Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 77, № 3. С. 238–241.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Обзорная статья
УДК 629.5.064.5 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-77-22 EDN: YVJQVJ

Повышение энергоэффективности электроприводов вспомогательных механизмов судовых энергетических установок

Нина Михайловна Марченко
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
n-m-m@mail.ru, ORCID: 0009-0009-2361-0185

Аннотация. Проводится обзор методов повышения энергоэффективности электроприводов вспомогательных механизмов судовых энергетических установок за счет использования современных материалов при изготовлении компонентов асинхронных двигателей. Рассматривается применение активных материалов, таких как железо, медь и алюминий А97. Но увеличение этих материалов влечет за собой возрастание массы двигателей, что значительно ухудшает их удельную мощность. В судостроении важным является сочетание эффективности двигателей и их массы. Поэтому предлагается использовать современные материалы – аморфные и нанокристаллические сплавы для изготовления магнитопровода статора, нанокомпозитные материалы для изоляционных покрытий, а для корпусов – полимерные композиты на основе углеволокна. Использование данных материалов приводит не только к повышению удельной мощности электроприводов, но и позволяет повысить их коэффициент полезного действия.

Ключевые слова: энергоэффективные электродвигатели, электропривод, судовые энергетические установки, активные материалы, нанокомпозитные материалы

Для цитирования: Марченко Н. М. Повышение энергоэффективности электроприводов вспомогательных механизмов судовых энергетических установок // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 77, № 3. С. 238–241.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 77, no. 3. P. 238–241.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Review article

Improving the energy efficiency of electric drives of auxiliary mechanisms of marine power plants

Nina M. Marchenko
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
n-m-m@mail.ru, ORCID: 0009-0009-2361-0185

Abstract. The article provides an overview of methods for improving the energy efficiency of electric drives of auxiliary mechanisms of marine power plants through the use of modern materials in the manufacture of components of asynchronous motors. The use of active materials such as iron, copper and aluminum A97 is contemplated. But an increase in these materials entails an increase in the mass of the engines, which significantly worsens their specific power. In

© Марченко Н. М., 2026

shipbuilding, a combination of engine efficiency and engine mass is important. Therefore, it is proposed to use modern materials - amorphous and nanocrystalline alloys for the manufacture of a stator magnetic core, nanocomposite materials for insulation coatings, and for cases - polymer composites based on carbon fiber. The use of these materials leads not only to an increase in the specific power of electric drives, but also allows to increase their efficiency.

Keywords: energy-efficient electric motors, electric drive, ship power plants, active materials, nanocomposite materials

For citation: Marchenko N. M. Improving the energy efficiency of electric drives of auxiliary mechanisms of marine power plants. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 77(3):238–241. (In Russ.).

На сегодняшний день является важным вопрос рассмотрения повышения энергоэффективности электроприводов (ЭП) вспомогательных механизмов судовых энергетических установок (СЭУ). Самым распространенным механизмом в СЭУ являются насосы. Назначение, конструктивные особенности, режимы работы которых разнообразны − это насосы циркуляционные, масляные, топливные, конденсатные, питательные, охлаждающие и пр. Используемые в ЭП этих насосов двигатели далеко не всегда отвечают требованиям энергоэффективности, т.е. обладают невысокими значениями КПД и коэффициента мощности. Тем более, что Международная морская организация (ИМО) в своих нормативных документах рекомендует использовать более энергоэффективные электродвигатели при проектировании новых судов, что должно повысить эффективность, надежность и безопасность работы СЭУ [1].

Поэтому важным стоит вопрос снижения, прежде всего, потерь мощности в этих ЭП. Одним из путей решения этой проблемы является использование энергоэффективных двигателей. Данные двигатели классифицируются по уровням энергоэффективности в соответствии с международными стандартами (IEC 60034-30-1):

- IE1 (Standard Efficiency) − базовый уровень энергоэффективности, уже не соответствует современным требованиям;
- IE2 (High Efficiency) − повышенная энергоэффективность, используется в большинстве насосных установок;
- IE3 (Premium Efficiency) – двигатели с уменьшенными потерями, требуют улучшенного охлаждения;
- IE4 (Super Premium Efficiency) – наиболее энергоэффективные двигатели.

Эффективность этих двигателей заключается в увеличении активных материалов, содержащих железо, медь и алюминий А97, для изготовления обмотки статора и пакетов статора и ротора, что приводит к снижению потерь примерно на 30 %, а КПД возрастает до 5 %. Однако их стоимость выше, чем у обычных двигателей, примерно на 20–30 % [2].

Кроме этого, увеличение материалов приводит к возрастанию массы двигателя и снижению такого важного для судостроения показателя, как удельная мощность двигателя (кВт/кг). При создании же новых судов важным является сочетание мощности и компактности, т.е. должна быть решена задача обеспечения высокой мощности электродвигателей при их минимальных массогабаритах**.** Одним из путей повышения удельной мощности двигателей в ЭП насосов является применение новых материалов.

В ЭП насосов в основном используются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Они обладают невысоким значением удельной мощности (0,05–0,167 кВт/кг) и высокими потерями в магнитопроводе статора, достигающими при частоте 50 Гц 15–20 % от суммарных потерь [3, 4]. Значительными являются также удельные потери в стали, которые при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц составляют 2–3 Вт/кг, причём с ростом частоты (при частотном регулировании скорости) они возрастают квадратично. Потери в меди обмотки статора также значительны [3].

Поэтому в настоящее время рекомендуется применение аморфных и нанокристаллических сплавов для магнитопровода статора.

