

Маннапова О.В.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Бойко С.О.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Урум Н.С.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Рященко О.І.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМИХ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ АЗОТУ ВІД ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОВНИХ ДВИГУНІВ

Метою роботи є підвищення екологічності судових двигунів за рахунок моніторингу токсичності відпрацьованих газів і корегування параметрів двигунів. Поставлена мета досягається шляхом розробки математичної моделі залежності питомих викидів діоксиду азоту від експлуатаційних характеристик головних двигунів. Особливою проблемою всіх існуючих системах автоматичного управління залишається формування такого значення кута випередження впорскування палива, при якому значення питомих викидів оксидів азоту з відпрацьованих газів, буде відповідати вимогам правила 13 Окисли азоту Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78. В зв'язку з цим в статті розв'язано задачу оптимізації значення кута випередження впорскування палива на різних режимах роботи судових дизельних двигунів. Для розв'язання даної задачі безпосередньо і розроблено математичну модель, що дозволяє зробити процес оптимізації значення кута випередження впорскування палива в залежності від навантаження й експлуатаційного стану судового дизеля. Зміст побудови математичної моделі, що описує вплив навантаження і кута випередження впорскування палива розглянуто на прикладі головних двигунів типу 6S90MC-C. Запропонована модель дозволяє вирішувати задачу оптимізації значення кута випередження впорскування палива в залежності від навантаження й експлуатаційного стану судового дизельного двигуна з метою зниження питомих викидів діоксидів азоту до значень, нормованих правилом 13 Окисли азоту Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78. В роботі визначено, що викиди шкідливих речовин з ВГ судових дизельних, двигунів залежать від кута випередження впорскування палива. Це пояснюється тим, що при зменшенні кута випередження впорскування палива спостерігається зниження максимальних температур згоряння, а так само час окислювання продуктів згоряння. Таким чином, зі зменшенням кута випередження упорскування палива знижується емісія оксидів азоту.

Ключові слова: математична модель, відпрацьовані гази, метод, дизельний двигун, зміни фаз газорозподілу.

Постановка проблеми. Захист навколишнього середовища останнім часом є глобальною проблемою людства. Постійне збільшення споживання вуглеводних палив і викидів в атмосферу шкідливих речовин від їх використання викликає порушення природного процесу самоочищення біосфери і є загрозою життя людини. Для зупинки даного процесу, підписані міжнародні угоди, прийняті державні постанови і програми захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів.

У країнах Європейського Союзу нормування викидів шкідливих речовин з відпрацьованими

газами (ВГ) автомобільних дизелів здійснюється відповідно до правил Європейської екологічної комісії (ЄЕК) ООН № 49. За минулі роки ці правила неодноразово піддавалися істотному корегуванню, як за переліком нормованих шкідливих речовин, так і за жорсткістю їх нормативів. Згідно Євро-5 (діють з 2008 року) значення питомих викидів оксидів азоту з ВГ дизельних двигунів не повинне перевищувати 2 г/ (кВт·год) Тобто, у порівнянні з Євро-3 (діють з 2000 року) вимоги до значення питомих викидів оксидів азоту стали більш жорсткими на 250 %.

Завдяки високій енергетичній ефективності дизельні двигуни в даний час витиснули інші типи енергетичних установок на судах морського і річкового флоту та у близькому майбутньому вони збережуть домінуюче положення.

Працюючий дизельний двигун є інтенсивним джерелом акустичного, теплового і хімічного забруднення навколишнього середовища. Проблема скорочення викидів забруднюючих речовин працюючим дизельним двигуном є однією з найважливіших задач, як судноплавства, так і дизелебудування, від рішення якої залежить стан здоров'я людини і збереження оточуючого середовища.

В даний час склалася ситуація, коли розвиток судових дизельних двигунів і їх конкурентноздатність визначаються головним чином розробкою технологічних рішень, що дозволяють знизити викиди шкідливих речовин до рівня зазначених вище екологічних вимог. Ці вимоги можуть бути досягнуті різними засобами.

Найбільш відомі в суднобудівній галузі способи зниження викидів оксидів азоту, такі як селективне каталітичне відновлення і рециркуляція ВГ мають серйозні недоліки – це значне ускладнення конструкції та збільшення витрати палива. Ріст цін на паливо змушує суднобудівні компанії шукати такі методи, що одночасно забезпечують зниження викидів оксидів азоту без помітного погіршення паливної економічності дизельного двигуна.

