УДК 621.436.001.5:629.12 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.4

С. В. БІГУН
аспірант кафедри експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0009-0007-6385-3296

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЗМАЩЕННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МАСТИЛ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ЛУЖНОСТІ

Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності та надійності систем автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння при використанні мастил із низьким рівнем лужності. Аналіз експлуатації існуючих систем імпульсного змащення, зокрема Alpha Lubricator виробництва MAN Energy Solutions, виявив низку критичних проблем при роботі з низьколужними мастилами. Серед них: підвищена частота відмов індуктивних датчиків зворотного зв'язку, недостатня живучість системи керування при виході з ладу окремих компонентів, а також труднощі з формуванням стабільної мастильної плівки через знижену в'язкість мастила при робочих температурах циліндрової втулки. Усе це призводить до зростання ризиків аварійних режимів, скорочення ресурсу циліндро-поршневої групи та зниження загальної готовності суднової енергетичної установки. Метою дослідження є розробка та експериментальна апробація адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила, яка реалізує два режими роботи та алгоритм прогнозуючого керування. Запропоновано метод адаптивного керування з автоматичним перемиканням режимів залежно від умов експлуатації та динамічною корекцією температури охолодження циліндрової втулки. Для забезпечення безперервності функціонування системи розроблено алгоритм резервування на основі статистичного аналізу попередніх циклів роботи, що дозволяє підтримувати точність дозування мастила на рівні ±8% навіть у випадку відмови індуктивних датчиків зворотного зв'язку. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність запропонованої системи. Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення надійності та живучості системи змащення, зменшення експлуатаційних ризиків і продовження ресурсу циліндро-поршневої групи суднових малооборотних двигунів. Отримані результати мають практичне значення для модернізації суднових енергетичних установок у контексті глобального переходу на екологічно чисті палива та сприяють підвищенню безпеки й економічності морських перевезень.

Ключові слова: *система змащення, циліндрове мастило, низька лужність, Alpha Lubricator, адаптивне керування, живучість системи, прогнозуюче керування, суднові двигуни, автоматизація.*

S. V. BIHUN
Postgraduate Student at the Department of Operation of Ship Electrical Equipment
and Automation
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0009-0007-6385-3296

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CYLINDER-PISTON GROUP LUBRICATION SYSTEM OF MARINE ENGINES WHEN USING OILS WITH LOW ALKALINITY CONTENT

The article addresses a pressing scientific and technical problem of improving the efficiency and reliability of automatic control systems for cylinder oil injection in low-speed marine diesel engines when operating with lubricants of low alkalinity. An analysis of the operation of existing pulse lubrication systems, in particular the Alpha Lubricator manufactured by MAN Energy Solutions, revealed a number of critical issues when using low-alkaline oils. These include: increased failure rates of inductive feedback sensors, insufficient resilience of the control system in the event of component malfunctions, and difficulties in forming a stable lubricating film due to reduced oil viscosity at the operating temperatures of the cylinder liner. All these factors lead to higher risks of emergency modes, reduced service life of the cylinder–piston assembly, and decreased overall availability of the ship's power plant.

The aim of the study is the development and experimental validation of an adaptive automatic control system for cylinder oil injection, implementing two operating modes and a predictive control algorithm. A method of adaptive control with automatic switching between modes depending on operating conditions and dynamic correction of cylinder liner

© С. В. Бігун, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

cooling temperature is proposed. To ensure continuous system operation, a redundancy algorithm based on statistical analysis of previous operating cycles has been developed, enabling oil dosing accuracy within ±8% even in the event of inductive sensor failures.

Experimental verification confirmed the effectiveness of the proposed system. The technical solution ensures increased reliability and resilience of the lubrication system, reduction of operational risks, and extension of the service life of the cylinder–piston assembly of low-speed marine engines. The obtained results have practical significance for the modernization of ship power plants in the context of the global transition to environmentally friendly fuels and contribute to enhancing the safety and cost-effectiveness of maritime transport.

