

ИНЖЕНЕРНОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Научная статья

УДК 62-133.241; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-4-31-38

ПРОТЯЖНЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНЫХ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ

✉ Булатова Юлия Михайловна;

Рева Юрий Викторович.

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

✉ bylatova.u@igps.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с конструкцией и схемами протяжных обмоток трехфазных асинхронных погружных электрических машин в морской среде на буровых установках и платформах. Изложен расчет шага обмотки, число пазов на полюс и фазу, а также угол сдвига между началами и концами фаз. Приведен математический аппарат расчета и схемы однослойных, двухслойных и концентрических обмоток асинхронных электрических двигателей. Также рассмотрены некоторые характерные отличительные особенности между однослойными, двухслойными петлевыми обмотками и обмотками с концентрическими витками электрических машин открытого исполнения.

Ключевые слова: шаг обмотки, количество пазов статора, погружные электрические машины, число полюсов и фаз, однослойная протяжная петлевая обмотка, направление вращения поля, электромагнитный момент, концентрические витки

Для цитирования: Булатова Ю.М., Рева Ю.В. Протяжные петлевые обмотки трехфазных погружных электрических машин открытого исполнения // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 4 (52). С. 31–38. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-4-31-38.

Scientific article

BROACHING LOOP WINDINGS OF THREE-PHASE SUBMERSIBLE ELECTRIC MACHINES OF OPEN DESIGN

✉ Bulatova Yulia M.;

Reva Yuriy V.

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

✉ bylatova.u@igps.ru

Abstract. The article is devoted to the consideration of issues related to the design and circuits of broaching windings of three-phase asynchronous submersible electric machines in the marine environment on drilling rigs and platforms. The article describes the calculation of the winding pitch, the number of slots per pole and phase, as well as the angle of shift between the beginnings and ends of the phases. The mathematical apparatus for calculating and schematics of single-layer, double-layer and concentric windings of asynchronous electric motors is given. Some characteristic distinguishing features between single-layer, double-layer loop windings and windings with concentric coils of open-ended electric machines are also considered.

Keywords: winding pitch, number of stator slots, submersible electric machines, number of poles and phases, single-layer extended loop winding, direction of rotation of the field, electromagnetic moment, concentric coils

For citation: Bulatova Yu.M., Reva Yu.V. Broaching loop windings of three-phase submersible electric machines of open design // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2024. № 4 (52). P. 31–38. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-4-31-38.

Введение

Как известно, протяжные обмотки на принципиальной схеме выполняются также, как и для обычных электрических машин переменного тока и отличаются только способом и технологией изготовления. Принцип образования, расчет, типы обмоток для асинхронных общепромышленных электродвигателей общеизвестны.

Очевидно, что технологически не каждый тип обмотки можно выполнить протяжным способом с непрерывной фазой и удовлетворением требований по изоляции, предъявляемым к машинам данного типа. В соответствии с этим рассмотрим основные типы протяжных обмоток указанных машин, технология намотки которых показана ниже.

Для образования любой обмотки исходными данными являются: количество пазов статора Z_1 ; число полюсов $2p$; число – m .

Рассчитываются: шаг обмотки – $У$; число пазов на полюс и фазу – g ; угол между соседними пазами в электрических градусах – α ; угол сдвига в электрических градусах между началами или концами фаз α_{ϕ} .

Актуальность решаемой задачи по созданию электрических машин (ЭМ) открытого исполнения с охлаждением их активных частей непосредственно окружающей морской водой состоит в том, что асинхронные электрические двигатели (АЭД) с протяженными обмотками статора должны иметь соответствующие разнослойные протяжные петлевые обмотки, которые являются одним из определяющих факторов их работы, что будет гарантировать их надежность при эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях и морской среде, и являются новым видом техники [1].

Цель данной работы – дать понятие о протяжных обмотках и их схемах в АЭД ЭМ открытого исполнения.

