

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Л.А. Макриденко, А.П. Сарычев, М.Е. Коварский, В.В. Магин
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассмотрены особенности проектирования электрических машин для специальных применений: морского исполнения, для атомных электрических станций, погружные привода нефтяного насоса. Описаны мероприятия, направленные на снижения уровней вибраций двигателей морского исполнения. Показано, что двигатели с распределенной обмоткой якоря имеют лучшие по сравнению с двигателями с сосредоточенной обмоткой якоря ВШХ.

Ключевые слова: электродвигатели морского исполнения, погружные привода нефтяного насоса.

На базе ФГУП «НПП ВНИИЭМ» создан «Научно-производственный центр корабельного электромашиностроения» (НПЦ КЭ), который объединяет и направляет усилия различных подразделений института и электромашиностроительных предприятий РФ по выпуску электрических машин. Одной из первоочередных задач центра является повышение качества проектируемых и выпускаемых машин, в том числе внедрение автоматизированной системы измерений, которая позволит значительно повысить точность измерений и снизить трудоемкость испытаний.

Наиболее крупным достижением центра в области электрических машин общепромышленного применения является разработка и внедрение единой серии 4А, являющейся до настоящего времени базой для разработки, стандартизации и производства асинхронных двигателей электромашиностроительными заводами. Кроме этого, в институте постоянно ведутся разработки электрических машин специального применения:

- электродвигатели морского исполнения;
- электродвигатели для атомных электрических станций;
- погружные привода нефтяного насоса;
- электропривода, предназначенные для эксплуатации в космосе;
- магнитные подшипники для газоперекачивающих агрегатов.

Каждое из вышеперечисленных направлений имеет свою специфику: для одних это повышенные требования по ВАХ, для других решающее значение имеют массогабаритные показатели. Проектирование электрических машин специального назначения требует индивидуального подхода к проектированию и невыполнимо без научно-исследовательской базы.

В этой работе рассмотрены три направления по созданию электрических машин специального применения: электродвигатели морского исполнения, электродвигатели для атомных электрических станций, погружные привода нефтяного насоса.

Электродвигатели морского исполнения

НПУ КЭ является одним из основных предприятий разработчиков и поставщиков электродвигателей морского исполнения.

Электропривода морского исполнения эксплуатируется в тяжелых условиях. Разнообразие климатических поясов, в которых может находиться судно от арктических до тропических, и соответственно этому значительные колебания температуры наружного воздуха, а также повышенная температура воздуха в месте расположения электроприводов, значительная влажность воздуха при наличии в нем солей, может весьма агрессивно действовать на металл и изоляцию электродвигателей. Качка, наклоны, крен, дифферент судна, вибрация, вызванная работой других отдельных агрегатов, также предъявляют особые требования к конструкциям электродвигателей и к их испытаниям.

В настоящее время в электромеханике все актуальнее становятся вопросы обеспечения необходимых уровней шума и вибраций электропривода. Требования, предъявляемые к вибрациям приводов, постоянно ужесточаются, уровень шума наряду с электроэнергетическими и механическими параметрами является одним из ключевых показателей качества электрической машины.

За долгие годы исследования шумов и вибраций в электрических машинах в НПУ КЭ были разработаны научнообоснованные методы проектирования электрических машин удовлетворяющих жесточайшим требованиям по ВАХ [1]. Вибрации в электрической машине можно разделить на вибрации электромагнитного и механического происхождения.

Для минимизации уровней электромагнитных вибраций машины на стадии проектирования проводится моделирование магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины и выделение его гармонических составляющих. При анализе гармонических составляющих выделяются пары гармоник, которые имеют достаточно большую амплитуду и взаимодействие которых порождает пространственные формы колебаний с порядком $r \leq 4$. Далее производится расчет возмущающих радиальных усилий как от самих гармонических составляющих, так и от взаимодействующих пар гармонических составляющих. Возмущающие усилия позволяют

рассчитать уровни вибрации электрической машины, обусловленные электромагнитными полями.

