижению КПД.

Вентильный электродвигатель с постоянными магнитами с когтеобразными полюсами 1375 кВт с эквивалентной инерционной массой

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами находят применение в качестве приводов на промышленных предприятиях. Данные электродвигатели обладают высокими КПД, перегрузочной способностью, массогабаритными показателями, коэффициентом мощности ($\cos \varphi > 0,95$) [9] и жесткими механическими характеристиками.

Существенный недостаток магнитоэлектрических вентильных машин заключается в сложности сборки статора и ротора из-за наличия мощных высококоэрцитивных постоянных магнитов. Одностороннее магнитное тяжение для крупногабаритных машин может составлять несколько тонн, что делает сборку технологически невозможной.

Следует отметить, что конструкция машин с когтеобразными полюсами может решить эту техническую проблему. Для этого необходимо организовать сборку по следующей технологической цепочке:

- в статор ставится первая деталь когтеобразных полюсов в своих подшипниках. Эта деталь размещается внутри статора без постоянных магнитов. При этом одностороннее тяжение ротора к статору отсутствует;
- в эту деталь вклеиваются постоянные магниты. Появляется тяжение ротора к статору, но оно компенсируется подшипниками;
- на заключительном этапе сборки встраивается вторая деталь когтеобразных полюсов. Под действием магнитных сил она втягивается в ротор, завершая сборку.

Электродвигатель не требует мощности для создания возбуждения, поэтому имеет наивысший КПД.

На рис. 12, 13 представлены трехмерная модель электродвигателя и его активных частей, а также его основные характеристики.

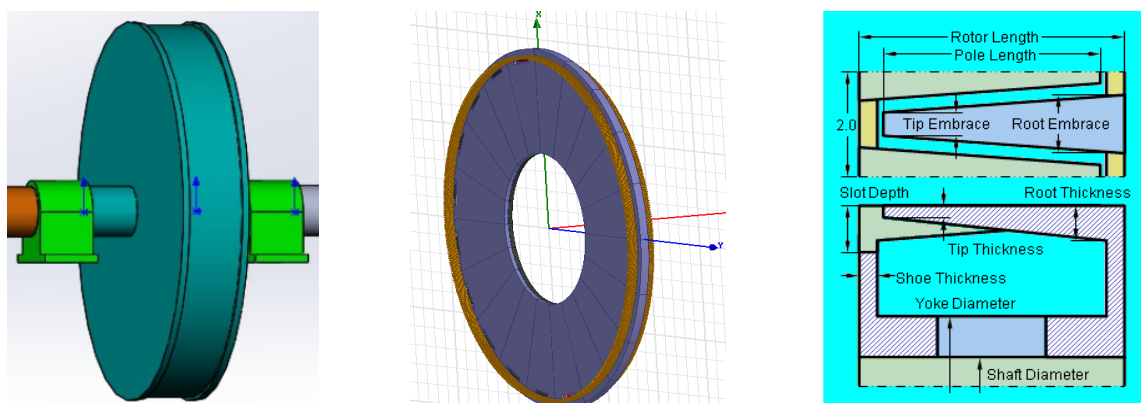


Рис. 12. Трехмерная модель и геометрия синхронного электродвигателя с когтеобразными полюсами 1375 кВт с эквивалентной инерционной массой

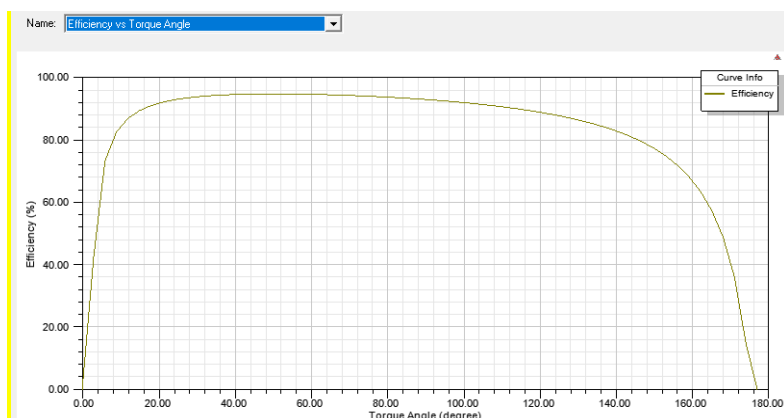


Рис. 13. КПД вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами 1375 кВт с эквивалентной инерционной массой