Научной новизной данной работы является то, что впервые произведен расчет шага обмотки, число пазов на полюс и фазу, а также угол сдвига между началами и концами фаз статоров асинхронных электрических двигателей электрических машин открытого исполнения, которые дополнили существующие известные данные.

Теоретической значимостью работы является то, что впервые приведен математический аппарат расчета и схемы однослойных, двухслойных и концентрических обмоток АЭД, который научно обосновывает этот расчет и обеспечит в будущем решение важных прикладных задач в данной отрасли.

Практической значимостью работы является то, что в результате исследования, проведенного авторами, была создана модель ЭМ открытого исполнения, которая показала высокие результаты при испытании на АО «Силовые машины» и может быть использована в других ведомствах [2].

Методы исследования

Объектом исследования в данной работе являются герметичные маслозаполненные погружные электродвигатели.

В основу исследования положен метод экспертных оценок по вопросам расчета однослойных, двухслойных и концентрических обмоток АЭД.

Условно принимаем, что количество проводов в пазу равно N_1 , и они расположены в один слой, тогда число витков в фазе для двухполюсной машины равно:

$$W_1 = g * N_1. \quad (1)$$

Для многополюсных машин количество последовательно соединенных витков фазы равно:

$$W_1 = p * g * N_1. \quad (2)$$

Для наглядности и простоты изображения схем обмоток условно принимаем: начало первой фазы – А; конец – Х; начало второй фазы – В; конец – Y; начало третьей фазы – С; конец – Z.

На рис. 1 показана простая петлевая обмотка с диаметральной шагом для четырехполюсной машины с $Z = 24$, $g = 2$. Стрелками указаны направления электродвижущей силы (ЭДС) под северным полюсом вверх, южным – вниз, в соответствии со временем векторной диаграммы ЭДС. На схеме витки показаны в виде многоугольников (пазовые и лобовые части); практически эти витки изогнуты в лобовых частях по дуге, допускающей изгиб обмоточного провода. На рис. 1 показана схема уложенной непрерывно фазы «А». Для данного типа обмотки технологию протяжки можно записать следующим образом:

$$A \rightarrow (1-7) N_1 \text{ витков} \rightarrow (2-8) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (13-19) N_1 \text{ витков} \rightarrow (14-20) N_1 \text{ витков} \rightarrow X.$$

Для обеспечения плотности тока при больших мощностях машин допускается осуществлять намотку в два и более параллельных провода.

По аналогии с фазой «А» выполняются фазы «В» и «С» с учетом сдвига их начал на угол 120° .

Тогда технологию протяжки можно записать следующим образом:

$$B \rightarrow (5-11) N_1 \text{ витков} \rightarrow (6-12) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (17-23) N_1 \text{ витков} \rightarrow (18-24) N_1 \text{ витков} \rightarrow Y;$$

$$C \rightarrow (9-11) N_1 \text{ витков} \rightarrow (10-16) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (21-3) N_1 \text{ витков} \rightarrow (22-4) N_1 \text{ витков} \rightarrow Z.$$

