

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 531.43, 681.5

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288180

© Худяков І.В.¹, Грицук І.В.², Погорлецький Д.С.³, Черненко В.В.⁴,
Поліщук О.В.⁵**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАТЧИКА КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАЛІЗА У
МАСЛІ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА**

В статті розглядаються особливості загальної проблеми надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів, а саме, питання тертя, змащувальній дії, зношування поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях. Запропоновано підхід до підвищення надійності суднового дизеля, що вимагає розробки ефективних розрахункових методів і моделей для прогнозування довговічності й зносостійкості матеріалів деталей у вузлах тертя при граничній змащенні в широкому діапазоні зміни умов експлуатації й з урахуванням змінних режимів роботи суднового ДВЗ. В статті розглядається загальний підхід і саме особливості побудови складових діагностичної системи суднового ДВЗ. На основі обраного обсягу завдань, розв'язуваних системою діагностування, визначено послідовність функціонування її елементів. Розроблено алгоритм діагностування, за допомогою якого здійснюється процес індивідуального прогнозування й коректування періодичності технічних впливів на механізм. Впровадження даного алгоритму може дати значний ефект при комплексному використанні діагностичної інформації спільно зі статистичною інформацією, збереженої індивідуально по кожному механізмі, при керуванні його технічним станом. На основі запропонованої діагностичної моделі можна здійснювати розпізнавання технічного стану судових ДВЗ по даним трибомоніторингу, виявляючи зміну умов тертя й збільшення швидкості зношування деталей циліндро-поршневої групи. Це дозволить почати попереджувачі коригувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових двигунів.

Ключові слова: суднова енергетична установка, двигун, датчик, система змащення, прогнозування, моніторинг, діагностування, інформаційний елемент.

I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletsky, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk. Use of iron in oil concentration sensor for continuous monitoring of marine diesel engine technical condition. The article examines the features of the general problem of reliability, accuracy and durability of machines, mechanisms and devices, namely, the issue of friction, lubricating action, wear of the surfaces of parts and working bodies, which exist among themselves in very complex correlational dependencies. An approach to increasing the reliability of a ship's diesel engine is proposed, which requires the development of effective calculation methods and models for predicting the durability and wear resistance

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-8900-7879, khudiakov.ihor@ksma.ks.ua

² д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskiyi.dmytro@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

⁵ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон

of materials of parts in friction nodes at the limit of lubrication in a wide range of changes in operating conditions and taking into account the variable modes of operation of a ship's diesel engine. The article considers the general approach and specific features of the construction of the components of the diagnostic system of the ship's internal combustion engine. Based on the selected volume of tasks solved by the diagnostic system, the sequence of functioning of its elements is determined. The implementation of this algorithm can have a significant effect in the complex use of diagnostic information together with statistical information stored individually for each mechanism, when managing its technical condition. On the basis of the proposed diagnostic model, it is possible to recognize the technical condition of marine diesel engines based on tribomonitoring data, detecting changes in friction conditions and an increase in the rate of wear of parts of the cylinder-piston group. This will enable the initiation of preventive corrective actions aimed at ensuring the reliable and safe operation of marine engines.

Key words: ship power plant, engine, sensor, lubrication system, forecasting, monitoring, diagnostics, information element.

Постановка проблеми. У загальній проблемі надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів основне місце належить питанням тертя, змащувальній дії, зношуванню поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях.

Дослідження показали, що для більшості деталей і вузлів суднової енергетичної установки (СЕУ) відсутня яка-небудь кореляція між їхньою надійністю й частотою профілактичного обслуговування [1]. Це пов'язане з тим, що відсутні надійні методи й засоби, що дозволяють надійно й вчасно проводити моніторинг стану вузлів СЕУ. Крім цього, виконується велика кількість робіт з демонтажу й розбиранню цілком справних механізмів, що приводить до значних економічних витрат і в ряді випадків приводить до відмов, які виникають при розбираннях, і окремих сполучених деталей вузлів тертя.

