

Тараненко С.В., Голубєва С.М.

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У СУЧАСНОМУ СУДНОВОМУ ОБЛАДНАННІ

У статті наведено аналіз показників надійності суднових електродвигунів (ЕД), що використовуються у сучасному судновому обладнанні. Надійність та ефективність роботи суднового електроприводу (ЕП) забезпечується системою заходів, де поряд з конструктивними рішеннями важливе місце відводиться технічному обслуговуванню та підтримці експлуатаційних характеристик електроприводів у процесі роботи. На судах електрообладнання повинно витримувати такі фактори, як крен і диферент, що постійно проявляються, вібраційні та ударні впливи, перегрів і підвищену вологість повітряного середовища, неможливість швидко доставити обладнання на ремонтну базу. Отже, надійність суднових електроустановок як ремонтпридатних регулюється особливими вимогами. Предметом дослідження є характерні uszkodження суднових електродвигунів, що використовуються в сучасних електроприводах. Наведено показники фактичного рівня надійності сучасних суден та їх комплектуючого обладнання. Розглянуто залежність відмови суднового електрообладнання від умов експлуатації, матеріалів, режимів роботи та ін. Зроблено висновки про методи збільшення надійності конкретних типів ЕД та про перспективи застосування різних ЕД у сучасних суднових електроприводах. Для ефективного впровадження інтегрованої діагностики асинхронних електроприводів потрібне вирішення низки супутніх завдань, що дозволить суттєво підвищити її ефективність та забезпечити необхідний рівень надійності та безпеки суднового електрообладнання. Застосування інтегрованої діагностики відкриває широкі перспективи для створення інтелектуальних систем керування складними системами керування, що діють за умов неповної інформації.

Ключові слова: судновий електропривод, електродвигун, надійність, відмова, термін служби, інтегрована діагностика.

Постановка проблеми. Ефективність експлуатації технічних засобів флоту є одним з основних факторів, що визначають розвиток водного транспорту. Об'єктивна необхідність безперервного підвищення надійності суден та суднового електрообладнання стимулює вивчення фактичного рівня надійності обладнання, що застосовується на судах та використання отриманих результатів для розробки організаційних та технічних заходів, спрямованих на усунення виявлених конструктивних недоліків, причин відмов, на вдосконалення комплексної автоматизації судна, що поєднують функції контролю управління та моніторингу.

Рівень енергоємності та автоматизації сучасних судів незмінно збільшується, і ця тенденція продовжує зберігатися протягом останніх десятиліть. Така тенденція

обумовлює **актуальність** визначення експериментальних значень надійності суднового електроустаткування з метою розробки сучасних методів діагностики та оцінки реального технічного стану електричного обладнання [1].

Метою статті є аналіз досліджень щодо підвищення надійності суднових електродвигунів, методів діагностики та своєчасного виявлення несправностей, збільшення терміну технічної експлуатації (ТЕ) суднових ЕП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На розвиток теоретичних розробок та практичне вдосконалення ЕП, включаючи вирішення основних завдань енергозбереження, орієнтовані роботи Б.І. Абрамова, А.В. Башаріна, А.П. Богословського, І.Я. Браславського, Д.Г. Жимеріна, Г.І. Кітаєнко, Г.М. Мустафи, Є.Г. Подобедова, В.В. Тихонова, І.М. Шаранова, В.А. Шубенко, А.Г. Яурі, А.Ф. Буркова та ін. Істотні результати у розвитку теорії та практики надійності, включаючи суднові технічні вироби, отримані за активної участі Астахова С.В., Гольдберга О.Д., Єрмоліна Н.П., Жеріхіна І.П., Капури К., Кірєєва Ю.Н., Кузнєцова С.В., Ламберсона Л., Рябініна І.А. та ін. До можливих напрямів розвитку суднових ЕП, відповідальних сучасним вимогам, ставляться: поглиблені теоретичні дослідження і практична реалізація нових технічних рішень; модернізація існуючих систем ЕП переважно для суден, що перебувають в експлуатації [2,3].

