

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Слободянюк Микола Васильович



УДК 621.431.74

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВПРИСКУ ПАЛИВА
СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі суднових енергетичних установок в Національному університеті «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Половинка Едуард Михайлович,
Національний університет «Одеська морська академія»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри суднових енергетичних установок

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимошевський Борис Георгійович,
Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова Міністерства освіти і науки України, завідувач
кафедри двигунів внутрішнього згоряння

доктор технічних наук, професор
Грицук Ігор Валерійович,
Херсонська державна морська академія Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри експлуатації суднових
енергетичних установок

Захист дисертації відбудеться 06.05.2021 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 у Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 1, зала засідань Вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 2 та за електронною адресою: <http://onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Автореферат розіслано 05.04.2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зміни технологій у процесі виробництва суднових дизельних двигунів вказують на необхідність подальшого підвищення надійності і працездатності як самих двигунів так і окремих вузлів.

В процесі створення суднових дизелів увага науковців була спрямована на економічні показники, потім на надійність тощо.

Суднові дизельні двигуни більшу частину експлуатаційного часу працюють зі стабільними навантаженнями. Різкі зміни режиму негативно впливають на роботу дизельного двигуна і, в першу чергу, паливної системи.

З огляду на необхідність контролю за роботою паливної системи актуальною стає проблема забезпечення надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднового дизельного двигуна на науково-методологічному технологічному та конструктивному рівнях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тема дисертаційного дослідження пов'язана з реалізацією основних положень і вирішенню основних задач, передбачених Транспортною стратегією України, Закону України щодо «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» (№ 430-р від 30.05.2018 р.) і плану виконання науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська морська академія» за темою «Підвищення ефективності робочих процесів суднових енергетичних установок на базі сучасних технічних інформаційних технологій» ДР № 0116U002390, де автор дисертації підготував окремий розділ: «Процес вприску палива у судновому середньообертovому дизелі на змінних режимах».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є збереження надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднового дизеля.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що надійність і працездатність елементів високого тиску паливної системи визначаються перепадами на кожному з них тиску робочої речовини на всіх режимах роботи дизеля.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає в розробці способу та алгоритму контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи дизеля.

Для виконання головного завдання дисертаційного дослідження вирішити допоміжні завдання:

1. Визначити гідродинамічні характеристики в паливній системі високого тиску при роботі дизельного двигуна на змінних режимах.

2. Розробити математичну модель механічних процесів в паливній системі високого тиску регресійним методом.

3. Здійснити імітаційне моделювання характеристик подачі палива у судновому ДВЗ.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є функціонування паливної системи суднового дизельного двигуна внутрішнього згорання, який працює на змінних режимах.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є процес биття в паливній апаратурі високого тиску суднового дизельного двигуна.

Методи дослідження. Для пошуку рішень поставлених завдань у дисертаційному дослідженні були використані наступні методи:

– дедукції (інформаційного пошуку основних напрямів підвищення ефективності технічної працездатності паливної апаратури високого тиску суднового дизельного двигуна);

– експертного оцінювання (для визначення теми дисертаційної роботи);

– системного аналізу (при визначенні мети і завдань дослідження, а також при розробці технологічної карти дослідження);

– статистичної обробки експериментальних даних (при оцінці похибок вимірювань регресійних рівнянь процесів паливоподачі системи високого тиску суднового дизельного двигуна);

– фізичного моделювання (при розробці комплексу керування паливною системою високого тиску суднового дизельного двигуна на експериментальному стенді);

– імітаційне моделювання (при побудові моделі характеристик подачі палива у судновому ДВЗ);

– динамічного програмування (при розв'язанні задачі шляхом її розбиття на декілька однакових підзадач, рекурентно пов'язаних між собою).

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні процесу контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи дизеля у робочому діапазоні частоти обертів.

Наукові рішення, що визначають новизну отриманих результатів, полягають у наступному:

вперше:

– запропонована методика ймовірності (регресивної) побудови характеристик системи паливоподачі судових дизелів за результатами експериментальних випробувань паливного насоса високого тиску, ділянки трубопроводу та форсунки паливної системи дизеля;

удосконалено:

– математичну модель механічних процесів у паливній системі високого тиску регресивним методом з додаванням компонентів перехідних процесів у паливній апаратурі;

– методику побудови характеристик паливної системи високого тиску судових дизельних двигунів на динамічних режимах шляхом експериментальних випробувань з отриманням швидкісної та навантажувальної характеристик;

набули подальший розвиток:

– методика дослідження паливних систем високого тиску суднових дизельних двигунів.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що основні положення, висновки та результати дисертаційної роботи доведені до рівня конкретних методик і рекомендацій, адаптованих для використання у практичній діяльності щодо оцінки впливу паливної системи високого тиску на робочі процеси дизельного двигуна. При цьому:

1. Проведена модернізація експериментального стенду дала можливість виконати дослідження щодо регулювання паливної апаратури високого тиску дизелів. В результаті теоретико-експериментальних досліджень одержані характеристики процесу подачі палива при плавному регулюванні частоти обертів та керування переміщенням рейки паливного насоса високого тиску з тривалою безперервною реєстрацією. (Патент на корисну модель №132260 Україна, МПК F02M 65/00).

2. Спираючись на теоретико-експериментальні дані, одержаної математичної моделі, при проектуванні суднових установок додані компоненти перехідних процесів паливної апаратури силових агрегатів суднових комплексів. Аналіз витрати палива на мильо шляху при оптимальному керуванні порівняно з відповідним постійним керуванням показав, що має місце економія близько 5%. (Акт впровадження від 28.05.2020 р. Державного підприємства Науково-дослідного проектно-конструкторського інституту).

3. Розділ 4 «Імітаційне моделювання та дослідження характеристик подачі палива при роботі дизельного двигуна на змінних режимах» увійшов складовою частиною у заключний звіт науково-дослідної роботи в НУ «ОМА». (Акт використання дисертаційної роботи від 07.02.2021 р. НУ «ОМА»).

4. Результати дисертаційного дослідження були апробовані впродовж 2018-2019 н.р. шляхом внесення змін до навчального методичного комплексу навчальних дисциплін кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил НУ«ОМА» та кафедри суднових енергетичних установок судномеханічного факультету НУ«ОМА». (Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальному процесі від 26.03.2020 р. Інститут Військово-Морських Сил НУ«ОМА», Акт використання результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі від 05.05.2020 р. НУ«ОМА»).

