

В. В. ШТРИБЕЦЬ

кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0009-0004-1726-1175

А. О. ТРОФИМЕНКО

доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт»,
доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0001-8424-7518

В. В. КОЛЕСНИК

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник зі спеціальності теорія систем,
теорія автоматичного регулювання та керівництва та системним аналізом,
доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем
на водному транспорті
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0009-0006-7477-8271

Р. М. ГІМПЕЛЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-математичних
та інженерно-технічних дисциплін
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного
транспорту Національного транспортного університету»
ORCID: 0000-0003-0546-6654

ТЕПЛОВИЙ МОНІТОРИНГ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА ФАКТИЧНИМ СТАНОМ

У статті проведено комплексний аналіз методів теплового моніторингу основних компонентів суднової енергетичної установки – парових котлів, електричних машин та двигунів внутрішнього згоряння – як інформаційної основи для переходу від планового технічного обслуговування до обслуговування за фактичним станом. Актуальність дослідження зумовлена посиленням вимог Міжнародної морської організації щодо безпеки мореплавства та енергоефективності суден, а також розвитком цифрових технологій моніторингу, що створюють передумови для впровадження концепції предиктивного обслуговування на морському транспорті. Для кожного типу обладнання суднової енергетичної установки систематизовано діагностичні теплові параметри: для парових котлів – температура димових газів, ефективність теплопередачі, термічний опір відкладень; для електричних машин – температура обмоток, залежність опору ізоляції від температури, класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів відповідно до стандарту IEC 60085; для двигунів внутрішнього згоряння – розподіл температури вихлопних газів по циліндрах, температура охолоджуючої рідини, тренд-аналіз теплових параметрів як індикатор зносу. Наведено математичні моделі деградаційних процесів, зокрема модель Арреніуса для теплового старіння ізоляції електричних машин, модель зростання термічного опору відкладень теплообмінних поверхонь котлів та моделі тренд-аналізу температурних відхилень двигунів внутрішнього згоряння. Виконано порівняльний аналіз вимог провідних класифікаційних товариств (DNV, Lloyd's Register, Bureau Veritas) до систем моніторингу технічного стану суднового обладнання. Запропоновано інтегральний індекс теплового стану суднової енергетичної установки, що об'єднує парціальні показники окремих компонентів та формалізує при-



йняття рішень щодо технічного обслуговування. Сформульовано рекомендації щодо впровадження інтегрованої системи теплового моніторингу суднової енергетичної установки.

Ключові слова: тепловий моніторинг, суднова енергетична установка, обслуговування за фактичним станом, паровий котел, електричні машини, двигун внутрішнього згорання, електро матеріалознавство, теплове старіння ізоляції, класифікаційні товариства.

V. V. SHTRYBETS

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separate Structural Unit “Danube Institute of Water Transport”
of the National Transport University
ORCID: 0009-0004-1726-1175

A. O. TROFYMENKO

PhD in Specialty 271 “River and Maritime Transport”,
Associate Professor at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separate Structural Unit “Danube Institute of Water Transport”
of the National Transport University
ORCID: 0000-0001-8424-7518

V. V. KOLESNYK

Candidate of Technical Sciences,
Senior Research Fellow in the Specialty of Systems Theory, Automatic Control
and Management Theory, and Systems Analysis,
Associate Professor at the Department of Navigation and Operation
of Technical Systems in Water Transport
Separate Structural Unit “Danube Institute of Water Transport”
of the National Transport University
ORCID: 0009-0006-7477-8271

R. M. HIMPEL

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural Sciences, Mathematics,
and Engineering-Technical Disciplines
Separate Structural Unit “Danube Institute of Water Transport”
of the National Transport University
ORCID: 0000-0003-0546-6654

THERMAL MONITORING OF MARINE POWER PLANTS FOR CONDITION-BASED MAINTENANCE

This article presents a comprehensive analysis of thermal monitoring methods for the main components of a marine power plant – steam boilers, electrical machines and internal combustion engines – as an information basis for the transition from scheduled maintenance to condition-based maintenance. The relevance of the research is determined by the strengthening of International Maritime Organisation requirements for navigation safety and ship energy efficiency, as well as the development of digital monitoring technologies that create prerequisites for implementing predictive maintenance concepts in maritime transport. For each type of marine power plant equipment, diagnostic thermal parameters are systematised: for steam boilers – flue gas temperature, heat transfer efficiency, thermal resistance of deposits; for electrical machines – winding temperature, insulation resistance as a function of temperature, thermal endurance classes of electrical insulating materials in accordance with IEC 60085; for internal combustion engines – exhaust gas temperature distribution across cylinders, coolant temperature, and trend analysis of thermal parameters as wear indicators. Mathematical models of degradation processes are presented, including the Arrhenius model for thermal ageing of electrical machine insulation, fouling thermal resistance growth model for boiler heat exchange surfaces, and trend analysis models for ICE temperature deviations. A comparative analysis of requirements from leading classification societies (DNV, Lloyd’s Register, Bureau Veritas) for ship equipment condition monitoring systems is performed. An integrated thermal health index for the marine power plant is proposed, combining partial indicators of individual components and formalising maintenance decision-making. Recommendations for implementing an integrated thermal monitoring system for marine power plants are formulated.

