

Научная статья

УДК 62-133.241; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-24-30

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБМОТКИ СТАТОРА, РАЗМЕРОВ ПАЗА СТАТОРА И ЧИСЛА ПРОВОДНИКОВ В ПАЗУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

✉ **Рева Юрий Викторович.**

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

✉ [revay@igps.ru](mailto:revay@igps.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы, связанные с конструкцией электродвигателей и применением погружных электрических машин в морской среде на буровых установках и платформах. Изложен расчет обмотки статора, размеров пазов статора и числа проводников в пазу электродвигателей погружных электрических машин. Приведен математический аппарат расчета обмотки статора, размеров пазов статора и числа проводников в пазу асинхронных электрических двигателей. Также рассмотрены некоторые характерные особенности расчета асинхронных электрических машин открытого исполнения при расчете высоты пазов, определения высоты спинки, допустимые значения индукции в стенке при номинальной нагрузке. Рассмотрены расчетный диаметр пакета статора, зубцовое деление статора на этом диаметре, ширина и площадь сечения зубцов.

*Ключевые слова:* обмоточный провод, погружные электрические машины, погружные электрические двигатели, двухслойная изоляция, высота пазов, полезная мощность, частота вращения, расчетный диаметр пакета статора

**Для цитирования:** Рева Ю.В. Методика расчета обмотки статора, размеров пазов статора и числа проводников в пазу электродвигателей погружных электрических машин // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 1 (49). С. 24–30. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-24-30.

Scientific article

## **THE METHOD OF CALCULATING THE STATOR WINDING, THE SIZE OF THE STATOR GROOVE AND THE NUMBER OF CONDUCTORS IN THE GROOVE OF ELECTRIC MOTORS OF SUBMERSIBLE ELECTRIC MACHINES**

✉ **Reva Yuriy V.**

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

✉ [revay@igps.ru](mailto:revay@igps.ru)

*Abstract.* The article is devoted to the consideration of issues related to the design of electric motors and the use of submersible electric machines in the marine environment on drilling rigs and platforms. The article describes the calculation of the stator winding, the size of the stator groove and the number of conductors in the groove of electric motors of submersible electric machines. The mathematical apparatus for calculating the stator winding, the size of the stator groove and the number of conductors in the groove of asynchronous electric motors is given. Some characteristic features of the calculation of asynchronous electric machines of open design when calculating the height of the groove, determining the height of the backrest, permissible values of induction in the wall at rated load are also considered. The calculated diameter of the stator package, the tooth division of the stator at this diameter, the width and cross-sectional area of the teeth are considered.

*Keywords:* winding wire, submersible electric machines, submersible electric motors, double-layer insulation, groove height, useful power, rotational speed, calculated diameter of the stator package

**For citation:** Reva Yu.V. The method of calculating the stator winding, the size of the stator groove and the number of conductors in the groove of electric motors of submersible electric machines // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2024. № 1 (49). P. 24–30. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-24-30.

## Введение

Как известно, в герметичных погружных электродвигателях (ПЭД) при проектировании для получения оптимальных рабочих характеристик нужно стремиться выбрать наиболее подходящую конфигурацию паза. В электрических машинах открытого исполнения для работы в жидких средах с протяжными обмотками статора выбирают обычно полузакрытые или закрытые трапецеидальные или овальные пазы с неизменным сечением зубцов.

Постановка задачи. Конструкция погружных электрических машин (ПЭМ) открытого исполнения должна позволять применять их в качестве гребных винтов, активных рулей, подруливающих устройств, насосов и других механизмов глубоководных аппаратов на глубине погружения в морской воде с любой химической активностью, соленостью, при наличии в ней биоорганизмов, заиления и других взвешенных органических и неорганических частиц, находящихся в коллоидном состоянии, а также при наличии хлоридов, дисульфидов, сероводорода, борной кислоты и т.д.

Характерной особенностью этих машин должно быть охлаждение их активных частей, в том числе обмотки, электротехнической стали статора и ротора, подшипников забортной морской водой [1].

Актуальность решаемой задачи по созданию электрических машин открытого исполнения с охлаждением ее активных частей непосредственно окружающей морской водой состоит в том, что асинхронные электрические двигатели (АЭД) с протяженными обмотками статора должны иметь соответствующие обмотки, пазы статора и число проводников в пазе, что будет гарантировать их надежность при эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях и морской среде.