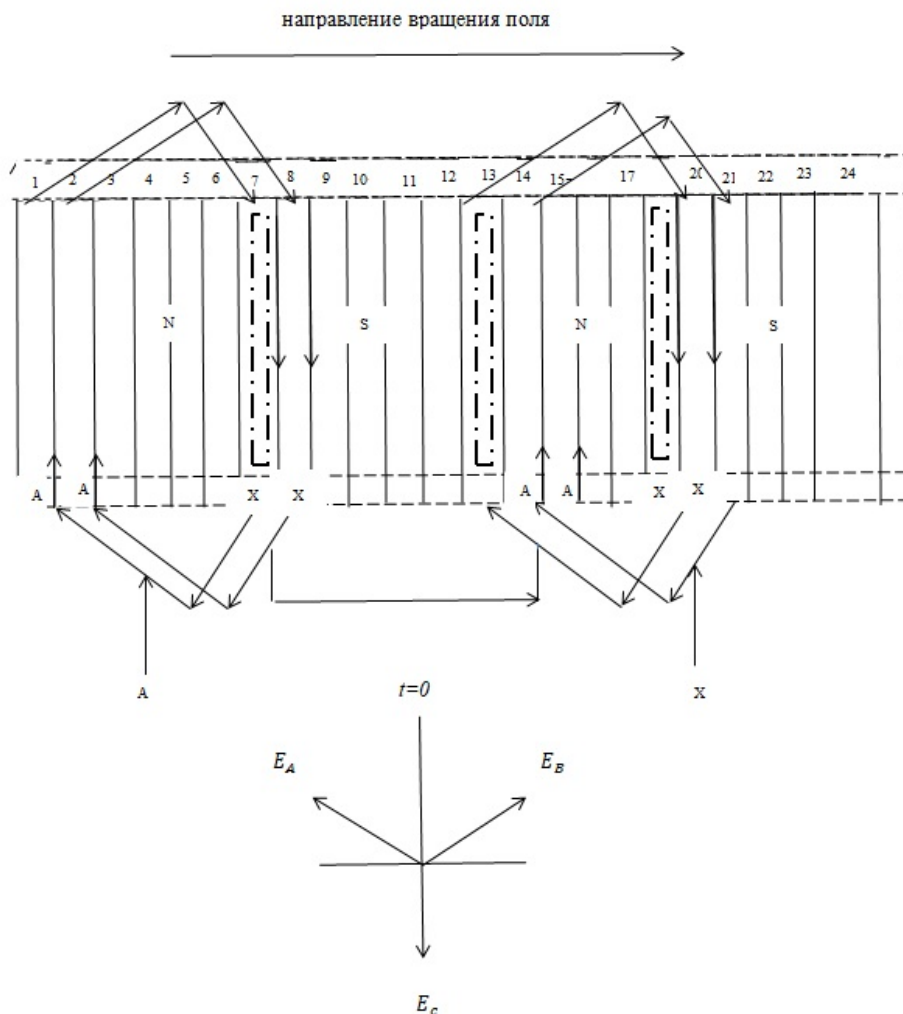


Рис. 1. Схема фазы «А» однослойной протяжной петлевой обмотки

Такую обмотку можно выполнить с укороченным шагом. Из формулы (1) видно, что данная обмотка может быть применена в машинах с большим количеством полюсов и малым g , то есть в малоскоростных машинах ($2p \geq 4$). Однако при больших магнитодвижущих силах (МДС) необходимо увеличить количество витков в пазу N_1 , что усложняет их укладку и крепление, получается большое сгущение витков в лобовых частях под серединами полюсов, особенно в малополюсных машинах. Эти недостатки устраняются в двухслойных петлевых обмотках (рис. 2).

