

Дощенко Г.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-1004-4934>

Херсонська державна морська академія

Наговський Д.А.

<https://orcid.org/0000-0001-6920-0324>

Херсонська державна морська академія

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВІДМОВ

У статті пропонується методичний підхід до оцінки технічного стану суднового електрообладнання на основі аналізу динаміки параметричних відмов. Актуальність цієї роботи впливає з необхідності переходу від планового технічного обслуговування до стратегії технічного обслуговування за станом (СВМ), яка дозволяє запобігати раптовим відмовам обладнання.

Розглядається процес поступового формування відмов у технічних системах. Описано модель для ймовірнісної оцінки вихідної аварійної події або стану, спричиненого цим явищем. У дослідженні уточнено поняття «небезпечного стану» та його синоніма (за певних умов) «граничного стану». Досліджено можливі причини досягнення граничного стану, що призводить до повного виведення обладнання з експлуатації. Зокрема, у дослідженні проаналізовано критичні параметри, що визначають граничний стан виробу.

Встановлено, що під час експлуатації суднового обладнання граничне значення критичного параметра може коливатися. Представлено модель поступового формування відмов, що враховує фактори, що негативно впливають на роботу обладнання. Автори зазначають, що ймовірність безпечної експлуатації зменшується зі зносом та старінням обладнання, що призводить до постійного зміщення граничного значення.

Дослідження базується на моделюванні процесів деградації ключових характеристик у суднових електричних системах. Автори визначили ключові діагностичні індикатори, що сигналізують про початок параметричних змін до функціонального збою або аварійного вимикання.

Результати цієї роботи підвищують точність прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання та оптимізують графіки технічного обслуговування. Запропонована методологія може бути впроваджена в енергетичному секторі та в автоматизованих системах моніторингу промислових об'єктів.

Ключові слова: електрообладнання, технічний стан, параметрична відмова, діагностування, залишковий ресурс, ймовірність, старіння ізоляції.

Постановка проблеми. Безпека експлуатації судна насамперед визначається його технічним станом. Досвід експлуатації морських суден підтверджує важливість комплексної реалізації конструктивних заходів на етапі будівництва самого судна. Однак підтримання заданого рівня технічної готовності судна, забезпечення його справного технічного стану загалом та працездатності окремих вузлів та механізмів залежать від загальної організації технічної експлуатації та побудови усєї системи технічного забезпечення. На даному

етапі можна виділити декілька основних складових, пов'язаних із забезпеченням безпечної та ефективної експлуатації морського транспорту.

По-перше, слід зазначити якість професійної підготовки екіпажів суден. Керівними документами, зокрема Міжнародною конвенцією «Про підготовку та дипломування моряків та несення вахти» (ПДНВ), встановлюються стандарти знань, розуміння, досвіду та професійної компетентності членів екіпажів морських судів. Забезпечення даних стандартів компетентності та



професіоналізму моряків покликане забезпечити охорону людського життя, майна та навколишнього середовища. Тому професійна підготовка членів екіпажів судів включає формування компетенцій в галузі технічного обслуговування, проведення регламентних робіт і ремонтів [1].

Однак для визначення ступеня готовності системи та оцінки її технічного стану в процесі експлуатації судна поряд із традиційними показниками необхідно враховувати вплив людського фактора. Як відомо, людський фактор у будь-якій технічній системі є слабоформалізованим явищем і неминуче робить всі такі системи імовірними. Виходячи з імовірної природи цього явища, звичайні методи оцінки та прогнозування рівня технічної готовності виявляються неефективними. Для зниження впливу цього явища слід впроваджувати в систему управління технічною експлуатацією нові методи організаційного контролю, технології та системи автоматизованого контролю, а також удосконалені методи оцінки технічної готовності судна, що наочно відображають її рівень з урахуванням людського фактора. Такий підхід дозволяє прогнозувати можливі технічні події та відмови, а також своєчасно визначити та усувати передумови до їх виникнення [2].

По-друге, слід враховувати необхідність наявності бази технічного обслуговування судів. Такі підрозділи вирішують завдання усунення дефектів різного обладнання, відновлення робочих властивостей окремих деталей, виготовлення нових деталей або спеціальних пристроїв і т. д. Основна роль бази технічного обслуговування полягає у збільшенні можливостей відновлення заданого рівня технічної готовності судна в період проведення регламентних робіт за рахунок додаткових виробничих потужностей. Бази технічного обслуговування можуть формуватися з урахуванням берегових ремонтно-технічних станцій (БРТС), окремих судноремонтних майстерень (СРМ) чи ремонтно-експлуатаційних баз (РЕБ). Також можливе формування рухомих ремонтно-експлуатаційних комплексів на основі плавучих майстерень (ПМ). В останньому випадку можливе якісне забезпечення проведення великого обсягу регламентних та відновлювальних робіт безпосередньо у морі чи у часових пунктах базування судів [3].