Особистий внесок здобувача. Здобувач самостійно виконав дисертаційну роботу: він виявив важливі аспекти вирішення завдань сучасних теорій надійності паливних систем високого тиску суднових дизельних двигунів та детально проаналізував їх, провів інформаційний пошук у цьому напрямку та обґрунтував методологічне забезпечення дисертаційного дослідження, розробив методики побудови процесу

управління пропульсивним комплексом судна, характеристику системи оцінки подачі палива суднових дизельних двигунів.

В дисертації з 19 наукових праць, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті положення, які належать автору особисто: шляхи дослідження процесу вприску при компактній зміні частоти обертання [1]; запропонована технологія проведення експериментального дослідження паливної апаратури [2]; обґрунтована задача оптимізації витрат палива в умовах динаміки суднового комплексу та стану водної поверхні [5]; запропонована методика контролю руху суднового комплексу на нестационарних режимах з максимальною середньою швидкістю і мінімальною витратою палива на одиницю шляху [6]; описано практичну складову експериментального дослідження швидкісних характеристик системи подачі палива суднового дизельного двигуна за різних початкових умов [7]; визначені та досліджені фактори, які впливають на процес подачі палива під час зміни режимів [8]; описані та досліджені гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску дизельного двигуна на змінних режимах [9].

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення роботи та окремі її розділи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-технічних конференціях: Науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: Експлуатація і ремонт» (Одеса, 2016); Науково-технічній конференції «Річковий та морський флот: Експлуатація і ремонт», (Одеса, 2017); 8-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2017», (Одеса, 2017); Науково-технічній конференції «Річковий та морський флот: Експлуатація і ремонт», (Одеса, 2018); Міжнародній науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: Експлуатація і ремонт», (Одеса, 2019); Науково-технічній конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», (Одеса, 2020); XXV Міжнародному конгресі двигунобудування, (Харків, 2020); Міжнародній конференції математичного моделювання МКММ-2020, (Херсон, 2020); I Міжнародній науково-практичній конференції «An integrated approach to science modernization, methods, models and multidisciplinary», (Вінниця, 2021).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, з яких 6 – у наукових фахових виданнях України (що входять до переліку наукових фахових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук); 3 – наукові статті, опубліковані у наукових виданнях України, які внесені до наукометричних баз; 1 – наукова стаття, опублікована в іншому іноземному виданні; 8 – у збірниках за матеріалами міжнародних конференцій і 1 охоронний документ: патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 204 сторінок комп'ютерного тексту, із них 181 сторінок основного тексту дисертації, 49 рисунків, 36 таблиць, список використаної літератури нараховує 109 найменувань на 13 сторінках, 3 додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі визначено актуальність теми дисертації, сформовані мета і завдання дослідження, відображена наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, наведена інформація щодо апробації результатів та публікації, структура та обсяг дисертації.

У першому розділі «Технології наукових досліджень паливних систем високого тиску суднових дизелів» охарактеризовано процес роботи паливної системи високого тиску судового дизельного двигуна на перехідних режимах, виконано дослідження впливу паливної системи на процес роботи судового дизельного двигуна, досліджено стан та надано оцінку сучасних теорій паливних систем судових дизельних двигунів працюючих на змінних режимах.

Встановлено, що під час експлуатації судових дизельних двигунів залишаються не вирішеними проблеми щодо отримання інформації стосовно технічного стану елементів паливної системи високого тиску. Зазвичай під час експлуатації елементів високого тиску паливної системи надійність контролюють за визначеним виробником експлуатаційним ресурсом та за непрямими показниками, що вказують на марне витрачання пального або проведення невчасних замін елементів високого тиску паливної системи судового дизеля.

За результатами інформаційного огляду публікацій та наукових робіт досліджено дійсний стан щодо оцінки сучасних теорій паливних систем високого тиску судових дизелів. Проблеми надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи судових двигунів не знайшли свого відображення повною мірою. Тому необхідність подальшого дослідження характеристик елементів високого тиску паливної системи судового дизеля у сталому режимі при дії вимушених коливань обумовило актуальність науково-прикладної задачі.

У другому розділі «Мета, завдання та технологія наукового дослідження» обґрунтовано тему дослідження, мету та завдання дослідження, викладено загальну технологію дисертаційного дослідження.

Актуальність підвищення надійності та визначення працездатності елементів високого тиску паливної системи судового дизеля, шляхом контролю перепадів тиску робочої речовини на кожному з них та на всіх режимах роботи, викликана необхідністю впровадження технологічних та конструктивних рішень призначених для судових дизелів.

Передбачувана наукова новизна полягає створенні процесу контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи дизеля у робочому діапазоні частоти обертів. Це відповідає реалізації основних засад Транспортної стратегії України, Закону України щодо «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» (№ 430-р від 30.05.2018 р.), паспорту спеціальності 05.05.03, профілю наукової школи кафедри суднових енергетичних установок, а також науково-дослідній роботі НУ «ОМА» (НДР «Підвищення ефективності робочих процесів суднових енергетичних установок на базі сучасних технічних інформаційних технологій» ДР № 0116U002390).

За допомогою методу системного аналізу та загальних методів наукового пізнання була розроблена технологічна схема дослідження. Здійснено постановку мети дослідження та висунута робоча гіпотеза. Сформовані головне та допоміжні завдання. Визначено об'єкт дослідження і предмет дослідження.

На основі технологічної карти розроблена загальна методика дослідження. Здійснено вибір методів дослідження та його обґрунтування. Принципова схема дослідної установки представлена на рис. 1.