СЕУ повинна забезпечити безпеку плавання, надійність роботи у всіх можливих умовах експлуатації, у тому числі при тривалому диференті 5° і крені 15° , бортовій і кільовій хитавиці судна з амплітудою до 10° . Механізми і пристрої повинні бути, по можливості, прості та зручні в експлуатації, обслуговуванні, ремонті і повинні задовольняти вимогам Правил Регістра по конструктивним і експлуатаційним властивостям. Висока надійність в роботі суднової енергетичної установки при великому моторесурсі характеризується: безвідмовністю двигуна та обслуговуючих його механізмів; тривалістю ефективної безперервної роботи з гарантованою відсутністю відмов і вимушеного ремонту; частотою виведення установки з експлуатації на профілактику та ремонт; ефективністю використання потужності головного двигуна; тривалістю експлуатаційного періоду; витратами на профілактику та ремонт. Головний двигун з точки зору надійності займає особливе положення, оскільки його безвідмовна робота має вирішальне значення для безпеки плавання. Тому будь-які заходи, що підвищують надійність двигуна, незалежно від витрат є виправданими [2].

З розвитком науково-технічного прогресу необхідно проводити складніші розрахунки сил опору у важконавантажуваних, автоматичних і особливо точних вузлах тертя і забезпечувати їх антифрикційність в експлуатаційних умовах [2, 3]. У багатьох галузях промисловості виникла необхідність створення спеціальних фрикційних пристроїв і гальмівних систем, для чого потрібно керувати процесами зовнішнього тертя, знати і використовувати його закони. Наука про тертя відстає від потреб практики і в наш час не може дати відповіді на багато важливих питань у реальному масштабі. Сучасний стан теорії зовнішнього тертя не дозволяє конструктору проводити необхідні розрахунки сил тертя в машинах, які проєктують.

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні нових матеріалів (композиційні сплави, полімерні матеріали, тверді мастила), однак спеціалісти не мають необхідної інформації про зовнішнє тертя і зношування в машинах і механізмах, яка потрібна для їх розроблення і застосування.

Одним із актуальних завдань сучасного машинобудування є раціональне застосування мастил, що в багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин. Складні умови експлуатації сучасних машин різко підвищили вимоги до змащувальних матеріалів.

Працездатність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) порушується внаслідок фізичного зношування, через більш-менш тривалий термін служби. Найпоширенішою причиною виходу деталей машин з ладу є не поломка, а зношування циліндрових втулок (ЦВ) і ушкодження їх робочих поверхонь [2-4].

Для практики дизелебудування й експлуатації важливо знати ресурси окремих деталей як для цілей удосконалювання машини, так і для розробки основних контурів технічної експлуатації. В експлуатації ж ці відомості необхідні для планування технічного обслуговування й ремонту машин (ТО й Р).

Ресурс деталей судових дизелів можна визначити по параметрах їх зношування (лінійне зношування, інтенсивність або швидкість зношування).

Граничним значенням зношування є те значення, якому відповідає: початок різкого зростання інтенсивності зношування; гранично припустиме зниження міцності деталі, що зношується, внаслідок зміни розмірів, що виходить за межі припустимих значень; вплив зношування деталі трибосполучення на працездатність інших деталей; відмова машини.

Забезпечення високої надійності судового дизеля вимагає розробки ефективних розрахункових методів і моделей для прогнозування довговічності й зносостійкості матеріалів деталей у вузлах тертя при граничній змащенні в широкому діапазоні зміни умов експлуатації й з урахуванням змінних режимів роботи ДВЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з найбільш ефективних методів оцінки технічного стану деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) судових дизелів є трибомоніторинг по параметрах відпрацьованого циліндрового масла (ВЦМ) [5, 6]. Розробка наукової методології інтерпретації отриманих у результаті трибомоніторингу даних дозволяє вчасно почати попереджувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових ДВЗ.