Целью данной работы является разработка последовательности расчета паза статора и числа проводников в пазе АЭД электрических машин открытого исполнения.

Научной новизной данной работы является то, что расчет размеров паза статора и числа проводников в пазе впервые производился по эмпирическим формулам на основе среднестатистических данных для асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Теоретической значимостью работы является то, что впервые приведен математический аппарат расчета размеров паза статора и числа проводников в пазе АЭД ПЭМ.

Практической значимостью работы является то, что в результате работы, проведенной автором, была создана модель электрической машины открытого исполнения, которая показала высокие результаты при испытании на АО «Силовые машины – Электросила» [2].

## Методы исследования

Объектом исследования являются герметичные маслозаполненные ПЭД.

В основу исследования положен метод экспертных оценок по вопросам расчета размеров паза статора и числа проводников в пазе АЭД электрических машин открытого исполнения.

Исходя из заданной полезной мощности электродвигателя, сначала определяется величина тока фазы в номинальном режиме:

$$I_{\text{фр}} = \frac{P_{2\text{н}}}{3 \cdot U_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi \cdot \mu_{\text{н}}} * 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $\cos \varphi \approx \mu_{\text{н}} = 0,8$  – средневзвешенные значения.

Затем, исходя из допустимой плотности тока  $I_{\text{доп}}$ , находится сечение эффективного проводника обмотки статора:

$$S = \frac{I_{\text{фн}}}{J_{\text{доп}}} \text{ (мм}^2\text{)},$$

где  $J_{\text{доп}}$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup> [3].

По этому сечению выбирается обмоточный провод по таблице.

Таблица

**Характеристика обмоточного провода  
в зависимости от сечения для ПЭМ открытого исполнения**

$d_m, \text{мм}$	0,5	0,8	1,4	1,6	3,2	4,0	5,0
$S_{\text{м.пр}}, \text{мм}^2$	0,2	0,51	1,55	2,02	8,09	12,54	19,75

Для ПЭМ открытого исполнения выпускаются обмоточные провода круглого сечения с полимерной двуслойной изоляцией. Первый внутренний слой выполняется из облученного сшитого полиэтилена, второй внешний слой – из фторопласта марки 2М. Суммарная толщина изоляции составляет:

$$\Delta_{\text{из}} = (0,45 \div 1,0) \text{ мм.}$$

При отсутствии данных проводов могут быть использованы провода, которые выпускаются серийно для работы в малоагрессивной водной среде с водородным показателем  $\text{pH} < 8$ . Рекомендуются обмоточные провода с изоляцией из полиэтилена низкой и высокой плотности марки ПВДП-1 и ПВДП-2 с сечением меди, соответствующим таблице. Также могут быть использованы обмоточные провода марки ПЭВВП с поливинилхлоридной изоляцией с тем же сечением медной жилы. Эти провода имеют пониженную гидролитическую стойкость в морской воде с высоким содержанием NaCl.

Изоляция проводов изготавливается монолитной методом экструзии, чтобы исключить образование воздушных пузырьков в теле изоляции и возможность ее повреждения при высоких гидравлических давлениях [4].

С целью снижения величины зубцовых гармонических, а, следовательно, паразитных моментов и добавочных потерь, а также для улучшения виброакустических характеристик выбирают число пазов на полюс и фазу  $g_1 \geq 2$ . В зависимости от диаметра расточки статора  $D_1$  выбирают  $g_1 = 2 \div 4$ . При этом лучше, чтобы  $g_1$  было четным, тогда протяжная обмотка может быть выполнена «вразвалку» и она будет иметь хорошую электромагнитную симметрию, так как длины витков катушек и вылеты лобовых частей катушек будут одинаковы, что очень важно для улучшения виброакустических характеристик (ВАХ).

При заданной частоте вращения или заданном числе полюсов число пазов статора равно:

$$Z_1 = 2p * m_1 * g_1,$$

где  $2p$  – число полюсов;  $m_1$  – число фаз [5].

**Результаты исследования и их обсуждение**

При расчете размеров паза статора и числа проводников в пазу необходимо знать соответствующие определенные параметры.

Высота паза равна:

$$h_{n1} = \frac{D_{a1} - D_1}{2} - h_{a1} \text{ (см)}, \quad (2)$$

где  $h_{a1}$  – высота спинки статора, см.