Викладення основного матеріалу дослідження. Сучасні судна характеризуються високим ступенем електрифікації. Електроенергія широко використовується для управління судном, для роботи різних допоміжних та палубних механізмів, для електроруху, радіо- та електронавігаційних приладів, для здійснення внутрішньосудинного зв'язку та сигналізації, побутових цілей.

Останні досягнення автоматичного управління, обчислювальної та напівпровідникової техніки уможливили автоматизацію всіх виробничих процесів на судні.

Орієнтуючись на деякі показники, такі, як середня кількість електрообладнання, що встановлюється, і середня потужність суднових електроустановок, можна констатувати, що в даний час рівень електрифікації судів безперервно підвищується.

На сучасних морських судах встановлюються сотні електричних машин та десятки тисяч електричних апаратів та приладів, прокладаються сотні кілометрів кабелю. Потужність суднових електростанцій досягає кількох тисяч кіловат, а потужність окремих електроприводів становить кілька сотень кіловат.

В даний час процес електрифікації судів безперервно продовжується, що пояснюється зростанням надійності електричних машин, їх високим ККД, легкістю перетворення електроенергії в інші види енергії. Електрифікуються механізми машинного відділення, побутові споживачі та ряд інших установок та механізмів [4]. Класифікація суднових електричних машин показано в табл. 1.

Асинхронний електродвигун на сьогоднішній день є основним приводом суднових механізмів, систем та пристроїв. Надійність та ефективність його роботи забезпечується системою заходів, де поряд з конструктивними рішеннями важливе місце відводиться технічному обслуговуванню та підтримці експлуатаційних характеристик електроприводів у процесі роботи [5].

Трифазні асинхронні двигуни є найбільш масовою продукцією електромашинобудування, проте їхня надійність недостатня. Основним видом відмови електродвигунів є пошкодження його обмотки, що потребує капітального ремонту. У середньому протягом року капітальний ремонт піддається близько 20% встановлених

асинхронних двигунів. У переважній більшості випадків (85-95%) відмови відбуваються через пошкодження обмотки; 2-5% електродвигунів відмовляють через пошкодження підшипників. Близько 35% відмов спостерігається через недостатню хорошу якість виготовлення електродвигунів. На якості електродвигунів позначається незадовільна якість матеріалів (особливо електроізоляційних, обмотувальних проводів і просочувальних лаків). Основною причиною відмов є недоліки експлуатації (переважно незадовільний захист). З цієї причини відбувається близько 50% відмов [6, 7].

Аналіз відмов суднового електрообладнання показує, що перші півтора-два роки експлуатації спостерігається підвищена у 2–3 рази частота відмов (ω); після зазначеного періоду приробітку значення ω стабілізується навколо встановленого значення $\omega_{вст}$. Ця закономірність є у всіх видів електрообладнання. Кількість відмов за рівні проміжки часу, як правило, узгоджується із законом Пуассона. З усіх відмов електрообладнання відмови кабелів та арматури мережі освітлення складають (у відсотках) 40-50, апаратури електроприводів 25-40, електродвигунів 5-8, електронагрівальних приладів 5-8, розподільних пристроїв 2-6, силових кабелів 2-4, джерел електроенергії 1-2.

Таблиця 1 – Класифікація суднових електричних машин

Тип ЕМ Найменування механізму	ЕМ змінного струму			ЕМ постійного струму				
	асинхронні трифазні ЕД	генератори (синхронні)	синхронні ЕД	ЕД незалежного збудження (великої потужності)	ЕД послідовного збудження	ЕД паралельного збудження	ЕД змішаного збудження	генератори
насоси (для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), керування холодною та гарячою водою тощо)								
вентилятори (для ДВЗ вантажних трюмів)								
системи пожежогасіння								
кермові пристрої								
компресори								
живлення головного розподільного щита (ГРЩ)								
привод гребного гвинта								
гребні азиподні установки AZIPOD, гвинтувальна поворотна колонка (ГРПК)								
привод потужних лебідок та брашпилів								
привод брашпилів, шпилів, лебідок, кранів								
привод вантажопідійомних, якірно-швартовних та інших механізмах								
привод насосів та вентиляторів, допоміжні механізми та насоси, що обслуговують головні двигуни та суднові системи, верстати тощо								
палубні механізми, рульові приводи, валоповоротні пристрої та ін.								
електромеханічні перетворювачі								

