

---

---

# МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

---

---

Научная статья

УДК 62-133.241; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2-6-12

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ

✉ 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 электродвигателей и применением погружных электрических машин в морской среде на буровых установках и платформах. Изложен расчет параметров и энергетических характеристик асинхронных электрических двигателей погружных электрических машин.

Приведен математический аппарат расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания асинхронных электрических двигателей электрических машин открытого исполнения. Также рассмотрены некоторые характерные особенности расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания асинхронных электрических двигателей электрических машин открытого исполнения с учетом коэффициента полезного действия по отношению полезной мощности к потребляемой и суммарные потери в них.

*Ключевые слова:* ток короткого замыкания, погружные электрические машины, пусковые характеристики асинхронного двигателя, энергетические характеристики, кратность пускового момента, активное сопротивление короткого замыкания, коэффициент полезного действия, приведенный ток ротора

**Для цитирования:** Булатова Ю.М., Рева Ю.В. Методика расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания электрических машин открытого исполнения // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 2 (50). С. 6–12. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2-6-12.

Scientific article

## THE METHOD OF CALCULATING THE ENERGY CHARACTERISTICS AND SHORT-CIRCUIT CURRENT OF OPEN-CIRCUIT ELECTRIC MACHINES

✉ 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 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 parameters and energy characteristics of asynchronous electric motors of submersible electric machines.

The mathematical apparatus for calculating the energy characteristics and short-circuit current of asynchronous electric motors of electric machines of open design is given. Some characteristic features of calculating the energy characteristics and short-circuit current of asynchronous electric motors of electric machines of open design, taking into account the efficiency coefficient in relation to the useful power consumed and the total losses in them, are also considered.

*Keywords:* short-circuit current, submersible electric machines, starting characteristics of an asynchronous motor, energy characteristics, starting torque multiplicity, active short-circuit resistance, efficiency coefficient, reduced rotor current

**For citation:** Bulatova Yu.M., Reva Yu.V. The method of calculating the energy characteristics and short-circuit current of open-circuit electric machines // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2024. № 2 (50). P. 6–12. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-2-6-12.

## Введение

Как известно, ток короткого замыкания или пусковой ток возникает в статоре асинхронного двигателя в момент включения его в сеть, то есть когда к статору подводится напряжение сети, а ротор неподвижен, скольжение в данный момент времени равно единице ( $S = 1$ ). Вследствие больших значений токов коротких замыканий в обмотках при пуске происходит магнитное насыщение зубцов статора и ротора от полей рассеивания, что приводит к изменению индуктивных сопротивлений обмоток. Кроме того, благодаря большой частоте тока в обмотке ротора повышается активное сопротивление ротора из-за явления вытеснения тока [1].

В данной статье кратко приведены расчеты параметров погружных электрических машин (ПЭМ), которые являются общими с воздушными и герметичными маслозаполненными машинами, и рассмотрены некоторые особенности расчета энергетических характеристик, тока короткого замыкания и параметры схемы замещения в режиме короткого замыкания.

Актуальность решаемой задачи по созданию электрической машины (ЭМ) открытого исполнения с охлаждением ее активных частей непосредственно окружающей морской водой состоит в том, что асинхронные электрические двигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором должны иметь соответствующие обмотки, у которых активное сопротивление будет состоять из сопротивления стержней и колец, изготовленных из меди, что будет гарантировать их надежность при эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях и в морской среде.

Целью данной работы является разработка методики расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания АЭД ЭМ открытого исполнения [2].

Научной новизной данной работы является то, что расчет энергетических характеристик и тока короткого замыкания впервые проводился по эмпирическим формулам на основе среднестатистических данных для асинхронных короткозамкнутых двигателей.

Теоретической значимостью работы является то, что впервые приведен математический аппарат расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания АЭД ЭМ открытого исполнения [3].

Практической значимостью работы является то, что в результате работы, проведенной авторами, была создана модель электродвигателя ЭМ открытого исполнения с короткозамкнутым ротором, которая показала высокие результаты при испытании на ОАО «Электросила» [4].

## Методы исследования

Объектом исследования являются герметичные маслозаполненные погружные электродвигатели (ПЭД).

В основу исследования положен метод экспертных оценок по вопросам расчета энергетических характеристик и тока короткого замыкания АЭД ЭМ открытого исполнения [5].

Рассмотрим расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя без учета магнитного насыщения и вытеснения тока по схеме, которая имеет две параллельные ветви цепи намагничивания с током  $I_0$  и рабочей цепи с током  $I_2$ .

Индуктивное сопротивление магнитной цепи будет иметь вид:

$$x_0 = \frac{U_{1н} - I_0 \cdot x_1}{I_0}, \text{ Ом,}$$

где  $U_{1н}$  – фазное номинальное напряжение, откуда комплексный коэффициент для Г-образной схемы замещения равен:

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_0}.$$

Практически  $C_1 = 1,03 \div 1,05$ .