В связи с тем, что листы статора имеют на внешней стороне вырезы для сборки, а также погрешность сборки и шихтовки, эффективная высота спинки несколько уменьшается и составляет:

$$h_{a_{13\phi}} = (0,9 \div 0,93) * h_{a1} \text{ (см)}.$$

Для более точного определения высоты спинки  $h_{a_{1\text{эф}}}$  задаются допустимые значения индукции в стенке при нормальной нагрузке, но не более  $B_{a_{1H}} = 1,85$  Тл [6].

Номинальная рабочая величина индукции в спинке определяется величиной магнитного потока в немагнитном зазоре на один полюс:

$$\Phi_{\delta H} = a_1 * B_{\delta H} * Q_{\delta} * 10^{-4} \text{ (Вб)},$$

где  $B_{\delta H} = 0,7$  Тл из условия индукции в зазоре;  $Q_{\delta}$  – площадь сечения полюса в зазоре.

$$Q_{\delta} = l_1 * \tau \text{ (см)},$$

где  $\tau$  – полюсное деление, см.

Магнитный поток в статоре на один полюс будет равен:

$$\Phi_{1H} = \frac{\Phi_{\delta H}}{K_1} \text{ (Вб)}, \quad (3)$$

где  $K_1 = 0,96$  – коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного потока в статоре.

Эффективная высота спинки с учетом формульной зависимости (3) равна:

$$ha_{11} = h_{a_{1\text{эф}}} = \frac{\Phi_{1H} * 10^4}{2 * B_{a_{1H}} * l_{\text{эф}1}} \text{ (см)},$$

где  $l_{\text{эф}1} = l_1 * K_{c_1}$  – эффективная длина сердечника статора, см;  $K_{c_1} = 0,93$  – коэффициент заполнения сердечника статора сталью; 2 – поток на одну спинку полюса или поток полуполюса [7].

Расчетный диаметр пакета статора, по которому проходит дно паза статора, равен:

$$D^*_{1} \approx D_{a_1} - 2ha_{11} \text{ (см)}.$$

Зубцовое деление статора на этом диаметре, соответственно равно:

$$\tau_{11P} = \frac{\pi D^*_{1}}{Z}, \text{ (см)},$$

а высота паза, соответствующая формуле (2), равна:

$$h_{n1} = \frac{D^*_{1} - D_1}{2} \text{ (см)}. \quad (4)$$

Для определения ширины зубца задается значение индукции в расчетном сечении зубца с параллельными гранями:

$$B_{\text{з}1H} = 1,7 \text{ Тл}; (1,7 - 1,9) \text{ Тл}.$$

Площадь сечения зубцов будет равна:

$$Q_{z_1} = \frac{\Phi_{1H} * 10^4}{a_1 * B_{\text{з}1H}} \text{ (см}^2\text{)},$$

где  $a_1 = 0,7 \div 0,8$ .

Ширина зубца в расчетном сечении:

$$b_{n11} = b_{n11P} = \tau_{11P} - b_{z1P} \text{ (см)}. \quad (5)$$

Тогда зубцовое деление в начале прямолинейной части трапецеидального паза будет рассчитываться:

$$\tau_{12p} = \frac{\pi[D_1 + 2(h_{k1} + h_{m1})]}{z_1} \text{ (см)},$$

где  $h_{k1}$  – высота клиновидной части паза, равная  $0,2 \div 0,3$  см;  $h_{m1}$  – высота шлица, равная  $0,1$  см. Ширина паза в этой части будет выражена:

$$b_{n12} = \tau_{12p} - b_{z1p} \text{ (см)}. \quad (6)$$

После определения основных размеров зубцов и пазов выбранного трапецеидального паза ориентировочно вычисляем площадь сечения паза (трапеции):

$$S_{\Pi} = \frac{1}{2} (b_{n11} + b_{n12}) * h_{n1} \text{ (см}^2\text{)},$$

где  $b_{n11}$  – вычисляется по формуле (5),  $b_{n12}$  – по выражению (6),  $h_{n1}$  – по формуле (4).

Сечение медных проводов в пазу обмотки статора определяется с учетом заполнения паза  $K_{\text{зап}}$ , который для проводов с полимерной изоляцией, приведенной в таблице, равен  $K_{\text{зап}} = 0,2 \div 0,3$ .

