

Научная статья

УДК 62-133.241; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-23-27

## **РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ПРИВодОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ**

✉ Булатова Юлия Михайловна;

Рева Юрий Викторович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ [bylatova.u@igps.ru](mailto:bylatova.u@igps.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы, связанные с конструкцией и применением погружных электрических машин в морской среде на буровых установках и платформах. Изложены особенности электрических машин открытого исполнения для приводов систем автоматизации и робототехники погружных электрических машин.

Рассмотрены конструктивные решения по электрическим машинам открытого исполнения, которые можно использовать в устройствах, работающих в жидких агрессивных средах с химической активностью. Показаны рабочие характеристики и эффективность использования новых материалов в конструкции электродвигателя при наличии корпуса, подшипников щитов и вала из сплава титана, которые имеют электрический контакт с активными частями электродвигателя.

*Ключевые слова:* обмоточные провода, электродный потенциал, погружные электрические двигатели, опорно-упорные подшипники, гидростойкость материалов, подшипниковые щиты, системы автоматизации и робототехники, сплав титана

**Для цитирования:** Булатова Ю.М., Рева Ю.В. Расчет рабочих характеристик электродвигателей электрических машин открытого исполнения для приводов систем автоматизации и робототехники // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 3 (51). С. 23–27. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-23-27.

Scientific article

## **CALCULATION OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS OF ELECTRIC MACHINES OF OPEN DESIGN FOR DRIVES OF AUTOMATION AND ROBOTICS SYSTEMS**

✉ Bulatova Yulia M.;

Reva Yuriy V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ [bylatova.u@igps.ru](mailto:bylatova.u@igps.ru)

*Abstract.* The issues related to the design and application of submersible electric machines in the marine environment on drilling rigs and platforms are considered. The features of open-ended electric machines for drives of automation and robotics systems of submersible electric machines are described.

Constructive solutions for open-ended electric machines that can be used in devices operating in liquid aggressive media with chemical activity are considered. The performance characteristics and efficiency of using new materials in the design of an electric motor are shown in the presence of a housing, shield bearings and a titanium alloy shaft that have electrical contact with the active parts of the electric motor.

*Keywords:* winding wires; electrode potential; submersible electric motors, thrust bearings, hydrolytic resistance of materials, bearing shields, automation and robotics systems, titanium alloy

**For citation:** Bulatova Yu.M., Reva Yu.V. Calculation of the performance characteristics of electric motors of electric machines of open design for drives of automation and robotics systems // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2024. № 3 (51). P. 23–27. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-23-27.

## Введение

Как известно, для дальнейшего развития работ по освоению ресурсов Мирового океана, шельфных морских добычных установок, а также поисковых и геологоразведочных работ по изучению и поиску минеральных ресурсов в недрах морей и океанов и мантии Земли в придонных зонах с помощью роботов и батискафов, особенно необитаемых, требуется разработка электрических машин (ЭМ) малой мощности для выполнения этих работ. Разрабатываемые машины относятся к области погружных ЭМ открытого исполнения малой мощности (до 1 кВт), которые применяются для приводов различных механизмов забортных систем автоматики и робототехники, а также навигационных следящих систем гирорелевых устройств на научно-исследовательских глубоководных обитаемых и необитаемых аппаратах, на добычных установках.

Актуальность решаемой задачи по созданию ЭМ открытого исполнения с охлаждением ее активных частей непосредственно окружающей морской водой состоит в том, что ЭМ при освоении ресурсов Мирового океана можно использовать в процессе выполнения работ на нефтедобывающих морских платформах, что улучшит эффективность этих процессов и снизит затраты и энергоемкость.

Целью данной работы является определение гидrolитической стойкости и работоспособности новых материалов, таких как обмоточные провода, подшипники, протекторы, гильзы на роторе и др., в конструкции электродвигателей нового поколения при длительной работе в морской воде и оценка их ресурса.

Научной новизной данной работы является конкретизация данных о том, что на валу ротора были установлены по большому и маленькому диску с торцов для протекторной защиты ротора, которые использовались для нового, более качественного способа балансировки ротора.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые дано научное обоснование электрической микромашины с гильзой из магнитоэлектропроводящего материала на роторе, внедрение которой обеспечит решение многих прикладных задач в данной отрасли.

Практической значимостью работы является то, что в результате работы, проведенной авторами в содружестве со специалистами, была создана модель ЭМ открытого исполнения, которая показала высокие результаты при испытании на АО «Силовые машины» и возможность их использования в различных структурах и системах ведомств [1].

## Методы исследования

Объектом исследования являются герметичные электрические микромашины с гильзой из магнитоэлектропроводящего материала на роторе.