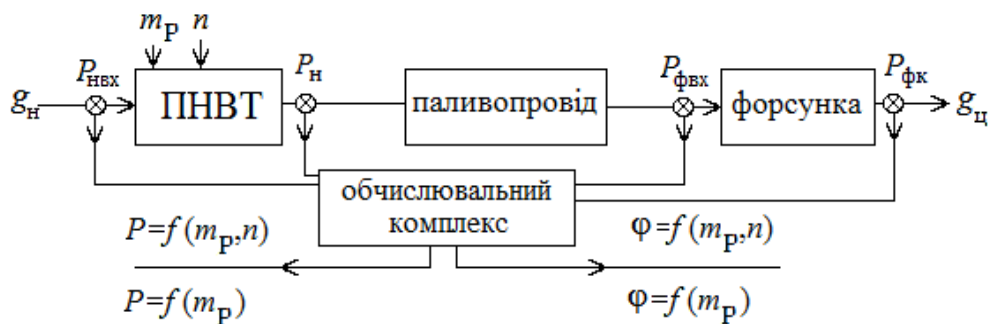


Рис. 1. Принципова схема дослідної установки

У третьому розділі «Параметри паливної системи високого тиску при роботі дизельного двигуна на змінних режимах» описано складові математичної моделі механічних процесів у паливній системі високого тиску, сформовано рівняння паливної системи суднового дизеля з урахуванням перехідних процесів.

Досліджена математична модель динаміки суднового комплексу, яка була доповнена компонентами, що враховують перехідні процеси у паливній апаратурі та забезпечують рух судна з максимальною середньою швидкістю та мінімальною витратою палива на одиницю шляху.

Процес експлуатації суднового дизеля залежить від оптимального керування його паливною системою високого тиску. Аналіз способів керування систем подачі палива показав, що основна увага приділяється не тільки підвищенню тиску впрыску палива, але і можливостям адаптаційного регулювання процесів подачі палива для отримання необхідних значень

циклової подачі, кута випередження вприску та закону подачі під час змінних режимів у роботі пропульсивного комплексу.

Для прийнятої математичної моделі використано диференціальні рівняння руху суднового комплексу у безрозмірному вигляді в нестационарних умовах, які мають вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{N}{A} \left[\overline{M}_g^0(\omega) - \overline{M}_c^0(\omega, \nu, \varphi, t) \right],$$

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{1}{A} \left[\overline{P}^0(\omega, \nu, \varphi, t) - R^0(\nu) \right],$$

граничні умови $\omega(0) = 1, \nu(0) = 1,$

де ω, ν – відносна кутова швидкість ведучої ланки та відносна поступальна швидкість веденої ланки (суднового комплексу); A, N, t – безрозмірні динамічні параметри та відносний час; P, R, M_g, M_c – відносні величини.

Важливою характеристикою, яка оцінює економічність роботи енергетичної системи, є відносна витрата палива, яким для суднового комплексу є паливо на одиницю шляху:

$$C^0 = \frac{M_g(\omega)\omega M_c(\omega)}{\nu}. \quad (1)$$

При отриманих оптимальних керуваннях паливною системою, що забезпечує мінімальну витрату палива на мильо шляху судна за заданою середньою швидкістю його руху $\nu_1 < \nu_{\max}$, величина економії у відносній витраті палива може досягати 5%. Розгляд керування виду (2) показали, що економія у витраті палива при керуванні за законом (1) мало відрізняється від економії у витраті палива при керуванні за законом (2) та теж досягає до 5%. Однак закон керування виду (2) більш простий у реалізації:

$$u(t) = a + b \cdot C_2(t). \quad (2)$$

Отримані співвідношення при моделюванні та оптимальне керування силовими агрегатами суднових комплексів дозволили методом динамічного програмування виконати аналіз витрат палива на одиницю шляху, при оптимальному керуванні порівняно з відповідним постійним керуванням. Рішення показало залежність стану суднового комплексу від збурень водного середовища при оптимальному та постійному керуванні. Це, у свою чергу, сприятиме оцінці надійності та працездатності паливної системи суднового дизеля, що отримало підтвердження у виконанні досліджень на експериментальному стенді.

У четвертому розділі «Імітаційне моделювання та дослідження характеристик подачі палива при роботі дизельного двигуна на змінних режимах» надано опис складових експериментального стенду, результати імітаційного моделювання характеристик подачі палива, проведені на експериментальному стенді та досліджені перехідні процеси у паливній

апаратурі ДВЗ при зміні обертів двигуна від мінімально до максимально стійких.

Склад експериментального стенду складається з елементів високого тиску паливної системи дизеля 6ЧН25/34, а саме паливної форсунки закритого типу, трубопроводу, паливного насоса високого тиску золотникового типу на базі електроприводу постійного струму з розробленим багатоканальним програмно-апаратним комплексом та комплексом керування рейкою ПНВТ.

Багатоканальний програмно-апаратний комплекс призначено для вимірювання тиску у системі подачі палива в різних точках експериментальної установки з використанням непрямого методу вимірювання при розбалансуванні резистивної мостової схеми.

Комплекс керування рейкою ПНВТ призначено для керування переміщенням рейки у довільні положення, також задається тривалість перебування в цих положеннях відповідно до програми випробувань. Він орієнтований на роботу у складі експериментального стенду для випробувань елементів високого тиску паливної системи суднового дизельного двигуна.

В результаті проведення експериментальних досліджень отримано характеристики параметрів подачі палива на навантажувальному та швидкісному режимах (рис. 2, 3).

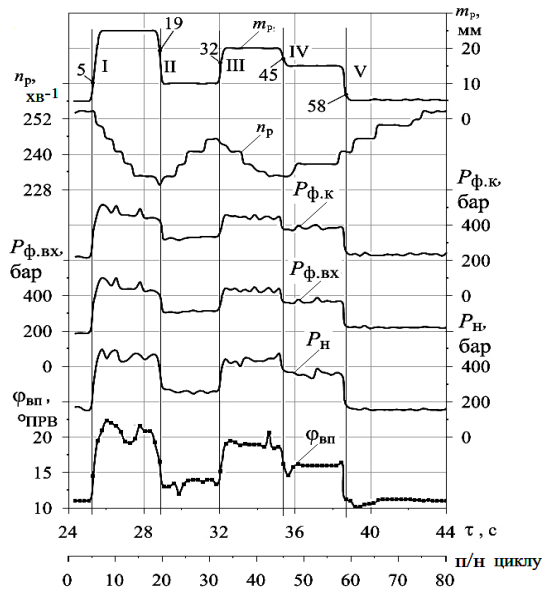


Рис. 2. Параметри подачі палива на режимах навантажувальної характеристики під час динамічних випробувань:

I – $m_p = 5\text{--}25$ мм; II – $25\text{--}10$ мм; III – $10\text{--}20$ мм; IV – $20\text{--}15$ мм; V – $15\text{--}05$ мм; 5, 19, 32, 45, 58 – номери циклів під час переміщення рейки

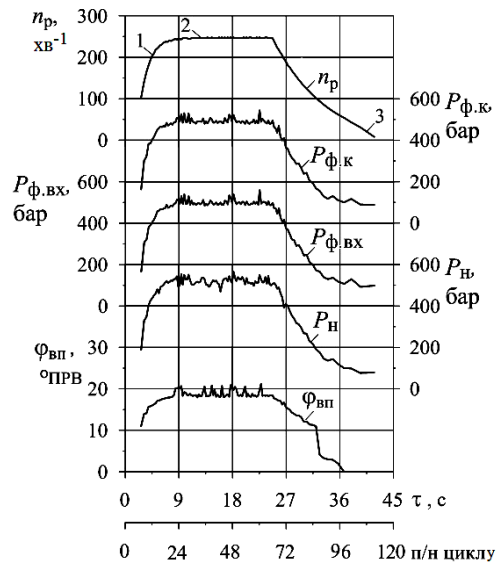


Рис. 3. Параметри подачі палива на режимах швидкісної характеристики під час динамічних випробувань:

1 – ділянка розгону; 2 – ділянка встановленого режиму; 3 – ділянка вибігання

Характеристику переміщення рейки ПНВТ під час моделювання перехідного процесу надано у табл. 1.

Характеристика переміщення рейки ПНВТ

Ділянка і положення рейки	Пройдена відстань рейкою, мм	Час переміщення рейки, с	Швидкість рейки, мм/с	Номер циклу в кінці переміщення рейки
I – 5–25	20	0,44	45,49	5
II – 25–10	15	0,309	48,54	19
III – 10–20	10	0,2259	44,27	32
IV – 20–15	5	0,1085	46,08	45
V – 15–05	10	0,2264	44,17	58

Осцилограми послідовних циклів подачі палива на ділянках навантажувальної характеристики показано на рис. 4, а, б.

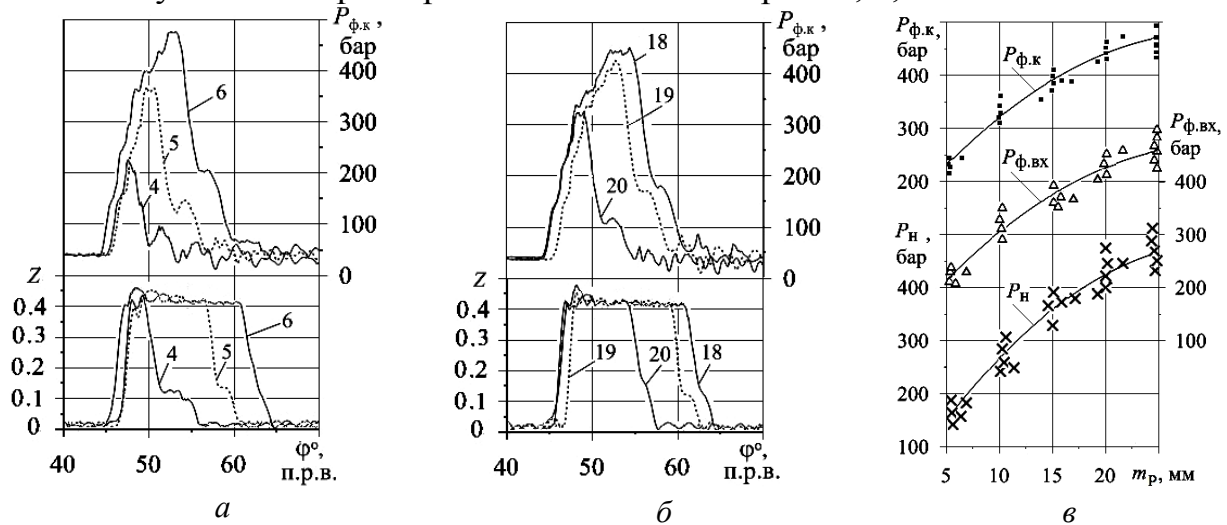


Рис. 4. Поєднані осцилограми подачі палива на ділянках навантажувальної характеристики: - - - цикли 5, 19 – рух рейки; – цикли 4, 6, 18, 20 – рейка стабільна; а – I ділянка, $m_p = 5 - 25$ мм; б – II ділянка, $m_p = 25 - 10$ мм; в – залежність параметрів подачі палива від положення рейки паливного насоса високого тиску – навантажувальна динамічна характеристика

Графічне відображення навантажувальної характеристики подачі палива від положення рейки ПНВТ під час динамічних випробувань показано на (рис. 4, в). Візуальний аналіз розподілу досвідчених точок рис. 4, в свідчить про коректне подання існуючих залежностей апроксимуючими кривими. Результати імітаційного моделювання характеристик подачі палива суднового ДВЗ дозволили дійти висновку, що дослідження на експериментальному стенді сумісні з параметрами, які надані в експлуатаційній документації дизельного двигуна 6ЧН25/34 (на що вказує частота обертання, тиск та інші параметри), визначені методичні засади та практичні рекомендації щодо оцінки впливу паливної системи високого тиску на робочі процеси дизельного двигуна. Реалізоване рівняння виду $u(t) = a + b \cdot C_2(t)$ забезпечує економію витрати палива до 5%.

Отримані регресійні рівняння перехідних процесів у паливній апаратурі ДВЗ при зміні частоти обертів двигуна в діапазоні від мінімально до максимально стійких були оброблені за допомогою математичного

апарата Статистика. Аналіз гідродинамічних процесів дозволив визначити вид регресійних моделей та отримати математичні рівняння процесів у паливній системі високого тиску для навантажувальної та швидкісної характеристик суднового дизельного двигуна.

Для швидкісної характеристики залежності мають вигляд: залежності кута впрыску від швидкості обертання розподільного валу $\varphi_{\text{вп}} = f(n_p)$; залежності тиску в штуцері паливного насоса від швидкості обертання розподільного валу $p_n = f(n_p)$; залежності тиску в паливному каналі форсунки від швидкості обертання розподільного валу $p_{\text{фк}} = f(n_p)$.

