

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

© 2025 *Миханошин В.В., Бурков А.Ф.*

Условия эксплуатации судового электрооборудования (ЭО) являются достаточно специфическими, а судовые возможности выполнения необходимых ремонтных работ по его восстановлению или замене во многих случаях крайне ограничены. Поэтому актуальными являются вопросы, связанные с повышением надёжности ЭО, и в частности, электроприводов (ЭП), являющихся основными приёмниками электрической энергии (ЭЭ). В статье рассмотрен способ повышения надёжности электрических машин (ЭМ), основанный на их выполнении с несколькими статорно-роторными парами, встроенными друг в друга, позволяющий снизить риски аварийных ситуаций ЭО. А также приведено описание устройства для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, надёжность, электрическая машина, электрический привод, электрическое оборудование, электрическая энергия.

Введение. Необходимость повышения надёжности судового ЭО обусловлена специфическими условиями его эксплуатации (изменениями температуры в широком диапазоне, повышенной влажностью воздуха, агрессивностью окружающей среды и пр.), и активно отражена в действующих нормативных документах, к основным из которых относится «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р, и «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 08.12.2010 № 2205-р.

Режимы и условия эксплуатации современных ЭП определяются их назначением и отличаются большим многообразием. К основным режимам работы исполнительных и приводных двигателей ЭП относятся режимы, близкие к S1, S2 и S3, наиболее напряженным из которых являются режимы, близкие к S3. Исходя из условий эксплуатации, в настоящее время промышленностью для ЭП освоен выпуск ЭД различных категорий исполнения, предназначенных для эксплуатации в разных климатических условиях, основными из которых являются категории ТВ, ТС, У, ХЛ и др.

Выполненный анализ опыта технической эксплуатации судового ЭО [1, 2] показывает, что несмотря на свое конструктивное совершенствование и разнообразие, выходы из строя ЭМ [3] современных ЭП, содержащих достаточно развитые системы управления, контроля и защиты, не являются единичными.

Отказы судовых ЭМ (генераторов или электродвигателей (ЭД)) могут привести к нарушениям необходимой управляемости судна, сохранности перевозимых грузов и другим отклонениям от нормальных функционирований судов, и как следствие, к дополнительным, порой значительным, финансовым затратам.

Диагностика, поиск и устранение неисправностей асинхронных ЭП, наиболее широко используемых в настоящее время, широко освещены в отечественных и зарубежных научно-технических публикациях [4–8]. Вопросы, связанные с повышением надёжности судового ЭО, включая ЭП, рассматриваются в научно-технической и учебной литературе ряда отечественных [2, 9–12] и зарубежных [13, 14] изданий.

Основная часть. Анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что большинство известных научно-технических решений и способов, направленных на повышение надёжности судовых ЭМ, основано на совершенствовании их систем управления, контроля и защит. При этом несмотря на то, что отказы ЭМ, большинство из которых связано с электрическими повреждениями их статорных обмоток, составляют до 95 % случаев [15], вопросы конструктивных изменений ЭМ в литературных источниках практически не рассматриваются. Кажущееся очевидным решение предотвращения таких отказов заключается в непрерывном контроле сопротивления изоляции судовых электроэнергетических систем, включая обмотки работающих ЭМ.

Исходя из того, что сопротивление изоляции судового ЭО зависит от числа и единичных мощностей подключенных в каждый момент времени потребителей ЭЭ, использование этого метода в судовой электротехнике для ЭМ не представляется достаточно эффективным, как и установка мегомметров на отдельные ЭМ с непрерывным дистанционным отслеживанием сопротивления изоляции.

ЭМ (исполнительные или приводные ЭД) являются основными компонентами силовых каналов ЭП, и решение частных задач, направленных на повышение надёжности судовых ЭП, может быть обеспечено за счет использования в них трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АКЗ) с несколькими статорно-роторными парами [16]. Такой АКЗ содержит статор, выполненный из нескольких полых сердечников - магнитопроводов (1) уменьшающегося диаметра, как элементов соответствующих статорно – роторных пар (рис. 1).