Вариант имеет следующие достоинства:

- минимальные потери и наибольший КПД;
- электродвигатель изготавливается на специализированном предприятии с гарантией, поставляется как готовое комплектующее изделие;
- конструкция позволяет разместить постоянные магниты без изготовления дополнительной оснастки;
- габариты одного привода с этим электродвигателем позволяют разместить второй независимый привод;
- электродвигатель имеет закрытое исполнение, что уменьшает шум, повышает безопасность и надежность;
- вполне возможно изготовление электродвигателя на данную мощность в Челябинске на АО «РЭД».

К недостаткам варианта следует отнести следующее:

- электродвигатель содержит мощные дорогостоящие магниты;
- электродвигатель имеет реактивный момент.

7. Сравнительный анализ вариантов.

Выбор основного базового варианта

В качестве показателей наилучшего варианта примем минимальный расход активных материалов (меди) и энергетические показатели (КПД). Расход железа в качестве показателя экономии активных материалов не рассматривался, поскольку варианты проектировались исходя из требуемого момента инерции с добавлением необходимой массы. Для вариантов электродвигателя 1375 кВт в расходе материалов учитывалось, что для полной замены потребуется два привода и, соответственно, два электродвигателя. Результаты анализа сведены в таблицу.

Из представленной таблицы видно, что вариант вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами является наилучшим и по расходу активных материалов, и по КПД. Это можно объяс-

нить тем, что данный электродвигатель не тратит энергию на создание возбуждения за счет использования мощных постоянных магнитов. Исключение обмотки возбуждения приводит также к экономии меди.

На основе анализа технических параметров в качестве базового варианта для дальнейших уточненных электромагнитных и тепловых расчетов с оптимизацией геометрии, разработки рабочих чертежей с изготовлением образца рекомендуется вариант вентильного электродвигателя с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами. Он имеет наилучшие показатели по минимальному расходу дорогостоящей меди и максимальному значению КПД, а также позволяет выполнить требования заказчика по изготовлению двух независимых друг от друга приводов.

8. Научная новизна выбранного базового варианта

Конструкция электрической машины с когтеобразными полюсами известна и описана в многочисленных источниках [7–9]. В основном она применяется в качестве генератора с контактной системой возбуждения в виде кольцевой обмотки на мощности до 10 кВт. Использование этой конструкции в режиме электродвигателя с постоянными магнитами на мощности более 1 МВт с внешним диаметром 9 м является уникальным в мировой практике.

Для электродвигателя предлагается новая технология, при которой постоянные магниты клеиваются в ротор на стадии сборки всего электродвигателя.

Конструкция электродвигателя потребует детальной проработки магнитной системы с оптимизацией геометрии на минимум потоков рассеяния, разработки системы охлаждения, обеспечивающей требуемый температурный режим при динамической нагрузке, анализ элементов конструкции на прочность и жесткость к ударным нагрузкам.

Результаты анализа вариантов

№ п/п	Наименование варианта	Масса меди, кг	КПД
1	Замена существующего электродвигателя постоянного тока на асинхронный электродвигатель 2750 кВт	11 570	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	11 860	0,945
4	Исключение маховика и замена его двумя асинхронными электродвигателями 1375 кВт большого диаметра с эквивалентной инерционной массой	11 870	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

Исключение из привода маховика как отдельного элемента и замена его инерционной массой самого электродвигателя является новым техническим решением в приводах данного типа. Оно требует проработку подшипникового узла с системой охлаждения и смазки.

Исследование этих вопросов составляет новую новизну в разработке этого уникального привода в мировой металлургической практике по производству бесшовных труб. Детальная проработка конструкции является основой дальнейших научных исследований.

9. Практическая значимость предлагаемой концепции привода

Основным практическим результатом предлагаемой конструкции привода пильгерстана является возможность в существующих габаритах цеха сделать два привода, работающих независимо друг от друга. Это позволит проводить ремонтные и регламентные работы, не останавливая полностью производство труб.