Активное сопротивление короткого замыкания ( $S = 1$ ) будет равно:

$$r_k = r_1 \cdot c_1 + r_2.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания ( $S = 1$ ) будет соответственно иметь следующий вид:

$$x_k = x_1 \cdot c_1 + x_2.$$

Если принять значение  $C_1 = 1$ , то  $r_k = r_1 + r_2$  и  $x_k = x_1 + x_2$ . Для приближенных расчетов так и принимают.

Полное сопротивление короткого замыкания будет иметь формульную зависимость:

$$Z_k = \sqrt{r_k^2} + \sqrt{x_k^2}.$$

Сопротивления  $r_k$ ,  $x_k$ ,  $z_k$  являются параметрами короткого замыкания асинхронного двигателя.

Приведенный ток короткого замыкания ротора будет иметь вид:

$$I_{2k} = \frac{U_{1н}}{c_1^2 \cdot z_k} \approx \frac{U_{1н}}{z_k},$$

где  $C_1 = 1$ .

Тогда ток короткого замыкания статора будет равен:

$$I_{1k} = I_{2k} + I_0.$$

Коэффициент мощности при коротком замыкании при этом равен:

$$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k}.$$

Отсюда кратность тока короткого замыкания, пускового тока:

$$K_i = \frac{I_{1k}}{I_{1н}}.$$

Кратность пускового тока находится в пределах  $K_i = 4,5 \div 6,0$ .

Кратность пускового момента будет иметь вид:

$$K_{мп} = \frac{M_n}{M_H} = \frac{I_{2k}}{I_{2н}} \cdot S_H,$$

где  $I_{2н}$  – приведенный ток ротора;  $S_H$  – номинальное скольжение;  $S_H \approx \frac{I_{2н} \cdot r_2}{E_{1н}}$ ;  $r_2$  – приведенное сопротивление ротора.

$$E_{iH} \approx U_{1H} - I_{1H} \cdot Z_1,$$

где  $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ .

Кратность пускового момента  $K_{мп}$  не должна быть ниже 0,9.

Мощность  $P_k$ , потребляемая асинхронным двигателем при коротком замыкании, идет только на покрытие потерь в обмотках статора и ротора, то есть:

$$P_k = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + m_1 \cdot (I_1)^2 \cdot r_2 = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_k,$$

где  $r_k$  – активное сопротивление короткого замыкания, которое не всегда постоянно и, например, в глубокопазных асинхронных двигателях зависит от частоты в роторе  $f_2$  и высоты стержня, то есть от эффекта вытеснения тока [6].

### Результаты исследования и их обсуждение

Эффект вытеснения тока в стержнях ротора возрастает с увеличением их размеров и учитывается в расчетах с большим отношением высоты стержня  $h_{ст}$  к его ширине  $b_{ст}$ . При круглых стержнях ротора учет вытеснения тока не производится. При больших высотах стержней нижние части сцепляются с большим числом линий потока рассеяния, а верхние – с меньшим. Так как основной поток противодействует изменению потока рассеяния, то ток от результирующего потока вытесняется в верхнюю часть. Вследствие этого увеличивается активное сопротивление стержня и уменьшается индуктивное сопротивление из-за уменьшения потока рассеивания в нижней части стержня. В зависимости от высоты прямоугольных или бутылко-овальной стержней увеличивается в большей степени их активное сопротивление. Индуктивное – в меньшей степени, в итоге улучшаются пусковые характеристики, уменьшается пусковой ток и несколько увеличивается пусковой момент. Для общего назначения ЭМ, работающих на воздухе, этот факт имеет большое значение, так как вопросы нагрева при пуске и торможении ограничены, а пусковой момент играет огромную роль, особенно в таких механизмах как компрессоры, лебедки и т.п. Погруженные ЭМ открытого исполнения применяются в основном для насосов, которые имеют винтовые характеристики. Пусковой момент для них всегда обеспечивается ЭМ с типом обмотки ротора «беличья клетка». Кратность пускового момента при этом должна быть не менее 0,9 [7].

Вопросы нагрева в ЭМ не являются проблемой, при любых токах обмотка и другие активные части ЭМ не нагреваются выше 50 °С. Из-за насыщения зубцов полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления пазового и дифференциального рассеяния, а, следовательно, и результирующее индуктивное сопротивление рассеяния в  $K_n$  раз ( $K_n$  – коэффициент насыщения):  $K_n = 1,15 \div 1,3$  – для полуоткрытых пазов,  $K_n = 1,3 \div 1,4$  – для закрытых пазов ротора. На пусковом моменте это уменьшение сказывается в меньшей мере, а на максимальном – в большей. Поэтому кратность максимального момента предлагается определять из круговой диаграммы с учетом коэффициента насыщения [8].