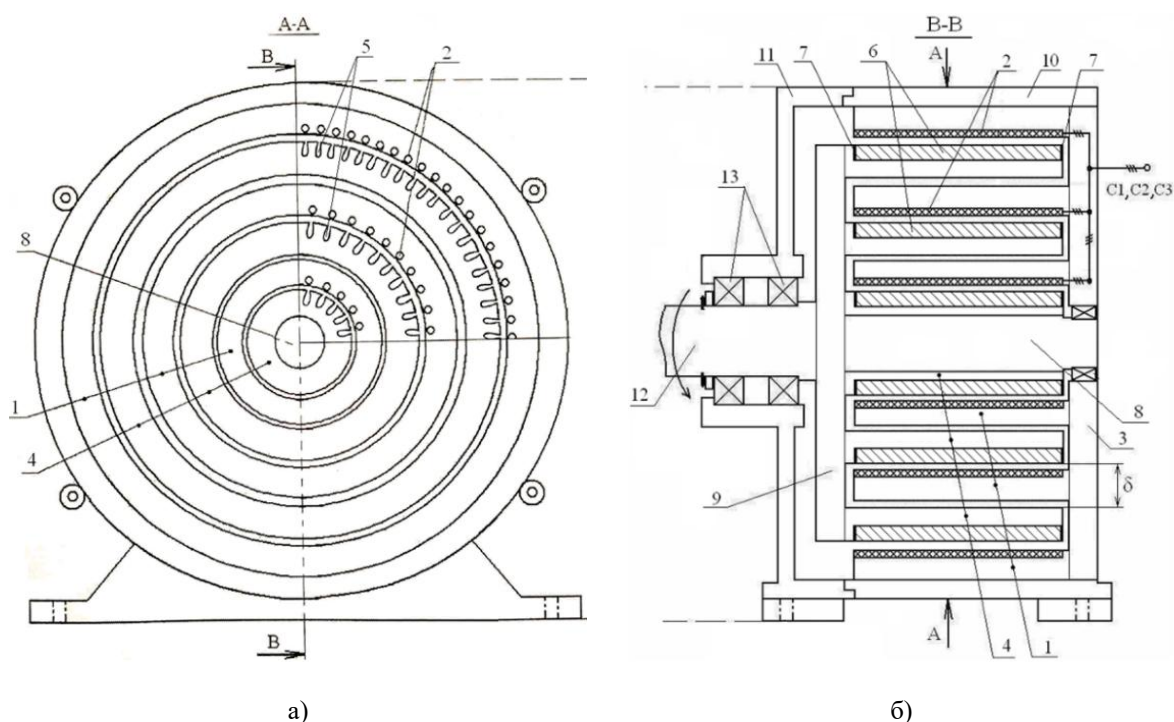


Рис. 1. Предложенный трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:
а) поперечное сечение (вид с торца), б) продольное сечение (схематический вид):

- 1 – сердечники – магнитопроводы статора, 2 – трёхфазные обмотки, 3 – опорное статорное кольцо, 4 – сердечники – магнитопроводы ротора, 5 – полузакрытые пазы, 6 – короткозамкнутая обмотка типа "беличья клетка", 7 – короткозамыкающие кольца, 8 – центральный стержень, 9 – опорное роторное кольцо, 10 и 11 – защитные крышки, 12 – приводной вал, 13 – подшипники скольжения

Число зубцов и пазов в каждом данном сердечнике - магнитопроводе (1) между собой одинаково. В пазы каждого данного сердечника - магнитопровода (1) уложена отдельная трехфазная обмотка (2). Каждая из этих обмоток соединена в схему «звезда» (рис. 2), а их выводы соединены параллельно пофазно и выведены в клеммную коробку. Т.к. число витков всех фазных медных обмоток одинаково между собой, то по мере уменьшения диаметра сердечников уменьшен, соответственно, и диаметр трёхфазной обмотки (2).