Key words: thermal monitoring, marine power plant, condition-based maintenance, steam boiler, electrical machines, internal combustion engine, electrical materials science, thermal ageing of insulation, classification societies.

Постановка проблеми

Суднова енергетична установка (далі – СЕУ) є складною технічною системою, що включає головні та допоміжні двигуни внутрішнього згорання (далі – ДВЗ), парові котли, електричні генератори та двигуни, системи автоматичного керування та розподілу електроенергії. Надійність СЕУ безпосередньо визначає безпеку мореплавства: за даними Європейського агентства з морської безпеки, відмови машинного обладнання є причиною приблизно 18–22 % морських аварій та інцидентів [1, с. 28]. Міжнародний кодекс управління безпекою (ISM Code) зобов'язує судовласників впроваджувати системи планового технічного обслуговування (далі – ТО), однак традиційний підхід до ТО, заснований на фіксованих часових інтервалах, має суттєві недоліки: надмірне обслуговування справного обладнання та ризик відмови між плановими оглядами [2].

Альтернативою є обслуговування за фактичним станом (condition-based maintenance, далі – СВМ), що базується на безперервному або періодичному моніторингу діагностичних параметрів обладнання. Міжнародна асоціація класифікаційних товариств (IACS) визнає три основні системи огляду судового обладнання: Normal Survey System, Continuous Survey Machinery та Planned Maintenance System, причому остання створює основу для впровадження СВМ [3]. Серед діагностичних параметрів, що використовуються для моніторингу стану СЕУ, теплові параметри займають особливе місце, оскільки температурний режим є універсальним індикатором технічного стану для всіх основних компонентів: парових котлів, електричних машин та ДВЗ.

Актуальність дослідження зумовлена розвитком цифрових технологій (IoT-сенсори, хмарні платформи, алгоритми машинного навчання), що суттєво розширюють можливості теплового моніторингу на судах. Водночас відсутній систематичний аналіз, який об'єднав би методи теплової діагностики різних компонентів СЕУ в єдину картину та співставив їх із вимогами класифікаційних товариств. Це визначає наукову та практичну значущість дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання діагностики та моніторингу судового обладнання досліджуються у контексті загальної концепції РНМ (Prognostics and Health Management). Систематичний огляд РНМ для судового обладнання з позиції класифікаційного товариства представлено у роботі Wang et al. (2024), де виділено три ключові технічні процеси: моніторинг стану, діагностика та прогнозування несправностей, а також прийняття рішень щодо обслуговування [4]. Автори зазначають зростання ролі підходів на основі даних (data-driven approaches), особливо з використанням технологій глибокого навчання.

Тепловий контроль парових котлів досліджується переважно у контексті ефективності теплопередачі та впливу відкладень на теплообмінні поверхні. А.І. Дубинець та співавтори (2022) дослідили можливості застосування методів машинного навчання для теплотехнічного контролю парового котла у складі судової енергетичної установки [5]. Т.О. Войченко та співавтори (2023) виконали моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб судових котельних установок, показавши залежність термічного опору від товщини та складу відкладень [6].

Діагностика електричних машин за тепловими параметрами базується на фундаментальній залежності ресурсу ізоляції від температури, описаній моделлю Арреніуса. Стандарт ІЕС 60085 класифікує електроізоляційні матеріали за класами нагрівостійкості (А, Е, В, F, H), що визначає допустимі температури обмоток [7]. В. В. Штрибець та співавтори (2024) розробили модель і метод теплового розрахунку судових синхронних генераторів при сушінні в умовах експлуатації судна [8], що має пряме відношення до теплового моніторингу.

Температурний контроль ДВЗ є базовим методом оцінки технічного стану: розподіл температури вихлопних газів по циліндрах відображає рівномірність згорання, стан форсунок та клапанів. В.В. Штрибець та співавтори (2024) запропонували метод діагностики несправностей у судових електроенергетичних системах на основі вдосконаленої згорткової нейронної мережі [9], що демонструє перспективність інтелектуальних підходів до діагностики.

Серед вітчизняних досліджень слід також відзначити роботи О.А. Дакі та співавторів [10] щодо методів контролю стану підшипників судового валопроводу та можливостей застосування вейвлет-аналізу для ідентифікації пошкоджень [11], а також дослідження А.П. Шевченко та співавторів [12] з питань впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті.

Незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі діагностики окремих компонентів СЕУ, залишаються недостатньо систематизованими: комплексний порівняльний аналіз методів теплового моніторингу для різних типів судового обладнання; математичні моделі деградаційних процесів у контексті прийняття рішень щодо ТО; зіставлення вимог класифікаційних товариств до систем СВМ; та практичні рекомендації щодо впровадження інтегрованого теплового моніторингу СЕУ.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є комплексний аналіз методів теплового моніторингу основних компонентів судової енергетичної установки як інформаційної основи для обслуговування за фактичним станом. Для досягнення поставленої мети передбачено систематизувати діагностичні теплові параметри основних елементів СЕУ – парових котлів,

електричних машин та двигунів внутрішнього згоряння, а також навести математичні моделі деградаційних процесів, що визначаються цими параметрами. Поряд із цим виконано порівняльний аналіз вимог провідних класифікаційних товариств до систем моніторингу суднового обладнання, на основі якого сформульовано рекомендації щодо впровадження інтегрованої системи теплового моніторингу СЕУ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Стратегії технічного обслуговування суднового обладнання еволюціонували від реактивного через планове до обслуговування за фактичним станом та предиктивного. СВМ визначається стандартом ISO 17359 як обслуговування, що ініціюється на підставі оцінки фізичного стану обладнання, отриманої шляхом моніторингу [13]. Процес СВМ формалізується як послідовність:

$$СВМ: \text{Збір даних} \rightarrow \text{Обробка} \rightarrow \text{Діагностика} \rightarrow \text{Прогнозування} \rightarrow \text{Рішення} \tag{1}$$

Для кожного компоненту СЕУ визначається множина діагностичних параметрів $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, кожен з яких має базове значення p_0 , допустиме відхилення Δp та граничне значення p_lim . Індикатор стану обладнання:

$$HI(t) = 1 - \max_i \{ |p_i(t) - p_{0,i}| / (p_lim,i - p_{0,i}) \} \tag{2}$$

де $HI(t) \in [0, 1]$ – індекс здоров'я (health index); $HI = 1$ відповідає новому обладнанню, $HI = 0$ – граничному стану. Рішення про обслуговування приймається при $HI(t) \leq HI_threshold$. Для теплового моніторингу основними параметрами є температури в характерних точках обладнання та їх похідні (тренди).

Таблиця 1

Порівняння стратегій технічного обслуговування суднового обладнання

Стратегія	Критерій ТО	Переваги	Недоліки	Вимоги ІАС
Реактивне (RTF)	Після відмови	Мінімальні витрати на моніторинг	Ризик аварії, простої	Не допускається для критичного обл.
Планове (ТВМ)	Час / напрацювання	Предбачуваність, простота	Надмірне ТО справного обладнання	NS, CSM
За станом (СВМ)	Діагностичні параметри	Оптимізація витрат, раннє виявлення	Потребує систем моніторингу	PMS з СМ
Предиктивне (PdM)	Прогноз деградації	Планування ТО наперед	Складні алгоритми, великі дані	В розробці

Паровий котел є одним із найбільш теплонавантажених компонентів СЕУ. Основні деградаційні процеси – утворення відкладень (накипу) на внутрішніх поверхнях та сажі на зовнішніх, корозія теплообмінних поверхонь та ерозія труб. Ці процеси проявляються через зміну теплових параметрів. Ефективність теплопередачі через стінку труби котла визначається коефіцієнтом теплопередачі [6]:

$$k = 1 / (1/\alpha_1 + \delta w/\lambda w + \delta d/\lambda d + 1/\alpha_2) \tag{3}$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до стінки ($Вт/(м^2 \cdot К)$); $\delta w, \lambda w$ – товщина та теплопровідність стінки труби; $\delta d, \lambda d$ – товщина та теплопровідність шару відкладень; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води. Термічний опір відкладень:

$$Rf = \delta d / \lambda d \tag{4}$$

Зростання Rf у часі описується моделлю асимптотичного забруднення [14]:

$$Rf(t) = Rf_{\infty} \times (1 - \exp(-t/\tau)) \tag{5}$$

де Rf_{∞} – асимптотичне значення термічного опору; τ – постійна часу, що залежить від якості води та режиму роботи. ККД котла як діагностичний параметр:

$$\eta = Q_корисне / Q_паливо = (D \times (h_n - h_жв)) / (B \times Q_н) \tag{6}$$

де D – паропродуктивність; $h_n, h_жв$ – ентальпія пари та живильної води; B – витрата палива; $Q_н$ – нижча теплота згоряння. Зниження η при незмінному режимі свідчить про деградацію теплообмінних поверхонь. Температура димових газів на виході з котла $T_дг$ є ключовим індикатором: підвищення $T_дг$ на $\Delta 20$ °С свідчить про зниження ефективності теплопередачі приблизно на 1 % [5].

Тепловий потік через стінку труби з відкладеннями:

$$q = k \times \Delta T = (T_дг - T_в) / (1/\alpha_1 + Rf_{зовн} + \delta w/\lambda w + Rf_{внутр} + 1/\alpha_2) \tag{7}$$

Температура зовнішньої поверхні стінки труби:

$$T_стінки = T_в + q \times (1/\alpha_2 + Rf_{внутр} + \delta w/(2\lambda w)) \tag{8}$$

Перевищення $T_{\text{стінки}}$ понад допустиме значення (зазвичай 450–500 °С для вуглецевих сталей) є критерієм необхідності зупинки та очищення котла. Діагностична таблиця теплових параметрів котла наведена нижче.