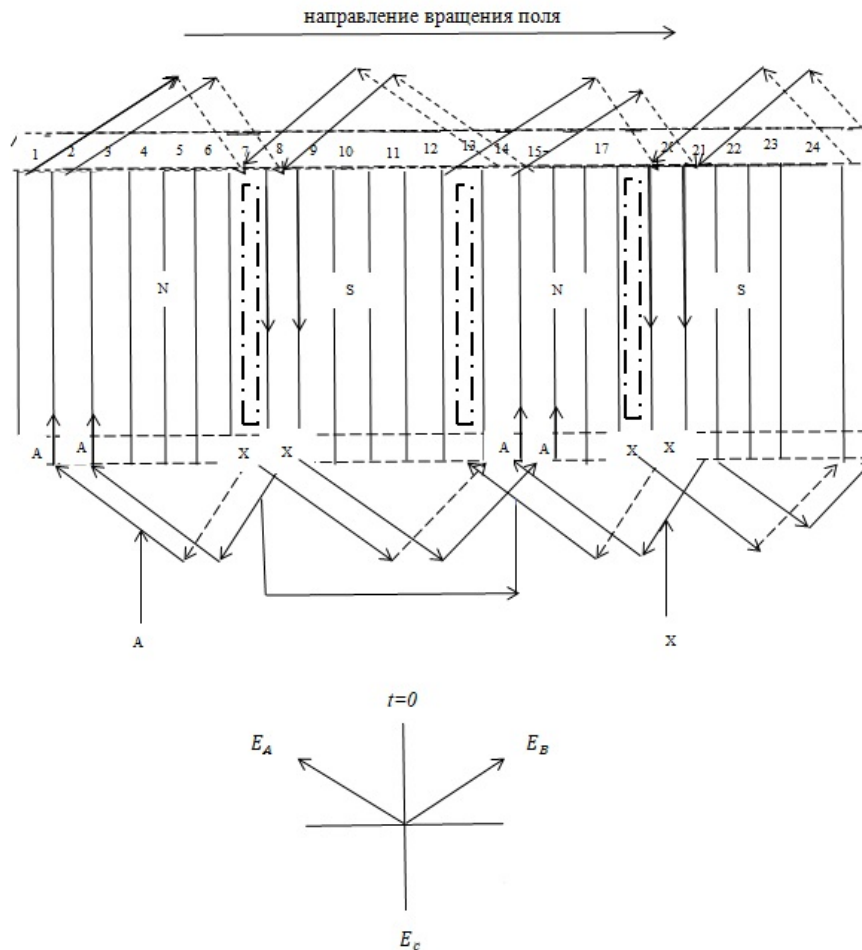


Рис. 2. Схема фазы «А» двухслойной протяжной петлевой обмотки

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет и определение параметров обмотки аналогичен расчету для однослойных обмоток. Условно количество проводов в пазах разбиваем на два слоя с одинаковым количеством проводов. При этом количество проводов в пазу должно быть четным.

На рис. 2 показана двухслойная петлевая обмотка для фазы «А» статора по рис. 1. Витки фазы «А» соединены последовательно: сплошными линиями – провода условного верхнего слоя, штриховыми – нижнего слоя.

Обозначив верхний слой проводов в пазу без индекса, а нижний – со штрихом, последовательность протяжки провода для фазы «А» можно записать:

$$A \rightarrow (1-7') N_1 \text{ витков} \rightarrow (2-8') N_1 \text{ витков} \rightarrow (14'-8) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (13'-7) N_1 \text{ витков} \rightarrow (13-19') N_1 \text{ витков} \rightarrow (14-20') N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (2'-20) N_1 \text{ витков} \rightarrow (1'-19) N_1 \text{ витков} \rightarrow X.$$

По аналогии с фазой «А» и учетом α_ϕ можно записать последовательность протяжки провода для фаз «В» и «С», построение не производится.

Главным преимуществом данной обмотки перед однослойной является более равномерное распределение витков в лобовых частях, удобство в технологии их крепления и сокращение их длины. Эту обмотку можно выполнить с укороченным шагом, получим экономию обмоточного провода и улучшенные характеристики ЭДС и МДС.

За рубежом, в частности фирма PLEUGER (Германия), применяют конструкцию такой обмотки с диаметральной шагом в водонаполненных погружных электродвигателях для скважных насосов.

Как было отмечено выше, для высокоскоростных электродвигателей с большим числом g и количеством проводов в пазу N_1 при $2p < 4$ однослойные и двухслойные петлевые обмотки в технологическом исполнении трудновыполнимы. В лобовых частях будут большие сгущения обмоточных проводов.