Key words: *lubrication system, cylinder oil, low alkalinity, Alpha Lubricator, adaptive control, system resilience, predictive control, marine engines, automation.*

Постановка проблеми

У 2020 році Міжнародна морська організація (IMO) запровадила глобальне обмеження вмісту сірки в судновому паливі до 0,5% m/m, що стало радикальним зниженням порівняно з попереднім лімітом 3,5%. Це регуляторне рішення, спрямоване на зменшення викидів SOx та твердих частинок, суттєво змінило вимоги до систем змащення циліндро-поршневої групи малооборотних суднових двигунів.

Традиційно для нейтралізації кислотних продуктів згоряння високосірчистих палив застосовувалися мастила з високим лужним числом (BN 70–100 мг KOH/г). Використання низькосірчистих палив (<0,5% S) зробило надлишок лужних присадок небажаним, оскільки він спричиняє утворення лакових відкладень, полірування втулки та підвищений знос кілець. Це зумовило перехід на мастила з низьким BN (20–40 мг KOH/г).

Однак експлуатація LOW BN мастил виявила низку критичних недоліків існуючих систем автоматичного керування змащенням. За даними світового флоту 2020–2023 років, системи Alpha Lubricator демонструють зростання частоти відмов індуктивних датчиків зворотного зв'язку – з 1–2 до 8–12 випадків на місяць на циліндр.

Ще однією проблемою є формування стабільної мастильної плівки. В'язкість LOW BN мастил (22–26 сСт при 100 °C) є нижчою за HIGH BN (28–32 сСт), що при стандартній температурі втулки 180–185 °C зменшує товщину плівки з 3,2–3,8 до 2,4–3,0 мкм і створює ризик граничного змащення та задирів.

Первопричиною цих проблем є відсутність адаптації алгоритмів Alpha Lubricator до специфіки LOW BN мастил, зокрема їх температурної чутливості та особливостей процесу упорскування. Тому актуальним завданням є розробка адаптивної системи автоматичного керування, здатної забезпечити ефективну роботу двигунів на LOW BN мастилах при високій надійності та живучості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Адаптація систем змащення циліндро-поршневої групи (ЦПГ) до мастил із низьким лужним числом (LOW BN) є предметом активних досліджень останніх п'яти років. Умовно наукові роботи можна поділити на три напрями: вивчення трибологічних характеристик LOW BN мастил, удосконалення механічних компонентів систем змащення та розробку алгоритмів керування.

Комплексне дослідження [2] показало, що при зниженні вмісту сірки в паливі нижче 0,5% оптимальне лужне число мастила становить 25–40 мг KOH/г. Експерименти на двигуні MAN B&W 6S50MC підтвердили, що зниження температури втулки на 8–12 °C дозволяє компенсувати меншу в'язкість LOW BN мастил [7]. Також встановлено, що для таких мастил оптимальний тиск упорскування має бути на 5–10% вищим порівняно з HIGH BN [8].

Виробники двигунів запропонували низку рішень. Wärtsilä у системі RT-flex CLU-4 реалізувала концепцію «pulse jet» із вісьмома точками упорскування замість чотирьох [9]. MAN Energy Solutions у Service Letter SL2020-694 рекомендувала зниження базової витрати мастила з 1,0–1,2 до 0,8–1,0 г/кВт·год при переході на LOW BN [1]. Проте такі рішення потребують значних капіталовкладень і не усувають проблеми живучості систем керування.

Відомі також системи довготермінового моніторингу параметрів двигуна на основі веб-технологій [10] та інтелектуальні системи моніторингу енергоспоживання з елементами прогнозування [11]. Однак вони зосереджені на аналізі трендів, а не на активному керуванні процесом змащення.

Питання живучості систем при відмові датчиків досліджено в [12], де доведено ефективність методів аналітичного резервування. У працях [13, 14] розглянуто стандартизацію систем моніторингу суднового обладнання та запропоновано архітектуру з резервуванням критичних каналів вимірювання. Імітаційне моделювання [15] підтвердило, що ключовими параметрами оптимізації є температура втулки, тиск упорскування та закон зміни витрати залежно від навантаження. У роботі [16] запропоновано концепцію системи з двома режимами (LOW BN MODE та HIGH BN MODE) та багатокритеріальну оптимізацію з обмеженнями на знос втулки й витрату мастила.