Таблиця 2

Діагностичні теплові параметри парового котла

Параметр	Фізичний зміст	Норма	Тривога	Можлива причина
T димових газів на виході	Ефективність теплообміну	250–320 °С	$\Delta 20$ °С від базової	Відкладення, сажа, несправність пальника
Перепад T газів вхід/вихід	Ефективність поверхонь	За проектом	Зниження >15 %	Забруднення поверхонь
T живильної води	Підігрів живильної води	80–105 °С	Відхилення >10 °С	Несправність економайзера
T стінки труби	Цілісність металу	<450 °С	>400 °С	Критичні відкладення, перегрів
ККД котла η	Інтегральний показник	85–92 %	Зниження >3 %	Комплексна деградація

Ресурс електричної машини (генератора, електродвигуна) визначається переважно станом ізоляції обмоток, а теплове старіння є домінуючим механізмом деградації ізоляції. Стандарт ІЕС 60085 класифікує електроізоляційні матеріали за класами нагрівостійкості [7]:

Таблиця 3

Класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів (ІЕС 60085)

Клас	T_{max} , °С	Матеріали	Застосування	Термічний індекс, роки
A	105	Целюлоза, шовк, просочені	Трансформатори	20–25 при T_{max}
E	120	Полівінілформалеві лаки	Малі двигуни	20–25 при T_{max}
B	130	Слюда, скловолокно, епоксид	Промислові двигуни	20–25 при T_{max}
F	155	Слюда, силікон, модифіковані	Суднові генератори	20–25 при T_{max}
H	180	Силіконова гума, кремнійорг.	Спеціальні застос.	20–25 при T_{max}

Теплове старіння ізоляції описується моделлю Арреніуса, згідно з якою швидкість хімічної деградації експоненціально зростає з температурою [7]:

$$L(T) = A \times \exp(E_a / (R \times T)) \tag{9}$$

де $L(T)$ – очікуваний ресурс ізоляції при температурі T (К); A – передекспоненціальний множник; E_a – енергія активації деградації (Дж/моль); R – універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль·К)). Практичне наближення – правило Монтзингера (правило 10 °С):

$$L(T + \Delta 10) \approx L(T) / 2 \tag{10}$$

Тобто підвищення температури обмотки на 10 °С вдвічі скорочує ресурс ізоляції. Для суднового синхронного генератора класу F ($T_{\text{max}} = 155$ °С) при номінальному тепловому режимі очікуваний ресурс ізоляції становить 20–25 років. При систематичному перевищенні на 10 °С ($T = 165$ °С) ресурс скорочується до 10–12 років. Відносний знос ізоляції за час Δt при температурі T :

$$W(\Delta t) = \Delta t / L(T) = (\Delta t / A) \times \exp(-E_a / (R \times T)) \tag{11}$$

Кумулятивний знос за період експлуатації з змінним тепловим режимом:

$$W_{\text{total}} = \sum_i W_i = \sum_i \Delta t_i / L(T_i) \tag{12}$$

де сумування виконується за всіма інтервалами Δt_i з відповідними температурами T_i . Обладнання потребує заміни ізоляції або ремонту при $W_{\text{total}} \geq 1,0$. Для поточного моніторингу використовується опір ізоляції $R_{\text{із}}$, що залежить від температури та стану матеріалу. Залежність $R_{\text{із}}$ від температури для електричних машин [15]:

$$R_{\text{із}}(T) = R_{\text{із},40} \times K_t(T) \tag{13}$$

де $R_{\text{із},40}$ – опір ізоляції при 40 °С; $K_t(T)$ – температурний коефіцієнт, що приблизно подвоюється на кожні 10 °С зниження. Для коректного порівняння вимірювань, виконаних при різних температурах, необхідно приводити $R_{\text{із}}$ до стандартної температури 40 °С:

$$R_{\text{із},40} = R_{\text{із}}(T) / K_t(T) \approx R_{\text{із}}(T) \times 2^{((T - 40)/10)} \tag{14}$$

Мінімально допустиме значення R_{iz} для суднових електричних машин згідно з правилами класифікаційних товариств: $R_{iz,min} \geq (U_{ном} + 1)$ МОм, де $U_{ном}$ – номінальна напруга в кВ. Тепловий баланс електричної машини:

$$C_m \times (d\Theta/dt) = P_{втрат} - \alpha_{охол} \times S \times (\Theta - \Theta_{навк}) \quad (15)$$

де C_m – теплоємність активних частин (Дж/К); Θ – температура обмотки; $P_{втрат}$ – потужність втрат (мідні + сталеві + додаткові); $\alpha_{охол}$ – коефіцієнт тепловіддачі системи охолодження; S – площа поверхні охолодження. У стаціонарному режимі ($d\Theta/dt = 0$) перевищення температури:

$$\Delta\Theta = P_{втрат} / (\alpha_{охол} \times S) \quad (16)$$

Збільшення $\Delta\Theta$ при незмінному навантаженні вказує на деградацію системи охолодження (забруднення фільтрів, зниження витрати охолоджувального повітря), що є діагностичною ознакою [8].