Зі збільшенням на судах цифрового обладнання та мікропроцесорної техніки виникає необхідність створення спеціалізованого інформаційно-технічного центру з обслуговування та забезпечення працездатності даного виду обладнання. Враховуючи високий рівень автоматизації сучасних судів

і широкий спектр застосовуваних мікропроцесорних систем, необхідність такого спеціалізованого центру очевидна. Для реалізації комплексного підходу за цим напрямом даний центр повинен бути універсальним і багатофункціональним. Це, у свою чергу, вимагає об'єднання та централізації ресурсів, зосередження матеріально-технічного, виробничого та кадрового потенціалу в рамках регіонального інформаційно-технічного центру.

По-третє, важливу роль підтримці на заданому рівні технічної готовності судів грає система матеріально-технічного забезпечення. Під поняттям «матеріально-технічне забезпечення» мається на увазі ціла низка необхідних заходів щодо повної комплектації судна для його подальшої експлуатації. Система матеріально-технічного забезпечення вирішує завдання забезпечення судів матеріалами та запасами за номенклатурою та в кількостях, необхідних для їх ефективної експлуатації та безпечного плавання. Під зазначеними матеріалами розуміються певне технічне обладнання, запасні частини, інструмент, пристрої, запаси води, ПММ та інші витратні матеріали, необхідні для нормальної експлуатації судна та підтримки його технічної готовності [3].

Збільшення кількості різних проектів судів з використанням на них обладнання різних типів, марок та виробників підриває надійність матеріально-технічного забезпечення. Збільшення обсягів номенклатури втрачає сенс, оскільки в таких умовах частина матеріальних запасів може виявитися незатребуваною. У цьому випадку системі постачання доводиться працювати практично «з коліс» під конкретні замовлення, що істотно знижує її ефективність. При цьому масове використання обладнання іноземних виробників ще більше посилює ситуацію, оскільки з'являються додаткові економічні, логістичні, а в сучасних умовах ще й політичні ризики.

Зниження даних ризиків та підвищення стійкості є актуальним завданням у системі матеріально-технічного забезпечення. Загальна уніфікація судів та судового обладнання за сучасних умов практично неможлива. Однак слід розуміти та комплексно оцінювати вплив даного фактора на ефективність системи матеріально-технічного забезпечення. Нівелювати ризики, що виникають, і забезпечити необхідну ефективність дозволяє застосування системи автоматизованого обліку матеріальних запасів. Такі автоматизовані системи підвищують оперативність управління матеріальними запасами, надають всій системі постачання додаткову маневреність і можливість

своєчасно адаптуватися до умов, що змінюються.

Четвертим, базовим елементом ефективної технічної експлуатації морського транспорту є система судноремонту. Основним завданням, вирішуваної у ході планових ремонтів судів, є відновлення їх технічних характеристик рівня, що дозволяє забезпечити ефективну та безпечну експлуатацію судна в міжремонтний період. Додатково в період планових ремонтів можуть вирішуватись завдання покращення або зміни характеристик судна або окремих видів обладнання шляхом проведення додаткових робіт з реконструкції, модернізації або переобладнання судна [4].

Ремонт суден є складним технологічним процесом, що включає в себе безліч окремих технологій. Для реалізації цих технологій та вирішення головних завдань судноремонту потрібен висококваліфікований персонал. Підготовка фахівців, створення та заохочення системи передачі досвіду, формування кадрового потенціалу підприємства – важливе завдання і визначальний фактор у питаннях забезпечення ефективності всього судноремонтного комплексу.

Сучасний етап розвитку морського флоту характеризується стрімким ускладненням судових електротехнічних систем та підвищенням вимог до їхньої надійності, безпеки й економічної ефективності. Традиційно на суднах переважає регламентна стратегія технічного обслуговування, яка ґрунтується на календарних термінах або напрацюванні в мотогодинах. Однак такий підхід має суттєві недоліки: він не враховує індивідуальну інтенсивність зносу обладнання та не здатний ефективно запобігати раптовим параметричним відмовам.

Ключові аспекти проблеми:

- Ризик раптових відмов: Параметричні зміни (поступове погіршення характеристик через старіння, корозію чи вібрацію) часто залишаються непомітними під час стандартних перевірок, що призводить до непередбачуваного виходу обладнання з ладу в рейсових умовах.

- Економічна неефективність: Регламентний ремонт часто передбачає заміну вузлів, які ще мають значний ресурс, або навпаки – не встигає запобігти аварії, що веде до дороговартісних простой судна.

- Складність діагностування: Процеси деградації характеристик судових систем мають прихований динамічний характер. Відсутність чітко визначених діагностичних ознак, які сигналізують про перехід системи від нормального стану до

критичного (до моменту повного заклинювання або спрацювання захисту), ускладнює впровадження систем автоматизованого моніторингу.

- Необхідність переходу до нових стратегій: Існує гостра потреба у розробці науково обґрунтованих методологій експлуатації за фактичним станом. Це потребує створення моделей, здатних аналізувати динаміку деградаційних процесів та з високою точністю прогнозувати залишковий ресурс електрообладнання.