Кількість ВЦМ, що стікає в підпоршневі порожнини, виявиться трохи меншою, чим було подано свіжого масла на дзеркало ЦВ. Це обумовлено тим, що частина циліндрового масла витрачається на вигар за рахунок насосної дії поршневих кілець і його випару із дзеркала ЦВ при знаходженні у високотемпературній зоні [6]. Кількість масла, що губиться, у судових умовах досить легко визначається як різниця між масою масла, що пішла з видаткової цистерни на змащення ЦВ, і масою масла, що надійшло у танк ВЦМ за той самий проміжок часу. Як правило, для дизелів, що перебувають у гарному технічному стані й працюючих на режимах, близьких до тривалої експлуатаційної потужності (характерно для морських транспортних судів), втрати масла на вигар не перевищують 5...8% [5, 6]. Таким чином, отримані з експериментальних даних значення коефіцієнта вигару коливаються в дуже вузькому діапазоні і їх величина дорівнює 0,92...0,95.

До різних механізмів повинні застосовуватися різні форми й методи ТО й Р або їх комбінації, що дозволяють вирішувати завдання максимальної безвідмовності технічних засобів або мінімальних економічних витрат на технічну експлуатацію (ТЕ). В роботі [2, 7-9] був зроблений аналіз технічної документації механізмів СЕУ з метою дослідження можливості впровадження засобів технічного діагностування вузлів тертя, що працюють із рідким мастилом.

Аналіз статистичних даних відмов судових механізмів [4] показує, що основною причиною відмов як нових, так і відремонтованих, механізмів є зношування вузлів тертя, що перевищує припустимі значення. Згідно цим даним зношування пар тертя становить від 70 до 90% усієї кількості факторів, що впливають на втрату механізмом його функціональних властивостей. У зв'язку із цим очевидно, що застосування методів технічного діагностування вузлів тертя механізмів по вмісту продуктів зношування (ПЗ) в маслі дозволить виключити близько 70% передбачених план-графіком ТЕ контрольних розкриттів і оглядів механізмів, що дасть можливість одержати істотний економічний ефект від скорочення витрат на запасні частини й підвищення надійності механізмів.

Слід також зазначити, щодо механізмів, що входять у систему ТЕ, повинні застосовуватися різні норми й методи ТЕ або їх комбінація залежно від відповідальності даних механізмів. Ці форми й методи повинні дозволяти вирішувати завдання максимальної безвідмовності роботи або мінімальних економічних витрат.

Метою дослідження є підвищення ефективності використання головного двигуна шляхом модернізації циркуляційної системи мащення [1-10].

Виклад основного матеріалу. Сучасні форми організації технічного обслуговування й ремонту з використанням засобів технічної діагностики вимагають подальшого вдосконалення методів керування технічним станом механізмів на базі діагностичної інформації [9-12]. Розв'язок цієї проблеми включає наступні завдання:

- удосконалювання поточної технічної експлуатації механізмів з використанням засобів технічної діагностики;
- удосконалювання технічних процесів ТО й Р;
- удосконалювання системи планування робіт з ТО й Р на основі діагностичної інформації.

Основним продуктом зношування в ВЦМ є *Fe*. Його надходження в ВЦМ, як відзначалося раніше, викликане зношуванням ЦВ, поршневих кілець і кепів головки поршня. Для постійного моніторингу технічного стану цих елементів авторами статті рекомендується використання датчика зношування вузлів тертя редукторів з картерної системою змащення, який необхідно встановлювати безпосередньо в масляній ванні.

Датчики повинні бути встановлені в інформативних крапках систем змащення механізмів, тобто в місцях, де концентрація параметра, що діагностується, (ДП) найбільша. Тому при монтажі датчиків необхідно враховувати розташування трубопроводу й швидкість потоку в ньому.

У результаті проведених випробувань різних макетів датчиків був обраний датчик з такими конструктивними елементами:

- магнітний сердечник;
- чутливий елемент;
- елемент підстроювання до вимірювальної схеми блоку.

Випробування датчиків зношування показали гарну працездатність датчиків із чутливими елементами у вигляді індуктивної котушки з однієї обмоткою, магнітний сердечник яких виконаний у вигляді дво полюсного постійного магніту циліндричної форми, ескізи обраних датчиків двох типорозмірів наведені на рис. 1 [6].