Двигун внутрішнього згоряння є основним компонентом СЕУ, для якого тепловий моніторинг має найтривалішу історію застосування. Ключовим діагностичним параметром є температура вихлопних газів (далі – ТВГ) по циліндрах. Для n -циліндрового двигуна відхилення ТВГ i -го циліндра від середнього:

$$\Delta T_{вих,i} = T_{вих,i} - T_{вих,сер}, \text{ де } T_{вих,сер} = (1/n) \times \sum T_{вих,i} \quad (17)$$

Допустиме відхилення зазвичай обмежується $\Delta 20\text{--}30$ °С від середнього значення. Перевищення свідчить про: несправність паливної форсунки (підвищення T), зношення поршневих кілець (підвищення T), порушення фаз газорозподілу (аномальний розподіл). Індекс рівномірності згоряння:

$$U_T = 1 - \sigma_T / T_{вих,сер} \quad (18)$$

де σ_T – середньоквадратичне відхилення ТВГ по циліндрах. Значення $U_T > 0,95$ відповідає нормальному стану, $U_T < 0,90$ вимагає діагностики та усунення причин нерівномірності. Тепловий баланс циліндра ДВЗ:

$$Q_n = N_e + Q_{охол} + Q_{вих} + Q_{зал} \quad (19)$$

де Q_n – теплота згоряння палива; N_e – ефективна потужність; $Q_{охол}$ – теплота, відведена охолоджуючою рідиною; $Q_{вих}$ – теплота з вихлопними газами; $Q_{зал}$ – залишкові втрати (випромінювання, неповнота згоряння). Зміна пропорцій теплового балансу є діагностичною ознакою: зростання $Q_{вих}/Q_n$ при постійному навантаженні свідчить про погіршення процесу згоряння [16].

Температура охолоджуючої рідини на виході з циліндрової втулки:

$$T_{ор,вих} = T_{ор,вх} + Q_{охол} / (G_{ор} \times c_p) \quad (20)$$

де $G_{ор}$ – масова витрата охолоджуючої рідини; c_p – теплоємність. Підвищення $T_{ор,вих}$ при незмінних $G_{ор}$ та навантаженні свідчить про утворення відкладень на поверхнях охолодження або погіршення теплопередачі через стінку втулки. Тренд-аналіз ТВГ є основним інструментом предиктивного обслуговування ДВЗ. Лінійна модель тренду:

$$T_{вих}(t) = T_0 + \beta \times t \quad (21)$$

де T_0 – базове значення після останнього ТО; β – швидкість деградації (°С/год). Залишковий ресурс до досягнення граничної температури T_{lim} :

$$RUL = (T_{lim} - T_{вих}(t)) / \beta \quad (22)$$

Більш точна модель враховує нелінійність деградації та вплив навантаження:

$$T_{вих}(t) = T_0 + \beta_1 \times P_e(t) + \beta_2 \times N(t) + \beta_3 \times t + \varepsilon(t) \quad (23)$$

де P_e – ефективна потужність; N – частота обертання; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти регресії; $\varepsilon(t)$ – залишок, що відображає деградацію. Систематичне зростання $\varepsilon(t)$ при постійних режимних параметрах вказує на погіршення технічного стану.

Температура мастила є додатковим діагностичним параметром, що відображає як тепловий стан двигуна, так і стан системи змащування:

$$T_{мастила,вих} = T_{мастила,вх} + P_{тертя} / (G_m \times c_m) \quad (24)$$

де $P_{тертя}$ – потужність тертя; G_m – витрата мастила; c_m – теплоємність мастила. Підвищення $T_{мастила,вих}$ може свідчити про: збільшення зазорів у підшипниках (зростання $P_{тертя}$); деградацію мастила (зміна c_m та в'язкості); несправність маслоохолоджувача [10].

Для комплексного моніторингу СЕУ пропонується інтегральний індекс теплового стану, що об'єднує показники всіх компонентів. Для кожного компоненту j обчислюється парціальний індекс здоров'я HI_j за формулою (2). Загальний індекс стану СЕУ:

$$HI_{CEU} = \sum_j w_j \times HI_j, \text{ де } \sum w_j = 1 \tag{25}$$

де w_j – ваговий коефіцієнт, що відображає критичність компоненту для безпеки та функціонування судна. Рекомендовані вагові коефіцієнти: головний двигун $w_{ГД} = 0,35$; допоміжні ДВЗ $w_{ДГ} = 0,25$; парові котли $w_{ПК} = 0,15$; головний генератор $w_{ГГ} = 0,15$; електродвигуни відповідальних механізмів $w_{ЕД} = 0,10$. Матриця рішень для обслуговування:

$$D(HI) = \{ \text{'нормальна експлуатація', якщо } HI > 0,7; \text{' посилений моніторинг', якщо } 0,4 < HI \leq 0,7; \text{' планування ТО', якщо } 0,2 < HI \leq 0,4; \text{' негайне ТО', якщо } HI \leq 0,2 \} \tag{26}$$

Швидкість деградації як діагностичний критерій:

$$dHI/dt < -\epsilon_{crit} \rightarrow \text{'аномальна деградація'} \tag{27}$$

де ϵ_{crit} – порогова швидкість зниження індексу здоров'я, що відрізняє нормальний знос від аномального. Для різних компонентів ϵ_{crit} визначається на основі статистичних даних експлуатації.