Серед таких методів та моделей заслуговують на особливу увагу ті, які спрямовані на удосконалення робочого процесу шляхом впливу на термодинаміку горіння палива в циліндрі двигуна внутрішнього згорання.

Таким чином, є актуальною задача розробки математичної моделі залежності питомих викидів діоксида азоту від експлуатаційних характеристик головних двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у рішення проблеми підвищення екологічної безпеки водного транспорту за допомогою зниження викидів від судових дизельних двигунів внесли результати наукових досліджень наступних вчених: Возницького І.В., Зубрилова С.П., Дорохова А.Ф., Климової Є.В., Щавелєва Д.В., Іванченко А.А., Смайлиса В.И., Стаценко В.Н., Одінцева В.І., Туркіна В.А., Окунева В.М., Обозова А.А., Покусаєва М.М., Кірпіченко С.В. та ін.

Аналіз в роботі [1] свідчить, що можливість зниження шкідливих викидів тільки за рахунок організації робочого процесу двигуна може не

забезпечити повною мірою вимоги Tier 3. Тому, до проблеми очищення ВГ необхідно шукати комплексний підхід, використовуючи прогресивні методи, які не потребують конструкційних змін двигуна:

- попередня обробка палива в каталітичному фільтрі-перетворювачі;
- обробка води для водопаливної емульсії;
- рециркуляція та самоочищення ВГ у рідинному контактному апараті.

Визначаючи ефективність способів зниження викидів ВГ, в роботі [2] обґрунтовується необхідність регулювання кута випередження впорскування палива, якості сумішоутворення для зменшення неповноти згорання і зниження концентрації токсичних компонентів у ВГ.

При визначенні найбільш ефективних способів зниження викидів ВГ в роботі [3] пропонується для рішення даної проблеми застосовувати рециркуляцію ВГ.

В роботі [4] відзначається, що для реалізації на судах можуть бути застосовані дві технології очищення газів від оксидів азоту: абсорбційне рідинне очищення і технологія селективного каталітичного відновлення NOx аміаком. Недоліком абсорбційного очищення на судні є його висока вартість, а також необхідність рішення задач, пов'язаних із забрудненням водного середовища. Істотну вартість будуть мати пристрої очищення газів, в основі роботи яких передбачається використовувати холодну плазму та електронні пучки. Для виключення зазначених недоліків пропонується використовувати технологію селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту аміаком або карбамідом. Для підвищення ефективності технології селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту запропоновано використовувати рециркуляцію ВГ дизельного двигуна у нейтралізаторі.

Мета статті (постановка завдання). Метою роботи є підвищення екологічності судових двигунів за рахунок моніторингу токсичності ВГ і корегування параметрів двигунів.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі [5] відзначено, що на утворення оксидів азоту найбільш сильний вплив робить кут випередження впорскування палива φ_{on} , тобто регульовальний параметр дизельного двигуна. Вважається, що при зменшенні кута впорскування палива знижуються максимальна температура згорання і час, що відводиться на це згорання. Тому, зі зменшенням кута випередження впорскування палива викид оксидів азоту знижується, а викиди COx, CH і сажі, як правило, збільшуються.

Разом з тим, сприятливий вплив зменшення кута випередження впорскування палива на викиди оксидів азоту приводить, як правило, до деякого зниження паливної економічності дизельного двигуна.

За даними роботи [6] зменшення кута випередження впорскування палива на 10° повороту колінчатого валу дизельного двигуна при роботі дизеля на номінальному режимі приводить до зниження змісту оксидів азоту в його ВГ, на 60 % і погіршенню паливної економічності на 10 % при одночасному збільшенні викиду сажі на 100 %.

В експлуатаційній практиці виникають ситуації, що стосуються оперативного управління концентрацією шкідливих речовин, які викидаються судновими двигунами. Це відбувається, наприклад, коли судно входить у район контролю викидів оксидів азоту з ВГ, (NECA). У таких випадках для виконання вимог ІМО Tier-2 або Tier-3 (для двигунів установлених на судах побудованих після 1 січня 2016 року) потрібна швидке настроювання двигуна на режим з мінімально можливою емісією оксидів азоту з ВГ, і відсутністю видимої димності газів, навіть за рахунок паливної економічності.