Таким чином, вирішення проблеми оцінювання технічного стану на основі аналізу динаміки параметричних відмов є критично важливим для підвищення живучості судна, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безперебійної роботи енергетичних систем у складних морських умовах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У сучасній науковій літературі питання діагностики технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу складних технічних систем розглядається з використанням різних підходів, включно з ймовірнісними, математичними моделями та інтелектуальними системами. Зокрема, дослідження Данильченка та Потривая пропонують нейро-нечіткі моделі для динамічного прогнозування технічного стану енергетичного обладнання, що дозволяє враховувати динамічні зміни стану об'єкта в умовах реального навантаження [11]. Подібні підходи до параметричної діагностики, основані на аналізі темпів змін параметрів, пропонуються для судових механізмів, зокрема з метою оперативної оцінки технічного стану дизельних установок за даними бортових приладів [12]. В контексті моніторингу судових енергетичних систем застосовуються ймовірнісні моделі, зокрема побудовані на ланцюгах Маркова, які дозволяють інтегрувати багатофакторні впливи на систему та підвищити точність прогнозування технічних параметрів [13]. Крім того, аналітичні та ймовірнісні методи прогнозування технічного стану, що базуються на статистичних та машинно-навчальних підходах, показують перспективність для оцінювання залишкового ресурсу обладнання в складних умовах експлуатації транспортних систем. Однак у більшості сучасних робіт все ще присутня потреба у глибшому вивченні природи параметричних відмов саме для судового електрообладнання з урахуванням морських умов експлуатації, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цій галузі.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка та обґрунтування методологічного під-

ходу до оцінювання технічного стану суднового електрообладнання на основі аналізу динаміки параметричних відмов для забезпечення переходу до стратегії експлуатації за фактичним станом та підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу.

Виклад основного матеріалу. Морська галузь, що охоплює понад 80% світового товарообігу, перебуває на етапі системних змін. Ця трансформація базується на впровадженні штучного інтелекту, IoT та кіберфізичних технологій у судноплавство. За даними звіту UNCTAD (2024), при обсягах у 12 млн рейсів за минулий рік, очікується подальше щорічне збільшення показників на 2,4% до 2029 року [5]. Інтенсифікація перевезень зумовлює зростання експлуатаційного тиску на технічне обладнання, передусім на електроенергетичні комплекси, які є засадничими для безпеки та функціонування суден.

За статистикою Європейського агентства з морської безпеки (EMSA), викладеною у звіті «Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024», несправності технічних систем та агрегатів залишаються однією з головних причин аварійності на флоті. Протягом 2014–2022 років технічні відмови зумовили 25,3% усіх морських подій. Примітно, що хоча цей чинник посідає друге місце після помилок навігації, саме вихід обладнання з ладу нерідко є детермінантою подальших помилок екіпажу [6].

Фундаментальним поняттям теорії безпеки є поняття «небезпечний стан», перехід у який може завдати об'єкту шкоди великого масштабу. Одна з причин попадання об'єкта в небезпечний стан – перевищення критичним параметром його граничного значення. У цьому випадку термін «небезпечний стан» є синонімом терміну «граничний стан», який визначається як стан виробу, при якому його подальша експлуатація має бути припинена через непереможне порушення вимог безпеки або непереможного догляду заданих параметрів за встановлені межі...» [7].

Граничний стан настає при поступових відмовах. Поступові відмови іноді називають параметричними. Параметрична відмова – це вид

відмови, при якому виріб або система перестає відповідати встановленим нормам, але при цьому зберігає свою працездатність (хоч і з погіршеними характеристиками). Простіше кажучи, пристрій все ще працює, але його ключові параметри «плинули» за допустимі межі.

На відміну від раптової (повної) відмови, коли прилад просто перестає вмикатися або виконувати свою функцію, параметрична відмова характеризується поступовістю.

Причиною параметричної відмови найчастіше це природні процеси старіння, знос, корозія чи зміна фізико-хімічних властивостей матеріалів. Проявляється цей стан у наступному: зниження точності, падіння потужності, збільшення витрат палива, поява шумів або вібрацій. Таку відмову складно помітити «на око» без спеціальних вимірювальних приладів.

З погляду безпеки відбувається поступова зміна критичного параметра внаслідок старіння та зносу, порушення процедур ведення технологічного процесу, відмови автоматики, контрольно-вимірювальної апаратури, внаслідок неготовності засобів протипожежного захисту тощо. [8]

Розглянемо у загальному плані область зміни критичного параметра, обмежену його граничними значеннями, у якій об'єкт працездатний, яке функціонування безпечне (рис. 1).

Область зміни параметра включає дві допустимі зони в тому випадку, якщо на параметр накладаються двосторонні обмеження. При односторонньому обмеженні маємо одну допустиму область. Надалі для стислості розглядається випадок, коли робоче значення завжди менше допустимого, а останнє завжди менше граничного, тобто $Z_{н} < Z < Z_{пр}$.