Провідні класифікаційні товариства мають специфічні програми та нотації для систем моніторингу стану суднового обладнання. Det Norske Veritas пропонує нотацію CBM (Condition Based Maintenance), що визначає вимоги до безперервного моніторингу визначених параметрів обладнання як основу для планування обслуговування замість фіксованих часових інтервалів [3]. Lloyd's Register розробив методологію ShipRight Machinery Planned Maintenance and Condition Monitoring (PMCM), що включає вимоги до кваліфікації персоналу, процедур збору даних та критеріїв прийняття рішень [17]. Bureau Veritas впроваджує систему Planned Maintenance Survey з опцією CBM, де діагностика базується на порогових значеннях параметрів, визначених виробником або міжнародними стандартами [18].

Таблиця 4

Порівняння вимог класифікаційних товариств до систем моніторингу

Критерій	DNV	Lloyd's Register	Bureau Veritas	ABS
Нотація/програма	CBM Notation	ShipRight PMCM	PMS + CBM option	Machinery CBM
Мін. параметри	Визначає власник за узгодженням	Вібрація + Т обов'язково	За порогоми виробника	За переліком критичних
Тепловий моніторинг	Частина CBM плану	Т обмоток, Т вихлопних газів	Т як один з параметрів	Т вихлопних газів обов.
Кваліфікація персоналу	Підготовка за програмою DNV	Сертифікація ISO 18436	Навчання від виробника	Програма підготовки
Цифровий двійник	DATE, Veracity	Digital Twin Ready	Smart Ship	ABSDA platform

Спільною тенденцією для всіх класифікаційних товариств є рух у напрямку цифровізації та впровадження концепції цифрового двійника (digital twin) суднових механізмів. Цифровий двійник інтегрує дані теплового моніторингу з фізичними моделями деградації, що дозволяє прогнозувати залишковий ресурс [4]. Стандарт ISO 13374 визначає архітектуру систем моніторингу стану, що включає шість рівнів: збір даних, обробка, оцінка стану, діагностика, прогнозування та підтримка прийняття рішень [13].

Впровадження інтегрованої системи теплового моніторингу СЕУ потребує вирішення низки практичних завдань. Вибір сенсорів температури визначається діапазоном вимірювань та умовами експлуатації: термопари типу К (Ni-Cr / Ni-Al) для діапазону $-40...+1260$ °С (вихлопні гази ДВЗ, димові гази котла); термопари типу J (Fe / Cu-Ni) для діапазону $-40...+750$ °С (стілки труб котла); терморезистори Pt100 для діапазону $-200...+850$ °С (обмотки електричних машин, мастило); термістори NTC для обмоток електродвигунів (захист від перегріву) [15].

Частота збору даних залежить від динаміки контрольованого процесу: для ТВГ ДВЗ – не менше 1 Гц (для тренд-аналізу достатньо 1 вимірювання за 10 хв); для температури обмоток генератора – 1 вимірювання за 1–5 хв; для параметрів котла – 1 вимірювання за 1–10 хв. Загальна кількість каналів теплового моніторингу для типового вантажного судна:

$$N_{каналів} = n_{цил} \times k_{ДВЗ} + n_{ГГ} \times k_{ГГ} + n_{ПК} \times k_{ПК} + n_{ЕД} \times k_{ЕД} \tag{28}$$

де n – кількість одиниць обладнання; k – кількість каналів на одиницю. Для судна з 6-циліндровим головним двигуном, 3 допоміжними 4-циліндровими ДГ, 1 паровим котлом та 4 електродвигунами відповідальних механізмів: $N = 6 \times 4 + 3 \times 4 \times 3 + 1 \times 5 + 4 \times 2 = 24 + 36 + 5 + 8 = 73$ канали. Вартість впровадження та окупність системи визначаються за формулою:

$$ROI = (C_TBM - C_CBM - C_система) / C_система \times 100 \% \quad (29)$$

де C_TBM – витрати на планове ТО за рік; C_CBM – витрати на ТО при CBM; $C_система$ – амортизовані витрати на систему моніторингу. За даними DNV, типова економія при впровадженні CBM становить 10–25 % витрат на ТО [3].