Снижение уровня электромагнитных возмущающих усилий достигается за счет снижения амплитуды гармонических составляющих магнитного поля в зазоре электрической машины. Поэтому одним из важнейших аспектов при подходе к проектированию электродвигателей морского исполнения является выбор типа электрической машины. В общем случае выбор электрической машины определяется конкретными требованиями к характеристикам машины. Однако с точки зрения обеспечения минимальных уровней ВАХ самым оптимальным выбором являются машины, которые питаются синусоидальным током и имеют магнитное поле в зазоре наиболее приближенное к синусоиде и, следовательно, содержат минимум гармонических составляющих (например асинхронные и синхронные).

В последнее время получили развитие электрические машины, имеющие импульсное питание. К таким типам электрических машин относится вентильно-индукторный двигатель, который, помимо импульсного питания, имеет ярко выраженную зубчатость на поверхности статора и ротора, что неизбежно приводит к высоким уровням гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре и, следовательно, повышенным магнитным вибрациям.

На практике наибольшее использование в качестве электродвигателя морского исполнения получил асинхронный двигатель, который обладает простотой изготовления, распределением магнитного поля в зазоре близким к синусоиде, обладает высокой надежностью и способностью работать напрямую от сети и/или от преобразователя частоты.

На рис. 1 приведен результат моделирования магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя мощностью 37 кВт в режиме холостого хода. На этом рисунке видно, что кривая магнитного поля в воздушном зазоре близка к синусоиде, однако с четко выраженными гармониками более высокой частоты.

Гармонические составляющие магнитного поля в зазоре представлены на рис. 2, в виде значений амплитуд индукций, соответствующих своему номеру гармоники. Для наглядности представлены амплитуды гармоник. Начиная со второй, амплитуда основной гармоники составляет 0,68 Тл. Магнитное поле в воздушном зазоре асинхронного двигателя, помимо основной гармоники, содержит большое количество гармоник высших порядков. При этом четко отслеживаются высокие значения амплитуд гармоник порядка 47 и 49. Гармоники такого порядка относятся к зубцовым гармоникам, которые порождаются зубчатой поверхностью статора. Стоит отметить, что при работе асинхронного двигателя в номинальном режиме, помимо зубцовых гармоник статора, проявляются зубцовые гармоники ротора, которые также имеют высокие значения амплитуд индукции.

Для изучения влияния зубчатости статора на магнитное поле в воздушном зазоре определены гармонические составляющие поля в зазоре при различных значениях раскрытия паза. Зависимость амплитуд индукции магнитного поля от порядка гармоники при различных значениях ширины шлица паза статора приведена на рис. 3. Изменение ширины шлица значительно влияет на значения индукций, соответствующих 47 и 49 номерам гармоник, и практически не влияет на все осталь-