Початок і кінець вибірки даних на мінімальних обертах обмежений величиною близько 100 об/хв через неоднозначність визначення кута впрыску за менших обертів з дробовим впрыском.

Процес побудови рівнянь проведений за методикою, що складається з наступних етапів: попередня специфікація моделі; побудова рівняння; аналіз та оцінка отриманого рівняння; оцінка складових рівняння. Рівняння залежності кута впрыску у вигляді простої регресії має вигляд:

$$\varphi_{\text{вп}} = 5,84418 + 0,050926n_p.$$

Результати розрахунків статистичних характеристик за даним рівнянням надані у табл. 2, 3, 4.

Статистичні характеристики залежності $\varphi_{\text{вп}} = f(n_p)$

Таблиця 2

Одномірні критерії значущості для $\varphi_{\text{вп}}$					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	69,477	1	69,477	875,02	0,00
n_p , об/хв	203,14	1	203,14	2558,4	0,00
Помилка	3,0172	38	0,0794	–	–

Таблиця 3

Оцінки параметрів				
Ефект	$\varphi_{\text{вп}}$ параметри	$\varphi_{\text{вп}}$ ст. пом.	$\varphi_{\text{вп}}$ t	$\varphi_{\text{вп}}$ p
Вільний член	5,8441	0,1975	29,580	0,0
n_p , об/хв	0,0509	0,0010	505581	0,0

Таблиця 4

SS моделі та SS залишків для $\varphi_{\text{вп}}$											
Залежні змінні	Множ. R	Множ. R2	Скорег. R2	SS моделі	сс моделі	MS моделі	SS залишку	сс залишку	MS залишку	F	p
$\varphi_{\text{вп}}$ град.	0,9926	0,9853	0,9849	203,14	1	203,14	3,0172	38	0,0794	2558,4	0,0

Рівняння залежності $\varphi_{\text{вп}} = f(n_p)$ оцінювалось використанням критерію Фішера F. Оцінка значущості складових рівняння залежності $\varphi_{\text{вп}} = f(n_p)$ відбувалось шляхом порівняння розрахованого t-критерію з табличним. Оцінюванню підлягають коефіцієнт регресії та вільний член. Оцінювання здійснено стандартним методом, тобто розраховується помилка відповідного параметра, потім було визначено значення t-критерію, як відношення значення параметра до його помилки: $t_a = a/m_a$; $t_b = b/m_b$. Тут t_a , t_b розрахункові значення t-статистик для вільного члена та коефіцієнта регресії; b – коефіцієнт регресії; a – вільний член. Значення t-критерію табличне для

числа ступенів свободи 38 та рівня значущості 0,05 однакове для всіх параметрів і так само $t_{\text{табл}} = 2,0244$.

Рівняння залежності $p_n = f(n_p)$; $p_{\text{фк}} = f(n_p)$ мають вигляд:

$$p_n = -25,853 + 2,2756n_p; \quad p_{\text{фк}} = -40,332 + 2,1818n_p.$$

Результати розрахунків статистичних характеристик за даними рівняннями надано у табл. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Статистичні характеристики залежності $p_n = f(n_p)$

Таблиця 5

Одномірні критерії значущості для p_n					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	1359,7	1	1359,7	9,811	0,0033
n_p , об/хв	405648	1	405648	2927,1	0,0
Помилка	526670	38	138,6	–	–

Таблиця 6

Оцінки параметрів				
Ефект	p_n параметри	p_n статистична помилка	p_n t	p_n p
Вільний член	-25,853	8,2537	-3,1323	0,0033
n_p , об/хв	2,2757	0,0420	54,103	0,0

Таблиця 7

SS моделі та SS залишків для p_n											
Залежні змінні	Множ. R	Множ. R2	Скорег. R2	SS моделі	сс моделі	MS моделі	SS залишку	сс залишку	MS залишку	F	p
p_n , бар	0,9935	0,9871	0,9868	405648	1	405648	5266,0	38	138,57	2927,1	0,0

Статистичні характеристики залежності $p_{\text{фк}} = f(n_p)$

Таблиця 8

Одномірні критерії значущості для $p_{\text{фк}}$					
Ефект	SS	Ступені свободи	MS	F	p
Вільний член	3309,0	1	3309,0	18,643	0,000109
n_p , об/хв	372872	1	372872	2100,8	0,0
Помилка	6744,6	38	177,5	–	–

Таблиця 9

Оцінки параметрів				
Ефект	$p_{\text{фк}}$ параметри	$p_{\text{фк}}$ ст. пом.	$p_{\text{фк}}$ t	$p_{\text{фк}}$ p
Вільний член	-40,332	9,3409	-4,3178	0,0001
n_p , об/хв	2,1818	0,0476	45,834	0,0

Таблиця 10

SS моделі та SS залишків для $p_{\text{фк}}$											
Залежні змінні	Множ. R	Множ. R2	Скорег. R2	SS моделі	сс моделі	MS моделі	SS залишку	сс залишку	MS залишку	F	p
$p_{\text{фк}}$, бар	0,9910	0,9822	0,9817	372872	1	372872	6744,6	38	177,49	2100,8	0,0

Таблиця 11

Параметр	Помилка	t-критерій розрахований	t-критерій табличний
коэф. регресії p_n	0,0420	54,103	2,0244
вільний член p_n	8,2537	- 3,1323	
коэф. регресії $p_{\text{фк}}$	0,0476	45,834	
вільний член $p_{\text{фк}}$	9,3409	- 4,3178	

Всі розраховані (фактичні) t -критерії більші критичного табличного значення, це означає, що всі параметри рівняння регресії є статистично значущими.