У таблиці 2 наведено значення середнього часу безвідмовної експлуатації T_e деяких допоміжних механізмів енергетичної установки.

Таблиця 2 – Середній час безвідмовної експлуатації деяких допоміжних механізмів

Найменування механізму	T_e , тис.год	Найменш надійні елементи та їх коефіцієнти відмов k_e , %
Насоси відцентрові	10÷26	Ущільнення 40 – 70; підшипники 12 – 30; вали 10 – 30; робочі колеса 3 – 16.
Насоси поршневі	8÷13	Кільця поршневі 10 – 37; клапани 29 – 62; підшипники 5; сальники 7 – 17.
Сепаратори відцентрові	13÷28	Прокладки барабана 10 – 29; черв'яні передачі 11 – 26; муфти 10 – 30; підшипники 5 – 28.

Численні дослідження показали, що час безвідмовної експлуатації систем та засобів автоматизації розподілене за експонентним законом [7]. Враховуючи відмінності у складності та конструктивному виконанні елементів та схем автоматики, різний рівень якості вихідних матеріалів та виконання, неможливо дати узагальнену оцінку безвідмовності систем та засобів автоматизації. Можна лише навести приклади щодо конкретних систем. Так, час безвідмовної експлуатації T_e систем дистанційного автоматичного керування (ДАК) та систем автоматичного керування (САК) становить (у годинах, не менше): для системи ДАК головного двигуна - 690, системи централізованого контролю - 540, ДАК допоміжних двигунів - 4600, САК насосів головного двигуна - 2200, САК компресорів - 17 280, САК та контролю сепараторів - 2420, ДАК клапанами паливної та баластної систем - 4600, САК допоміжного котла - 6280, системи авторегулювання температури охолоджуючої забортної води - 2200, САК кермом - 6050.

Гребні гвинти, як правило, є об'єктами, що не відновлюються в суднових умовах. Тому показник безвідмовності (середнє напрацювання повністю) збігається з показником довговічності - ресурсом до капітального ремонту або до заміни (списання). За даними обстеження 360 торгових суден та великої кількості військових кораблів США, для 50% суден капітальний ремонт гребних гвинтів, виготовлених з марганцевої бронзи, був потрібний через 10 років експлуатації і раніше, а 35% гвинтів були замінені в перші 5 років. Відмови гребних валів відбуваються, як правило, внаслідок розвитку явищ втоми. Згідно з результатами обстежень одновальних морських суден США, понад 30% усіх валів мали термін служби до 3 років і лише 13% - від 9 до 12 років.

Одним із головних показників надійності є довговічність. Визначення показників довговічності суднових технічних засобів досвідченим шляхом є найбільш складним завданням, так як для багатьох суднових систем, машин і механізмів термін служби становить 10 і більше років, протягом яких відбуваються суттєві зміни у конструкції та технології виготовлення нових виробів аналогічного призначення. Тому для таких агрегатів та механізмів термін служби встановлюють виходячи зі схеми технічної експлуатації судна з урахуванням досвіду експлуатації аналогічних виробів попередніх випусків. Нормовані показники під час проектування забезпечуються відповідними розрахунками міцності.

Найчастіше термін служби основних агрегатів і механізмів приймається рівним нормативному терміну служби судна (20 - 25 років) чи терміну служби до ремонту судна.

У той же час для ряду елементів судна термін служби встановлюється, ґрунтуючись на середній швидкості (інтенсивності) зносу або корозії, гранично допустимому зносі.