Ротор статорно – роторных пар аналогично статору и состоит из стольких же, уменьшающимся диаметром, сердечников - магнитопроводов (4) (рис.1), как элемента соответствующей статорно – роторной пары. Сердечники - магнитопроводы (1) статора и сердечники - магнитопроводы (4) ротора являются шихтованными, причем последние выполнены с полузакрытыми пазами (5) с внешней их стороны.

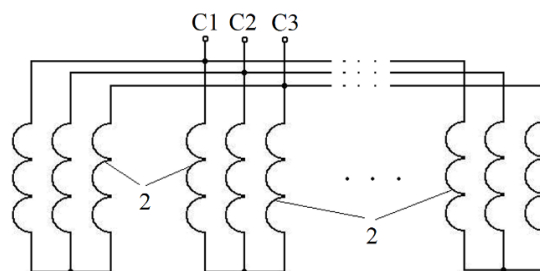


Рис. 2. Схема соединений трехфазных обмоток сердечников - магнитопроводов

В данных пазах расположена короткозамкнутая медная или алюминиевая обмотка (6) типа "беличья клетка". Стержни этой обмотки замкнуты по обоим торцам накоротко кольцами (7) из такого же материала (рис.1 б). Наименьший по диаметру сердечник - магнитопровод (4) ротора установлен на валу (8), а все сердечники ротора большего диаметра прилегают по внутренним торцам к опорному роторному кольцу (9) (рис. 1 б). Для защиты от воздействия окружающей среды сердечников – магнитопроводов (1) и (4) служат защитные крышки (10) и (11), плотно соединенные между собой по ступенчатому профилю. Причем крышка (11) сопряжена подвижно с приводным валом (12) АКЗ посредством подшипников скольжения (13), сопряженным в свою очередь с кольцом (9). Охлаждение обмоток АКЗ может быть воздушным. Для отвода тепла от внутреннего пространства предусматриваются сквозные технологические отверстия в защитных крышках, а опорное статорное кольцо выполняют ребристым с внешней стороны.

Предложенный АКЗ, защищенный патентом на изобретение, конструктивно целесообразно выполнять большего диаметра и относительно коротким, т.к. при этом обеспечивается большая его надёжность и удобство размещения обмоток на сердечниках - магнитопроводах.

Принцип действия данного АКЗ такой же, как и обычного трехфазного двигателя, но благодаря тому, при подключении обмотки (2) к трёхфазной сети переменного тока электромагнитным образом через воздушные зазоры одновременно взаимодействует несколько статорно-роторных пар, т.е. каждый соответствующий сердечник - магнитопровод (1) статора взаимодействует с соответствующим сердечником - магнитопроводом (4) ротора, удельная мощность его оказывается значительно выше. А внутреннее его пространство используется при этом более эффективно.

Надёжность двигателя также является более высокой, так как при отказе одной или нескольких его обмоток он сохранит свою работоспособность, хоть и будет развивать меньший электромагнитный момент. Вышедшую из строя обмотку при этом отключают.

Оценить изменение допустимой частоты вращения при изменении размеров АКЗ можно следующим образом. В соответствии с законом квадрата куба, при изменении всех размеров ЭМ в a раз электрическая мощность изменится в a^4 раз:

$$P_{эм}^* = k_1 \left(\frac{a}{a_{исх}} \right)^4 = k_1 a^{*4}, \quad (1)$$

где $a_{исх}$ – исходный (первоначальный) размер ЭМ, k_1 – коэффициент пропорциональности.

Зависимости потребляемой мощности наиболее типовых судовых механизмов от частоты вращения имеют вид:

а) для грузоподъёмных механизмов

$$P_{c1}^* = \frac{P}{P_{с.н}} = k_2 \left(\frac{n}{n_n} \right) = k_2 n^*; \quad (2)$$

б) для механизмов с вентиляторной нагрузкой (центробежных насосов, вентиляторов, гребных винтов)

$$P_{c2}^* = \frac{P}{P_{с.н}} = k_3 \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 = k_3 n^{*3}, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности.