На практиці експлуатації різних об'єктів, у тому числі суднових технічних засобів (СТЗ), для того щоб не допускати стан об'єкта до граничного (небезпечного) стану, зазвичай призначають деяке проміжне (допустиме) значення параметра $Z_{д}$, досягнення якого дає інформацію про близькість граничного значення.

Для будь-якого критичного параметра можна виділити три області його значень: робочу, допус-



Рис. 1. Область зміни критичного параметра

тиму та небезпечну. У робочій області значення параметра завжди менше допустимого, тобто $Z < Z_d$. У ній знаходяться номінальне та поточне значення. Допустима область розташована між допустимим і граничним значеннями, та для неї справедлива умова $Z_d < Z < Z_{np}$. В допустимій області функціонування об'єкта можливе, але різко підвищується ймовірність виникнення аварії. В небезпечній області значення параметра перевищує граничне значення. При переході параметра значення Z_{np} завжди настає граничне, тобто небезпечний стан.

Розглянемо модель формування поступової відмови у фіксований час, припускаючи, що зміна параметра відбувається дуже повільно. Значення параметрів аналізованого об'єкта змінюються у межах робочої області $Z_n < Z < Z_d$ під впливом будь-яких з перерахованих вище причин та випадкових впливів. Для певності припустимо, що ймовірнісний розподіл значень параметра підпорядковується нормальному закону з математичним очікуванням m_z та середньоквадратичним відхиленням σ_z . У свою чергу, під впливом детермінованої складової m_z і σ_z можуть набувати певних значень в різних умовах експлуатації, на різних етапах старіння і зносу і при управляючих та збурювальних впливах.

На рис. 2 зображена щільність розподілу значень критичного параметра області його можливої зміни. Пунктиром показаний закон розподілу при математичному очікуванні рівному номінальному значенню параметра ($m_z = Z$), суцільною лінією – при $m_z = Z_d$.

Для законів, зображених на рис. 2, $\sigma_1 < \sigma_z$.

З рис. 2 видно, що можливість виходу значення параметра O_z межі Z_{np} залежить як від m_z , і від

σ_1 . Для законів розподілу, зображених на рис. 2, у першому випадку вона практично дорівнює нулю, у другому – заштрихованої площі S . Для нормального закону розподілу [3], що найчастіше використовується при вимірах, ймовірність дорівнює:

$$Q_z(Z \geq Z_{np}) = 1 - \Phi\left(\frac{Z_{np} - m_z}{\sigma}\right), \quad (1)$$

де $\Phi\left(\frac{Z_{np} - m_z}{\sigma}\right)$ – функція Лапласа.

Вираз (1) дозволяє визначити ймовірність знаходження параметра у безпечній області $P_z = 1 - O_z$ за будь-якого зміщення середнього значення межах аналізованої області $Z_n < Z < Z_d$. За зміни середнього значення $m_z = Z_k$ від Z_n до Z_{np} (Z_k – конкретне значення випадкової величини в інтервалі від Z_n до Z_{np}) значення шуканої ймовірності зменшується від 1 до 0,5 (рис. 3).

У промисловості, авіації та при використанні для перевезення вантажів морськими суднами параметричні відмови часто є провісниками катастрофічних поломок. Якщо вчасно помітити, що параметр почав «дрейфувати» до критичної позначки, можна провести технічне обслуговування до того, як система повністю вийде з ладу.

Для суднового електрообладнання (СЕО) розрахунок та запобігання параметричним відмовам мають критичне значення, оскільки морське середовище (сіль, вологість, вібрація) прискорює «дрейф» характеристик.

Основним показником для суднового електрообладнання є можливість його безвідмовної роботи $P(t)$. Для електроустаткування найчастіше використовується експоненційний закон розподілу, який справедливий для періоду нормальної