Отсутствие контактного токоподвода с шточно-коллекторным узлом существенно повышает надежность при снижении затрат на обслуживание и ремонт.

Данный привод потребует использования меньшего количества дорогостоящего цветного металла (обмоточной меди).

Уменьшенные электрические потери позволят снизить затраты на эксплуатацию привода.

10. Оценка показателей экономической эффективности базового варианта

Оценим экономию электроэнергии базового варианта за счет снижения потерь и, соответственно, повышения КПД. Наиболее близкий вариант к выбранному имеет КПД 0,955. Для базового варианта КПД составляет 0,97.

Соответственно экономия на потерях при выборе базового варианта составит:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{0,955} - \frac{P_{\text{дв.ном}}}{0,97} = \frac{2750}{0,955} - \frac{2750}{0,97} = 44,5 \text{ кВт.}$$

При постоянной работе привода 330 дней в году с перерывом на обслуживание и регламентные работы и средней стоимости электроэнергии 3 руб./кВт·ч годовая экономия составит:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{годовая}} &= \Delta P \cdot 24 \cdot 330 \cdot 3 = 44,5 \cdot 24 \cdot 330 \cdot 3 = \\ &= 1\,057\,320 \text{ руб.,} \end{aligned}$$

то есть более одного миллиона рублей в год по действующим на сегодняшний день тарифам.

Следует отметить, что базовый вариант рассчитан на питание от действующего в цехе источника постоянного тока 6 кВ. При этом коммутатор для электродвигателя будет существенно дешевле частотного преобразователя частоты для асинхронного привода за счет исключения уже существующего звена постоянного тока. Этот фактор

приводит к еще большей экономии на внедрение базового варианта.

В целом привод должен окупиться примерно за 3–5 лет за счет выпуска высокорентабельной продукции – труб большого диаметра для нефтегазовой отрасли.

Заключение

Из большого количества возможных вариантов исполнения электродвигателя для существующего привода пильгерстана в качестве основного (базового) варианта электрической машины предлагается вариант с исключением существующего маховика и заменой его вентильным электродвигателем большого диаметра с когтеобразными полюсами и постоянными магнитами с эквивалентной инерционной массой. Электродвигатель имеет номинальную мощность 1375 кВт и частоту вращения 35 об/мин. Управление электродвигателем планируется осуществить от собственного коммутатора, который питается от имеющегося в цехе источника постоянного тока. Габаритные размеры позволяют поставить аналогичный комплект на второй независимый привод пильгерстана. Применение данного варианта электродвигателя позволит сэкономить затраты на эксплуатацию за счет повышения КПД, повысить надежность за счет исключения контактного токоподвода, удешевить регламентные работы за счет разделения существующего одного привода, работающего одновременно на два цеха, на два независимых привода. Предложенный вариант удовлетворяет основным требованиям заказчика в лице ПАО «ЧТПЗ», которые он предъявляет к новому приводу пильгерстана, предназначенному для замены существующего физически и морально устаревшего агрегата.

Литература

1. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: моногр. / М.А. Григорьев. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – 159 с.
2. Козаченко, В.Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения / В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 3. – С. 138–139.
3. Никифоров, Б.В. Вентильно-индукторные электродвигатели для тяговых электроприводов / Б.В. Никифоров, С.А. Пахомин, Г.К. Птах // *Электричество*. – 2007. – № 2. – С. 34–38.
4. Туан, Н.М. Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями / Н.М. Туан, Н.Ч. Хай // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2014. – № 8. – С. 184–187.
5. Козаченко, В.Ф. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромаг-