Приравняв (2) и (3) к (1) и выразив частоты вращения, соответственно получим:

$$P_{эм}^* = P_{c1}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_2 n^* \Rightarrow n^* = \frac{k_1 a^{*4}}{k_2}, \quad (4)$$

$$P_{эм}^* = P_{c2}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_3 n^{*3} \Rightarrow n^* = \sqrt[3]{\frac{k_1 a^{*4}}{k_3}}, \quad (5)$$

На рис. 3 по выражениям (4) и (5) построены зависимости относительной частоты вращения n^* от размера a ЭМ:

$$P_{эм}^* = P_{c1}^* \Rightarrow k_1 a^{*4} = k_2 n^* \Rightarrow n^* = \frac{k_1 a^{*4}}{k_2}, \quad (4)$$

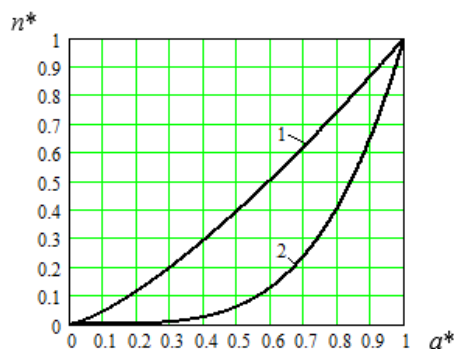


Рис. 3. Зависимость частоты вращения от размера a ЭМ: 1 – по выражению (5), 2 – по выражению (4)

Из рис. 3 видно, что предложенный АКЗ целесообразно применять в ЭП, которые работают с вентиляторным моментом нагрузки на валу, т.к. в этом случае частота вращения при снижении размера АКЗ оказывается бóльшей.

Целесообразно применение таких АКЗ в ЭП, режим работы которых длительный с переменной во времени нагрузкой, вплоть до холостого хода (компрессоры, рулевые устройства и т.д.). Использование разработанного АКЗ с несколькими статорно-роторными парами целесообразно совместно с предложенным авторами недорогим устройством, также защищенном патентом на изобретение (рис. 4) [17]. Данное устройство автоматически подключает по сигналу датчика тока и / или измерителя коэффициента мощности ту обмотку АКЗ, при работе которой будет обеспечен близкий к номинальному коэффициент его загрузки k_3 . При этом появляется возможность устранить еще один из существенных недостатков асинхронных двигателей – снижение коэффициента мощности при малой их нагрузке. Учитывая тот факт, что на судах имеется ряд электроприводов, которые значительную долю от общего рабочего времени работают с низким k_3 , то применение предложенного АКЗ в них с подключаемыми трехфазными обмотками в функции k_3 позволит улучшить энергетические показатели судовой сети: увеличить коэффициент мощности $\cos\varphi$ и снизить потери в ней. Что приведет, в свою очередь, к некоторому увеличению её пропускной способности. На рис. 4 приведена схема устройства с предложенным АКЗ с тремя парами сердечников – магнитопроводов, и соответственно, с тремя трехфазными обмотками статора.

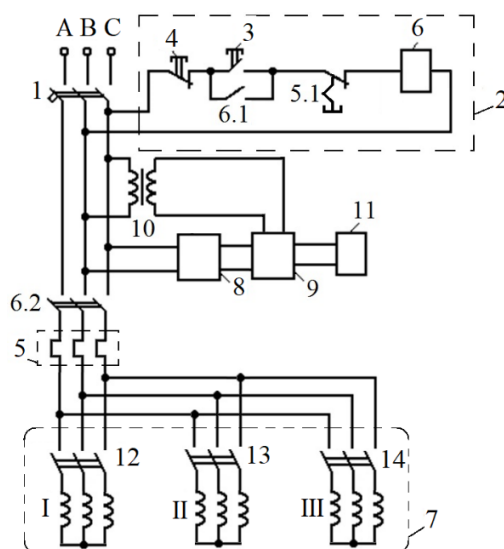


Рис. 4 – Устройство повышения энергоэффективности асинхронного электропривода:

- 1 – Автоматический выключатель; 2 – магнитный пускатель; 3 – кнопка пуск; 4 – кнопка стоп;
 5 – реле тепловой защиты; 5,1 – контакт теплового реле; 6 – катушка магнитного пускателя (МП);
 6,1 – блок-контакт МП; 6,2 – главные контакты МП; 7 – АКЗ; 8 – фазометр; 9 – контроллер (схема управления); 10 – трансформатор напряжения; 11 – коммутационное устройство (КУ);
 12, 13, 14 – контакты КУ; I, II, III – обмотки АКЗ

Тепловую защиту такого АКЗ целесообразно выполнить на основе термочувствительных элементов – позисторов – полупроводниковых резисторов, сопротивление которых зависит от температуры, встраиваемых в лобовой части трехфазной обмотки I, II и III каждого сердечника - магнитопровода статора. В этом случае в устройство на рис. 4 включают реле термисторной защиты, например типа РТ-М01-1-15.

Работа данного устройства заключается в следующем. При замыкании автоматического выключателя (1) и нажатии кнопки пуск (3) катушка (6) МП (2) получает питание. Блок-контакт (6.1) МП (2) при этом шунтирует кнопку пуск (3), после чего её можно отпустить, а главные его контакты (6.2) замыкаются, подключая обмотку статора АКЗ (7) к сети. При включении АКЗ (7) в сеть КУ подключает обмотку наибольшего по размеру сердечника – магнитопровода статора – I, замыкая контакты (12). Ротор АКЗ (7) разгоняется до номинальной частоты вращения. После окончания переходного процесса схема управления (9) начинает сравнивать текущий $\cos\varphi$, измеренный с помощью фазометра (8), и/или ток, измеренный с помощью датчика тока (не показан), с заданными заранее в его памяти верхним и нижним пороговыми значениями $\cos\varphi$, и, соответственно, с верхним и нижним пороговыми значениями тока. При номинальных значениях $\cos\varphi$ (тока) двигатель продолжит работать на обмотке I. При некоторых средних значениях этих величин КУ (11) по сигналу управления от контроллера (схемы управления) (9) подключает отключает обмотку I и включает обмотку II. Контакты (12) при этом будут разомкнуты, а контакты (13) замкнуты. При работе двигателя в режимах, близких к холостому ходу, КУ (11) по сигналу управления от контроллера (схемы управления) (9) отключает обмотку II (или I) и включает обмотку III. Контакты (13) (или 12) при этом будут разомкнуты, а контакты (14) замкнуты.

При частых изменениях нагрузки и, соответственно, частых коммутациях контактов 12, 13 и 14 последние будут относительно быстро изнашиваться и требовать обслуживания и / или замены. Вероятность отказа ЭП при этом возрастает. Повышение надежности ЭП в этом случае может быть обеспечено путем установки вместо этих контактов твердотельных реле (solid state relay (SSR)) с технологией zero-crossing (переключение через нулевую точку) (называемой иногда также технологией синхронной коммутации "zero sync"). Применение таких реле позволит получить следующие известные преимущества: бесшумность в работе, большая скорость переключения, длительный срок службы благодаря отсутствию электрического и механического износа, а также меньшей чувствительности к вибрациям, влажности и запыленности окружающего воздуха; снижение броска тока при включении, и соответственно, снижение уровня создаваемых электромагнитных помех. Последние два преимущества – снижение броска тока и уровня создаваемых электромагнитных помех при включении обеспечивается благодаря тому, что силовые полупроводниковые ключи (например тиристоры) этих реле начинают проводить ток (т.е. включаются) тогда, когда кривая напряжения пересекает ноль. А перестают проводить ток (выключаются) тогда, когда кривая тока пересекает ноль.