Попри значну кількість досліджень, комплексного рішення досі немає. Воно має одночасно забезпечувати адаптацію параметрів керування до типу мастила, живучість системи при відмові датчиків, можливість модернізації без заміни механічних компонентів та підтвердження ефективності у реальних умовах експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розробка та експериментальна апробація адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння, яка забезпечує ефективну роботу при використанні мастил із низьким рівнем лужності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження виступає система автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння, зокрема Alpha Lubricator System 707X-40C виробництва MAN Energy Solutions.

Система змащення циліндро-поршневої групи реалізована у вигляді Alpha Lubricator 707X-40C, що працює за принципом імпульсного упорскування під високим тиском. Кожен циліндр обладнано двома лубрикаторами та чотирма точками впорскування, розташованими діаметрально протилежно на різних рівнях втулки. Форсунки встановлені на відстані 30 мм та 80 мм нижче верхньої мертвої точки, а тиск упорскування сягає 200 бар. Робочий діапазон витрати мастила становить 0.6–1.4 г/кВт·год на циліндр. Система оснащена акумуляторами високого та низького тиску, індуктивними датчиками зворотного зв'язку та керуючими блоками MCU і BCU з функцією автоматичного резервування.

Охолодження циліндрових втулок здійснюється у замкненому контурі прісноводної системи з номінальною температурою води на вході 36 °C та на виході 50–55 °C. Температурний режим регулюється термостатичним клапаном у діапазоні 40–60 °C, а контроль здійснюється за допомогою датчиків, розташованих у чотирьох зонах втулки. Система керування двигуном належить до типу ME-C, що передбачає електронне управління, використання системи Common Rail для паливоподачі та електрогідравлічний привід випускних клапанів. Вона інтегрована у суднову мережу через протокол Modbus TCP/IP та оснащена діагностичним комплексом MAN PrimeServ Diagnostic із можливістю віддаленого доступу.

На рис. 1 представлено структурну схему розробленої модернізованої адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила, яка реалізує трирівневу ієрархічну архітектуру з інтеграцією елементів інтелектуального керування на основі нечіткої логіки.