- нитным возбуждением / В.Ф. Козаченко, Д.Е. Корпусов // *Электронные компоненты*. – 2005. – № 6. – С. 60–64.
6. Голландцев, Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных электродвигателей / Ю.А. Голландцев // *Информационно-управляющие системы*. – 2006. – № 6. – С. 50–53.
7. Копылов, И.П. *Электрические машины: учебник* / И.П. Копылов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
8. Вольдек, А.И. *Электрические машины: учеб.* / А.И. Вольдек. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
9. Костенко, М.П. *Электрические машины. В 2 ч.* / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Ч. 1: *Машины постоянного тока. Трансформаторы*. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.; Ч. 2: *Машины переменного тока*. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.
10. *High-speed electrical machines: Technologies trends and developments* / D. Gerada, A. Mebarki, N. Brown et al. // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2014. – Vol. 61, no. 6. – P. 2946–2959. DOI: 10.1109/tie.2013.2286777
11. *A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains* / L. Papini, T. Raminosa, D. Gerada, C. Gerada // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2014. – Vol. 61, no. 6. – P. 3071–3080. DOI: 10.1109/tie.2013.2282604
12. Сравнительный обзор синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2015. – № 6. – С. 123–128.
13. Опейко, О.Ф. Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления / О.Ф. Опейко, А.И. Пташкин, В.И. Хильмон // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2010. – № 6. – С. 37–43.
14. Гуляев, И.В. *Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного электродвигателя: монография* / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та., 2010. – 200 с.
15. Kovalev, K. *Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation* / K. Kovalev, N. Ivanov, E. Tulinova // *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. – Proceedings 8076353. DOI: 10.1109/icieam.2017.8076353
16. Gandzha, S.A. *Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills* / S.A. Gandzha, R.L. Halstead // *Design World (engineering solution for product manufactures)*. – 2012. – No. 1. – www.designworldonline.com.
17. Gandzha, S.A. *Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills* / S.A. Gandzha, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 191–194. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.031
18. Gandzha, S.A. *Variable speed power* / S.A. Gandzha, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 731–735. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.095
19. Gandzha, S.A. *The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase* / S.A. Gandzha, A.I. Sogrin, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
20. Мартыанов, А.С. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL / А.С. Мартыанов, Н.И. Неустроев // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2014. – № 19 (159). – С. 47–52.
21. Babu, B.M. *A MLI topology with different braking mechanisms employing BLDC drive* / B.M. Babu, L.R. Srinivas, B. Bindhu // *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India*. – 2017. – P. 1845–1849. DOI: 10.1109/ICPCSI.2017.8392034
22. *Speed control of high-performance brushless DC motor drives by load torque estimation* / Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun // *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC '03. Acapulco, Mexico*. – 2003. – No. 4. – P. 1677–1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709

Ганджа Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gandja_sa@mail.ru.

Косимов Бахтиёр Исмагуллоевич, аспирант, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kosimov.energy@mail.ru.

Аминов Дилшод Саидович, аспирант, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; dilshod-aminov-93@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 мая 2018 г.

OPTIMIZING THE DESIGN OF A PILGER MILL MOTOR TO PRODUCE SEAMLESS PIPES

S.A. Gandzha, gandja_sa@mail.ru

B.I. Kosimov, kosimov.energy@mail.ru

D.S. Aminov, dilshod-aminov-93@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This paper dwells upon optimizing the design of motors for pilger mills making seamless pipes of large diameter. The options are grouped into four types: high-speed motor with a reduction drive; low-speed motor, no reduction drive (replaces the existing motor); a motor that uses the flywheel as the rotor of another motor; no flywheel, a motor of equivalent inertial mass used instead. This research applies ANSYS Electronics Desktop: special software for computing electric machines which employs finite-element analysis. The options are compared against each other. Energy indicators coupled with a minimum use of active materials is the criterion applied to choose the best option. The replace the existing obsolete DC commutator motor, the paper proposes a drive based on a brushless claw-pole permanent-magnet motor that is more reliable thanks to contactless current feed while also using less copper and offering better energy indicators due to zero excitation loss.

Keywords: pilger mill, asynchronous motor, synchronous motor, low-speed motors, brushless motor, permanent magnets, electromagnetic excitation, claw poles.