Середній термін служби (років) до капітального ремонту деяких суднових механізмів та пристроїв складає: люкові закриття та їх приводи – 8, донно-забортна арматура – 8, вантажні стріли та блоки – 6 - 10, гребні гвинти – 6 – 10, насоси – 8 , вентилятори – 10, рульові машини - 9, крани, лебідки вантажні – 10 – 14, випарники – 4, опріснювачі, водонагрівачі, мастильні охолоджувачі – 8.

На рис. 1 представлені експериментальні значення потоку відмов ω електрообладнання морського порту, розраховані за період 29 календарних місяців [1,8].

На графіках видно, що експериментальні значення потоку дефектів ω електричних машин лежать в межах $0,0038 - 0,014 \text{ м}^{-1}$.

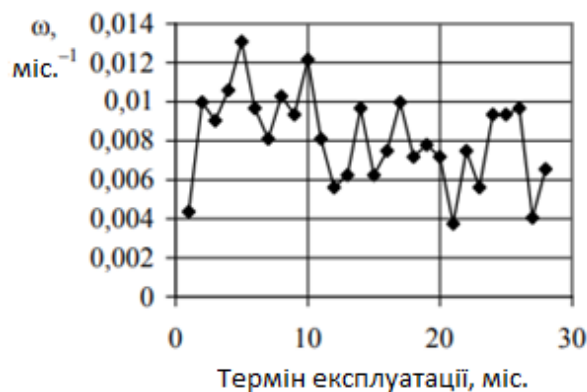


Рисунок 1 – Експериментальні значення потоку відмов ω електрообладнання від часу

Таким чином, дефекти електрообладнання морського порту призводять до аварійного переривання технологічного процесу та економічних втрат.

Раптова відмова та втрата працездатності практично будь-якого суднового електроприводу супроводжується зниженням експлуатаційних характеристик судна, підвищує ймовірність виникнення технічних, екологічних та навігаційних подій [5].

Таким чином, можна розділити основні відмови суднового електрообладнання на три групи:

– *конструкторсько-технологічні*, пов'язані з помилками у проектуванні, порушенням технології складання, внутрішніми дефектами та невідповідністю обладнання фактичним умовам експлуатації;

– *ремонтно-сервісні*, зумовлені низьким рівнем технічного обслуговування та ремонту, що призводить до підвищення інтенсивності процесів зношування, старіння та виникнення раптових відмов, як правило, зі значними руйнуваннями деталей та вузлового обладнання;

– *експлуатаційні*, спричинені порушенням правил та норм експлуатації, перевищенням або значним відхиленням експлуатаційних параметрів, зниженням опору ізоляції та виникненням коротких замикань.

Інтегровані діагностики електроприводів на базі сучасних інформаційних технологій дозволить підвищити можливості та своєчасність виявлення прихованих відмов електроприводу з урахуванням негативних процесів у взаємодіючих системах,

зокрема управління. Так, при відповідному доопрацюванні програмного забезпечення та застосування як датчиків температурних реле, рівнемірів, відцентрових покажчиків швидкості та інших пристроїв, можливе додавання цілого ряду функцій:

- контроль, реєстрація, а в окремих випадках і регулювання температури (обмоток статора, підшипників, мастила, рідини, що охолоджує, приміщень і т.д.);
- контроль тиску;
- контроль рівня рідини та мастил;
- контроль положення у просторі (заборона на пуск у неробочому положенні);
- контроль та реєстрація швидкості обертання;
- контроль параметрів електричної мережі;
- моніторинг та реєстрація споживання електроенергії обладнанням.

Таким чином, така система здатна не тільки забезпечувати безперервний захист електроприводу, але й вести реєстрацію всіх параметрів на пристрої, що фактично виключає втрату даних, дозволяє віддалено проводити моніторинг та управління обладнанням, здійснювати своєчасну діагностику та контроль технічного стану, а також видавати за необхідності заборону на запуск та своєчасно ініціювати аварійну зупинку.

