

УДК 621.313.213.32

Г.С. Ясаков, д-р техн. наук, профессор,

ВУНЦ ВМФ Военно-Морская Академия им. Н.Г. Кузнецова, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: rossa@inbox.ru

В.В. Агафонов, ст. преподаватель,

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: viktor2906@gmail.com

Е.А. Костиков, адъюнкт,

ВУНЦ ВМФ Военно-Морская Академия им. Н.Г. Кузнецова, г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: rossa@inbox.ru

ПОГРУЖНОЙ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ С УНИВЕРСАЛЬНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассматриваются вопросы использования вентильно-индукторных двигателей с пониженными массогабаритными характеристиками в качестве приводов, работающих в морской воде и агрессивных средах. Дается конструкция ВИД и описание универсального упорно-опорного подшипника для нового погружного электродвигателя открытого исполнения для нефтегазовых скважин, работающего на глубинах погружения до 3000 м.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, вентильно-индукторный, подшипник, упорный, опорный, нефтегазовые скважины.

Введение. В настоящее время актуальны работы по внедрению экологически чистых погружных электродвигателей (ПЭД) открытого исполнения, главным образом, асинхронного типа АМВ (асинхронная машина Ветохина) для привода забортных механизмов глубоководных подводных аппаратов (ГПА) для специальных и буровых установок нефтегазовой отрасли с охлаждением внутренних частей забортной агрессивной водой. Эти машины обладают высокой надежностью, неограниченной глубиной погружения, работают при любых кренах и дифферентах, имеют большой ресурс и срок службы [1, 2].

Постановка задачи. В течение последних 20 лет в промышленности находят применение вентильно-индукторные двигатели (ВИД). ВИД-это относительно новый тип электромеханического преобразователя энергии, который сочетает в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы регулируемого электропривода. Питание ВИД осуществляется от вентильного преобразователя (коммутатора), который поочередно переключает обмотки статора двигателя в строгом соответствии с сигналами от датчика положения ротора. Для управления полупроводниковым преобразователем используется микропроцессор. При последовательной, периодической коммутации фаз статора, вращение ротора осуществляется с угловой скоростью, пропорциональной частоте коммутации.

К достоинствам ВИД относятся:

- надежность и простота конструкции и технологии изготовления;
- возможность получать как сверхвысокие, так и сверхнизкие частоты вращения вала;
- отсутствие скользящего электрического контакта;
- электромагнитная редукция вращения ВИД и гибкость системы управления;
- ротор ВИД имеет малый момент инерции, что позитивно отражается на динамике его работы;
- ВИД способен работать в тяжелых перегрузочных режимах и в широком диапазоне нагрузок;
- ВИД обладает высокими энергетическими характеристиками и КПД [5].

Характеристика задачи. Вопрос использования ВИД с пониженными массогабаритными характеристиками в качестве приводов, работающих в морской воде и агрессивных средах, до настоящего времени не ставился, авторы впервые начали работать над этой проблемой, используя теоретические и конструктивные решения по ПЭД открытого исполнения нового поколения [1].

Решение задачи. Конструкция вентильно-индукторного электродвигателя открытого исполнения (рисунок 1) содержит корпус 1 диаметром $D_{корп}$, в котором размещены ядро 2 статора с явнополюсными зубцами 3 диаметром по немагнитному зазору D_1 и катушками возбуждения 4 на них из обмоточного провода с полиамидно-фторопластовой изоляцией, например, марки ППИ. Статор имеет протекторную защиту от контактной коррозии ядра 2 диаметром D_a и зубцов 3 статора в виде дуговых шин-протекторов 5, запрессованных в пазы вплотную к внутренним поверхностям ядра 2 и боковым поверхностям зубцов 3 длиной, равной длине пакета статора 2 и толщиной не менее 8-10 мм, например, из магниевого сплава марки МЛ4 (рисунок 1). На валу 6 размещен пакет 7 ротора, имеющего явнополюсные зубцы 8 по количеству на два меньше, чем на статоре и диаметром по немагнитному

зазору D_2 . Ротор имеет протекторную защиту от контактной коррозии ярма 7 и зубцов 8 пакета ротора в виде дисков с зубцами толщиной не менее 8-10 мм, напрессованных на свободные концы вала 6 диаметром $d_{вал}$ из того же магниевого сплава, покрывающими полностью торцевые поверхности пакета ротора, с плотным электрическим контактом с пакетом ротора и вала. В пространство между соседними зубцами 8 ротора запрессованы втулку под замки высокопрочные монолитные цилиндрические клинья 9 из стеклотекстолита или аналогичного материала с целью придания ротору гладкой цилиндрической формы. Длина клиньев должна равняться сумме длины пакета ротора и удвоенной толщине протекторных дисков. Между зубцами пакетов 8 ротора и зубцами пакетов статора 3 имеется немагнитный рабочий зазор 10 (δ), по которому проходит охлаждающая забортная агрессивная вода, обладающая свойствами электролита.