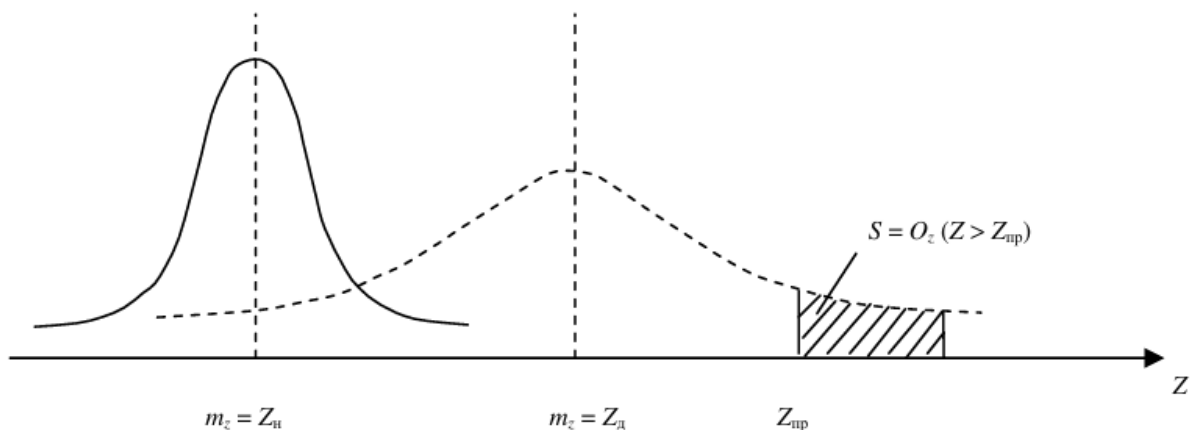


Рис. 2. Щільність розподілу значень критичного параметра

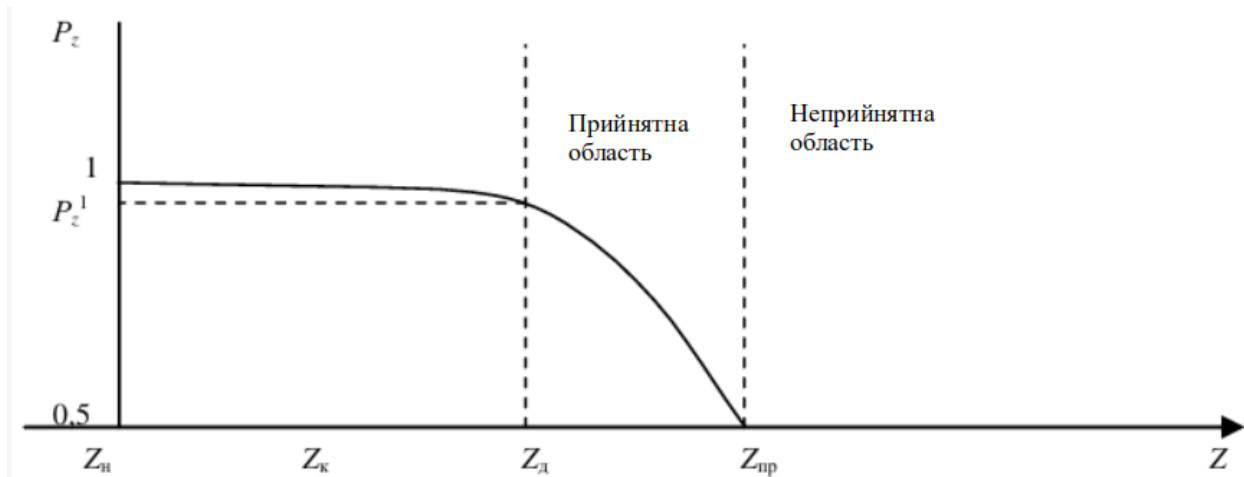


Рис. 3. Визначення ймовірності знаходження параметра у безпечній області

експлуатації (після опрацювання і до початку масового зносу).

Формула ймовірності:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

де λ – інтенсивність відмов (кількість відмов в одиницю часу, для СЕО часто береться з довідників або даних морського реєстру судноплавства та органу державного нагляду за суднами внутрішнього флоту);

t – час роботи (напрацювання в годинах);

e – основа натурального логарифму (приблизно 2,718).

Оскільки параметрична відмова – це вихід параметра x за допустимі межі $[x_{min}, x_{max}]$, ймовірність розраховується через функцію розподілу цього параметра:

$$P(t) = P(x_{min} < x(t) < x_{max}).$$

На судах для цього часто застосовують статистичний контроль: якщо ми бачимо, що опір ізоляції двигуна Ri80 знижується зі швидкістю v , ми можемо розрахувати час до досягнення критичного порога цього показника (наприклад, 0,5 МОм). [8]

Методи запобігання на судні

Профілактика на флоті будується на системі PMS (Planned Maintenance System).

1. Тренд-аналіз (Condition Monitoring):

– Замість того щоб просто перевіряти «працює/не працює», механіки та електромеханіки записують чисельні значення (наприклад, струм витoku або температуру обмоток).

– Якщо графік показує стійке зниження параметра, обслуговування призначається до досягнення критичної точки.

2. Тепловізійний контроль:

– Дозволяє виявити параметричну відмову контактних з'єднань у ГРЩ (головному розподільчому щиті). Зростання температури на 10–20°C говорить про зростання перехідного опору, хоча світло на судні ще не згасло.

3. Контроль ізоляції під навантаженням:

– Використання приладів безперервного контролю ізоляції (типу Bender). Вони дозволяють помітити параметричну відмову ізоляції на ранній стадії, коли волога тільки почала проникати в кабель.

Для судового електрообладнання вкрай важливо дотримуватись періодичності вимірів опору ізоляції (зазвичай раз на місяць або після тривалих стоянок). Параметрична відмова ізоляції – це найчастіша причина спрацювання захисту та подальшого знеструмлення судна (blackout).