Одним з регулювальних параметрів, що дозволяють швидко вирішувати поставлену задачу, є кут випередження впорскування палива.

Таким чином, можна зробити висновок, що при зменшенні кута випередження впорскування палива емісія оксидів азоту знижується, а димність навпаки росте. Дана обставина дозволяє стверджувати: кожному режиму роботи судового дизельного двигуна властиво раціональне з погляду мінімального викиду шкідливих речовин значення кута випередження впорскування палива.

Отже, реалізація цих або подібних їм залежностей у системах автоматичного керування судових дизельних двигунів дозволяє знижувати значення питомих викидів оксидів азоту з ВГ, і, зокрема, довести їх до рівня вимог Tier-2, а в деяких випадках і до рівня Tier-3, правила 13 «Окисли азоту» Додатка VI «Правила запобігання забруднення повітряного середовища із судів» Конвенції МАРПОЛ 73/78. Такими системами управління оснащуються багато судових дизельних двигунів виробництва «MAN Diesel & Turbo».

Дизельні двигуни моделі 6S90MC-C компанії «MAN Diesel & Turbo» характеризуються механічним приводом розподільного валу, що контролює геометричні фази впорскування палива, відкриття випускного і пускового клапанів, з яких тільки кут випередження впорскування палива, який впливає на максимальне тиски згоряння в циліндрі P_z ,

може змінюватися в експлуатації за допомогою встановленої системи зміни кута випередження на оснві функції зміни фаз газорозподілу Variable Injection Timing (VIT).

Функція зміни фаз газорозподілу (VIT) в судових дизельних двигунах вступає в дію під час регулювання тиску згоряння в залежності від навантаження. Змінний момент впорскування (VIT) дозволяє досягти максимального тиску згоряння під час роботи з частковим навантаженням, що допомагає зменшити витрату палива, а також досягти ефективного згоряння в двигуні.

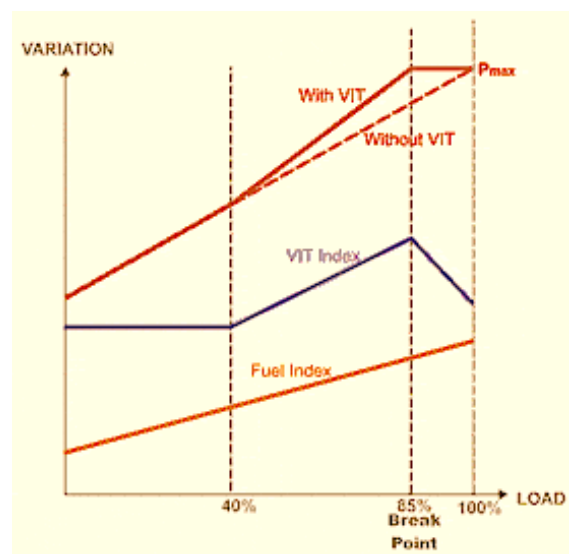


Рис. 1. Демонстрація ефективності функції зміни фаз газорозподілу VIT

Контролюючи момент впорскування палива в паливному насосі і випереджаючи момент впорскування паливного насоса, VIT збільшує максимальний тиск в двигуні.

При роботі з головним судовим двигуном, оснащеним системою зміни фаз газорозподілу VIT, судовому інженеру необхідно знати наступні моменти для забезпечення безперебійної роботи двигуна:

1. Вільність механічних частин: Привід змінного моменту впорскування VIT працює на русі ексцентрикового валу всмоктувального і переливного клапанів. Морські інженери повинні переконатися, що ці клапани не мають жодних перешкод або надмірного люфту. Пружина ексцентрикового валу також повинна регулярно перевірятися на предмет належної роботи, щоб уникнути будь-яких поломок.

2. Перевірка значень індикатора навантаження: Регулююча паливна тяга передає рух вихідному важелю регулятора і відповідно визначає подачу палива в циліндр. Судновий механік повинен

перевірити відповідність між положенням індикатора навантаження на регулювальній пластині, передбаченій в тязі, і значенням індикатора навантаження на місцевому маневровому стенді і на пульті дистанційного керування, коли VIT встановлений на "0". Якщо є відхилення в будь-якому з трьох значень, його необхідно виправити, перш ніж починати будь-які дії з регулюванням фаз газорозподілу паливного насоса.