Аналіз сучасного стану досліджень визначає такі тенденції розвитку: впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу на основі теплових даних [5]; інтеграція теплового моніторингу з вібродіагностикою та трибодіагностикою в єдину мультипараметричну систему; розвиток концепції цифрового двійника CEУ, що поєднує фізичні моделі деградації з даними реального часу [4]; стандартизація протоколів обміну даними між суднами та береговими центрами відповідно до ISO 19847 та ISO 19848; впровадження бездротових IoT-сенсорів, що суттєво знижує вартість розгортання систем моніторингу [12]. Особливо перспективним є застосування нейронних мереж для автоматичної класифікації несправностей за тепловими сигнатурами [9], що дозволить перейти від CBM до повноцінного предиктивного обслуговування.

Висновки

Проведений комплексний аналіз методів теплового моніторингу основних компонентів суднової енергетичної установки підтвердив, що тепловий контроль є одним із найбільш інформативних та універсальних інструментів оцінки технічного стану суднового обладнання.

Систематизація діагностичних теплових параметрів для трьох основних типів обладнання CEУ виявила специфіку кожного з них: для парових котлів визначальними є температура димових газів на виході та ККД як інтегральний показник ефективності, причому підвищення температури димових газів на 20 °C свідчить про зниження ефективності теплопередачі приблизно на 1 %; для електричних машин критичне значення мають температура обмоток та опір ізоляції з урахуванням правила Арреніуса–Монтзингера, згідно з яким перевищення температури на 10 °C вдвічі скорочує ресурс ізоляції; для ДВЗ найбільшу діагностичну цінність має розподіл температури вихлопних газів по циліндрах та тренд-аналіз їх динаміки.

Розглянуті математичні моделі деградаційних процесів – модель асимптотичного забруднення для котлів, модель Арреніуса для теплового старіння ізоляції та лінійна регресійна модель тренду ТВГ для ДВЗ – формалізують зв'язок між тепловими параметрами і фактичним технічним станом обладнання, що створює основу для прогнозування залишкового ресурсу.

Порівняльний аналіз вимог провідних класифікаційних товариств – DNV, Lloyd's Register, Bureau Veritas та ABS – засвідчив спільну тенденцію до визнання обслуговування за станом (CBM) як повноцінної альтернативи плановому обслуговуванню. Водночас кожне товариство висуває специфічні вимоги щодо переліку контрольованих параметрів, кваліфікації персоналу та процедур документування, при цьому тепловий моніторинг визнається обов'язковою складовою CBM усіма розглянутими організаціями.

Запропонований інтегральний індекс теплового стану CEУ, який об'єднує парціальні індекси здоров'я окремих компонентів із ваговими коефіцієнтами за критичністю обладнання, разом із матрицею рішень на його основі забезпечує перехід від суб'єктивної оцінки стану обладнання до об'єктивного та документованого планування технічного обслуговування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів машинного навчання для автоматичної класифікації несправностей за тепловими сигнатурами, формування цифрових двійників CEУ, а також інтеграцію теплового моніторингу з іншими методами технічної діагностики – вібродіагностикою та трибодіагностикою – в єдину мультипараметричну систему оцінки технічного стану.

Список використаної літератури

1. EMSA. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023. Lisbon : European Maritime Safety Agency, 2024. 156 p.
2. ISM Code. International Safety Management Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code. London : International Maritime Organization, 2018. 42 p.
3. DNV. Rules for Classification: Ships. Part 7 Fleet in Service. Chapter 4 Survey Requirements for Machinery. Oslo : DNV, 2024. 86 p.
4. Wang H., Zheng Y., Yu Y. A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 304. Article 117836. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117836>.
5. Дубинець О. І., Гімпель Р. М., Бойко С. О., Маннапова О. В. Дослідження можливостей теплотехнічного контролю парового котла у складі суднової енергетичної установки на основі машинного навчання. *Водний транспорт*. 2022. № 2(36). С. 194–203.
6. Войченко Т. О., Гімпель Р. М., Шевченко А. П., Маннапова О. В. Моделювання та дослідження впливу відкладень на стан труб судових котельних установок. *Водний транспорт*. 2023. Вип. 2(38). С. 260–268.
7. EC 60085:2007. Electrical insulation – Thermal evaluation and designation. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2007. 14 p.

8. Штрибець В. В., Тришин В. В., Якусевич Ю. Г., Лісовський С. В. Модель і метод теплового розрахунку суднових синхронних генераторів при сушінні в умовах експлуатації судна. *Водний транспорт*. 2024. № 3, Вип. (41). С. 73–82.
9. Штрибець В. В., Трофименко А. О., Тришин В. В., Лісовський С. В. Метод діагностики несправностей у суднових електроенергетичних системах на основі вдосконаленої згорткової нейронної мережі. *Водний транспорт*. 2024. № 3, Вип. (41). С. 64–73.
10. Даки О. А., Штрибець В. В., Трофименко А. О., Ліганенко В. В., Тришин В. В. Методи контролю стану підшипників суднового валопроводу. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 1. С. 289–294.
11. Даки О. А., Войченко Т. О., Штрибець В. В., Маннапова О. В., Рященко О. І. Аналіз можливості застосування вейвлет-аналізу для ідентифікації пошкоджень підшипників валопроводу суднової енергетичної установки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 34(73), № 6. С. 225–231.
12. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофєєва З. Я., Тришин В. В. Деякі проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 1. С. 382–388.
13. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 32 p.
14. Bott T. R. *Fouling of Heat Exchangers*. Amsterdam : Elsevier, 1995. 524 p.
15. IEEE Std 43-2013. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. 36 p.
16. MAN Energy Solutions. MAN B&W Two-stroke Marine Engines: Emission Project Guide. 12th ed. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2023. 264 p.
17. Lloyd's Register. ShipRight: Procedure for Machinery Planned Maintenance and Condition Monitoring. London : Lloyd's Register Group, 2023. 28 p.
18. Bureau Veritas. Rules for the Classification of Steel Ships. Part C – Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection. Paris : Bureau Veritas, 2024. 412 p.
19. Mobley R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd ed. Amsterdam : Butterworth-Heinemann, 2002. 437 p.
20. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>.
21. Kobbacy K. A. H., Murthy D. N. P. *Complex System Maintenance Handbook*. London : Springer, 2008. 654 p.