При вращении ротора в охлаждающей агрессивной морской воде (электролите) ротор и статор оказываются в среде движущегося электролита. При полном соприкосновении всех внутренних активных частей машины с электролитом возникает электрохимическая коррозия на всех активных металлических поверхностях, соприкасающихся с электролитом. В связи с тем, что электродный потенциал дисков протекторов ротора и шин-протекторов 5 статора, изготовленных из магниевого сплава марки МЛ4, значительно ниже, чем электродный потенциал электротехнической стали пакета статора 2, пакета ротора 7 и вала 6, то происходит электрохимическая коррозия протекторных дисков ротора и протекторных шин 5 статора с вымыванием продуктов коррозии движущимся электролитом. Физически это значит: на пакетах расточки статора гальванический ток замыкается по цепи: анодный ток выходит из шины-протектора 5, проходит по электролиту и входит в зубцы 3 статора, зубцы статора 3 являются катодами (выход анодного тока), а шины-протекторы 5 являются анодами (выход анодного тока); в роторе гальванический ток замыкается по цепи: анодный ток выходит из протекторных дисков с зубцами, проходит по электролиту и входит в зубцы 8 ротора, зубцы 8 ротора являются катодами (выход анодного тока), а протекторные диски являются анодами (выход анодного тока). Известно, что катоды будут сохранять свое исходное состояние, а аноды будут корродировать, т.е. растворяться в электролите. В данном случае пакеты статора 2, ротора 7, корпус 1 и вал 6 будут в исходном состоянии, а протекторы ротора и шины-протекторы 5 статора будут подвергаться коррозии и уменьшаться в размерах. Поэтому будет происходить расход материала протекторов, а остальные металлические части машины будут находиться в исходном состоянии на протяжении расчетного, запланированного срока эксплуатации без увеличения величины немагнитного рабочего зазора и связанного с этим падения энергетических характеристик машины, которые будут постоянны весь ресурс. Толщина дисков-протекторов ротора и протекторных шин 5 статора из алюминий-магниевого сплава должна быть в пределах (5-8) мм при скорости коррозии протекторов 0,5 мм/год из расчета срока службы в течение 10-15 лет.

Для повышения надежности, живучести и срока службы погружного асинхронного электродвигателя открытого исполнения для нефтегазовых скважин (АМВ НГС) вертикального исполнения (валом вверх для насосов и валом вниз для механизма бурения), рассчитанным на глубину погружения до 3000 м и температуру пластовой воды до 150°C, разработан универсальный высоконагруженный упорно-опорный малогабаритный подшипник скольжения, воспринимающий основную упорную нагрузку от исполнительного механизма, с вкладышами из порошковых материалов (рисунок 2) [2, 3]. Он включает в себя вал 2 с упорным буртиком 3, имеющим упорные термообработанные скользящие поверхности 4 и 11 с точностью обработки до 7...10 класса чистоты. Перпендикулярно на валу расположены опорные термообработанные скользящие поверхности 5 и 12 с такой же степенью обработки поверхностей. Для привода насоса, когда электродвигатель располагается валом вверх, в корпус 1 запрессован вкладыш 6 из порошкового материала марки Бр05Н2С5Гр1ДМ1, который также имеет упорную 4 и опорную 5 скользящие поверхности.

Для охлаждения скользящих поверхностей имеется свободный зазор 7, через который поступает пластовая вода из полости АМВ. Для привода бурового механизма с другой стороны буртика для упора