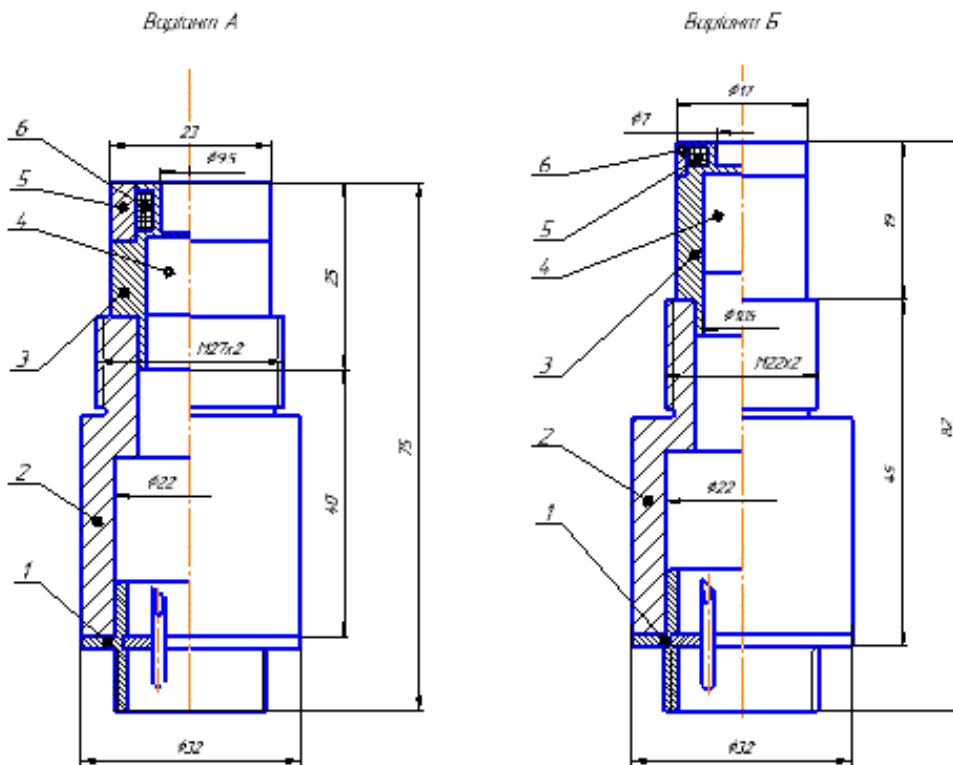


Рис. 1 – Датчики виміру концентрації заліза у маслі

Усі ці елементи розташовуються в корпусі, який повинен бути виконаний з немагнітного матеріалу й забезпечувати надійне кріплення датчика в настановному отворі механізму. Корпус

може бути виготовлений з полімерних матеріалів (текстоліт, гетинакс і ін.) або з металу (латунь, немагнітна сталь, бронза й ін.).

При виборі матеріалу магнітного сердечника повинні бути враховані наступні вимоги:

- матеріал магніту повинен при малому обсязі мати високе значення коерцетивної сили по намагніченості й стійкості до впливу полів, що розмагнічують;
- стабільність параметрів магнітного поля й невисока вартість.

Таким вимогам задовольняють постійні магніти з інтерметалевого з'єднання $SmCO_5$, у яких об'ємна щільність енергії магнітного поля досягає $W > 100$ кДж/м³.

Складність аналітичного вибору оптимальної конструкції чутливого елемента виходить з вимог максимальної чутливості, максимального діапазону вимірів, стабільності показань при коливаннях температури масла, його фізико-хімічних властивостей, вібрації.

На рис. 2 запропонована схема розташування датчика виміру продуктів зношування у маслі.