Для забезпечення надійності та запобігання раптового знеструмлення судна (Blackout),

Таблиця 1

Приклади параметричних відмов у судових системах

Обладнання	Контрольований параметр	Причина «дрейфу»
Генератор	Напруга та частота	Старіння елементів регулятора (AVR), знос щіток
Електродвигуни	Опір ізоляції	Зволоження, осідання солі, теплове старіння лаку
Акумулятори	Внутрішній опір	Сульфатація пластин, википання електроліту
Контактори	Перехідний опір	Підгоряння та окислення контактів у солоному повітрі

нижче представимо чекліст для контролю параметрів аварійного дизель-генератора (АДГ) та його систем [9].

Цей перелік сфокусований саме на параметричних змінах, які можна виміряти, перш ніж станеться поломка.

Щоб ефективно передбачати відмову, електро-механік повинен використовувати метод порівняння з попереднім вимірюванням, а саме:

1. Для опіру ізоляції: Якщо минулого місяця було 50 МОм, а цього – 5 МОм, це вже параметрична відмова, викликана зволоженням або забрудненням, навіть якщо норма в 0,5 МОм ще не досягнута.

2. Для перехідного опіру: У суднових умовах вібрація послаблює затискачі. Зростання падіння напруги на клеммах всього на 0,5 може призвести до перегріву і розплавлення клемної коробки.

Для судового електрообладнання найефективнішим методом щодо запобігання параметричної відмови є «Карта трендів». При цьому методі важливо записувати значення опору ізоляції ГРЩ і АДГ у спеціальний журнал одночасно (наприклад, першого числа кожного місяця). Різка зміна кута нахилу кривої на графіку – це сигнал до негайного огляду, навіть якщо система працює штатно.

Розглянемо головні автоматичні вимикачі (АВ) на судні – це критичні вузли, де параметрична відмова може призвести до пожежі або до повної втрати ходу. Неспрацювання автоматичного вимикача в умовах короткого замикання створює ризик повного знеструмлення судна (blackout). Головними чинниками таких збоїв є ерозія контактних поверхонь та деградація приводного механізму [10].

На відміну від простої лампочки, АВ виходять з ладу «тихо»: вони можуть роками виглядати справними, але в потрібний момент не

спрацювати або навпаки відключитися без причини.

Особливості параметричних відмов АВ на судні

1. Проблема «спікання» мастила: На судах АВ часто перебувають у режимі очікування місяцями. Мастило в механізмі взводу пружин під впливом температури в щитовій висихає і перетворюється на «клей».

– Відмова: АВ зовні справний, але при команді «Пуск» або «Захист» механізм заїдає.

– Профілактика: Регулярне очищення та використання спеціальної морської мастила (наприклад, Molykote), яка не втрачає властивостей при вібрації.

2. Ерозія дугогасних камер: Після кожного спрацювання під навантаженням усередині камер осідає металевий пил.

– Відмова: Зниження діелектричної міцності повітря всередині АВ. При наступному КЗ дуга може не згаснути, що призведе до вибуху вимикача.

– Профілактика: Чищення камер пирососом (не стисненим повітрям, щоб не загнати пил глибше!) після кожних 2-3 серйозних спрацювань.

Як уникнути Blackout: правило 3-х кроків

1. Щомісяця: Візуальний огляд через оглядові вікна та тепловізійний контроль усіх доступних з'єднань ГРЩ.

2. Раз на півроку: Тестування функції «Trip» (якщо дозволяє експлуатаційна обстановка) – перевірка того, що механічний зв'язок між розчіплювачем та замком працює чітко.

3. Щорічно (у доці або при стоянці): Викочування АВ, повне очищення, перевірка «провалу» контактів та замір перехідного опору.

Порада профі: Звертайте увагу на лічильник циклів (Operations Counter). Якщо кількість спрацювань наближається до ресурсу, вказаному виробником (зазвичай 2000-5000 циклів під

Таблиця 2

Чекліст контролю параметрів АДГ

Вузол / Система	Параметр	Норма (приблизна)	Тривожний тренд (Параметрична відмова)
Генератор	Опір ізоляції обмоток	> 100 МОм (на холодну)	Падіння нижче 2 МОм (потрібне сушіння)
Система пуску	Напруга АКБ під навантаженням	24 В (просідання до 22 В)	Падіння нижче 18-20 В під час прокручування
Паливна система	Час виходу на номінальні обороти	< 10 секунд	Збільшення часу до 15+ секунд (засмічення фільтрів)
Контактні групи	Температура з'єднань (тепловізор)	< 45° С	Зростання температури вище 70° С (окислення контактів)
Зарядний пристрій	Струм підзаряду в режимі очікування	0.5 – 2 А	Струм близький до 0 або постійно максимальний

Таблиця 3

Чеклист технічного обслуговування головного автоматичного вимикача (АВ)

