
МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

Научная статья

УДК 62-133.241; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-6-10

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ

✉ 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 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 активного сопротивления фазы статора, обмотки короткозамкнутого ротора в асинхронных электрических двигателях. Также рассмотрены некоторые характерные особенности расчета асинхронных электрических машин открытого исполнения при расчете активного сопротивления обмотки ротора и фазы статора с учетом коэффициента трансформации по напряжению и току при номинальной нагрузке.

Ключевые слова: активное сопротивление фазы статора, погружные электрические машины, число пазов ротора, энергетические характеристики, активное сопротивление короткозамкнутого кольца, сечение стержня, удельное сопротивление меди, длина стержня

Для цитирования: Булатова Ю.М., Рева Ю.В. Методика расчета параметров и энергетических характеристик электрических машин с короткозамкнутым контуром // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 3 (51). С. 6–10. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-6-10.

Scientific article

METHODOLOGY FOR CALCULATING PARAMETERS AND ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MACHINES WITH A CLOSED LOOP

✉ 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 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 active resistance of the stator phase, the winding of a short-circuited rotor in asynchronous electric motors is given. Some characteristic features of the calculation of asynchronous electric machines of open design are also considered when calculating the active resistance of the rotor winding and the stator phase, taking into account the voltage and current transformation coefficient at rated load.

Keywords: active resistance of the stator phase, submersible electric machines, number of rotor slots, energy characteristics, active resistance of the closed ring, rod cross section, resistivity of copper, rod length

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

For citation: Bulatova Yu.M., Reva Yu.V. Methodology for calculating parameters and energy characteristics of electric machines with a closed loop // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2024. № 3 (51). P. 6–10. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-3-6-10.

Введение

Как известно, для расчета параметров асинхронных электрических машин (ЭМ) принимают Г-образную схему замещения, в которой намагничивающая цепь с током вынесена на зажимы внешней сети. Эта схема замещения имеет преимущество в том, что она состоит из двух цепей: намагничивающей с током и рабочей с током. Обе цепи независимы одна от другой, поскольку они параллельно включены в сеть с напряжением [1].

Определение параметров схемы замещения, расчет основных характеристик для асинхронных классических воздушных машин изложены довольно подробно в методиках, приведенных в доступной литературе по данной тематике. 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 и коэффициент полезного действия ЭМ открытого исполнения [2]. Главной особенностью конструкции открытого исполнения является разгерметизация корпуса и осуществление циркуляции морской воды через отверстия в подшипниковых щитах и свободные зазоры на валу. Кроме того, ротор вращается в жидкой среде, плотность которой в тысячу раз больше плотности воздуха, механические потери мощности трения ротора о жидкость значительно выше, чем о воздух. При определении характеристики холостого хода на воздухе потери трения ротора о воздух не учитываются [3].

Актуальность решаемой задачи по созданию ЭМ открытого исполнения с охлаждением ее активных частей непосредственно окружающей морской водой состоит в том, что асинхронные электрические двигатели (АЭД) с короткозамкнутым (к.з.) 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 морской среде.

Целью данной работы является разработка методики расчета параметров и энергетических характеристик АЭД ЭМ открытого исполнения с к.з. контуром [4].

Научной новизной данной работы является то, что расчет параметров и энергетических характеристик впервые рассчитывался по эмпирическим формулам на основе среднестатистических данных для асинхронных к.з. двигателей.

Теоретической значимостью работы является то, что впервые приведен математический аппарат расчета параметров и энергетических характеристик АЭД ПЭМ.

Практическая значимость обусловлена тем, что в результате работы, проведенной автором, была создана модель электродвигателя ЭМ открытого исполнения с к.з. ротором, которая показала высокие результаты при испытании на АО «Силовые машины» [4].

Методы исследования

Объектом исследования являются герметичные маслозаполненные ПЭД.

В основу исследования положен метод экспертных оценок по вопросам расчета параметров и энергетических характеристик АЭД ЭМ открытого исполнения с к.з. контуром [5].

Активное сопротивление меди обмотки каждой фазы статора определяют для 15 °С по формуле:

$$r_1 = K_r * \frac{p_{15^\circ\text{C}} * l_{1\text{cp}} * W_1}{S_1},$$

где $p_{15^\circ\text{C}}$ – удельное электрическое сопротивление меди при 15 °С; $p_{15^\circ\text{C}} = 1,03 \div 1,05$ – коэффициент увеличения сопротивления переменному току от вихревых токов;

l_{1cp} – средняя длина витка обмотки фазы статора, м; W_1 – число витков фазы статора; S_1 – поперечное сечение проводника обмотки фазы статора, мм².

$$l_{1cp} = 2*(l_1 + l_{л1}) = 2*(l_1 + 1,4\tau),$$

где l_1 – длина пакета стали статора, м; $l_{л1} = 1,4\tau$ – длина лобовой части витка, м; τ – длина полюсного деления, м [6].