Висновок. 1. Наведені показники фактичного рівня надійності сучасних суден та їхнього комплектуючого обладнання, природно, не є вичерпними. В статті не проведений аналіз факторів, що впливають на безвідмовність, довговічність та ремонтпридатність об'єктів, не наведено рекомендацій щодо підвищення надійності суднового обладнання; такий аналіз та рекомендації мають індивідуальний характер.

2. Для ефективного впровадження інтегрованої діагностики асинхронних електроприводів потрібне вирішення низки супутніх завдань. Впровадження комплексного захисту суднових електроприводів у сукупності з вирішенням супутніх завдань та вдосконаленням елементної бази та програмного забезпечення дозволить суттєво підвищити її ефективність та забезпечити необхідний рівень надійності та безпеки суднового електрообладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Власов А.Б., Мухин Е.А. Статистический анализ поврежденных электрооборудования порталных кранов. *Вестник АГТУ: Морская техника и технология*. 2011. №1. С. 23-27.
2. Бурков А.Ф. Основы теории и эксплуатации судовых электроприводов: учебник для вузов. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 340с.
3. Бурков А.Ф. Повышение эффективности технической эксплуатации судовых электроприводов: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.09.03. Санкт-Петербург, 2014. 50с.
4. Коробко Г.И. Электрооборудование судов: метод. указания и контр. задания для студ. оч. и заоч. обуч. спец. 190602. Н. Новгород: ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2009. 52 с.
5. Белов О.А., Мясников Г.С. Внедрение комплексной защиты судовых асинхронных электроприводов. *Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. Второй междунар. науч.техн. конф.* 2020. С. 73-76.
6. Бурков А.Ф., Катаев Е.В., Кувшинов Г.Е., Чупина К.В. Анализ надёжности электродвигателей, используемых в современных электроприводах. *Электроника и электротехника*. 2017. №1. С. 1–6. DOI: 10.7256/2453-8884.2017.1.21385 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21385

7. Пальчик К.Б., Марков С.В. Управление технической эксплуатацией флота, Основы технической эксплуатации флота и судоремонт: конспект лекций. Новороссийск: МГА им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2008. 81с.

8. Мухин Е.А. Повышение эксплуатационной надёжности электрооборудования инфраструктуры предприятий АПК на базе количественной термографии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Мурманск, 2013. 20с.

9. Жадобин Н.Е., Лебедев А.И., Данилов О.Г. Нечеткие регуляторы в системах управления судовыми энергетическими установками. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. Санкт-Петербург, 2014. №3(25). С. 62-68.

10. Счетчики и показания. Свод информации об измерительных приборах и системах: Двигателей постоянного тока в судах. URL: <https://lemzspb.ru/dvigateley-postoyannogo-toka-v-sudakh/> (дата звернения: 12.12.2021).

REFERENCES

1. Vlasov, A.B., & Mukhin, E.A. (2011). Statisticheskij analiz povrezhdenij elektrooborudovaniya portal'nyh kranov [Statistical analysis of damages to electrical equipment of portal cranes]. *Vestnik AGTU: Morskaya tekhnika i tekhnologiya – Bulletin of the ASTU: Marine engineering and technology*. (Vols. 1), (pp. 23- 27) [in Russian].

2. Burkov, A.F. (2021). *Osnovy teorii i ekspluatsii sudovyh elektroprivodov [Fundamentals of the theory and operation of marine electric drives]*. Sankt-Peterburg: Lan' [in Russian].

3. Burkov, A.F. (2014) *Povyshenie effektivnosti tekhnicheskoy ekspluatsii sudovyh elektroprivodov [Increasing the efficiency of technical operation of ship electric drives]. Extended abstract of Doctor's thesis*. Sankt-Peterburg [in Russian].

4. Korobko, G.I. (2009) *Elektrooborudovanie sudov [Electrical equipment of ships]*. N. Novgorod: FGOU VPO «VGAVT» [in Russian].