В основу исследования положен метод экспертных оценок специалистов по вопросам приводов систем автоматики и робототехники ЭМ открытого исполнения.

На электродвигателях ЭМ открытого исполнения для приводов систем автоматики и робототехники применен двухслойный ротор, представляющий собой гильзу из железомедного сплава толщиной 8 мм, одетую на предварительно расточенный по внешней поверхности пакет ротора. По торцам к гильзе приварены медные короткозамыкающие кольца. Сплав гильзы по своим характеристикам примерно соответствует материалу СМ-24. Обмоточный провод, материалы для скользящих пар подшипников и протекторных колец взяты такими же, как и для электродвигателей предыдущих поколений типа АВМ-3.

Целью испытаний являлась проверка работоспособности и эффективности использования новых материалов в конструкции электродвигателя при наличии корпуса, подшипников щитов и вала из сплава титана, которые имеют электрический контакт с активными частями электродвигателя, а именно пакеты статора и ротора, гильза ротора,

подшипники, электродный потенциал титана в четыре раза больше, нежели у нержавеющей стали электродвигателя типа АВМ-3. Испытания проводились в технологическом баке емкостью 400 л, заполненном искусственной морской водой с 3,5-процентным содержанием хлористого натрия (3,5 % NaCl).

### Результаты исследования и их обсуждение

После определения энергетических характеристик двигателя были проведены испытания в течение 500 ч для оценки гидролитической стойкости материалов, обмоточных проводов, подшипников, гильзы ротора и т.д. и эффективности работы протекторной защиты и конструкции двигателя корпусом из титанового сплава. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты эффективности работы протекторной защиты и конструкции двигателя с корпусом из титанового сплава

Наработка, ч	Линейное напряжение, В	Ток, А	Мощность холостого хода, Вт	Сопротивление изоляции, МОм	Примечание
100	220	8,06	1 200	500	
200	220	8,06	1 200	500	
300	220	8,06	1 200	500	
400	220	8,06	1 200	500	
500	220	8,06	1 200	500	

Из табл. 1. видно, что параметры электродвигателя в процессе испытаний остались стабильными. Следовательно, коррозия статора и ротора в рабочем зазоре отсутствует, постоянство мощности подтверждает отсутствие абразивного износа подшипников. Средняя температура охлаждающей соленой воды в стендовой установке в процессе испытаний равнялась 33 °С, температура обмотки статора составляла 50 °С.

Высокое сопротивление изоляции (500 МОм) соответствует исходному состоянию и подтверждает гидролитическую стойкость обмоточных приводов к искусственной морской воде (3,5 % NaCl). После ресурсных испытаний (500 ч) были произведены разборка и ревизия электродвигателя с замером геометрических размеров основных активных частей. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты измерений геометрических размеров основных активных частей электродвигателя

Диаметр деталей	До испытаний, мм	После испытаний, мм
Расточки: статора	214,4	214,4
ротора	212,7	212,7
Подвижной втулки подшипника	60	60
Внутреннего вкладыша	60,1	60,1
Внешней втулки протектора	56,0	53

Из табл. 2. видно, что геометрические размеры активного ядра машины и втулок подшипников не изменились, контактная коррозия приостановлена протекторной защитой в виде колец на статоре и втулок на концах ротора из материала АМг-3М. Внешний диаметр протекторных втулок уменьшился на 1,5 мм в сторону или расход материала втулок протекторов увеличился в четыре раза в пересчете на год по сравнению с аналогичными

втулками двигателя предыдущего поколения АМВ-3, что объясняется повышенным электродным потенциалом титанового сплава по сравнению с нержавеющей сталью конструкции АМВ-3 примерно в четыре раза [2].

Температуры нагрева в машинах исследовались на различных моделях машин с обмоткой из обмоточного провода с полимерной изоляцией и различными плотностями тока, например, на электродвигателе типа АМВ-3, корпус был изготовлен из стали. Мощность двигателя составляла 5,5 кВт, напряжение – 220 В, частота вращения – 750 об/мин. Результаты исследования приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Температуры нагрева в электродвигателях асинхронных машин  
при различных плотностях тока**

Плотность тока $J$ , $A/mm^2$	Температура воздуха $\vartheta_{\text{возд.}}, ^\circ C$	Температура воды в баке $\vartheta_{\text{воды}}, ^\circ C$	Температура меди обмотки $\vartheta_{\text{м}}, ^\circ C$
5,0	23	28	32
6,25	20	30	36
7,5	20	31	36,9
8,75	21	32	40
9,0	22	37	49

Из табл. 3 видно, что максимальная температура нагрева меди обмотки не превышает  $50^\circ C$ ,  $12^\circ C$  – перепад температуры относительно воды в изоляции проводов и выкладке паза. Измерение температур активных частей ЭМ осуществлялось термомпарами медь – константан, заборной воды – термометрами. Температура обмотки определялась по сопротивлению меди.