Стоимость составляющих предложенного электропривода – АКЗ с несколькими статорно-роторными парами, твердотельных реле, фазометра и контроллера (схемы управления), очевидно больше суммарной стоимости нерегулируемого электропривода с магнитным пускателем и с обычным асинхронным двигателем, но не превышает стоимости частотно регулируемого асинхронного электропривода с полупроводниковым частотным преобразователем. Однако учитывая продолжительный срок эксплуатации, порядка 15...20 лет, возможность, пусть в ограниченном диапазоне и ступенчато, регулировать мощность АКЗ, а также возможность работы в режиме близком к номинальному с высоким коэффициентом полезного действия и с высоким коэффициентом мощности, можно сделать вывод об окупаемости данного ЭП и целесообразности его применения.

Выводы. Таким образом, электропривод, выполненный на основе предложенного АКЗ, характеризуется рядом преимуществ по сравнению с ЭП, выполненном с обычным асинхронным двигателем. При этом свойственные последнему внезапные отказы, обусловленные электрическими неисправностями, и характеризующиеся скачкообразным переходом из работоспособного состояния в неработоспособное, у предложенного АКЗ отсутствуют благодаря наличию нескольких обмоток, расположенных на отдельных сердечниках - магнитопроводах статора. Поэтому выход одной из таких обмоток из строя практически не оказывает заметного влияния на работу остальных обмоток в отличие от многоскоростных АКЗ, у которых в одних и тех же пазах укладывается две или более обмоток и перегрев одной из них приводит к быстрому перегреву соседней обмотки. А благодаря высокому быстродействию современных электронных контроллеров (схем управления) и твердотельных реле (solid state relay (SSR)) с технологией zero-crossing обеспечивается быстрый (практически мгновенный) переход работы с одной обмотки на другую.

Несмотря на ступенчатость регулирования мощности ЭП с данным АКЗ могут быть также рекомендованы к применению в механизмах непрерывного транспорта – вентиляторах, насосах, конвейерах, производящих перемещение газообразных, жидких или твердых грузов с постоянной скоростью независимо от степени их загрузки. При частичной нагрузке данных механизмов их ЭП, работающие с постоянной скоростью, характеризуются повышенным удельным расходом ЭЭ на единицу выполненной полезной работы. Применение в них предложенного устройства с АКЗ с несколькими статорно-роторными парами позволит выполнить ту же работу с меньшим расходом ЭЭ.

Электроприводы, выполненные на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, как основные потребители ЭЭ на судах могут быть модернизированы. При несколько большей стоимости предложенный ЭП характеризуется большей надежностью, способностью автоматического регулирования мощности на валу, высокими энергетическими показателями при работе в долевых режимах, а также большей удельной мощностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков, А. Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Мор. гос. ун-т им. адм. Г. И. Невельского, 2011. – 417 с.
2. Бурков, А. Ф. Надежность судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток : Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – 204 с.
3. Кацман, М. М. Электрические машины. Справочник: учебное пособие / М. М. Кацман. – Изд-во КноРус. – 2023. – 480 с.
4. Пантина, А. И. Контроль технического состояния судовых асинхронных двигателей на основе характеристик внешнего электромагнитного поля / А. И. Пантина, О. А. Белов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 32-36. – EDN ZEHQDT.
5. Beley, V. F. Results of studies of higher harmonics during the operation of ship frequency-controlled asynchronous electric drives / V. F. Beley, K. V. Korotkikh, N. Ya. Sinyavskij // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. – 2023. – No. 4. – P. 80-87. – DOI 10.24143/2073-1574-2023-4-80-87. – EDN KBKAVU.
6. Integrated machine learning and probabilistic degradation approach for vessel electric motor prognostics / J. I. Aizpurua, K. E. Knutsen, M. Heimdal, E. Vanem // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 275. – P. 114153. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.114153. – EDN MKHFST.
7. Velasco-Gallego, Ch. RADIS: A real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery / Ch. Velasco-Gallego, I. Lazakis // Expert Systems with Applications. – 2022. – Vol. 204. – P. 117634. – DOI 10.1016/j.eswa.2022.117634. – EDN JGLIEK.
8. Cardoso, A. J. M. Diagnosis and Fault Tolerance of Electrical Machines / A. J. M. Cardoso. – The Institution of Engineering and Technology, 2018. – 376 p.