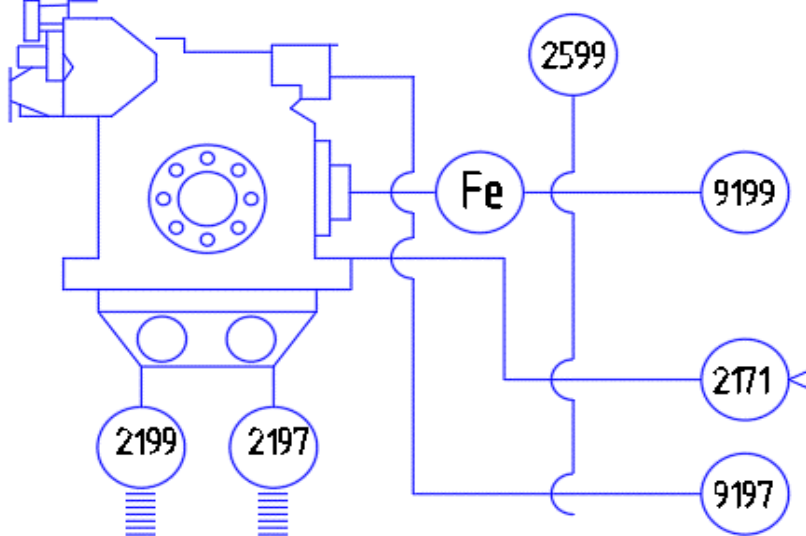


Рис. 2 – Схема розташування датчика виміру концентрації заліза у маслі

Проведені дослідження датчика й реєструючого блоку показали наступне:

Датчики дозволяють контролювати зміст і вступ ПЗ в маслі за масою осаду на ньому.

Розроблена конструкція датчиків дозволяє одержувати інформацію про кількість ПЗ, що надходять у змащення в умовах експлуатації реального механізму.

Вимірювальна схема працездатна в реальних умовах експлуатації й має високу чутливість до змісту ПЗ на датчиках (0,025 мг).

На основі обраного обсягу завдань, розв'язуваних системою діагностування, можна визначити послідовність функціонування її елементів, яка в загальному виді представлена на рис. 3.

У комплексній системі технічного обслуговування й ремонту (ТО й Р) встановлено чотири категорії технічного стану елементів суднових технічних засобів і відповідні їм межі параметрів технічного стану:

- 1 категорія – гарний технічний стан (проведення ТО й Р не потрібно);
- 2 категорія – задовільний (припустимий) технічний стан, який характеризується появою ознак можливого початку розвитку ушкоджень;
- 3 категорія – незадовільно, що характеризується появою ознак ушкоджень (потрібне проведення ТО й Р);
- 4 категорія – аварійний стан – відмова (потрібна негайна зупинка механізму).

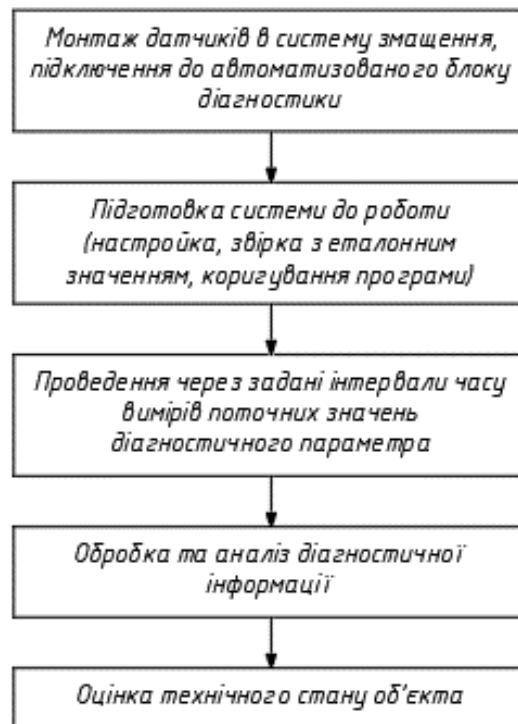


Рис. 3 – Алгоритм функціонування системи діагностування

Алгоритм діагностування при цьому в загальному виді може бути представлений як показано на рис. 4.