Произведены испытания на нагревание электродвигателя при полезной мощности на валу 6 кВт и 9 кВт. Нагрузка создавалась генератором постоянного тока, который грузили реостатом. Ниже, в табл. 4, приведены результаты испытаний при установившихся температурах.

Таблица 4

**Результаты испытания электродвигателя при полезных мощностях**

$P_2$ , кВт	$\vartheta_{\text{обм}}, ^\circ C$	$\vartheta_{\text{паз}}, ^\circ C$	$\vartheta_{\text{воды}}, ^\circ C$	$\vartheta_{\text{изол}}, ^\circ C$	$\vartheta_{\text{паз}}, ^\circ C$
6	41	36	30	5	6
9	53	48	37	5	11

Из этих результатов можно заключить, что при мощности 9,0 кВт и температуре окружающей воды  $37^\circ C$  обмотка нагревается всего на  $53^\circ C$ . Таким образом, при температуре морской воды, равной  $32^\circ C$ , нагрев меди обмотки статора будет меньше  $50^\circ C$ , а в данном случае –  $48^\circ C$ . Сопротивление изоляции  $R_{\text{из}}$  статора в обоих режимах равнялось 500 Мом.

В табл. 4 обозначено:  $\vartheta_{\text{обм}}$ ,  $\vartheta_{\text{паз}}$ ,  $\vartheta_{\text{воды}}$  – абсолютные установившиеся температуры нагрева меди обмотки, воды в пазу, охлаждающей воды в технологическом баке, емкость которого равнялась 400 л;  $\Delta\vartheta_{\text{изол}} = \vartheta_{\text{обм}} - \vartheta_{\text{паз}}$  – перепад температуры в изоляции обмоточного провода;  $\Delta\vartheta_{\text{паз}} = \vartheta_{\text{паз}} - \vartheta_{\text{воды}}$  – перепад температуры в пазовой выкладке из фторлакткани [3].

## Заключение

Таким образом, проведенные испытания на нагревание машин подтвердили теоретические обоснования и утверждение о том, что больших нагревов активных частей в ЭМ открытого исполнения не будет, так как тепло, выделенное обмоткой, передается непосредственно в окружающую морскую воду и существенного влияния этих температур на энергетические и массогабаритные характеристики машин не будет.

Подтверждено, что полезную мощность ЭМ открытого исполнения можно увеличить в два – три раза по сравнению с герметичными машинами в одних и тех же габаритах активного ядра за счет увеличения плотности тока обмотки статора даже при значительных уменьшениях коэффициента заполнения паза, то есть уменьшением числа витков фазы.

### Список источников

1. Рева Ю.В. Технология изготовления и способ сборки электрических машин открытого исполнения на средствах водного транспорта // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 2. С. 36–40.
2. Рева Ю.В. Применение опорно-упорных подшипников скольжения электрических машин открытого исполнения в морской воде Арктической зоны // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 1. С. 27–30.
3. Рева Ю.В. Технические средства добычи минеральных ресурсов и полезных ископаемых из глубин Мирового океана // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2020. № 1. С. 16–19.

### References

1. Reva Yu.V. Tekhnologiya izgotovleniya i sposob sborki elektricheskikh mashin otkrytogo ispolneniya na sredstvakh vodnogo transporta // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 2. S. 36–40.
2. Reva Yu.V. Primenenie oporno-upornyyh podshipnikov skol'zheniya elektricheskikh mashin otkrytogo ispolneniya v morskoy vode Arkticheskoy zony // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 1. S. 27–30.
3. Reva Yu.V. Tekhnicheskie sredstva dobychi mineral'nyh resursov i poleznykh iskopaemykh iz glubin Mirovogo okeana // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 1. S. 16–19.

### Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 14.09.2024; одобрена после рецензирования: 28.10.2024; принята к публикации: 29.10.2024

### Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 14.09.2024; approved after review: 28.10.2024; accepted for publication: 29.10.2024

### Информация об авторах:

**Булатова Юлия Михайловна**, преподаватель кафедры сервис безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: bylatova.u@igps.ru, SPIN-код: 8694-0865

**Рева Юрий Викторович**, доцент кафедры сервис безопасности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат военных наук, доцент, e-mail: yreva@list.ru, SPIN-код: 2619-6292

### Information about the authors:

**Bylatova Yulia M.**, senior lecturer of the department of security service of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: bylatova.u@igps.ru, SPIN: 8694-0865

**Reva Yuriy V.**, associate professor of the department of security service of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of military sciences, associate professor, e-mail: yreva@list.ru, SPIN: 2619-6292