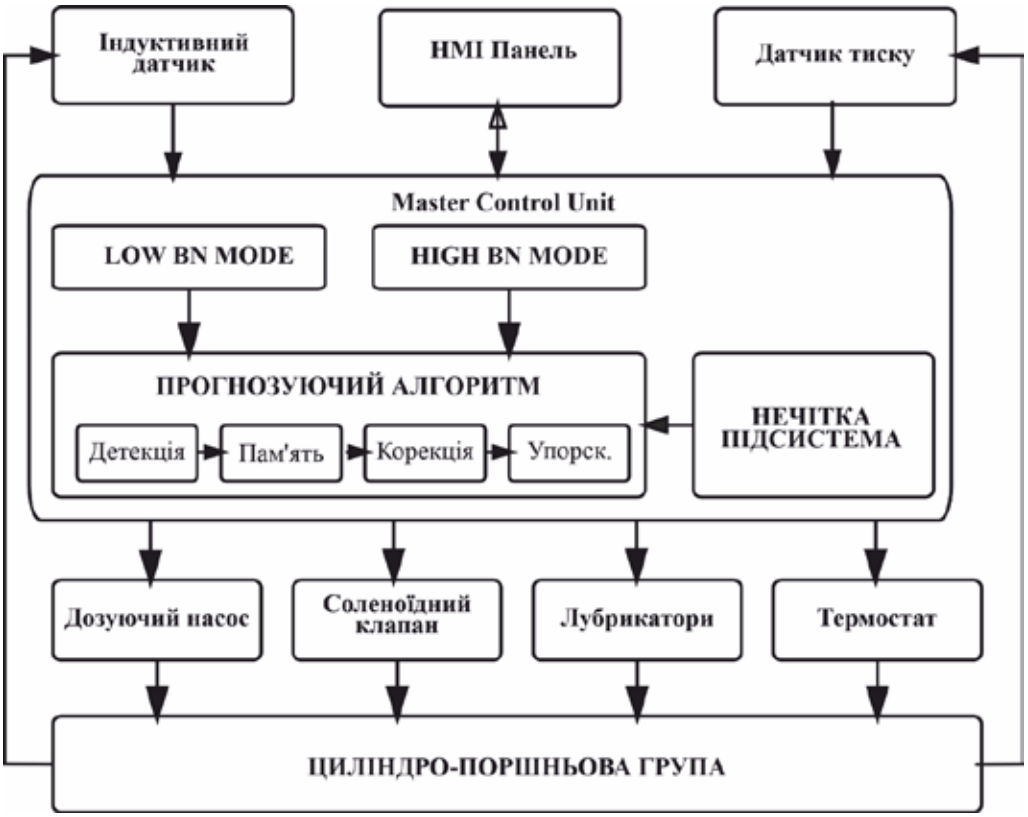

Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила

Запропонована система побудована за принципом функціональної декомпозиції з виділенням трьох незалежних, але взаємопов'язаних рівнів: апаратного, автоматичного керування та інтелектуального керування. Така архітектура забезпечує модульність системи, що дозволяє проводити поетапну модернізацію існуючих установок Alpha Lubricator без необхідності повної заміни обладнання, а також спрощує діагностику та усунення несправностей завдяки чіткому розподілу функцій між рівнями.

Апаратний рівень складається з трьох основних компонентів вимірювальної та інтерфейсної апаратури. Датчики Balluff BES 516-326-E4-C-S49 призначені для верифікації факту спрацювання лубрикаторів шляхом індуктивної детекції переміщення штока виконавчого механізму.

HMI панель Siemens SIMATIC KTP700 Basic забезпечує інтерфейс оператора для введення параметрів мастила, моніторингу поточного стану системи, перегляду активних та історичних тривог, а також ручного перемикання між режимами роботи.

Датчик тиску WIKA S-20 (діапазон 0-250 бар) є додатковим елементом, відсутнім в базовій конфігурації Alpha Lubricator. Його інтеграція дозволяє реалізувати функцію аналітичного резервування, коли при відмові датчика тиск може бути оцінений розрахунковим шляхом на основі виміряної витрати мастила, температури та кількості активних лубрикаторів, що підвищує живучість системи.

Центральним елементом системи керування є MCU (Master Control Unit), в запропонованій системі його функціональність розширена шляхом впровадження двох режимів роботи, що адаптують параметри керування до типу використовуваного мастила:

– Режим LOW BN MODE автоматично активується при введенні оператором через HMI панель значення лужного числа мастила BN < 50 мг KOH/г.

– Режим HIGH BN MODE активується при BN ≥ 50 мг KOH/г і використовує стандартні параметри керування, рекомендовані виробником для високолужних мастил.

Третій рівень керування активується лише у випадку відмови датчика зворотного зв’язку. Замість переходу системи в режим обмеженої функціональності або зупинки, запускається прогнозуючий алгоритм, що дозволяє продовжити роботу без підтвердження факту упорскування. Алгоритм складається з чотирьох етапів: детекція відмови за трьома пропущеними циклами (3–5 с), активація буфера пам’яті з даними останніх 100 циклів, розрахунок середнього часу спрацювання t_{av}g, корекція цього часу на поточні умови (температура, тиск, навантаження) та генерація команди на упорскування з точністю ±8%.

Ключовою інновацією є інтеграція нечіткої підсистеми, яка оцінює коефіцієнти корекції ktemp, kpress та kload на основі нечіткої логіки. Вхідними параметрами є відхилення температури мастила, тиску та навантаження двигуна. Використання нечіткої логіки дозволяє врахувати невизначеність і нелінійні ефекти при екстремальних умовах, що підвищує гнучкість системи.