Известно, что потери в стали традиционного магнитопровода складываются из потерь на гистерезис и вихревые токи. Если уменьшить толщину листа с 0,5 мм до 20–40 мкм, то составляющая вихревых токов снижается на порядок. Именно такой подход реализован в аморфных металлических сплавах, например $Fe_{80}Si_6B_{14}$ (сплав железа, кремния, бора). Материал получают сверхбыстрой закалкой расплава (скорость охлаждения 10^6 К/с), что придаёт ему аморфную (стеклообразную) структуру [4, 5].

Анализ показал: удельные потери в аморфной стали составляют 0,1–0,3 Вт/кг при частоте 50 Гц, т.е. в 10–20 раз ниже, чем у электротехнической стали 2412. При работе АД на повышенных частотах (до 100 Гц и выше) разница становится ещё более заметной [4]. Однако аморфная лента обладает хрупкостью и низкой обрабатываемостью. Формование зубцовой зоны статора традиционной штамповкой невозможно – материал крошится. Одно из решений − использование композитного сердечника, в котором аморфные ленты склеены эпоксидным связующим с наполнителем из наночастиц Al_2O_3 (соединение алюминия и кислорода, также известное как глинозём) [5, 6].

В связи с высокой влажностью и содержанием солей при эксплуатации судового электрооборудования традиционные изоляционные материалы, используемые в АД (стеклослюдинит, эмалевая изоляция, эпоксидные компаунды), разрушаются за 2 года эксплуатации. Пробивное напряжение снижается с 18 до 8–10 кВ/мм [7]. Перспективным решением повышения износостойкости изоляции выступают нанокомпозитные покрытия на основе полиимида, армированного частицами диоксида кремния (SiO_2) размером 10–20 нм. Такая изоляция имеет пробивное напряжение 25–30 кВ/мм и класс нагревостойкости Н (до 180 °С) [5, 6]. В солевом тумане ресурс нанокомпозитной изоляции достигает 20000 ч, что в 2,5–4 раза выше, чем у традиционных материалов.

Корпусные детали АД морского исполнения чаще изготавливают из нержавеющей стали с добавлением молибдена, например, марки 316 или 317 и алюминиевых сплавов (например, АК12 − литейный сплав алюминия с кремнием и незначительной долей магния, а также прочих примесей). Корпуса из стали быстро теряют усталостную прочность из-за циклических нагрузок (вибраций, волновых воздействий) и имеют сложности с обработкой и сваркой при изготовлении, а алюминивые - уступают по жёсткости. Целесообразно было бы использовать полимерные композиты на основе углеволокна (Т1000), которые имеют модуль упругости 180 ГПа при плотности 1,6 г/см³, что в 5 раз легче стали [8], но их применение ограничено высокой стоимостью и сложностью герметизации разъёмов.

Сравнительная оценка АД, изготовленного по старой технологии, и АД, в состав которого входят перспективные материалы, показала, что удельная масса (кг/Вт) выросла примерно в 2,7 раза; КПД при 25 % нагрузки увеличился с 0,82 до 0,93; ресурс изоляции стал больше в 2,5 раза, но стоимость нового двигателя увеличивается в 2–2,5 раза [4].

Однако эксплуатационные расходы снижаются за счёт экономии электроэнергии (8–12 %) и отсутствия необходимости в частой замене изоляции. Срок окупаемости для судов с интенсивным использованием насосов составляет 2–3 года.

При использовании новых материалов для улучшения эксплуатационных показателей и повышения энергоэффективности АД, используемых в ЭП вспомогательных механизмов СЭУ, необходимо учитывать высокую стоимость и технологические сложности при изготовлении. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку промышленных методов штамповки аморфных сердечников и удешевление нанокомпозитных изоляционных покрытий.

Список источников

1. International Maritime Organization: официальный сай http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx (дата обращения : 29.05.26).

2. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение : учеб. пособие. М. : Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.

3. Копылов И. П. Справочник по электрическим машинам. М. : Энергоатомиздат, 2018. Т. 1. 568 с.

4. Степанов, В. Н. Сравнительный анализ материалов для магнитопроводов судовых электродвигателей / В. Н. Степанов, О. Н. Прокопеня // Вестник Брестского ГТУ. 2023. № 3. С. 89–94.

5. Wang, L. Amorphous stator cores for high-efficiency ship electric drives / L. Wang, H. Kim // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 465. P. 133–142.

6. Järvinen, A. Nanocomposite insulation for high-humidity marine electric motors / A. Järvinen, K. Lehtoranta // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12, No. 1. P. 88.

7. ГОСТ Р 59668-2021. Электродвигатели судовые. Методы испытаний магнитных материалов. М. : Стандартинформ, 2021. 28 с.

8. Соколов А. В. Судовые электроприводы и системы автоматизации. СПб. : Морской вестник, 2019. 312 с.

Сведения об авторе

Н. М. Марченко – кандидат технических наук, доцент Департамента энергетических систем Политехнического института, SPIN-код: 8697-0282.

Information about the author

N. M. Marchenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Systems, SPIN-code: 8697-0282.

Статья поступила в редакцию 11.06.2026; одобрена после рецензирования 10.07.2026; принята к публикации 10.09.2026.

The article was submitted 11.06.2026; approved after reviewing 10.07.2026; accepted for publication 10.09.2026.

© Марченко Н. М., 2026.

«Повышение энергоэффективности электроприводов вспомогательных механизмов судовых энергетических установок» [Марченко Н. М.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).