5. Belov, O.A., & Myasnikov, G.S. (2020) *Vnedrenie kompleksnoj zashchity sudovyh asinhronnyh elektroprivodov [Implementation of comprehensive protection of ship asynchronous electric drives]. Proceedings from MIIM '20: II mezhdunarodnaya nauchno - tekhnicheskaya konferenciya «Tekhnicheskaya ekspluatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya» – The second international scientific and technical conference «Technical operation of water transport: problems and ways of development»*. (pp. 73-76) [in Russian].

6. Burkov, A.F., Kataev, E.V., Kuvshinov, G.E., & CHupina, K.V. (2017) *Analiz nadyozhnosti elektrodvigatelej, ispol'zuemyh v sovremennyh elektroprivodah [Analysis of the reliability of electric motors used in modern electric drives]. Elektronika i elektrotehnika – Electronics and electrical engineering, 1, 1-6* [in Russian]. DOI: 10.7256/2453-8884.2017.1.21385 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=21385

7. Pal'chik, K.B., & Markov S.V. (2008) *Upravlenie tekhnicheskoy ekspluatsiej flota, Osnovy tekhnicheskoy ekspluatsii flota i sudoremont [Fleet technical operation management, Fundamentals of fleet technical operation and ship repair]*. Novorossiysk: MGA im. adm. F.F. Ushakova [in Russian].

8. Muhin, E.A. (2002) *Povyshenie ekspluatsionnoj nadyozhnosti elektrooborudovaniya infrastruktury predpriyatij APK na baze kolichestvennoj termografii [Improving the operational reliability of electrical equipment in the infrastructure of agricultural enterprises based on quantitative thermography]. Extended abstract of candidate's thesis*. Murmansk [in Russian].

9. ZHadobin, N.E., Lebedev, A.I., & Danilov O.G. Nechetkie regulatory v sistemah upravleniya sudovymi energeticheskimi ustanovkami [Fuzzy controllers in control systems of ship power plants]. Sankt-Peterburg: Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala Makarova S.O. (Vols. 3(25)), (pp. 62-68). [in Russian].

10. Schetchiki i pokazaniya. Svod informacii ob izmeritel'nyh priborah i sistemah: Dvigatel' postoyannogo toka v sudakh [Counters and readings. Set of information on measuring instruments and systems: DC motors in ships]. (n.d.). *lemzspb.ru*. Retrieved from <https://lemzspb.ru/dvigatelye-postoyannogo-toka-v-sudakh/> [in Russian].

S.V. Taranenko, S.M. Golubieva

ANALYSIS OF RELIABILITY INDICATORS OF MARINE ELECTRIC MOTORS USED IN MODERN SHIP EQUIPMENT

The article provides an analysis of the reliability indicators of marine electric motors (EM) used in modern marine equipment. The reliability and efficiency of the ship's electric drive (ED) is ensured by a system of measures, where along with design solutions, an important place is given to the maintenance and maintenance of the operational characteristics of electric drives during operation. On ships, electrical equipment must withstand such factors as constantly manifested heel and trim, vibration and shock effects, overheating and high humidity of the air, the inability to quickly deliver the equipment to the repair base. Consequently, the reliability of ship electrical installations as repairable is regulated by special requirements. The subject of the research is the characteristic damage of marine electric motors used in modern electric drives. Indicators of the actual level of reliability of modern ships and their component equipment are given. The dependence of the failure of ship electrical equipment on operating conditions, materials used, operating modes, and more is considered. Conclusions are drawn about methods of increasing the reliability of specific types of electric motors and about the prospect of using various electric motors in modern marine electric drives. For the effective implementation of integrated diagnostics of asynchronous electric drives, it is necessary to solve a number of related problems, which will significantly increase its efficiency and ensure the required level of reliability and safety of ship electrical equipment. The usage of integrated diagnostics opens up broad prospects for the creation of intelligent control systems for complex control systems operating in conditions of incomplete information.

Key words: *marine electric drive, electric motor, reliability, failure, service life, integrated diagnostics.*