Команди від рівня керування передаються до виконавчих механізмів: дозуючого насоса змінного об’єму, який створює тиск до 200 бар і синхронізується з обертанням колінчастого валу; соленоїдного клапана, що швидко розподіляє потік мастила (час спрацювання 10–15 мс); лубрикаторів, які впорскують мастило через форсунки у втулку; та термостатичного клапана, що регулює температуру охолоджуючої води. При активації LOW BN MODE температура втулки знижується на 10–11 °C протягом 1,5–2 годин.

Об’єктом керування є циліндро-поршнева група двигуна MAN B&W 6S50ME-C9.5 із шістьма циліндрами діаметром 500 мм та потужністю 9,480 кВт. Всі виконавчі механізми формують замкнений контур керування завдяки трьом каналам зворотного зв’язку: від лубрикаторів, до HMI панелі та до датчика тиску. Це забезпечує MCU актуальною інформацією про стан системи та дозволяє своєчасно коригувати роботу.

Представлена трирівнева архітектура має низку переваг порівняно з традиційними одно- чи дворівневими системами. Модульна організація дозволяє модернізувати окремі рівні незалежно, чітке розділення функцій спрощує діагностику, а використання нечіткої логіки забезпечує адаптивність до непередбачених умов експлуатації. Це особливо важливо для суднових установок, які працюють у складних умовах із обмеженими можливостями технічного обслуговування під час рейсу. Результати статистичного аналізу сигналів тривоги системи змащення наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Статистика сигналів тривоги системи Alpha Lubricator за етапами випробувань

Тип сигналу тривоги	Етап 1 (HIGH BN, базова)	Етап 2 (LOW BN, базова)	Етап 3 (LOW BN, модерніз.)	Покращення, %
Feedback Sensor Failure (ALR 1-24)	4	23	3	87.0
Oil Pressure Low (ALR 39)	2	8	2	75.0
Oil Temperature High (ALR 38)	1	12	2	83.3
Speed Deviation Alarm (ALR 40)	3	5	3	40.0
BCU Takeover Events	0	6	1	83.3
Загальна кількість	10	54	11	79.6

Як видно з таблиці, після впровадження модернізованої системи загальна кількість сигналів тривоги знизилася на 79,6%, що підтверджує ефективність запропонованих технічних рішень у забезпеченні надійності системи змащення при використанні мастил із низьким рівнем лужності.

Окрім кількісних показників, було зафіксовано суттєве покращення часу реагування системи на критичні ситуації. На основі даних про всі зареєстровані відмови та час їх усунення протягом трьох етапів випробувань розраховано інтегральні показники надійності системи (табл. 2).

Таблиця 2

Показники надійності системи автоматичного керування

Показник	Базова система	Модернізована система	Покращення
Середній час між критичними відмовами, що вимагають втручання (MTBF), годин	320	1850	×5,8
Середній час відновлення після відмови (MTTR), годин	4,5	0,4	×11,3
Коефіцієнт готовності MTBF / (MTBF + MTTR)	0,946	0,993	+5,0%
Стійкість до одиночних відмов	Ні	Так	–
Стійкість до подвійних відмов	Ні	Частково	–

Збільшення MTBF у 5,8 разів (з 320 до 1850 годин) є найбільш значущим показником підвищення надійності. Це означає, що якщо в базовій системі критична відмова, що вимагає зупинки двигуна або втручання персоналу, відбувалася в середньому кожні 13 днів роботи, то в модернізованій системі інтервал між такими подіями збільшився до 77 днів, тобто приблизно 2,5 місяці безперервної роботи.