Параметр	Що перевіряємо (Метод)	Норма / Дія	Симптом параметричної відмови
Перехідний опір контактів	Замір мікроомметром (Ducter test) на замкнутому ГВ	< 50 мкОм (залежить від моделі)	Зростання опору через окислення або ерозію срібного наплаву
Час спрацювання	Перевірка таймінгу розчеплювачів (Secondary Injection Test)	Повинно суворо відповідати карті селективності судна	«Дрейф» уставок (повільне спрацювання веде до вигорання всієї секції ГРЩ)
Температура шин та затискачів	Тепловізійна зйомка під навантаженням	Різниця температур фаз не більше 5-10° С	Локальне перегрів («Hot spot») – ознака послаблення болтового з'єднання
Опір ізоляції	Мегаомметр (500В/1000В) між полюсами та на корпус	> 100 МОм	Падіння ізоляції через вугільний пил (продукти горіння дуги)
Механічний знос	Візуальний огляд дугогасних камер та головних контактів	Відсутність тріщин, сколів та сильного нагару	Збільшення зазору (wire) веде до неповного притискання контактів та їх оплавлення

Таблиця 4

Чеклист контролю параметрів систем АПС

Вузол системи	Контрольований параметр	Норма / Дія	Симптом параметричної відмови
Аналогові датчики (тиск, температура)	Вихідний сигнал (струм/напруга)	4-20 мА чи 0,5-4,5 В	«Дрейф нуля»: датчик показує 0,2 бар при фактичному нулі
Канали зв'язку (Data Bus)	Рівень шумів та помилок (Error Rate)	Мінімальна кількість помилок пакетів	Періодичне зникнення зв'язку з віддаленим блоком (Intermittent fault)
Блоки живлення (UPS/PSU)	Напруга та пульсації (Ripple)	24 В DC ($\pm 5\%$), пульсації < 100 мВ	Просідання напруги при включенні сирен/маяків
Релейні виходи	Релейні виходи	< 1 Ом у замкнутому стані	Окислення контактів: АПС дає сигнал на зупинку двигуна, але реле не замикається
Детектори диму	Поріг задимленості (Obscuration)	Відповідність паспортному значенню	Забруднення камери: спрацювання при нормальному повітрі

навантаженням), ризик параметричної відмови механіки зростає у геометричній прогресії.

Система АПС (Alarm and Monitoring System – AMS) – це «нервова система» судна. Параметрична відмова тут особливо небезпечна: система може продовжувати працювати, але видавати помилкові тривоги (False Alarms) або, що ще гірше, ігнорувати реальну небезпеку через «замилений» чи зміщений діапазон чутливості датчиків.

Специфічні параметричні відмови АПС:

1. «Дрейф» аналогових сигналів (4-20 мА)

Це найпідступніший вид відмови. Через старіння електроніки або влучення вологи в клемну коробку датчика опір ланцюга змінюється.

• Результат: Датчик температури вихлопних газів показує 380° С, хоча реальна температура – 420° С. Захист не спрацює і двигун отримує пошкодження.

• Як запобігти: Регулярне калібрування за допомогою еталонного манометра або калібруатора температури (термостату).

2. Деградація оптичних пар

У датчиках полум'я або масляного туману (Oil Mist Detector) стоять ІЧ-діоди та фотоприймачі. Згодом їхня яскравість падає, а лінзи каламутніють.

• Відмова: Система знижує чутливість, щоб уникнути помилкових спрацювань, і може «проспати» реальну пожежу або вибух у картері.

• Профілактика: Щотижнева перевірка вбудованим тестом (Self-test) та очищення оптики спеціальними засобами.

3. Ємність буферних батарей

Система АПС має працювати при знеструмленні судна.

• Відмова: Батарея показує 24 (напруга в нормі), але при реальному відключенні живлення «сідає» за 2 хвилини замість 30.

• Профілактика: Тест під реальним навантаженням (Battery Capacity Test) раз на півроку.

Практичні поради для електромеханіка

1. Контроль «Землі» (Earth Fault): Поява «землі» в низьковольтних ланцюгах АПС (24 В) – це початок параметричної відмови ізоляції [14]. Навіть невеликий витік може викликати наведення, через які аналогові значення почнуть стрибати.

2. Аналіз помилкових спрацьовувань [15]: Якщо один і той же датчик дає «False Alarm» раз на тиждень – це не випадковість, а параметрична відмова (знос мембрани або корозія роз'єму). Чи не «загрублюйте» уставку, а змінійте датчик.

3. Температурний режим у процесорних блоках: Перегрів контролера АПС у центральному посту управління (ЦПУ) веде до уповільнення обробки сигналів. Перевіряйте чистоту фільтрів охолодження шаф [15].

Висновки. Практична значущість запропонованого методологічного підходу до діагностування суднового електротехнічного устаткування була підтверджена шляхом аналізу судових систем, а саме: аварійного дизель-генератора (АДГ), головного автоматичного вимикача (АВ) та системи автоматичної пожежної сигналізації (АПС).

У межах дослідження проведено чітке розмежування та дескриптивний аналіз категорій «небезпечний стан» та «граничний стан», які за певних експлуатаційних умов можуть розглядатися як синонімічні. Авторами детально вивчено етіологію виникнення граничних станів, що призводять до незворотної втрати працездатності виробу та його подальшого виведення з експлуатації.