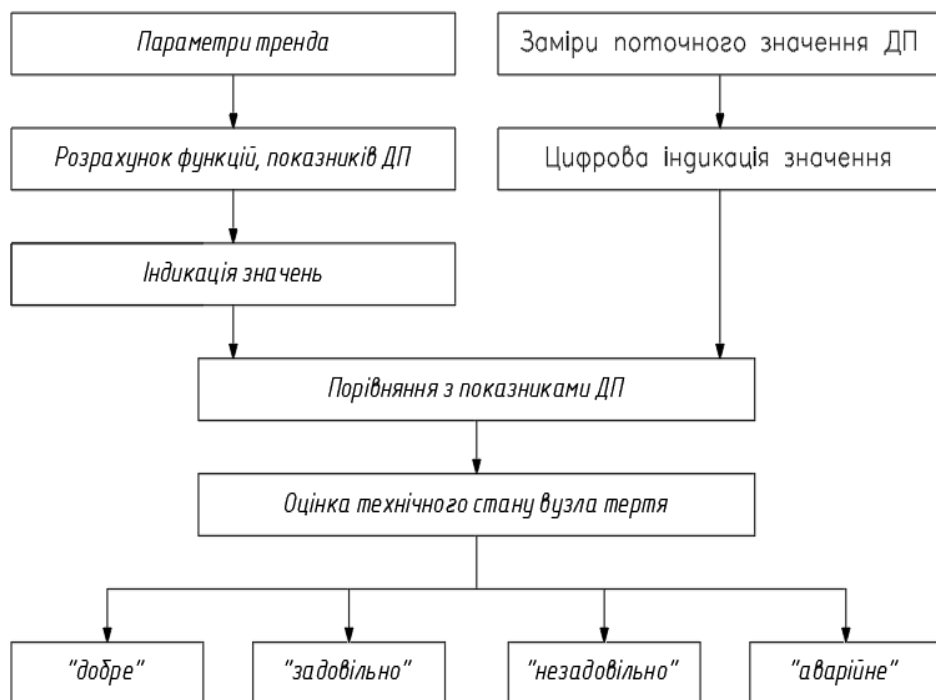


Рис. 4 – Алгоритм діагностування, що реалізує завдання обробки інформації

Таким чином, здійснюється процес індивідуального прогнозування й коректування періодичності технічних впливів на механізм.

Впровадження даного алгоритму може дати значний ефект при комплексному використанні діагностичної інформації спільно зі статистичною інформацією, збереженої індивідуально по кожному механізму, при керуванні його технічним станом.

Зміна схеми ТО й Р конкретного механізму полягає в переході від обслуговування за регламентом до обслуговування за станом на основі розв'язку трьох завдань:

- визначення ефективності заміни схеми ТО й Р за регламентом схемою по стану, яка полягає у величині економії працезатрат;
- розробка оптимальних строків планових вимірів діагностичних параметрів;
- розробка алгоритмів коректування періодичності проведення ТО й Р за результатами діагностування.

Висновки

Система мащення двигуна є найбільш відповідальною системою у складі двигуна на судні. Тому підтримання її в справному стані є однією з найважливіших задач. За результатами проекту було запропоновано дооснастити систему мащення датчиком концентрації заліза у маслі для безперервного моніторингу цього показника. Це дозволить ввести новий алгоритм подачі мастила, знизити зношування поверхонь тертя [9, 10].

Обрана послідовність роботи системи є підставою для розробки методики й алгоритму діагностування, завданням яких є аналіз зміни поточних значень ДП шляхом порівняння їх з еталонними залежностями.

Можна констатувати, що на основі запропонованої діагностичної моделі є можливість здійснювати розпізнавання технічного стану судових ДВЗ по даним трибомоніторинга, виявляючи зміну умов тертя й збільшення швидкості зношування деталей ЦПГ. Це дозволить почати попереджуючі коригувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових двигуна. Треба зауважити, що безперервне коригування алгоритму подачі мастила можливо тільки з установленим автономним насосом.

Перелік використаних джерел:

1. Говорущенко Н.Я., Варфоломій В.М. Технічна кібернетика транспорту: навчальний посібник. Харків: ХДАДТУ, 2001. 271 с.
2. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
3. Використання інтелектуальних інформаційних технологій позиціонування для контролю теплових параметрів системи комбінованого прогріву ДВЗ транспортного засобу / В.П. Матейчик, В.П. Волков, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2012. № 3(62). С. 136-141.
4. Кадильникова Т.М. Моніторинг технологічного стану як фактор забезпечення безаварійної роботи. *Вісник Донбаської академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва*. 2002. № 5(36). С. 38-41.
5. Худяков І.В. Можливість застосування різних видів датчиків тиску для управління робочим процесом в ДВЗ. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХДМА, 2014. № 1(10). С. 255-262.
6. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія / В.П. Волков та ін. Харків: Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
7. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator / I. Gritsuk, Y. Gutarevych, V. Mateichuk, V. Volkov. *SAE Technical Paper*. 2016. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
8. Матейчик В.П. Системний підхід до аналізу структурних схем енергоустановок транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2002. № 7, т. 2. С. 162-167.
9. Худяков І.В., Амелін М.Ю., Рудакова Г.В. Підвищення ефективності експлуатації судових дизельних енергетичних установок. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХДМА, 2016. № 2(15). С. 152-157.

10. Худяков І.В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 67. С. 141-148. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>.
11. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, D. Shybaiev, I. Gritsuk, V. Boyko, N. Shybaieva, A. Golovan, V. Zaharchuk, E. Rabinovich, V. Savchuk, E. Zenkin. *SAE Technical Paper*. 2018. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
12. Evaluation of the Powertrain Condition Based on the Car Acceleration and Coasting Data / E. Rabinovich, I.V. Gritsuk, V. Zuiev, E. Zenkin, A. Golovan, Y. Zybtssev, V. Volkov, J. Gerlici, K. Kravchenko, O. Volska, N. Rudnichenko. *SAE Technical Paper*. 2018. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1771>.

References:

1. Govorushchenko N.Ia., Varfolomiiv V.M. *Technical cybernetics of transport: a study guide*. Kharkiv, KhDADTU Publ., 2001. 271 p. (Ukr.)
2. Zakalov O.V., Zakalov I.O. *Basics of friction and wear in machines: a study guide*. Ternopil, Publishing house of TNTU named after I. Pulyuya, 2011. 322 p. (Ukr.)
3. Mateychik V.P., Volkov V.P., Komov P.B., Komov A.B., Gritsuk I.V. Use of intelligent information technology position control system combined heat settings warm ice vehicle. *The Journal of ZSTU / Engineering*, 2012, № 3(62), pp. 136-141. (Ukr.)
4. Kadil'nikova T.M. Monitoring of the technological state as a factor in ensuring trouble-free operation. *Bulletin of the Donbas Academy of Construction and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction*, 2002, № 5(36), pp. 38-41. (Ukr.)
5. Khudiakov I.V. The possibility of applying different types of pressductors for workflow management in ICE. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2014, № 1(10), pp. 255-262. (Ukr.)
6. Volkov V.P., Mateichyk V.P., Komov P.B. *Intelligent transport monitoring systems: monograph*. Kharkiv, NTMT Publ., 2015. 246 p. (Ukr.)
7. Gritsuk I., Gutarevych Y., Mateichyk V., Volkov V. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator. *SAE Technical Paper*, 2016, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
8. Mateichik V.P. A systematic approach to the analysis of structural schemes of vehicle power plants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, 2002, № 7, vol. 2, pp. 162-167. (Ukr.)
9. Khudiakov I.V., Amelin M.Iu., Rudakova G.V. Increasing the operational efficiency of ship diesel power plants. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2016, № 2(15), pp. 152-157. (Ukr.)
10. Khudiakov I.V. Monitoring information system database models vehicle technical parameters. *Scientific Notes*, 2019, vol. 67, pp. 141-148. doi: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>. (Ukr.)
11. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Shybaiev D., Gritsuk I., Boyko V., Shybaieva N., Golovan A., Zaharchuk V., Rabinovich E., Savchuk V., Zenkin E. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine. *SAE Technical Paper*, 2018, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
12. Rabinovich E., Gritsuk I.V., Zuiev V., Zenkin E., Golovan A., Zybtssev Y., Volkov V., Gerlici J., Kravchenko K., Volska O., Rudnichenko N. Evaluation of the Powertrain Condition Based on the Car Acceleration and Coasting Data. *SAE Technical Paper*, 2018, pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1771>.

Рецензент: Є.В. Білоусов
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 05.05.2023
Стаття прийнята 13.06.2023