Висновки

У проведеному дослідженні розроблено та експериментально апробовано адаптивну систему автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила для суднових малооборотних двигунів внутрішнього згоряння. Запропоноване рішення забезпечує стабільну роботу при використанні мастил із низьким рівнем лужності (BN 20–40), зберігаючи високі показники надійності та живучості. Система реалізує метод адаптивного керування з автоматичним перемиканням режимів (LOW BN MODE / HIGH BN MODE), що включає динамічну корекцію температури охолодження циліндрової втулки. Зниження температури на 10 °C у режимі LOW BN MODE сприяє підвищенню в'язкості мастила на 18–22% та формуванню мастильної плівки товщиною 3,5–4,2 мкм, що є співставним із показниками режиму HIGH BN.

Важливим елементом системи став алгоритм прогнозуючого керування, побудований на статистичному аналізі попередніх ста циклів роботи. Він забезпечує безперервність функціонування навіть у випадку відмови індуктивних датчиків зворотного зв'язку, підтримуючи точність дозування мастила в межах ±8%. Це підвищує живучість системи при одночасній відмові до двох компонентів. Експериментальні дослідження підтвердили суттєве зростання показників надійності: кількість сигналів тривоги зменшено майже на 80%, середній час між відмовами збільшено у 5,8 раза, а коефіцієнт готовності підвищено з 94,6% до 99,3%.

Морські випробування тривалістю 2 840 годин показали, що знос циліндрової втулки при роботі на мастилах із низьким BN становить 0,027 мм/1000 год, що відповідає показникам експлуатації на традиційних високолужних мастилах і водночас є на 41% кращим порівняно з базовою системою на LOW BN. Економічний ефект від впровадження системи полягає у зниженні витрат на циліндрове мастило на 28,3% (з 3 680 до 2 640 USD/1000 год для двигуна потужністю 9 480 кВт), при одночасному збереженні технічного стану циліндро-поршневої групи та скороченні кількості незапланованих зупинок із 8,5 до 0,5 год/1000 год роботи.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система є ефективним інструментом підвищення надійності та економічності суднових енергетичних установок у контексті глобального переходу на екологічно чисті палива. Подальші дослідження доцільно спрямувати на випробування системи на двигунах інших типів (Wärtsilä RT-flex, Winterthur X-series), вивчення довготривалого впливу на ресурс циліндро-поршневої групи (12 000–20 000 годин роботи), застосування методів машинного навчання та нечіткої логіки для інтелектуалізації алгоритмів керування, а також інтеграцію системи у концепцію «цифрового двійника» суднового двигуна для прогнозної діагностики.

Список використаної літератури

1. Cylinder lubrication update for 0 to 0.50% sulphur fuels: Service Letter SL2019-671/JUSV. Copenhagen: MAN Energy Solutions, 2019. 7 p.

2. Cylinder and System Oils MAN B&W Low-Speed Two-Stroke Engines: Service Letter SL2020-694/JUSV. Copenhagen: MAN Energy Solutions, 2020. 12 p.

3. Guidelines for Diesel Engine Lubrication – Impact of Low Sulphur Fuel on Lubrication of Marine Engines: CIMAC Recommendation No. 26 / CIMAC Working Group «Marine Lubricants». [S. l.]: CIMAC, 2014. 43 p.

4. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. Journal of Marine Science and Application. 2020. Vol. 19. P. 473–484. DOI: 10.1007/s11804-020-00156-0.

5. Marine engine lubrication after 2020: White Paper / Alfa Laval. 2018. 12 p. URL: https://www.alfalaval.com.

6. Base Number (BN) Technical Bulletin / Chevron Marine Products. 2020. 8 p. URL: https://www.chevronmarineproducts.com.

7. Бігун С. В., Сіманенков А. Л., Лебеденко Ю. О. Імітаційна модель системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. Одеса: НУ «ОМА», 2023. Вип. 48. С. 78–92.

8. Бігун С. В., Сіманенков А. Л., Лебеденко Ю. О. Задача оптимального керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТО-2024): матеріали 15-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Херсон: ХДМА, 2024. С. 93–94.

9. RT-flex Low-Speed Engines: Cylinder Lubrication System Description: Technical Documentation / Wärtsilä Corporation. [S. l.], 2021. 45 p.