Подводимая к статору электрическая мощность или потребляемая мощность:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi, \text{ Вт},$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение (задается заказчиком), В;  $I_{1\phi}$  – фазный ток, А;  $\cos \varphi$  – средневзвешенное значение.

Часть этой мощности затрачивается в статоре на потери в меди обмотки статора  $P_{M1}$  и на потери от гистерезиса вихревых токов в стали. Остальная мощность передается на ротор магнитным потоком и называется электромагнитной мощностью  $P_{ЭМ}$ :

$$P_{ЭМ} = P_z - (P_{M1} + P_{ст}),$$

где  $P_{M1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$  – потери в меди обмотки статора, Вт;  $r_1$  – активное сопротивление меди фазы статора (определяется по формуле  $r_{1(50^\circ\text{C})} = 1,14 \cdot r_{1(15^\circ\text{C})}$ );  $P_{ст}$  – потери в стали статора, Вт.

Часть электромагнитной мощности затрачивается на потери в меди обмотки ротора  $P_{M2}$ :

$$P_{M2} = m_1 \cdot (I_{2H}^*) \cdot r_2^*, \text{ Вт},$$

где  $m_1 = 3$  – число фаз статора;  $I_{2H}^*$  – приведенный ток ротора;  $r_2^*$  – приведенное активное сопротивление ротора.

Остальная часть мощности преобразуется в полную механическую мощность двигателя:

$$P_M = P_{эм} - P_{M2}.$$

Полезная мощность на валу электродвигателя получится, если из  $P_M$  вычесть механические потери  $P_{мех}$ , состоящие из потерь в подшипниках, гидравлических потерь трения ротора о воду и добавочных потерь.

$$P_2 = P_M - (P_{мех} + P_D), \text{ Вт},$$

где  $P_{мех} = P_n + P_{гидр}$  – механические потери;  $P_n$  – потери в подшипниках, Вт;  $P_{гидр}$  – гидравлические потери, Вт.

Добавочные потери:

$$P_D = 0,005 \cdot P_1, \text{ Вт},$$

где  $P_D$  в асинхронных ЭМ принимают равным 0,05 % от подведенной мощности  $P_1$ .

Суммарные потери в электродвигателе будут иметь вид:

$$\Sigma P = (P_{M1} + P_{M2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}), \text{ Вт}.$$

Отсюда коэффициент полезного действия будет выглядеть:

$$\mu = \frac{P_2}{P_1} = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right) \cdot 100 \%,$$

то есть КПД двигателя определяется отношением полезной мощности к потребляемой из бортовой сети [9].

### Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенных обоснований в расчетах энергетических характеристик и тока короткого замыкания АД ЭМ открытого исполнения, можно сделать вывод, что математический аппарат расчета этих параметров и энергетических характеристик позволяет рассчитать полезную мощность на валу электродвигателей, суммарные потери в них, коэффициент полезного действия и эффективность использования электрических двигателей ПЭМ [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 (54). 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 (53). 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.] // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2014. № 3.
7. Шафиков И.Н. Пути повышения энергоэффективности электроприводов скважинных центробежных насосных установок // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. 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., 1929.

## 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 (54). 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 (53). S. 27–30.
3. Veshnyakov A.S. Opyt ОАО «Udmurtneft'» po vnedreniyu shtangovykh nasosov dvojnogo dejstviya // Nauchno-tekhnicheskij vestnik ОАО «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 ОАО «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 investitsij / S.B. Yakimov [i dr.] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik ОАО «NK «Rosneft'». 2014. № 3.
7. Shafikov I.N. Puti povysheniya energoeffektivnosti elektroprivodov skvazhinnykh centrobeznykh nasosnykh ustanovok // Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatij: sb. nauch. tr. III Mezhdunar. (VI Vseros.) nauch.-tekhn. конф. / отв. ред. V.A. Shabanov. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2017. S. 156–160.
8. Shafikov I.N. Reguliruemyy privod skvazhinного электроцентробежного насоса на основе высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 3. S. 53–60.
9. Problemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychajnykh situatsij i sozdanie kompleksnykh avarijno-spatatel'nykh centrov v Arktike: Mezhdunar. nauch.-prakt. конф. М.: FGBU VNII GOCHS (FC), 2012.
10. Marek E. Obmotki elektricheskikh mashin postoyannogo i peremennogo toka. М., 1929.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 06.04.2024; одобрена после рецензирования: 12.05.2024;  
принята к публикации: 14.05.2024

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 06.04.2024; approved after review: 12.05.2024;  
accepted for publication: 14.05.2024

*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