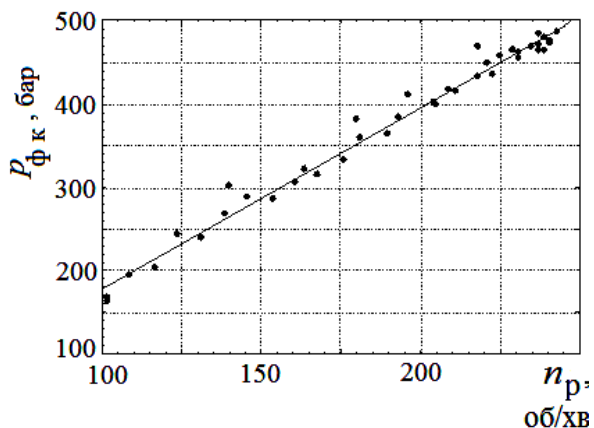
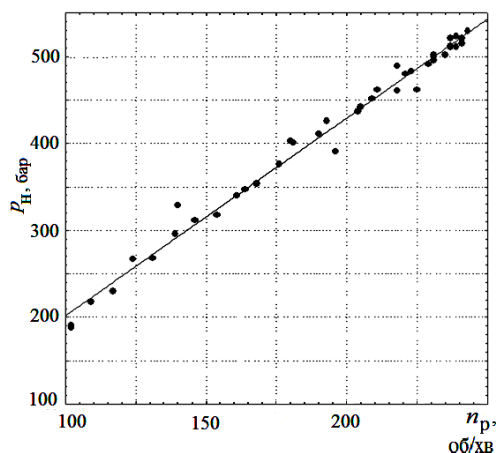


Рис. 5. Загальний графік лінії регресії і спостережуваних значень p_n від n_p Рис. 6. Загальний графік лінії регресії і спостережуваних значень $p_{фк}$ від n_p

Сформовані регресивні моделі (рис. 4, 5) відображають взаємозв'язок параметрів процесу вприску для швидкісної характеристики. Аналогічні результати отримані для навантажувальної характеристики. В цілому результати моделювання у поєднанні з додатковим аналізом та порівнянням F -критеріїв і t -критеріїв отриманих параметрів із табличними значеннями дозволяють дійти висновку про статистичну значущість усіх моделей швидкісної та навантажувальної характеристик та придатності.

У п'ятому розділі «Технологія розробки програми контролю за надійністю та працездатністю паливної системи високого тиску суднового дизеля» показано результати щодо технології розробки програми контролю, надано основні положення щодо способу контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи суднового дизеля.

Одним із напрямків покращення надійності та працездатності роботи елементів високого тиску паливної системи є контроль за перепадами тиску робочої речовини на всіх режимах роботи дизеля. Враховуючи проблемно-цільовий підхід на рис. 7 запропоновано технологію розробки програми контролю за надійністю та працездатністю паливної системи високого тиску суднового дизеля.

Положення щодо забезпечення способу контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи суднового дизеля здійснюється шляхом генерації антиподій (сценаріїв-альтернатив) з алгометричною послідовністю дій операторів, необхідних для здійснення процесу переходу з надзвичайної ситуації в штатну або екстремальну.

Спосіб генерації антиподії, адаптований до формування заходів контролю щодо забезпечення надійності та працездатності елементів паливної системи високого тиску, спрямовано на створення сценаріїв, коли

один, два тощо елементи ПСВТ працюють у штатному стані і змінюють свій стан. Також змінюються сюжети сценаріїв контролю ПСВТ (антиподій).

Персонал, отримуючи від системи контролю за елементами ПСВТ відповідну інформацію, аналізуючи її або звернувшись до чек-листа приймає відповідні рішення щодо проведення відновлювальних робіт.



Рис. 7. Технологія розробки програми контролю

Використання способу генерації сценаріїв антиподій дозволяє визначити по отриманій інформації можливі альтернативи антиподій, за рахунок знань оператора про характер процесу змін, які відбуваються в елементах ПСВТ з використанням регульовальних параметрів щодо контролю за станом паливної системи, а також наявності і кількості діючих осіб для реалізації відновлювальних робіт.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямовано на вирішення науково-прикладної задачі збереження надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднового дизеля шляхом контролю за тиском робочої речовини на всіх режимах роботи дизельного двигуна.

Паливні системи високого тиску входять до складу усіх дизельних двигунів. Надійна робота паливної системи високого тиску залежить від працездатності її окремих елементів. Одним зі способів забезпечення надійності і працездатності дизельного двигуна є створення системи контролю за тиском робочої речовини в елементах паливної системи високого тиску для визначення перепадів на кожному з них шляхом встановлення вимірювальних приладів.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є розробка способу та алгоритму контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи дизельного двигуна.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Характеристики процесу роботи двигуна знаходяться у строго встановлених конструктивних параметрах та вимагають певних методів дослідження.

2. На роботу дизельного двигуна впливає паливна система. Оцінку паливної системи високого тиску проводять з урахуванням різних факторів, а саме зовнішніх – погодні умови та внутрішні, які виникають під час керування.

3. За результатами інформаційного огляду публікацій та наукових робіт визначено дійсний стан щодо оцінки сучасних теорій паливних систем високого тиску суднових дизелів, де проблеми надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднових двигунів не знайшли свого відображення повною мірою, що і обумовило вибір мети, завдання та технологій наукового дослідження.

4. Відповідно до мети (збереження надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднового дизеля) дослідження проведено шляхом імітаційного моделювання за відповідною схемою. Технологія дисертаційного дослідження основана на етапах статистичної обробки експериментальних даних при побудові регресивних рівнянь процесів паливподачі системи високого тиску суднового дизельного двигуна.

5. Для вирішення допоміжних завдань дослідження використано метод фізичного моделювання при розробці комплексу керування паливною системою високого тиску суднового дизельного двигуна на експериментальному стенді та метод динамічного програмування при розв'язанні задачі шляхом її розбиття на декілька однакових підзадач, рекурентно пов'язаних між собою.

6. Отримана математична модель складових механічних процесів у паливній системі високого тиску динаміки суднового комплексу з урахуванням перехідних процесів і знайдено керування, що забезпечує його рух з максимальною середньою швидкістю і мінімальною витратою палива на одиницю шляху. Визначені співвідношення при моделюванні й оптимальному керуванні силовими агрегатами суднових комплексів дозволили методом динамічного програмування провести аналіз витрат палива на одиницю шляху при оптимальному керуванні порівняно з відповідним постійним керуванням. Встановлено вплив на паливну систему суднового комплексу збурень водного середовища при оптимальному й постійному керуванні. Це, у свою чергу, сприятиме оцінці надійності та працездатності паливної системи суднового дизеля.

7. Експериментальний стенд для випробувань елементів паливної системи високого тиску суднового дизельного двигуна, доопрацьований багатоканальним програмно-апаратним комплексом і комплексом керування рейкою ПНВТ, дозволив здійснити імітаційне моделювання характеристик

системи подачі палива та дослідити перехідні процеси при зміні частоти обертів двигуна в діапазоні від мінімально до максимально стійких.