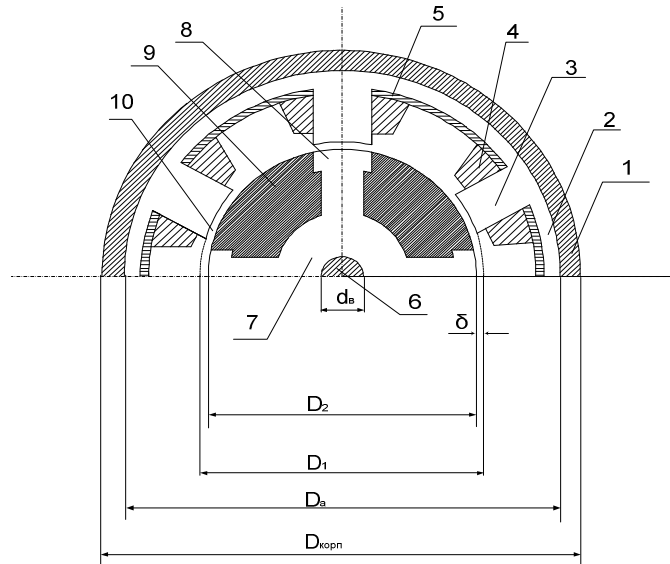


Рисунок 1 – Поперечный разрез погружного вентильно-индукторного двигателя

от веса ротора в корпус 1 двигателя устанавливается подшипниковый щит 8 из антикоррозионной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Щит имеет углубление в виде цилиндра для запрессовки вкладыша. Крепление подшипникового щита осуществляется симметрично расположенными в корпусе 1 винтами 9 (М6...М8), выполненными из высокопрочной термообработанной нержавеющей стали марки 40Х13. В углубление подшипникового щита 8 запрессовывается вкладыш 10 из высокоплотного антифрикционного и антикоррозионного порошкового материала, который имеет упорную 11 и опорную 12 скользящие поверхности.

В полость АМВ НГС в области подшипникового узла вода из окружающей среды поступает через симметрично расположенные отверстия 13 в корпусе 1, а через отверстия 14 нагретая вода выходит из полости машины. По окружности отверстия 13 и 14 равномерно размещены под углом β относительно друг друга, отверстия одной группы 13 смещены на угол $\beta/2$ относительно другой группы 14 с целью улучшения водообмена и для сохранения механической прочности корпуса. Выбирают по 6 отверстий в каждой группе диаметром по 5 мм каждое при диаметре корпуса до 150 мм.

Для охлаждения скользящих пар подшипника вода из полости двигателя через свободные зазоры 7,15,16,17 между корпусом 1 и валом 2 поступает для охлаждения непосредственно на скользящие поверхности подшипника. Для протекторной защиты от электрохимической коррозии подшипникового узла и вала на вал 2 напрессована втулку протекторная втулка 18, а внутрь корпуса 1 запрессовано кольцо 19 из магниевого сплава марки МЛ4, имеющих плотный электрический контакт с корпусом 1 и валом 2. Вкладыши 6 и 10 из высокоплотного порошкового антифрикционного материала

Бр05Н2С5Гр1ДМ1 могут нести удельную нагрузку до 120 кгс/см^2 в аксиальном и радиальном направлениях при температуре до 300°C .

Поверхности вкладышей могут иметь грубую токарную обработку, необходимо только строго выдерживать зазор между скользящими поверхностями с учетом температуры нагрева окружающей пластовой воды до 200°C и с учетом разбега ротора, с тем, чтобы ротор не затормозился во время работы. Рабочий зазор скользящей пары должен быть – ходовой ($60...80 \text{ мк}$) для диаметра вала до 60 мм. Относительная плотность материала вкладыша составляет ($96...99\%$), которая позволяет обеспечить низкий коэффициент трения, равный $f_t = 0,04$ в пластовой воде. Для улучшения охлаждения скользящей пары и удаления образовавшихся частиц вкладыши 6 и 10 имеют осевые канавки на опорной поверхности и шлицы на

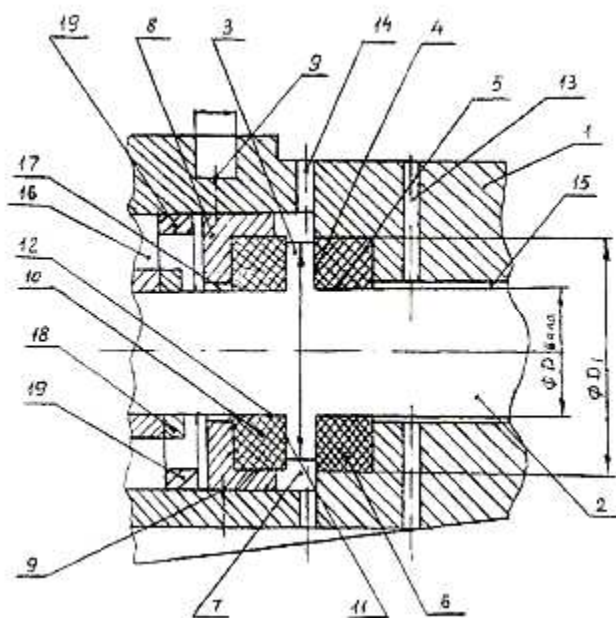


Рисунок 2 – Подшипниковый узел со стороны приводного конца вала

упорной поверхности, как продолжение канавок. Геометрические размеры канавок по диаметру $5...6 \text{ мм}$, конфигурация по сечению – полуокружность.

Для усиления жесткости при скручивании во время работы вал ротора должен быть сплошным, его охлаждение обеспечивается за счет теплопередачи в окружающую воду, а ввиду большой теплопроводности материала он практически нагревается на $(1...2)^\circ\text{C}$ выше, чем вода в зазоре между статором и ротором.