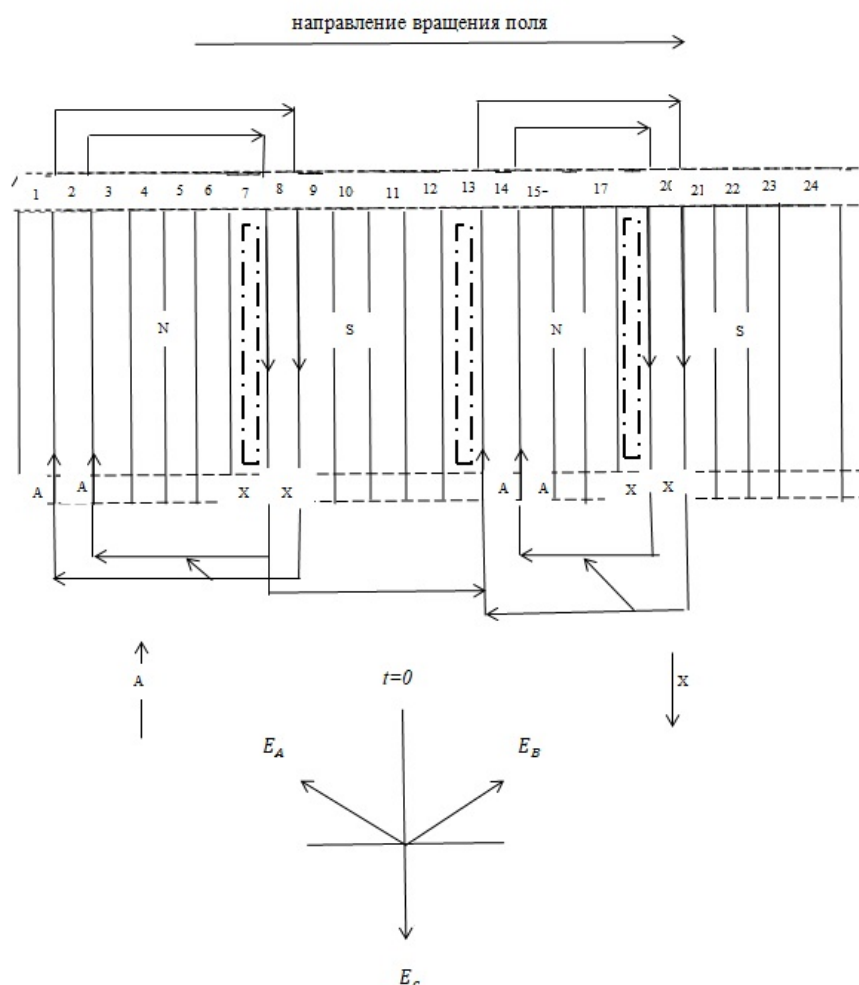


Рис. 3. Схема фазы «А» протяжной обмотки с concentрическими витками

В связи с этим для данных машин рекомендуется обмотка с concentрическими витками, в которой витки меньшим шагом располагаются внутри витка с большим шагом.

На рис. 3 приведена схема фазы «А» такой обмотки, имеющей $2p = 4$, $Z_1 = 24$, последовательность протяжки которой можно записать:

$$A \rightarrow (1-8) N_1 \text{ витков} \rightarrow (2-7) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (13-20) N_1 \text{ витков} \rightarrow (14-19) N_1 \text{ витков} \rightarrow X.$$

Шаг в данной обмотке для каждого витка будет различным, шаг внешнего витка определяется первым пазом «1» одного полюса и последним пазом «8» соседнего полюса с учетом g , шаг следующего витка располагается между следующими «2»–«7» пазами внутри первого витка и т.д. В данном случае максимальный шаг будет равен:

$$Y_1 = \frac{Z_1}{2p} + g - 1.$$

Аналогично можно записать последовательность протяжки для фаз «В» и «С», построение не приводится. При различных шагах concentрических витков стороны витков одной и той же фазы, лежащие под соседними полюсами, допускается переход от витка с большим шагом к меньшему и наоборот, поскольку ЭДС фазы при этом не изменится. В электромагнитном отношении обмотки с concentрическими витками эквивалентны обмотке с полным шагом, количество витков фазы определяется по выражению (2).