Так как в открытых ЭМ тепло от обмотки отдается сразу в окружающую среду, то ее температура будет меньше 50 °С и равняться температуре заборной морской воды (32 °С) плюс перепад температуры в изоляции обмоточного провода обмотки статора (13÷15 °С). Поэтому сопротивление обмотки статора необходимо определять при температуре 50 °С:

$$r_{1(50^\circ\text{C})} = r_{1(15^\circ\text{C})} * (1 + \alpha * \vartheta),$$

где $\alpha = 0,004$ – температурный коэффициент сопротивления меди, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$; $\vartheta = \vartheta_{гор} - \vartheta_{хол} = 35$ °С – перепад температуры в меди обмотки статора.

С учетом данного утверждения, активное сопротивление меди фазы статора при 50 °С равно:

$$r_{1(50^\circ\text{C})} = 1,14 * r_{1(15^\circ\text{C})} [7].$$

Результаты исследования и их обсуждение

Активное сопротивление обмотки к.з. ротора состоит из сопротивления стержней к.з. колец, изготавливаемых из меди. В к.з. асинхронном двигателе число фаз m_2 равно числу пазов Z_2 , то есть количеству стержней ротора [8]. Следовательно, сопротивление фазы ротора равно сопротивлению стержня плюс сопротивление кольца, определяемое из сопротивления части кольца между стержнями. Активное сопротивление стержня будет иметь формульную зависимость:

$$r_c = K_r * p_c * \frac{l_c}{g_c},$$

где $p_c = p_{c15^\circ\text{C}} * (1 + \alpha * \vartheta)$ – удельное сопротивление меди при температуре ϑ °С (если $\vartheta_{гор} = 50$ °С, то $\vartheta = (50 - 15) = 35$ °С); $K_r = 1,03 \div 1,05$ – увеличение сопротивления при переменных токах; p_c – сечение стержня, мм²; $l_c = l_2 + 2l_{л}$ – длина стержня, м; $l_{л} = (1 \div 2) * 10^{-2}$ – вылет стержней, м; $p_{c15^\circ\text{C}} = 0,0175 \frac{\text{Ом} * \text{мм}^2}{\text{м}}$ – удельное сопротивление меди при температуре 15 °С [9].

Активное сопротивление к.з. кольца определяем по формуле:

$$r_k = K_r * p_k * \frac{l_k}{g_k},$$

где g_k – площадь сечения к.з. кольца, мм²; $l_k = \frac{\pi * D_k}{Z_2}$ – длина к.з. кольца между двумя стержнями, где D_k – диаметр между центрами стержней относительно центра ЭМ по сечению ротора; Z_2 – число пазов ротора.

Коэффициент приведения сопротивления кольца к сопротивлению стержня равняется:

$$\Delta = 2 * \sin \frac{\pi * p}{Z_2}.$$

Активное сопротивление двух колец, приведенное к сопротивлению стержней, будет иметь следующий вид:

$$r_{2k} = \frac{2r_k}{\Delta^2} = K_r * p_k * \frac{\pi D_k}{Z_2 * 2 * \sin \frac{\pi p}{Z_2} * g_k}.$$

Активное сопротивление ротора тогда будет иметь вид:

$$r_2 = r_c + r_{2k}.$$

Отсюда приведенное к статору активное сопротивление ротора равно:

$$r_2^* = r_2 * K_e * K_i = \frac{12 * (K_{06} * W_1)}{Z_2} * r_2,$$

где K_e и K_i – коэффициенты трансформации по напряжению и току:

$$K_e = \frac{W_1 * K_{061}}{W_2 * K_{062}};$$

$$K_i = \frac{m_i * W_1 * K_{06m1}}{m_2 * W_2 * K_{06m2}} [10].$$

Заключение

Таким образом, на основании вышеизложенных обоснований в расчете параметров и энергетических характеристик, АД ЭМ открытого исполнения с к.з. контуром можно сделать вывод, что математический аппарат расчета этих параметров и энергетических характеристик позволяет рассчитать активное сопротивление фазы статора, активное сопротивление обмотки ротора, что, в свою очередь, позволяет регулировать 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. 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 // Нефтегазовая вертикаль – технологии (специальное приложение). 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.-Петербур. 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. 31–38.
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. 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. 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 // Neftegazovaya vertikal' – tekhnologii (special'noe prilozhenie). 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 investitsij / S.B. Yakimov [i dr.] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik OAO «NK «ROSNEFT'». 2014. № 3. S. 31–38.
7. Shafikov I.N. Puti povysheniya energoeffektivnosti elektroprivodov skvazhinnykh centrobeznykh 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 skvazhinnoy elektrocentrobeznykh nasosa na osnove vysokovol'tnogo mnogourovnevykh preobrazovatelya chastoty // Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2019. T. 15. № 3. S. 53–60.
9. Problemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychajnykh situatsiy 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., 1929.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 17.08.2024; одобрена после рецензирования: 18.09.2024; принята к публикации: 20.09.2024

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 17.08.2024; approved after review: 18.09.2024; accepted for publication: 20.09.2024

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