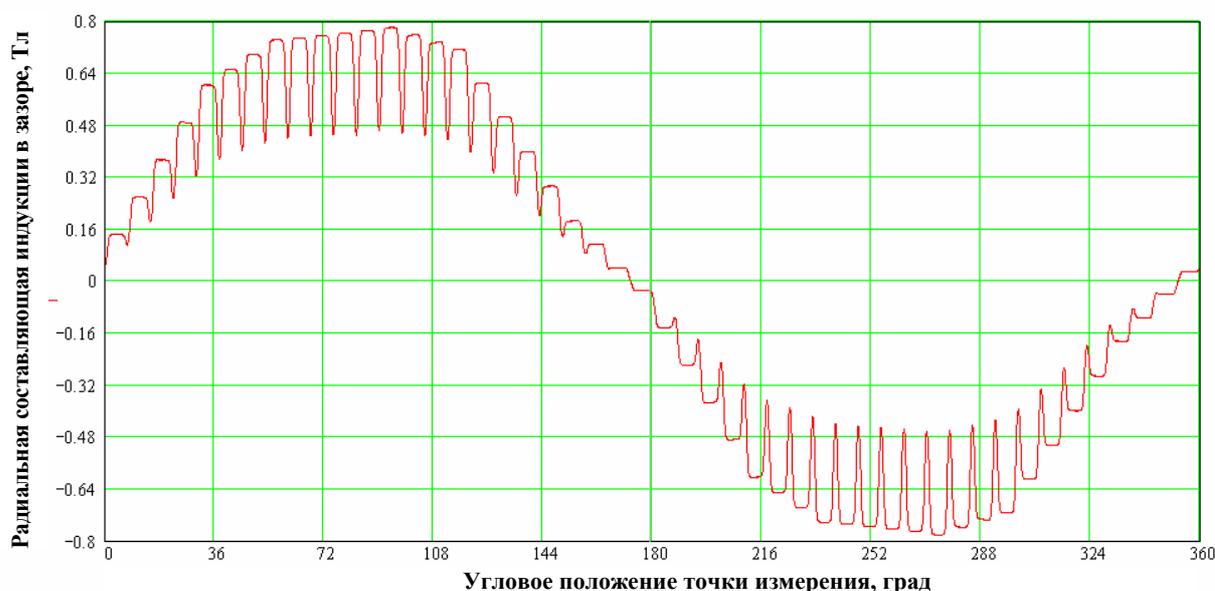


Рис. 1. Пространственное распределение индукции в зазоре асинхронного двигателя

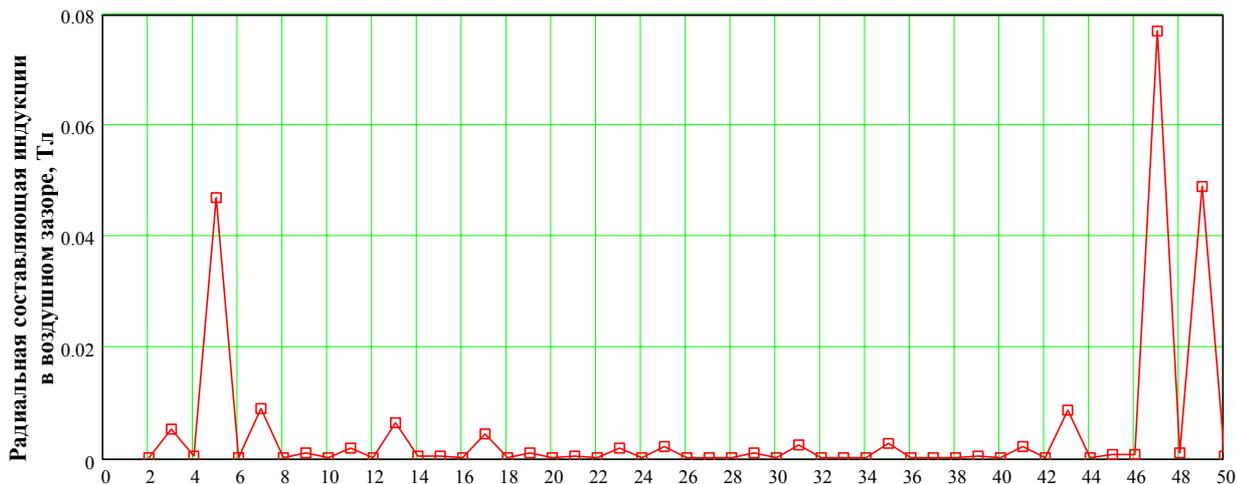


Рис. 2. Гармонические составляющие кривой индукции в воздушном зазоре

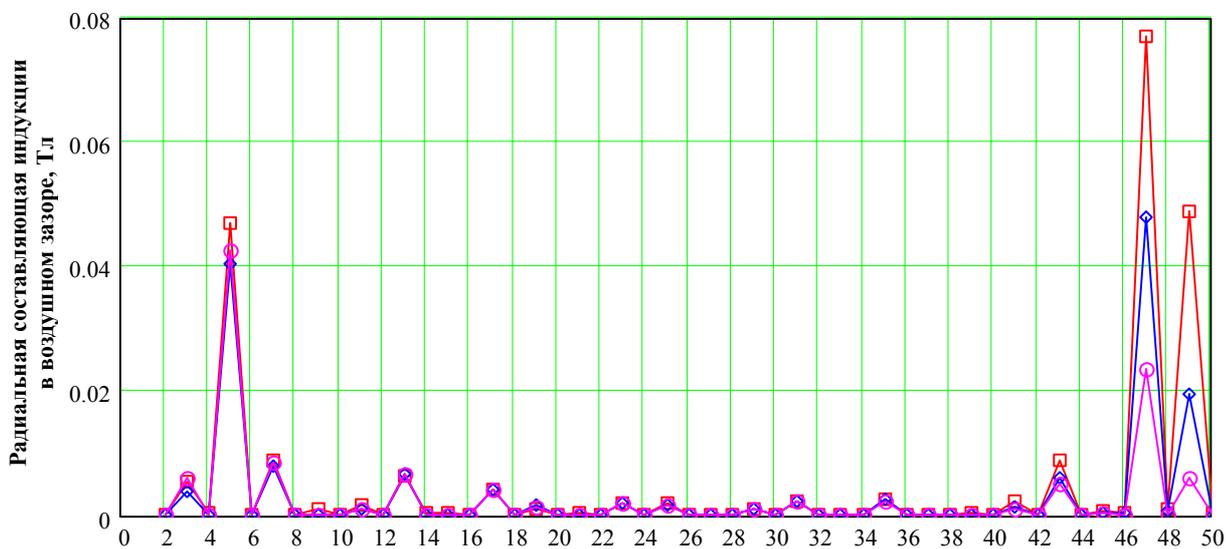


Рис. 3. Гармонические составляющие поля в воздушном зазоре при изменении ширины шлица статора: □ – ширина шлица 3,5 мм; ◇ – ширина шлица 2,5 мм; ○ – ширина шлица 1 мм

ные. При уменьшении ширины шлица зубцовые гармоники уменьшаются.

Еще одним способом снижения уровней вибраций, создаваемых зубцовыми гармониками, является выполнение мероприятий по снижению уровней вибраций от основного поля. Это автоматически позволяет снизить уровни вибраций на зубцовых гармониках.

Зубцовые гармоники оказывают большое влияние на уровни вибраций асинхронного двигателя в среднем диапазоне частот. Экспериментально установлено, что зубцовые гармоники проявляются в исследуемом нами электрическом двигателе в диапазоне частот 1600 – 2400 Гц. При этом уровни зубцовых вибраций превышают уровень вибрации, создаваемый основной волной поля, несмотря на существенно более низкое значение возмущающих