Для обмоток ЭМ при больших числах $g \geq 2$ и большом количестве N_1 в пазу лобовые части получаются длинными, для их уменьшения при четном g витки полюсов можно разделить на две половины ($g/2$) и отогнуть лобовые части витков каждой половины в разные стороны, то есть вывернуть их относительно друг друга на 180° «вразвалку», отсюда название обмотки с concentрическими витками «вразвалку».

На рис. 4 показана схема фазы «А» такой обмотки, технологию протяжки которой можно записать:

$$A \rightarrow (2-7) N_1 \text{ витков} \rightarrow (13-8) N_1 \text{ витков} \rightarrow \\ \rightarrow (14-19) N_1 \text{ витков} \rightarrow (1-20) N_1 \text{ витков} \rightarrow X.$$

По аналогии технологию протяжки можно записать для фаз «В» и «С» (на рисунках не показано). Шаг обмотки будет равняться:

$$Y_1 = \frac{Z_1}{2p}.$$

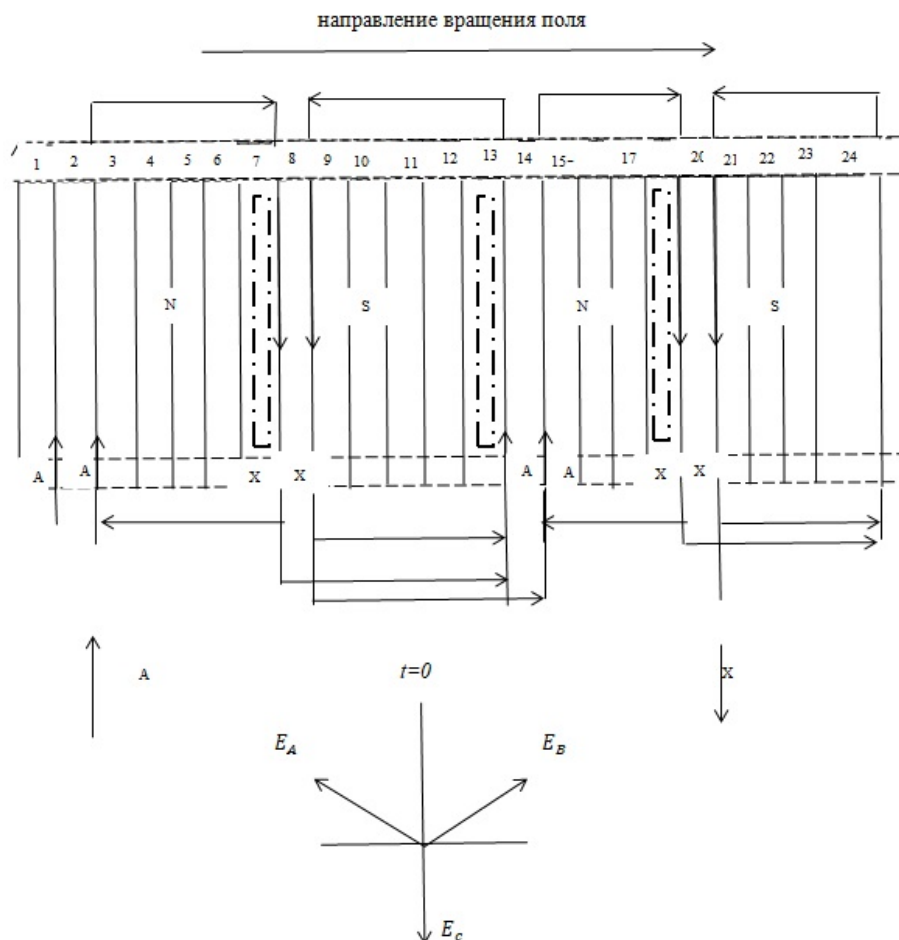


Рис. 4. Схема фазы «А» протяжной обмотки с concentрическими витками «вразвалку»

При исполнении данной обмотки получается экономия обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовых частей, а также повышается количество намотки, симметричность фаз намотки и т.д.