3. Налаштування приводу VIT: Перевірте хід приводу, коли VIT «0», вставивши дистанційну втулку між важелем регулювання всмоктувального клапана і блокуванням. Перемістіть VIT в максимальне положення вперед і мінімальне положення назад відповідно і запишіть значення на індикаторі навантаження на регулювальній пластині. Також перевірте хід приводу на пульті дистанційного керування. Нарешті, запишіть і порівняйте будь-які відхилення, зазначені в інструкції виробника.

4. Зазор VIT: При установці VIT після технічного обслуговування необхідно перевірити зазор і вирівнювання між упорною пластинкою і тягою, встановивши циліндр у повністю втягнуте положення. Якщо зазор відсутній, упорну пластину необхідно відшліфувати до тих пір, поки зазор не буде досягнутий (рис. 2).

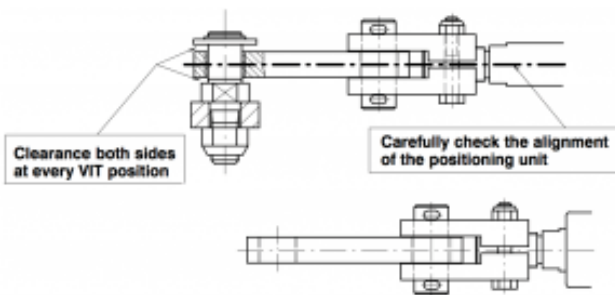


Рис. 2. Особливості налаштування зазору VIT

5. Електричне підключення: Для електричного керування системою зміни фаз газорозподілу (VIT) необхідно регулярно перевіряти всі кабельні з'єднання між з'єднувальною коробкою та клемою VIT.

6. Пневматичний циліндр: Пневматичний циліндр, який діє як позиціонує вузол зчеплення VIT, іноді оснащений механічним стопором, який слід перевіряти на предмет заклинювання. Це буде корисно для переміщення циліндра вручну в разі виходу з ладу автоматичної системи позиціонування.

7. Обкатка: Коли судновий дизельний двигун знаходиться на обкатці/обкатуванні через капі-

тальний ремонт компонентів двигуна, VIT повинен бути відключений або вимкнений на весь період до завершення обкатки.

8. Робота двигуна з відключеним агрегатом: Якщо головний двигун працює з відключеним агрегатом через серйозну проблему в деталях цього агрегату, VIT повинен бути встановлений на нуль або вимкнений, оскільки це призведе до нерівномірного розподілу навантаження в двигуні.

9. Відмова VIT: Коли відбувається відмова VIT, піковий тиск горіння більше не контролюється пневматичним приводом. У такій ситуації необхідно встановити дистанційну втулку, щоб зафіксувати нейтральне положення VIT.

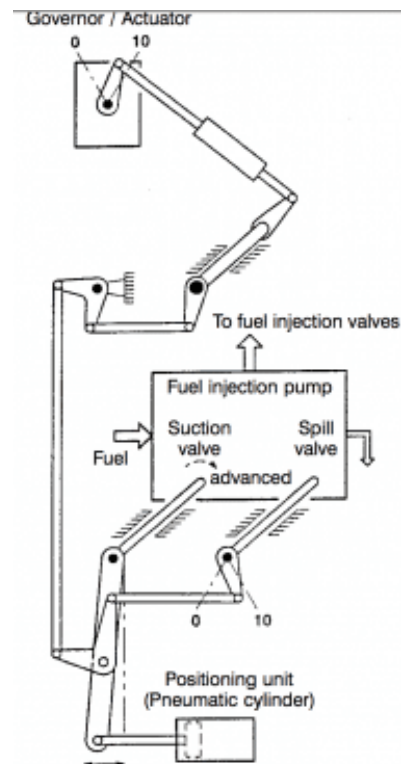


Рис. 3. Особливості функціонування пневматичного циліндру при використанні VIT

Це не є вичерпним списком, але включає всі важливі моменти, які необхідно враховувати при роботі з двигуном з VIT. VIT використовується для зменшення загальної витрати палива і досягнення максимального тиску навіть при низькому навантаженні, але погане обслуговування і експлуатація VIT може звести нанівець цей результат і навіть призвести до серйозних пошкоджень основних частин двигуна.