Особливу увагу приділено ідентифікації критичних параметрів, значення яких сигналізують про наближення до межі функціональної придатності. У роботі експериментально доведено, що в умовах реальної експлуатації граничні значення цих параметрів не є статичними величинами: вони піддаються динамічним змінам під впливом зовнішніх та внутрішніх деструктивних чинників.

На основі отриманих даних розроблено математичну модель формування поступових відмов. Ця модель інтегрує в собі різноманітні негативні впливи, що діють на обладнання в процесі роботи, та наочно демонструє, як рівень безпеки функціонування об'єкта прогресивно знижується внаслідок фізичного зносу та природного старіння матеріалів. Встановлено, що постійний дрейф граничних значень параметрів є прямим наслідком цих деградаційних процесів.

Завершальним етапом дослідження став комплекс науково обґрунтованих рекомендацій. Вони спрямовані на стабілізацію робочих характеристик АДГ, АВ та АПС, а також на розробку превентивних заходів, що дозволяють мінімізувати ризики передчасного зносу та забезпечити високий рівень живучості судових електроенергетичних систем у довгостроковій перспективі.

Список літератури:

1. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти. Лондон.: ИМО. «Albert Embankment», 2017. 378 с.
2. Mukund R. Patel Shipboard electrical power systems. Taylor & Francis Group LLC, 2012. 337 p.
3. Цацко В.І., Яровенко В.О., Криворучко Д.Ю. Організація технічної експлуатації електричного обладнання і автоматики суден. Навчальний посібник. 2023.10.47049/ONMU-2023-NP13.
4. Криворучко Д.Ю., Цацко В.І. Технічна експлуатація електричного та електронного обладнання. Частина 1. Навчальний посібник. Одеса : ОНМУ, 2021. 251 с. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2021-NP5>
5. Kalafatelis A. S. et al. Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, № 3. P. 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13030425>
6. Cicek K. Marine engineering systems failure analysis using extended failure modes and effects analysis with quality function deployment: maritime house of reliability. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2025. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1108/ijqrm-05-2025-0157>
7. Kiameh Philip. Electrical equipment handbook: troubleshooting and maintenance, McGraw-Hill Professional; ISBN: 978-0071396035.
8. Srinivaas A., Sakthivel N. R., Nair B. B. Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation. *Informatics*. 2025. Vol. 12, № 1. P. 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/informatics12010025>

9. Daya A. A., Lazakis I. Component Criticality Analysis for Improved Ship Machinery Reliability. *Machines*. 2023. Vol. 11, № 7. P. 737. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070737>
10. Li L. et al. Early Detection of Health Condition Degradation of Circuit Breaker Based on Electrical Quantity Monitoring. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 14. P. 5581. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145581>
11. Oscar S., Anvar V. The monitoring system of an actual technical condition for pumping units with frequency analysis. *Procedia Engineering*. 2017. vol. 176. p. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.282>
12. Boriak K., Ihnatenko O. Експрес-метод прогнозування розвитку деградаційних процесів в корабельних механізмах з використанням поточної інформації з бортових приладів. Праці Одеського політехнічного університету. 2024. 2(70) (Груд 2024), 131–142. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.15>
13. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using markov chains. *Science-Based Technologies*. 2023. 59(3). 251–261. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
14. International Maritime Organization, *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Chapter II-1, Regulation 31 – Machinery controls*. IMO Publishing, London, 2020.
15. International Maritime Organization, *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Chapter II-1, Regulation 42 – Bilge pumping arrangements*. IMO Publishing, London, 2020.

Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A. METHODOLOGY FOR PREDICTING THE STATE OF ELECTRICAL EQUIPMENT USING PARAMETRIC FAILURE INDICATORS

The article proposes a methodological approach to assessing the technical condition of shipboard electrical equipment based on the analysis of parametric failure dynamics. The relevance of this work stems from the necessary transition from scheduled maintenance to a condition-based maintenance (CBM) strategy, which enables the prevention of sudden equipment failures.

The process of gradual failure formation in technical systems is examined. A model is described for the probabilistic assessment of an initiating emergency event or condition caused by this phenomenon. The study clarifies the concepts of a "dangerous state" and its synonym (under certain conditions), the "limit state." Possible causes of reaching a limit state—which results in the complete removal of the equipment from service—are investigated. In particular, the study analyzes critical parameters that define the product's limit state.

It is established that during the operation of shipboard equipment, the limit value of a critical parameter may fluctuate. A model of gradual failure formation is presented, accounting for factors that negatively impact equipment operation. The authors note that the probability of safe operation decreases as the equipment wears and ages, causing the limit value to shift constantly.

The study is based on modeling the degradation processes of key characteristics in shipboard electrical systems. The authors have identified key diagnostic indicators that signal the onset of parametric changes prior to functional failure or emergency shutdown.

The results of this work improve the accuracy of residual life prediction for electrical equipment and optimize maintenance schedules. The proposed methodology can be implemented within the energy sector and in automated monitoring systems for industrial facilities.

Keywords: *electrical equipment, technical condition, parametric failure, diagnostics, residual resource, probability, insulation aging.*

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026