Суммарная площадь медных проводов без изоляции будет иметь вид:

$$S_{m1} = S_{p1} * K_{\text{зап}} = (0,2 \div 0,3) * S_{\Pi}.$$

Выбрав провод по таблице по заданной плотности тока, определяем расчетное количество проводов в пазу  $N_1^*$ :

$$N_1^* = \frac{S_{M1}}{S_{M_{\text{пр1}}}}, \quad (7)$$

где  $S_{M_{\text{пр1}}}$  – сечение меди одного провода [8].

С другой стороны, после выбора диаметра обмоточного провода с изоляцией  $d_{\text{пр}} = d_{m1} + \Delta_{\text{из}}$  по таблице и с расчетом расчетной высоты паза  $h_{n1}$  по формулам (1) или (4) и ширины паза по формуле (6), графическим методом на миллиметровой бумаге в масштабе чертят паз статора. В пазу учитывают толщину выкладки паза фторлакотканью  $0,3 \div 0,5$  мм, увеличение диаметра провода с изоляцией ( $d_{\text{пр}} + 0,2$ ) мм на свободную протяжку провода. Из этого построения определяем конструктивное количество проводов в пазу  $N_1^{**}$  и уточняем окончательно размеры паза. Количество проводов, определенное по формуле (7), должно равняться количеству проводов из построения  $N_1^{**}$  или быть меньше; принимаем округленное значение  $N_1$ . Тогда число витков фазы, соединенных последовательно, равно:

$$W_1 = p g_1 * N_1. \quad (8)$$

Для  $W_1$  проверки и уточнения правильности расчета и контроля определим количество витков фазы из формулы:

$$E = 4,44 * f * W_1 * K_{\text{об1}} * \Phi_m \text{ (В)},$$

где  $W_1$  – количество витков фазы;  $f$  – частота сети, Гц;  $\Phi_m$  – полный магнитный поток пары полюсов, Вб;  $K_{\text{об1}}$  – обмоточный коэффициент статора.

Необходимо учесть, что электродвижущая сила фазы  $E_1$  в асинхронных двигателях равна подведенному напряжению минус падение напряжения в фазе обмотки статора. При расчете это уменьшение учитывается коэффициентом падения напряжения  $K_E = 0,92 - 0,95$ , на который необходимо умножить подведенное напряжение. С учетом  $K_E$  после преобразований получим:

$$W_1 = \frac{0,45 * U_1}{\Phi_{1н} * K_{об}} * 10^{-2},$$

где

$$U_1 = U * K_E, \quad (9)$$

где  $U$  – подведенное фазное напряжение.

Число витков по формуле (9) должно равняться числу витков по формуле (8). В случае большого отличия изменяют длину активной части сердечника статора  $l_1$  и расчет корректируется.

После окончательного выбора числа витков фазы статора  $W_1$  необходимо проверить линейную токовую нагрузку, поток и индукцию в зазоре [9].

### Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенных обоснований в расчете обмотки статора, размеров паза статора и числа проводников в пазу электродвигателей ПЭМ, применяемых в конструкциях ПЭМ, можно сделать вывод, что их применение сильно зависит, прежде всего, от удачного сочетания пусковых ВАХ и подбора соответствующего материала или сплава, способного соответствовать заданным параметрам устойчивости, прочности и безопасности при их эксплуатации на предельных режимах [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. 72–74.
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.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2014. № 3. С. 75–81.
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. / отв. ред. В.А. Шабанов. 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. М., 2014. 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. 72–74.
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 – dvoynoy effekt bez investitsiy / S.B. Yakimov [i dr.] // Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa. 2014. № 3. S. 75–81.
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. / otv. red. V.A. Shabanov. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2017. S. 156–160.
8. Shafikov I.N. Reguliruemyy privod skvazhinного электроcentrobezhного насоса на основе высоковольтного многоровневого преобразователя частоты // Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2019. T. 15. № 3. S. 53–60.
9. Problemy preduprezhdeniya i likvidacii chrezvychajnykh situacij i sozdanie kompleksnykh avarijno-spatatel'nykh centrov v Arktike: Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M.: FGBU VNII GOCHS (FC), 2012.
10. Marek E. Obmotki elektricheskikh mashin postoyannogo i peremennogo toka. M., 2014. 100 s.

## Информация о статье:

Поступила в редакцию: 22.02.2024

Принята к публикации: 15.03.2024

## The information about article:

Article was received by the editorial office: 22.02.2024

Accepted for publication: 15.03.2024

## Информация об авторах:

**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: revay@igps.ru, SPIN-код: 2619-6292

## Information about the authors:

**Reva Yury 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: revay@igps.ru, SPIN: 2619-6292