З погляду поліпшення екологічних характеристик роботи суднових дизельних двигунів 6S90MC-C виробництва компанії "MAN Diesel & Turbo" перевага системи VIT полягає в наявності можливості зменшити кут випередження

впорскування палива, що приводить до зниження питомих викидів оксидів азоту з ВГ.

Особливою проблемою всіх існуючих системах автоматичного управління залишається формування такого значення кута випередження впорскування палива φ_{on} , при якому значення питомих викидів оксидів азоту з ВГ, буде відповідати вимогам правила 13 Окисли азоту Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78. Отже, необхідно розв'язати задачу оптимізації значення кута випередження впорскування палива на різних режимах роботи судових дизельних двигунів. Для розв'язання даної задачі необхідно мати математичну модель, що дозволяє зробити процес оптимізації значення кута випередження впорскування палива в залежності від навантаження й експлуатаційного стану судового дизеля.

Зміст побудови математичної моделі, що описує вплив навантаження і кута випередження впорскування палива головних двигунів типу 6S90MC-C на значення питомих викидів діоксиду азоту ВГ визначається відповідно до рекомендацій теорії планування експерименту.

Базовий вираз математичної моделі у загальному випадку має наступний вигляд:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i < j} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (1)$$

де y – значення питомих викидів діоксиду азоту у ВГ ГД (г/(кВт год));

x_i, x_j – значення факторів в кодованому масштабі;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – значення коефіцієнтів рівняння регресії.

Для розрахунку коефіцієнтів базового виразу математичної моделі (1) реалізовано повний факторний експеримент виду 3^n , наприклад випробувань для двох незалежних факторів z_1 та z_2 при трьох значеннях кожного фактору (у безрозмірній системі координат це: +1 – максимальне значення фактору; 0 – середнє значення фактору; -1 – мінімальне значення фактору). При цьому факторами, наприклад, можуть бути: z_1 – навантаження головного двигуна у відсотках від максимальної тривалої потужності (% MCR); z_2 – кут випередження впорскування палива в градусах повороту колінчатого валу головного двигуна до верхньої мертвої точки (ПКВ до ВМТ). За результатами експерименту формується відповідна матриця планування.

З метою спрощення розрахунків значень коефіцієнтів базового виразу математичної моделі (1) матриця експерименту приводиться до ортогонального плану відповідно до виразу:

$$x'_j = x_j^2 - \overline{x_j^2} = x_j^2 - \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 / N = x_j^2 - \frac{6}{9} = x_j^2 - \frac{2}{3}, \quad (2)$$

В даному випадку всі коефіцієнти базового виразу математичної моделі (1) визначаються з використанням наступного виразу:

$$b_j = \sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i / \sum_{i=1}^N x_{ji}^2, \quad (3)$$

При цьому дисперсії коефіцієнтів базового виразу математичної моделі (1) визначаються за виразом:

$$s_{b_j}^2 = s_{ооcnp}^2 / \sum_{i=1}^N x_{ji}^2, \quad (4)$$

Відповідно до результатів розрахунків за матрицею планування повного факторного експерименту наступне формальне представлення математичної моделі (1) може бути представлено як:

$$\hat{y} = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} (x_1^2 - \hat{x}_1^2) + b_{22} (x_2^2 - \hat{x}_2^2), \quad (5)$$

В подальшому розраховується значення дисперсії для коефіцієнта b_0 :

$$s_{b_0}^2 = s_{b'_0}^2 + (\overline{x_1^2})^2 s_{b_1}^2 + (\overline{x_2^2})^2 s_{b_2}^2, \quad (6)$$

Отримана математична модель відповідно виразів (1)–(6) може бути використана для оцінки впливу на значення питомих викидів діоксиду азоту у ВГ навантаження на двигун і кута випередження впорскування палива головних двигунів моделі 6S90MC-C виробництва компанії «MAN Diesel & Turbo».

Аналогічне перевищення вимог Додатка VI до значення питомих викидів діоксиду азоту у ВГ, даного судового малообертового двигуна буде спостерігатися при навантаженнях в інтервалі від 87,5 до 75 % MCR і кути випередження впорскування палива, що перевищує відповідно 10 і 16 ПКВ до ВМТ.

Модель (1)–(6) дозволяє розв'язувати оптимізаційну задачу визначення значення кута випередження впорскування палива в залежності від навантаження й експлуатаційного стану судового дизеля з метою зниження питомих викидів оксидів азоту до нормованих значень.