References

1. Grigoriev M.A. *Ventil'nyy elektroprivod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vozbuzhdeniya* [Brushless Direct Current Motor with Synchronous Reactive Machine of Independent Excitation]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2010. 159 p.
2. Kozachenko V.F., Lashkevich M.M. [Switched Reluctance Drive with External Excitation for the Traction Electric Drive]. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2011, no. 03, pp. 103–108. (in Russ.)
3. Nikiforov B.V., Pakhomin S.A., Ptakh G.K. [Switched Reluctance Motors for Traction Electric Drives]. *Electrical Technology Russia*, 2007, no. 2, pp. 34–38. (in Russ.)
4. Tuan N.M., Hai N.T. [The Main Advantages of Switched Reluctance Motors Compared to Traditional Motors]. *News of the Tula State University*, 2014, no. 8, pp. 184–187. (in Russ.)
5. Kozachenko V.F., Korpusov D.E. [Electric Drive on the Basis of Switched Reluctance Motors with Electromagnetic Excitation]. *Electronic Components*, 2005, no. 6, pp. 60–64. (in Russ.)
6. Gollantsev Yu.A. [Comparison of Mechanical Characteristics of Asynchronous and Switched Reluctance Inductor-Reactive Electric Motors]. *Information and Control Systems*, 2006, no. 6, pp. 60–64. (in Russ.)
7. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, High Sch., 2006. 607 p.
8. Vol'dek A.I. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical Machines]. Leningrad, Energy, 1978. 832 p.
9. Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. *Elektricheskiye mashiny. V 2 ch.* [Electrical Machines. In 2 parts]. *Ch. 1: Mashiny postoyannogo toka. Transformatory* [Part 1: DC Machines. Transformers], Leningrad, 1972, 544 p.; *Ch. 2: Mashiny peremennogo toka* [Part 2: AC Machines], Leningrad, 1973. 648 p.
10. Gerada D., Mebarki A., Brown N., Gerada C., Cavagnino A., Boglietti A. High-Speed Electrical Machines: Technologies Trends and Developments. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 2946–2959. DOI: 10.1109/tie.2013.2286777
11. Papini L., Raminosa T., Gerada D., Gerada C. A High-Speed Permanent-Magnet Machine for Fault-Tolerant Drivetrains. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 3071–3080. DOI: 10.1109/tie.2013.2282604
12. Gulyayev I.V., Volkov A.V., Popov A.A., Ionova E.I. [Comparative Review of Synchronous Motor with Permanent Magnets and Brushless DC Motor with Direct Torque Control]. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2015, no. 6, pp. 123–128. (in Russ.)
13. Opeyko O.F., Ptashkin A.I., KHil'mon V.I. [Traction Motor with Sensorless Vector Control System]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Power Energy. News of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS], 2010, no. 6, pp. 37–43. (in Russ.)
14. Gulyayev I.V., Tutayev G.M. *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventil'nogo elektrodvigatelya* [Motor Vector Control Systems Based on Asynchronized BLDC Motor]. Saransk, Mordov. Univ. Publ., 2010. 200 p. (in Russ.)

15. Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. Magnetic Field Distribution in the Active zone of Synchronous Generators with Electromagnetic Excitation. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*, proceedings 8076353 DOI: 10.1109/icieam.2017.8076353
16. Gandzha S.A., Halstead R.L. Optimal Design of Brushless Axial Gap Electric Machines for Low Power Windmills. *Design World (Engineering Solution for Product Manufactures)*, 2012, no. 1. www.designworldonline.com.
17. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application Brushless Machines with Combine Excitation for a Small and Medium Power Windmills. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 191–194. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.031
18. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable Speed Power. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 731–735. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.095
19. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
20. Mart'yanov A.S., Neustroyev N.I. [Analysis of Electromechanical Systems Using ANSYS MAXWELL]. *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 19, pp. 47–52. (in Russ.)
21. Babu B.M., Srinivas L.R., Bindhu B. A MLI Topology with Different Braking Mechanisms Employing BLDC Drive. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India*, 2017, pp. 1845–1849. DOI: 10.1109/ICPCSI.2017.8392034
22. Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun. Speed Control of High-Performance Brushless DC Motor Drives by Load Torque Estimation. *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC '03. Acapulco, Mexico*, 2003, no. 4, pp. 1677–1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709

Received 28 May 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

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

FOR CITATION

Gandzha S.A., Kosimov B.I., Aminov D.S. Optimizing the Design of a Pilger Mill Motor to Produce Seamless Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 5–17. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190101