9. Бурков, А. Ф. Теоретические положения технической эксплуатации для определения надежности судовых электроприводов / А. Ф. Бурков, В. Х. Нгуен // Надежность и безопасность энергетики. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 184-191. – DOI 10.24223/1999-5555-2023-16-3-184-191. – EDN MBZQJE.
10. Белов, О. А. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов / О. А. Белов, Г. С. Мясников // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : мат. Второй МНТК (23–25 октября 2019 г.). – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2020. – С. 73-76.
11. Олейников, А. М. Судовые электрические машины и их эксплуатация / А. М. Олейников, В. Н. Мартынов. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – 376 с.
12. Гольдберг, О. Д. Надёжность электрических машин / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М. : Академия, 2010. – 288 с.
13. Daya, A. A. Systems Reliability and Data Driven Analysis for Marine Machinery Maintenance Planning and Decision Making / A. A. Daya, I. Lazakis // Machines. – 2024. – Vol. 12, No. 5. – P. 294. – DOI 10.3390/machines12050294. – EDN TRNSOR.
14. Kantharia R. A Guide to Ship's Electro-Technology: Part 1. For Marine Engineers and Electrical Officers / R. Kantharia. – Marine Insight, 2013. – 44 p.
15. Воробьёв, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В. Е. Воробьёв, В. Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
16. Патент № 2759161 С2 Российская Федерация, МПК H02K 17/16, H02K 16/02, H02K 16/04. асинхронный трехфазный электродвигатель : № 2018120069 : заявл. 30.05.2018 : опубл. 09.11.2021 / В. В. Михановин ; заявитель ФГБОУ ВО "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского".
17. Патент № 2748215 С1 Российская Федерация, МПК H02P 1/32, H02P 25/18, H02P 23/02. Устройство для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода : заявл. 12.10.2020 : опубл. 21.05.2021 / В. В. Михановин, А. Ф. Бурков ; заявитель ФГБОУ ВО "Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского".

Поступила в редакцию 26.05.2025 г., рекомендована к печати 16.06.2025 г.

IMPROVING THE RELIABILITY OF MARINE ELECTRIC DRIVES

Mikhanoshin V.V., Burkov A.F.

The operating conditions of marine electrical equipment are quite specific, and the ship's ability to perform the necessary repair work to restore or replace it is in many cases extremely limited. The analysis of the ship's electrical equipment operation experience allows us to conclude that failures of electrical machines are not isolated during operation, but their causes and consequences are diverse. Therefore, issues related to improving the reliability of electrical equipment, and in particular, electric drives, which are the main receivers of electrical energy, are relevant. The article suggests a way to increase the reliability of electric machines based on their implementation with several stator-rotor pairs integrated into each other, which reduces the risks of electrical emergencies.

Keywords: asynchronous motor, reliability, electric machine, electric drive, electrical equipment, electric energy.

Михановин Виктор Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Российская Федерация, г. Владивосток.
E-mail: tetrodoksin@mail.ru

Mikhanoshin Viktor Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships of Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, Vladivostok.

Бурков Алексей Фёдорович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского», Российская Федерация, г. Владивосток.
E-mail: burkov.22@mail.ru

Burkov Aleksei Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Electrical Equipment and Automation of Ships of Admiral G.I. Nevelsky Maritime State University, Russian Federation, Vladivostok.