Опорно-упорный подшипник скольжения на не приводном конце вала АМВ НГС имеет определенные особенности. Подшипниковый узел содержит корпус, закрытый крышкой, закрепленной симметрично расположенными винтами с потайной головкой с внешней стороны корпуса. В корпус вставлен под замки подшипниковый щит, закрепленный с внешней стороны симметрично расположенными друг относительно друга ($6...10$) винтами с резьбой М6 и потайной головкой. На конец вала 5 напрессован горячей посадкой упорный стакан из термообработанной нержавеющей стали марки 20Х13, который по аналогии с предыдущим подшипником имеет буртик с упорной скользящей и опорной радиальной скользящей поверхностями. В цилиндрическое углубление подшипникового щита втулку запрессован такой же вкладыш из высокоплотного антифрикционного порошкового материала, который является неподвижной скользящей частью подшипника, который также имеет упорную (осевую) и опорную (радиальную) скользящие поверхности. Остальные конструктивные особенности,

обработка скользящих поверхностей, охлаждение и протекторная защита аналогичны описанному выше упорно-опорному подшипнику.

Главное назначение опорно-упорного подшипника скольжения заключается в поддержании вала с ротором в исходном положении при отклонении оси машины до 80° при работе на глубине 3000 м с тем, чтобы обеспечить неизменность толщины рабочего зазора между статором и ротором на полный срок службы машины. Постоянство величины немагнитного зазора обеспечивает постоянство энергетических характеристик АМВ в процессе эксплуатации.

Выводы: 1. Данная конструкция погружного вентильно-индукторного двигателя открытого исполнения, работающего в морской воде на любой глубине погружения, позволит значительно повысить его надежность и живучесть при сохранении энергетических характеристик. Это достигается за счет исключения контактной коррозии электротехнической стали статора и ротора в немагнитном зазоре с помощью протекторных шин статора, размещенных между зубцами пакета статора и протекторных дисков ротора с зубцами, напрессованных на свободные концы вала вплотную к пакету ротора. Создание гладкой цилиндрической внешней поверхности ротора запрессованными монолитными немагнитными клиньями между соседними зубцами ротора позволит значительно улучшить виброакустические характеристики (ВАХ) машины и уменьшить гидравлические потери мощности.

2. Применение универсального высоконагруженного упорно-опорного малогабаритного подшипника скольжения позволяет в значительной степени повысить надежность, работоспособность и увеличить срок службы АД открытого исполнения на глубине погружения до 3000 м при температуре окружающей жидкости 150°C при возможном отклонении от вертикальной оси машины до 80° .

3. Опорная скользящая поверхность вкладыша обеспечивает соосность ротора по отношению к расточке статора и постоянство рабочего зазора между статором и ротором, что надежно гарантирует постоянство энергетических характеристик и КПД двигателя, его эксплуатационную надежность и установленный срок службы.

Библиографический список использованной литературы

1. Ветохин В.И. Н Новое поколение электрических машин для работы в жидких агрессивных средах и электроприводах подводных объектов / В.И. Ветохин. — Изд. 2-е, перераб. и исправ. — СПб, М.: Полтораки, 2010. —
2. Агафонов В.В К вопросу о перспективе развития подводного электроснабжения при освоении континентального шельфа и мирового океана / В.В. Агафонов, В.И. Ветохин // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: матер. докл. междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 21–25 сентября, 2009 г. — Севастополь, 2009. — С. 32–34.
3. Ветохин В.И. Опыт проектирования и испытания погружного асинхронного двигателя открытого типа / В.И. Ветохин, А.М. Олейников, Б.П. Береза // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — 2003. — Вып. 48. — С. 124–128.

Поступила в редакцию 17.05.2012 г.

Ясаків Г.С., Агафонов В.В., Костиков Е.А. Заглибний вентильно-індукторний електродвигун відкритого виконання з універсальними підшипниками ковзання

Розглядаються питання використання вентильно-індукторних двигунів зі зниженими масогабаритними характеристиками як привід, що працює у морській воді й агресивних середовищах. Подається конструкція ВІД та опис універсального стопорно-опорного підшипника для нового заглибного електродвигуна відкритого виконання для нафтогазових свердловин, що працює на глибинах занурення до 3000 м.

Ключові слова: заглибний електродвигун, вентильно-індукторний, підшипник, стопорний, опорний, нафтогазові свердловини.

Yasakov G.S., Agafonov V.V., Kostikov E.A. Submersible open type switch reluctance drive with universal sleeve type bearing

Considered are the issues of stepless usage of switch reluctance drive with loose weight and size parameters as a drive working in sea water and aggressive environment. The description is given of the SRD construction and new universal axial-radial bearing for new submersible open type electric motor for oil and gas wells on depth of immersing up to 3000 m.

Keywords: submersible motor, switch reluctance, bearing, axial bearing, radial bearing, oil and gas wells.