сил, создаваемых зубцовыми гармониками. Это вызывает необходимость выполнения мероприятий по снижению уровней вибраций от зубцовых гармоник.

В Центре разработаны вертикальные электродвигатели асинхронного типа 4АН280, 4АВ280, ДА37-2К, 4ДМШНВ180В4, ВДН-14, АЧМ и др., предназначенные для работы от сети переменного тока частотой 50 и 400 Гц, напряжением 380 В на кораблях и морских судах неограниченного района плавания в качестве приводов насосных агрегатов.

Эти машины удовлетворяют повышенным требованиям к виброакустическим характеристикам, они надежны и рассчитаны на длительный срок службы.

На рис. 4 представлен асинхронный двигатель ДА37-2К (37 кВт, 3000 об/мин) с водяным охлаждением для привода насоса современных кораблей.



Рис. 4. Асинхронный двигатель ДАЗ7-2К

В двигателях применены специальные подшипники. Совместно с ВНИИПП разработана серия радиальных малошумных подшипников качества, которые выполнены с текстолитовыми сепараторами, и обладают пониженными уровнями вибрации. Каждый подшипник перед установкой на машину проходит индивидуальные испытания на виброакустику.

Для снижения уровня вибраций механического происхождения обработка подшипниковых гнезд и шеек валов электриче-

ских машин выполняется по 4 качеству.