References

1. EMSA (2024). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023*. Lisbon: European Maritime Safety Agency.
2. IMO (2018). *International Safety Management Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code*. London: International Maritime Organization.
3. DNV (2024). *Rules for Classification: Ships. Part 7 Fleet in Service. Chapter 4 Survey Requirements for Machinery*. Oslo: DNV.
4. Wang, H., Zheng, Y., & Yu, Y. (2024). A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective. *Ocean Engineering*, 304, 117836. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117836>
5. Dubynets, O. I., Himpel, R. M., Boiko, S. O., & Mannapova, O. V. (2022). Doslidzhennia mozhlyvosti teplotekhnichnoho kontroliu parovoho kotla u skladi sudnovoї enerhetychnoї ustanovky na osnovi mashynnoho navchannia [Research of possibilities of thermal control of a steam boiler in a marine power plant based on machine learning]. *Vodnyi transport*, 2(36), 194–203.
6. Voichenko, T. O., Himpel, R. M., Shevchenko, A. P., & Mannapova, O. V. (2023). Modeliuvannia ta doslidzhennia vplyvu vidkladen na stan trub sudnovykh kotelnykh ustanovok [Modelling and study of the effect of deposits on the condition of marine boiler tubes]. *Vodnyi transport*, 2(38), 260–268.
7. IEC 60085:2007. *Electrical insulation – Thermal evaluation and designation*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
8. Shtrybets, V. V., Tryshyn, V. V., Yakusevych, Yu. H., & Lisovskyi, S. V. (2024). Model i metod теплового розрахунку суднових синхронних генераторів при сушінні [Model and method of thermal calculation of marine synchronous generators during drying]. *Vodnyi transport*, 3(41), 73–82.
9. Shtrybets, V. V., Trofymenko, A. O., Tryshyn, V. V., & Lisovskyi, S. V. (2024). Metod diahnostryky nespravnosti u sudnovykh elektroenerhetychnykh systemakh na osnovi vdoskonalenoї zghortkovoї neironnoї merezhi [Fault diagnosis method in marine electrical power systems based on an improved CNN]. *Vodnyi transport*, 3(41), 64–73.

10. Daki, O. A., Shtrybets, V. V., Trofymenko, A. O., Lihanenko, V. V., & Tryshyn, V. V. (2022). Metody kontroliu stanu pidshypnykiv sudnovoho valoprovodu [Methods for monitoring the condition of marine shaftline bearings]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 33(72), 1, 289–294.
11. Daki, O. A., Voichenko, T. O., Shtrybets, V. V., Mannapova, O. V., & Riashchenko, O. I. (2023). Analiz mozhyvosti zastosuvannya veivlet-analizu dlia identyfikatsii poskodzhen pidshypnykiv valopryvodu [Analysis of the possibility of applying wavelet analysis for damage identification of shaftline bearings]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 34(73), 6, 225–231.
12. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., & Tryshyn, V. V. (2025). Deiaki problemy pidhotovky moriakiv na tli vprovadzhennia suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii na morskomu transporti [Some problems of seafarers training in the context of modern IT in maritime transport]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 382–388.
13. ISO 17359:2018. *Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization.
14. Bott, T. R. (1995). *Fouling of Heat Exchangers*. Amsterdam: Elsevier.
15. IEEE Std 43-2013. *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. New York: IEEE.
16. MAN Energy Solutions (2023). *MAN B&W Two-stroke Marine Engines: Emission Project Guide* (12th ed.). Copenhagen: MAN Energy Solutions.
17. Lloyd's Register (2023). *ShipRight: Procedure for Machinery Planned Maintenance and Condition Monitoring*. London: Lloyd's Register Group.
18. Bureau Veritas (2024). *Rules for the Classification of Steel Ships. Part C – Machinery, Electricity, Automation and Fire Protection*. Paris: Bureau Veritas.
19. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
20. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
21. Kobbacy, K. A. H., & Murthy, D. N. P. (2008). *Complex System Maintenance Handbook*. London: Springer.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026