8. Розроблений метод динамічних випробувань дозволив отримати навантажувальну і швидкісну характеристики з визначенням динаміки змін тиску на елементах паливної системи суднового дизеля у мінімальний термін з можливістю оцінювати перепади на кожного з елементів на всіх режимах роботи дизеля.

9. Регресивні рівняння для навантажувальної та швидкісної характеристики становлять статистичну значимість і придатність їх для подальшого використання в оцінці гідродинамічних процесів у системі подачі палива суднового дизельного двигуна з подальшим визначенням надійності та працездатності.

10. Ефективність процесу контролю за надійністю та працездатністю елементів високого тиску паливної системи має важливе значення при визначенні її експлуатаційних можливостей. Здійснення процесу контролю неможливо без відповідної програми контролю. Використовуючи проблемно-цільовий підхід розроблена програма контролю, яка складається з блоків, кожен з яких формується на основі виявлених проблем та рішень, спрямованих на забезпечення контролю за специфікою роботи паливної системи високого тиску суднового дизельного двигуна.

11. Запропонований спосіб генерації антиподії, адаптований до формування заходів контролю щодо забезпечення надійності і працездатності елементів паливної системи високого тиску, спрямований на створення сценаріїв, коли один, два тощо елементи ПСВТ працюють у штатному стані і змінюють його стан, також на здійснення змін сюжетів сценаріїв контролю ПСВТ (антиподій). Спосіб генерації альтернатив у вигляді сценаріїв антиподій сформованих на принципах швидкодії, упередження та допустимого ризику дозволить забезпечити недопущення антиподії (аварійної ситуації) під час експлуатації ПСВТ суднового дизеля.

12. Надані у дисертації, теоретично обґрунтовані, експериментально підтверджені наукові результати мають практичне значення, а саме були апробовані шляхом внесення змін до навчальних дисциплін методичного комплексу і впроваджені у науково-дослідній роботі НУ «ОМА». Отримано патент на корисну модель.

Запропонований метод постійного контролю елементів високого тиску паливної системи суднового дизельного двигуна є прикладом впровадження сучасних технологій у будівництві суднових дизельних двигунів щодо підвищення надійності та працездатності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, у яких опубліковані результати дисертації

1.1. Публікації у наукових фахових виданнях України

1. Половинка Е.М. Процессы впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах / Е.М. Половинка,

Н.В. Слободянюк // Научно-технический сборник “Судовые энергетические установки”. – 2016. – Вып. 36. – С. 141-151.

2. Половинка Е.М. Программно-аппаратный комплекс для динамических безмоторных испытаний топливной аппаратуры дизелей / Е.М. Половинка, **Н.В. Слободянюк** // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2019. – №1 (20). – С. 109-121. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.109-121.

3. Слободянюк Н.В. Особенности процесса впрыскивания на скоростной характеристике среднеоборотного дизеля в условиях переменных режимов / Н.В. Слободянюк // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2019. – № 1 (475). – С. 65-73. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).9](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).9).

4. Слободянюк Н.В. Процесс впрыскивания топлива на скоростной характеристике среднеоборотного дизеля при переменных режимах / Н.В. Слободянюк // Двигуни внутрішнього згорання: Всеукраїнський науково-технічний журнал, Харківський політехнічний інститут. – 2020. – № 1. – С. 28-37. DOI: 10.20998/0419-8719.2020.2.05.

5. Усов А.В. Оптимальное управление судовым дизелем при нестационарных режимах / А. В.Усов, Е.М. Половинка, **Н.В. Слободянюк** // Вісник Одеського національного морського університету збірник наукових праць. – 2020. – № 1 (61). – С. 131-139. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-1-131-139.

6. Усов А.В. Моделирование и оптимальное управление силовыми агрегатами судового комплекса на нестационарных режимах / А.В. Усов, **Н.В. Слободянюк** // Прикладні питання математичного моделювання: наук. збірник. – Херсон, 2020. – Том. 3. – № 1. – С. 238-248. DOI: 10.32782/2618-0340/2020.1-3.24.

1.2. Публікації у науковому виданні України, яке внесено до наукометричних баз

7. Половинка Е. М. Скоростные характеристики системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах / Е. М. Половинка, **Н. В. Слободянюк** // Науковий журнал “Молодий вчений”. – 2017. - № 3 (43). – С. 735-741.

8. Polovinka E.M. Building a load characteristic of the fuel injection system of a ship's medium-speed engine diesel in dynamic tests conditions / E.M. Polovinka, **N.V. Slobodianiuk** // Науковий журнал “Technology audit and production reserves” . – 2018. – № 6/1(44). – С. 41-49. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152596.

9. Слободянюк Н.В. Динамические испытания системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля / Н.В. Слободянюк // Науковий журнал “Молодий вчений”. – 2019. – № 5 (69). – С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-5-69-4>.

1.3. Публікації в інших іноземних виданнях:

10. Половинка Е.М. Влияние начальных условий на процесс топливоподачи среднеоборотного судового дизеля на переменных режимах / Е.М. Половинка, **Н.В. Слободянюк** // Науковий журнал “American Scientific Journal” – NY. – 2018. – №19. – С. 51-59.

1.4 Публікації за матеріалами наукових конференцій

11. Слободянюк Н.В. Работа системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Матер. наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 17.03.2016 – 18.03.2016. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія». – 2016. – С. 21–26.

12. Слободянюк Н.В. Процессы топливоподачи судового дизеля на переменных режимах / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Матер. наук.-техн. конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт», 23.03.2017 – 24.03.2017. Частина 1. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія». – 2017. – С. 23–29.

13. Слободянюк Н.В. Процесс впрыскивания топлива в судовом среднеоборотном дизеле на переменных режимах / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування : Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції СЕУТТОО-2017, 28.09.2017 – 29.09.2017. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2017. – С. 362–366.

14. Слободянюк Н.В. Исследование характеристик процессов топливоподачи на переменных режимах судового дизеля / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Матер. наук.-техн. конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2018 – 23.03.2018. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія». – 2018. – С. 20–28.