Для исключения аэродинамического шума вентилятора в двигателях 4АВ280, ДАЗ7-2К, 4ДМШНВ180В4, ВДН-14, АЧМ применено водяное охлаждение. Охлаждающая жидкость проходит по спиралевидному каналу в станине двигателя и охлаждает корпус двигателя. Активная часть ротора имеет скос пазов. Соотношение числа пазов статора и ротора подобрано таким образом, чтобы снизить зубцовые вибрации и шумы. Охлаждение двигателей 4АН280 воздушное. Воздух прогоняется вентилятором вдоль статора и выходит из корпуса сквозь специальные жалюзи. Профиль лопаток и конструкция вентилятора спроектированы с учетом снижения аэродинамического шума.

Перечисленные выше конструктивные и техно-

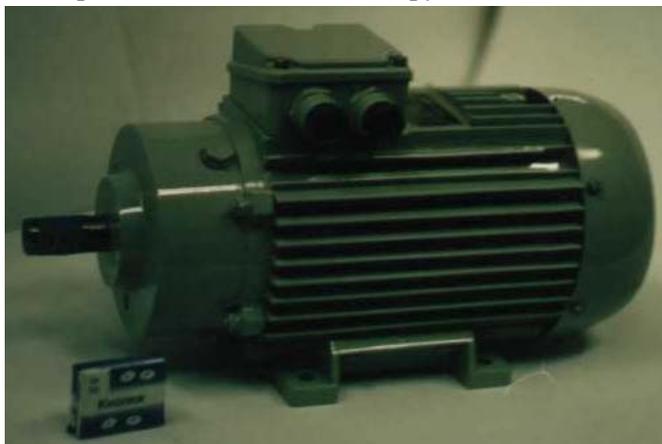


Рис. 5. Электродвигатель АДА90L6-Т2

логические особенности обеспечивают достижение требуемых уровней по виброакустическим характеристикам машины.

Для проверки работоспособности двигателей разработаны специальные испытательные стенды, имитирующие внешние воздействующие факторы корабля.

Электродвигатели для атомных электрических станций

В НПУ КЭ была разработана серия асинхронных двигателей АДА [2]. Двигатели асинхронные трёхфазные с короткозамкнутым ротором, с встроенным тормозом стояночного типа и вспомогательной обмоткой теплового контроля предназначены для электроприводов механизмов атомных электростанций и заменяют привод постоянного тока.

Конструктивно двигатели выполнены на базе и с использованием узлов и деталей серийных двигателей российских электромашиностроительных заводов, и отличаются от них радиационнотойкой и теплостойкой изоляцией обмотки статора (класс Н), влагостойкостью, наличием магнитоэлектрического тормоза стояночного типа и вспомогательной обмотки контроля теплового состояния статора.

Стояночный тормоз состоит из магнитопровода с обмоткой возбуждения и магнитами, выполненными из редкоземельных материалов. Магнитопровод закреплён в подшипниковом щите со стороны приводного конца вала и якоря. Якорь тормоза крепится к валу двигателя. При обесточенной обмотке тормоз фиксирует ротор в неподвижном состоянии, при включении обмотки тормоз выключается.

Для увеличения ресурса электродвигателя проведена модификация системы охлаждения, что обеспечило значительное снижение температур корпуса и обмоток.

На рис. 5 представлен двигатель АДА90L6-Т2 мощностью 1,5 кВт и скоростью вращения 980 об/мин. Двигатели серии АДА поставлены на целый ряд отечественных и зарубежных АЭС.

Погружные привода нефтяного насоса

В Российской Федерации, а также в других странах, занимающихся разработкой нефтяных месторождений, имеется значительный спрос на нефтедобывающие электроустановки, в частности, на погружные нефтяные комплексы.

Комплекс состоит из нефтяного насоса, электродвигателя (рис. 6), гидрозащиты, преобразователя частоты, питающего кабеля.