Заключение

В итоге по рассмотренным схемам протяжных обмоток можно заключить, что выбор соответствующей схемы обмотки производят для каждой конкретной конструкции машины, исходя из технологичности, простоты, экономии обмоточного провода и т.д., в зависимости от числа пазов статора, числа пар полюсов, габаритов машины.

При $g = 2,3$; $2p > 4$ рекомендуется двухслойная петлевая протяжная обмотка, в основном для неререверсивных электродвигателей.

При $g > 4$ рекомендуется обмотка с концентрическими витками, причем при g – четном числе необходимо выполнять обмотку с концентрическими витками «вразвалку», эти обмотки необходимо применять, главным образом, в реверсивных машинах [10].

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. Вешняков А.С. Опыт ОАО «Удмуртнефть» по внедрению штанговых насосов двойного действия // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2014. № 3. С. 72–75.
4. Францев А.В., Юшкин А.Ю., Якимов С.Б. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2013. № 6. С. 62–66.
5. 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.
6. Погружные электродвигатели с повышенным напряжением – двойной эффект без инвестиций / С.Б. Якимов [и др.] // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2014. № 3. С. 31–39.
7. Шафиков И.Н. Пути повышения энергоэффективности электроприводов скважинных центробежных насосных установок // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. трудов III Междунар. (VI Всерос.) науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. С. 156–160.
8. Шафиков И.Н. Регулируемый привод скважинного электроцентробежного насоса на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 3. С. 53–60.
9. Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и создание комплексных аварийно-спасательных центров в Арктике: Междунар. науч.-практ. конф. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012.
10. Марек Е. Обмотки электрических машин постоянного и переменного тока. 2-е изд. М.: Гос. техн. изд-во, 1929. 100 с.

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. Veshnyakov A.S. Opyt OAO «Udmurtneft» po vnedreniyu shtangovykh nasosov dvojnogo dejstviya // Nauchno-tekhnicheskij vestnik OAO «NK «Rosneft». 2014. № 3. S. 72–75.
4. Francev A.V., Yushkin A.Yu., Yakimov S.B. Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa // Nauchno-tekhnicheskij vestnik OAO «NK «Rosneft». 2013. № 6. S. 62–66.
5. Reva. Yu.V. Tekhnicheskie sredstva dobychi mineral'nykh resursov i poleznykh iskopaemykh iz glubin Mirovogo okeana // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 1. S. 16–19.
6. Pogruzhnye elektrodvigateli s povyshennym napryazheniem – dvoynoj effekt bez investitsij / S.B. Yakimov [i dr.] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik OAO «NK «Rosneft». 2014. № 3. S. 31–39.
7. Shafikov I.N. Puti povysheniya energoeffektivnosti elektroprivodov skvazhinnykh centrobezhnykh nasosnykh ustanovok // Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatij: sb. nauch. trudov III Mezhdunar. (VI Vseros.) nauch.-tekhn. konf. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2017. S. 156–160.
8. Shafikov I.N. Reguliruemyy privod skvazhinного elektrocentrobezhного nasosa na osnove vysokovol'tного mnogourovneвого preobrazovatelya chastoty // Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2019. T. 15. № 3. S. 53–60.
9. Problemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnykh situacij i sozdanie kompleksnykh avarijno-spasatel'nykh centrov v Arktike: Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M.: FGBU VNII GOCHS (FC), 2012.
10. Marek E. Obmotki elektricheskikh mashin postoyannogo i peremennogo toka. 2-e izd. M.: Gos. tekhn. izd-vo, 1929. 100 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 10.07.2024; одобрена после рецензирования: 20.08.2024;
принята к публикации: 23.08.2024

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 10.07.2024; approved after review: 20.08.2024;
accepted for publication: 23.08.2024

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:

Bulatova 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