15. Слободянюк Н.В. Динамічні випробування системи паливоподачи суднового середньообертового дизеля / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Матер. наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 21.03.2019 – 22.03.2019. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія». – 2019. – С. 141–146.

16. Слободянюк Н.В. Статистичні моделі характеристики паливоподачи суднового середньообертового дизеля / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // Матер. наук.-техн. конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 18.03.2020 – 19.03.2020. – Одеса : Національний університет «Одеська морська академія». – 2020. – С. 143–148.

17. Слободянюк Н.В. Процес впорскування палива на швидкісній характеристиці середньообертового дизеля при змінних режимах / Н.В. Слободянюк, Е.М. Половинка // XVX Міжнародний Конгрес двигунобудівників, 08.09.2020 – 11.09.2020. – Харків : Харківський авіаційний інститут. – 2020. <https://khai.edu/ua/nauka/konferentsiyi/mizhnarodnij-kongres-dvigunobudivnikov/>

18. Слободянюк Н.В. Ефективність процесів вприску палива суднового дизеля на нестаціонарних режимах / Н.В. Слободянюк // I Міжнародної наукової-практичної конференції «An integrated approach to science modernization, methods, models and multidisciplinary», 17.02.2021. – Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа». – 2021. – С.234-236. DOI: 10.36074/grail-of-science.19.02.2021.046.

1.4. Охоронні документи

19. Патент на корисну модель №132260 Україна, МПК F02M 65/00 / Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів / Е.М. Половинка, **М.В. Слободянюк**, О.М. Кириленко; власник Національний університет «Одеська морська академія».; заявл. 22.05.2018; опублік. 25.02.2019, Бюл. №4/2019. 5с.

Анотація

Слободянюк М.В. Вдосконалення процесів вприску палива суднового дизеля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний університет «Одеська морська академія», МОН України, Одеса, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню питань теоретичного обґрунтування та розроблення прикладних рекомендацій щодо збереження надійності та працездатності елементів високого тиску паливної системи суднового дизельного двигуна шляхом визначення перепадів на кожному з елементів тиску робочої речовини у робочому діапазоні частоти обертів.

Запропонована методика ймовірності (регресивної) побудови характеристик системи паливоподачі суднових дизелів за результатами експериментальних випробувань паливного насосу високого тиску, ділянки трубопроводу та форсунки паливної системи дизеля.

Удосконалено математичну модель механічних процесів в паливній системі високого тиску регресивним методом з додаванням компонентів перехідних процесів у паливній апаратурі.

Методику побудови характеристик систем подачі палива суднових дизельних двигунів шляхом динамічних випробувань з отриманням швидкісної та навантажувальної характеристик.

Подальшого розвитку набула методика дослідження паливних систем високого тиску суднових дизельних двигунів.

Ключові слова: паливна система, судновий дизель, характеристики подачі палива, технологія дослідження, параметри паливної системи, режими роботи паливної системи, імітаційне моделювання, програмно-апаратний комплекс, регресійні рівняння, спосіб контролю.

Аннотация

Слободянюк Н.В. Совершенствование процессов впрыскивания топлива судового дизеля. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный университет «Одесская морская академия» МОН Украины, Одесса, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению вопросов теоретического обоснования и разработки прикладных рекомендаций по сохранению надежности и работоспособности элементов высокого давления топливной системы судового дизельного двигателя путем определения перепадов на каждом из элементов давления рабочего вещества в диапазоне от минимальных до максимально устойчивых.

Выполнен анализ существующих теоретических исследований и публикаций современных теорий систем судовых дизельных двигателей. Обоснована необходимость дальнейшего исследования по разработке метода, способа и механизма контроля за надежностью и работоспособностью элементов высокого давления топливной системы дизелей.

Принята и исследована модель динамики судового комплекса, которая была дополнена компонентами, которые учитывают переходные процессы в топливной аппаратуре и обеспечивают движение судна с максимальной средней скоростью.

На экспериментальном стенде для испытаний топливного насоса высокого давления проведено имитационное моделирование характеристик подачи топлива судового ДВС и апробирована методика построения закона управления пропульсивным комплексом судна, что позволило получить соответствующие решения указанных задач, реализованных в разработанном программно-аппаратном комплексе.

Разработана методика построения закона управления пропульсивным комплексом судна обеспечивает минимальный расход топлива на единицу пути для переходных режимов, что позволило получить соответствующие решения указанной задачи реализованные в измерительном программно-аппаратном комплексе экспериментального стенда.

Усовершенствована методика построения характеристик систем подачи топлива судовых дизельных двигателей путем динамических испытаний с получением скоростной и нагрузочной характеристики.

Дальнейшее развитие получили методы статистической регрессионной обработки экспериментальных данных в области представления гидродинамических процессов и методика экспериментального исследования топливных систем высокого давления судовых дизельных двигателей.

Определение перепадов давления на элементах топливной системы судового дизельного двигателя обеспечит повышение его надежности и работоспособности.

Ключевые слова: топливная система, судовой дизель, характеристики подачи топлива, технология исследования, параметры топливной системы, режимы работы топливной системы, имитационное моделирование, программно-аппаратный комплекс, регрессионные уравнения, способ контроля.

ABSTRACT

Slobodianiuk M.V. Improvement of fuel injection processes of marine diesel engines. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation paper for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.05.03 – «Engines and power plants» – National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of theoretical substantiation and development of applied recommendations for maintaining the reliability and efficiency of high pressure elements of the fuel system of a marine diesel engine by determining the differences in each of the pressure elements of the working substance in the operating speed range.

The method of probability (regressive) construction of the characteristics of the fuel supply system of marine diesel engines based on the results of experimental tests of the high-pressure fuel pump, the pipeline section and the injector of the diesel fuel system has been proposed.

The mathematical model of mechanical processes in high pressure fuel systems has been improved by the regression method with the addition of transient components in fuel equipment.

Methods for constructing the characteristics of fuel supply systems for marine diesel engines, by dynamic tests to obtain speed and load characteristics.

The method of research of high-pressure fuel systems of marine diesel engines has been further developed.

Key words: fuel system, marine diesel, fuel supply characteristics, research technology, fuel system parameters, fuel system operation modes, simulation modeling, software and hardware complex, regression equations, control method.

Підп. до друку 1.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-04-04

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності
ДК № 1292 від 20.03.2003