Изготовлением электродвигателей для нефтяных насосов занимается ряд отечественных и зарубежных производителей, таких как Centrilift,

Reda, Алнас, НПУ КЭ. Однако у современных погружных нефтедобывающих установок имеется ряд недостатков: низкий уровень надежности устройства гидрозащиты, низкий срок службы электродвигателей, межремонтный период работы которых составляет около половины ресурса работы новых изделий, низкий КПД и $\cos\varphi$, что является причиной высокого удельного потребления электроэнергии. Самый существенный недостаток – это значительные габаритные размеры погружных нефтяных комплексов. Из-за размеров возникают сложности при размещении погружных нефтяных комплексов в скважинах с повышенной кривизной или углом наклона, значительно увеличиваются затраты на транспортировку оборудования, его монтаж, эксплуатацию и ремонт.

В новом поколении погружных нефтяных комплексов должны быть устранены или уменьшены вышеперечисленные недостатки существующих систем электроприводов.

Перспективными разработками должны быть решены следующие задачи:

- высокая производительность погружных нефтяных комплексов;
- минимальные габариты погружных установок, позволяющие эксплуатировать скважины со сложной геометрией ствола;
- малые материальные и энергетические затраты;
- возможность глубокого регулирования частоты вращения погружных нефтяных комплексов с оптимизацией режимов нефтедобычи;
- усовершенствование гидрозащиты.

Погружные нефтяные комплексы весьма специфичны, так как эксплуатируются в тяжелых условиях окружающей среды. При работе они находятся непосредственно в скважине ограниченного диаметра в среде пластовой нефтесодержащей жидкости, температура которой достигает $+90^{\circ}\text{C}$, а внешнее давление на комплексы 20 МПа. Пластовая жидкость содержит воду, химически активные со-

единения и абразивные примеси.

Анализ существующих конструкций погружных нефтяных комплексов отечественного и иностранного производства показывает, что наиболее слабым местом в данных электроприводах является гидрозащита. Несмотря на наличие самой совершенной гидрозащиты, в электродвигателях погружных нефтяных комплексов практически всех типов происходит замещение диэлектрической жидкости, заполняющей электродвигатель, пластовой жидкостью. Проникая в электродвигатель, пластовая жидкость разрушающе действует на пазовую и межвитковую изоляцию обмотки статора и подшипники.

В электроприводах при питании электродвигателей от высокочастотных преобразователей, расположенных на поверхности земли, могут возникать перенапряжения в обмотках статоров, что может привести к пробое межвитковой и пазовой изоляции.

При использовании высокоскоростных электродвигателей положительным фактором является снижение массогабаритных показателей привода и всего комплекса. Однако вследствие этого высокоскоростные электродвигатели имеют повышенную тепловую нагрузку, так как поверхность охлаждения у них существенно меньше, чем у серийных. Кроме этого, при высоких частотах вращения увеличиваются механические потери от трения «бочки» ротора.

В НПЦ КЭ разработан и изготовлен высокоскоростной погружной управляемый электропривод и комплексный стенд для испытаний комплекта погружного электропривода нефтяного насоса и его конструктивных узлов в условиях, приближенным к реальным [3]. На рис. 7 изображена конструктивная схема погружного нефтяного комплекса.

С целью снижения массогабаритных показателей применен синхронный электродвигатель с возбуждением от высокоэнергетических постоянных магнитов, расположенных на роторе. Потери