Висновки. В статті отримано математичну модель для оцінки впливу на значення питомих викидів оксидів азоту з ВГ від навантаження і кута випередження впорскування палива головних двигунів моделі 6S90MC-C виробництва компанії "MAN Diesel & Turbo". Дана модель дозволяє вирішувати задачу оптимізації значення кута випередження впорскування палива в залежності від навантаження й експлуатаційного стану судового дизельного двигуна з метою зниження питомих викидів діоксидів азоту до значень, нормованих

правилом 13 Окисли азоту Додатка VI Конвенції МАРПОЛ 73/78. Визначено, що викиди шкідливих речовин з ВГ судових дизельних, двигунів залежать від кута випередження впорскування палива. Це пояснюється тим, що при зменшенні кута випе-

редження впорскування палива спостерігається зниження максимальних температур згоряння, а так само час окислювання продуктів згоряння. Отже, зі зменшенням кута випередження упорскування палива знижується емісія оксидів азоту.

Список літератури:

1. Разлейцев Н.Ф. Моделювання та оптимізація процесу згоряння в дизелях. Харків: Вища школа, 1980. 169 с.
2. Черниш І.І., Кар'янський С. А., Оженко Є. М. Сучасні судові дизелі: особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління. Одеса: НУ "ОМА", 2019. 217 с.
3. Зіненко М.М. Удосконалювання експлуатації судових малооборотних двигунів на основі контролю параметрів і концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.05. Одеса, 2013. 133 с.
4. Голуб Є.С., Мадорский Є.З., Розенберг Г.Ш. Діагностування судових технічних засобів: довідник. К.: Транспорт, 1993. 150 с.
5. Наливайко В.С. Суднові двигуни внутрішнього згоряння. Миколаїв, 2015. 332 с.
6. Артемов Г.А., Горбов В.М. Суднові енергетичні установки. Миколаїв: УДМРТУ, 2002. 353 с. URL: <https://ua1lib.org/book/3153403/a9d654> (дата звернення 26.01.2023).
7. Variable Injection Timing (VIT): What Marine Engineers Must Know? URL: <https://www.marineinsight.com/main-engine/vit-marineengineer-must-know/> (дата звернення 26.01.2023).
8. What is VIT + FQS? URL: <https://chiefengineerlog.com/2022/02/21/what-is-vit-fqs/> (дата звернення 26.01.2023).

Mannapova O.V., Boiko S.O., Urum N.S., Riashchenko O.I. RESEARCH OF METHODS FOR TIME SERIES SMOOTHING WHEN PROCESSING NAVIGATIONAL DATA OF SHIP MOTION

The aim of the work is to improve the environmental friendliness of marine engines by monitoring the toxicity of exhaust gases and adjusting engine parameters. This goal is achieved by developing a mathematical model of the dependence of specific nitrogen dioxide emissions on the performance characteristics of the main engines. A special problem of all existing automatic control systems is the formation of such a value of the fuel injection advance angle at which the value of specific emissions of nitrogen oxides from exhaust gases will meet the requirements of Rule 13 Nitrogen Oxides of Annex VI of MARPOL Convention 73/78. In this regard, the article solves the problem of optimizing the value of the fuel injection advance angle at different modes of operation of marine diesel engines. To solve this problem directly, a mathematical model has been developed that allows the process of optimizing the value of the fuel injection advance angle depending on the load and operational condition of a marine diesel engine. The content of the construction of a mathematical model describing the influence of load and fuel injection advance angle is considered on the example of main engines of the 6S90MC-C type. The proposed model makes it possible to solve the problem of optimizing the value of the fuel injection advance angle depending on the load and operational condition of a marine diesel engine in order to reduce specific nitrogen dioxide emissions to the values regulated by Rule 13 Nitrogen Oxides of Annex VI of MARPOL Convention 73/78. The paper determines that emissions of harmful substances from the exhaust gas of marine diesel engines depend on the fuel injection advance angle. This is explained by the fact that with a decrease in the fuel injection advance angle, a decrease in the maximum combustion temperatures and the oxidation time of combustion products is observed. Thus, with a decrease in the fuel injection advance angle, the emission of nitrogen oxides decreases.

Key words: *mathematical model, exhaust gases, method, diesel engine, changes in gas distribution phases.*