10. Design and experimental development of a new electronically controlled cylinder lubrication system for low-speed marine diesel engines / Z. He et al. International Journal of Engine Research. 2019. Vol. 20, iss. 10. P. 1029–1041. DOI: 10.1177/1468087419833072.

11. Rules for Classification of Ships. Part 4, Chapter 2: Propulsion, power generation and auxiliary systems / DNV GL. [S. l.]: DNV GL, 2020. 156 p.

12. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система діагностики та моніторингу гібридного суднового турбокомпресора з нечіткою моделлю / Ю. О. Лебеденко та ін. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2025. Т. 1, № 30. С. 45–58. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044.

13. Sun Z., Shen Z., Li X. Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. Journal of Central South University (Science and Technology). 2018. Vol. 49, iss. 3. P. 600–605. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012.

14. Guidelines for Diesel Engines Lubrication Oil Degradation: CIMAC Recommendation No. 22 / CIMAC Working Group. [S. l.]: CIMAC, 2004. 68 p.

15. Alpha Lubricator System Operation Manual MC Engines: Document No. 707X-40C. Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2008. 72 p.

References

1. MAN Energy Solutions. (2019). Cylinder lubrication update for 0 to 0.50% sulphur fuels (Service Letter SL2019-671/JUSV).

2. MAN Energy Solutions. (2020). Cylinder and system oils MAN B&W low-speed two-stroke engines (Service Letter SL2020-694/JUSV).

3. CIMAC Working Group "Marine Lubricants". (2014). Guidelines for diesel engine lubrication – Impact of low sulphur fuel on lubrication of marine engines (CIMAC Recommendation No. 26). CIMAC.

4. Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2020). Optimization of the performance of marine diesel engines to minimize the formation of SOx emissions. Journal of Marine Science and Application, 19, 473–484. https://doi.org/10.1007/s11804-020-00156-0

5. Alfa Laval. (2018, November). Marine engine lubrication after 2020 [White paper]. https://www.alfalaval.com

6. Chevron Marine Products. (2020). Base Number (BN) technical bulletin. https://www.chevronmarineproducts.com

7. Bihun, S. V., Simanenkov, A. L., & Lebedenko, Yu. O. (2023). Imitatsiina model systemy keruvannia protsesom uporskuvannia tsylindrovoho mastyla sudnovykh dvyhuniv. Sudnovi enerhetychni ustanovky, 48, 78–92.

8. Bihun, S. V., Simanenkov, A. L., & Lebedenko, Yu. O. (2024). Zadacha optymalnoho keruvannia protsesom uporskuvannia tsylindrovoho mastyla sudnovykh dvyhuniv. Materialy 15-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia” (SEUTTO-2024) (pp. 93–94). KhDMA.

9. Wärtsilä Corporation. (2021). RT-flex low-speed engines: Cylinder lubrication system description [Technical Documentation].

10. He, Z., Guan, W., Lv, Y., et al. (2019). Design and experimental development of a new electronically controlled cylinder lubrication system for low-speed marine diesel engines. International Journal of Engine Research, 20(10), 1029–1041. https://doi.org/10.1177/1468087419833072

11. DNV GL. (2020). Rules for classification of ships: Part 4, Chapter 2: Propulsion, power generation and auxiliary systems.

12. Lebedenko, Yu. O., Tymofieiev, K. V., Voronenko, S. V., & Bihun, S. V. (2025). Intelektualna informatsiino-vymiriuvalna systema diahnostyky ta monitorynhu hibrydnoho sudnovoho turbokompresora z nechytkoiu modeliu. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii, 1(30), 45–58. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044

13. Sun, Z., Shen, Z., & Li, X. (2018). Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. Journal of Central South University (Science and Technology), 49(3), 600–605. https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012

14. CIMAC Working Group. (2004). Guidelines for diesel engines lubrication oil degradation (CIMAC Recommendation No. 22). CIMAC.

15. MAN Diesel & Turbo. (2008). Alpha lubricator system operation manual MC engines (Document No. 707X-40C).

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025