Рис. 6. Электродвигатель погружного нефтяного насоса

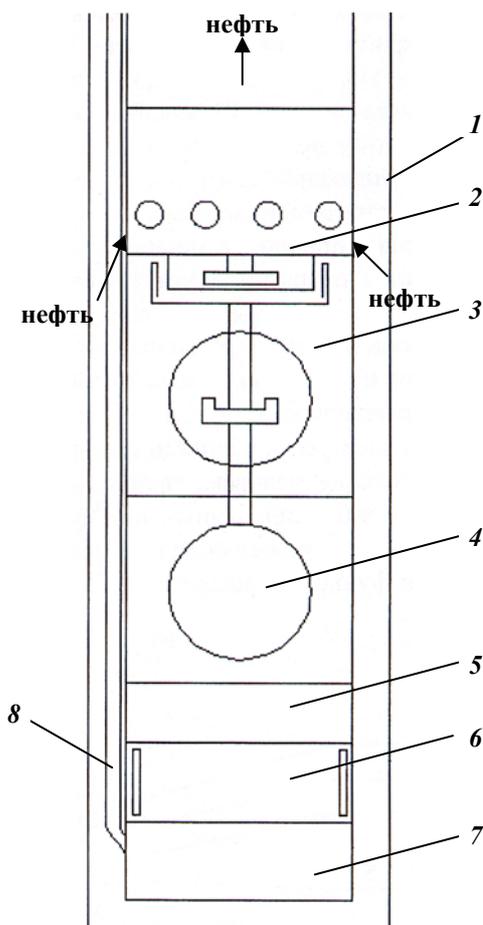


Рис. 7. Конструктивная схема погружного нефтяного комплекса: 1 – обсадная труба; 2 – нефтяной насос; 3 – синхронный электродвигатель и магнитная муфта; 4 – маслонасос; 5 – регенератор; 6 – теплообменник с системой очистки; 7 – преобразователь-инвертор; 8 – одножильный питающий кабель

на возбуждение в нем отсутствуют, КПД на 3,5% выше, а массогабаритные показатели в 1,5 раза ниже по сравнению с асинхронным двигателем. Постоянные магниты выполнены из соединения SmCo и сохраняют работоспособность при температуре, достигающей 250°C.

Основная обмотка статора служит для создания МДС в воздушном зазоре, вращающейся с синхронной частотой, дополнительная обмотка соединена с преобразователем-инвертором и обеспечивает идентификацию положения ротора и питание инвертора.

Снижение температуры электродвигателя достигается интенсивной системой охлаждения. В двигателе полость статора с обмоткой отделена от полости ротора гильзой из стеклопластика и заполнена специальным маслом. При работе электродвигателя при помощи специального маслонасоса осуществляется циркуляция жидкости по контуру: полость статора – подшипники – теплообменник с системой очистки – полость статора. Пазовая изоляция статора выполнена таким образом, что между стенками паза и изоляцией образуются каналы, по которым протекает жидкость, возвращаясь обратно по каналам в спинке статора.

Полость ротора является газонаполненной (воздух), что существенно снижает механические потери на трение «бочки» ротора по сравнению с жидкостной системой наполнения, особенно при высоких частотах вращения.

Для исключения попадания пластовой жидкости внутрь электродвигателя и разрушения изоляции обмоток статора и подшипников электродвигатель выполнен герметичным. Это достигается применением магнитной муфты и герметичными токовводами.

Магнитная муфта состоит из ведущей и ведомой полумуфт. Ведущая полумуфта, насаженная на рабочий конец вала электродвигателя, закрывается немагнитным металлическим стаканом, соединенным с корпусом электродвигателя и создающим герметичность данного узла. Ведомая полумуфта, соединенная с основным нефтяным насосом, охватывает немагнитный металлический стакан с ведущей полумуфтой.

Для исключения перенапряжений в питающем кабеле и в обмотках статора преобразователь-инвертор выполнен погружным и расположен в одном корпусе с электродвигателем. Питание инвертора осуществляется постоянным током, что приводит к уменьшению электрических потерь в питающем кабеле.

Литературы

1. Коварский Е.М. О расчете вибрации электрических машин / Е.М. Коварский // Электротехника. – М., 1974. – №12.
2. Серия асинхронных двигателей АДА для приводов механизмов атомных электростанций / Г.А. Жемчугов, В.В. Лопатин, М.Е. Коварский [и др.] // Электротехника. – М., 2001. – №7.
3. Пат. 52124 Российская Федерация. Электронасосная погружная установка с магнитной муфтой (варианты) / С.А. Васюков, М.Е. Коварский, В.В. Лопатин [и др.]. – №2005120405; заявл. 30.06.2005.

Леонид Алексеевич Макриденко, д-р техн. наук, генеральный директор–генеральный конструктор.

Алексей Петрович Сарычев, канд. техн. наук, зам. генерального директора–генерального конструктора, т. 365-56-29.

Михаил Ефимович Коварский, канд. техн. наук, зам. главного конструктора, т. 365-57-28.

Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории, т. 366-30-01.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.