

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
(НУ «ОМА»)

ЯКОВЕНКО АНАТОЛІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.431

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ
РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

Спеціальність 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки

Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Одеса - 2021

Дисертація є рукописом.

Робота виконана 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 ка-
федри двигунів внутрішнього згоряння

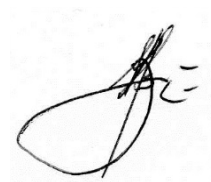
доктор технічних наук, професор
Грицук Ігор Валерійович,
Херсонська державна морська академія Міністерства освіти і
науки України, професор кафедри експлуатації суднових
енергетичних установок

Захист відбудеться 6 травня 2021 р. о 13.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 у Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дидрихсона, 8, корп. 1, зала засідань Вченої Ради.

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

Автореферат розісланий 5 квітня 2021 р

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01
доктор технічних наук, професор



В.В.Нікольський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення високих експлуатаційних параметрів суднових дизельних енергетичних установок залежить від якості робочих процесів, які безпосередньо забезпечуються підтримкою специфікаційних показників процесу впорскування палива.

Вирішення проблеми експлуатаційного контролю процесу впорскування палива пов'язане з певними труднощами методологічного й конструктивного характеру. До перших відносяться, зокрема, високі тиски палива в системі високого тиску й більші частоти нестационарних процесів при впорскуванні палива. Складнощі конструктивного плану складаються у відсутності штатних точок доступу в паливну систему високого тиску і до робочих елементів форсунки. Існуючі методи моніторингу роботи паливної апаратури є досить складними і не знаходять широкого застосування в експлуатації суднових дизелів.

Внаслідок цього при досить значному обсязі проведених у даному напрямку досліджень розвиток методів і засобів контролю паливоподачі, поряд з робочим процесом, залишається актуальним як у науковому, так і в практичному плані.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалося відповідно до Державної програми розвитку промисловості на 2003-2011 роки (частина IV), затвердженої Кабінетом Міністрів України від 28.07.2003 р, № 1174.

Тема дисертаційної роботи пов'язана із програмою економічних реформ на 2010-2014р. «Заможне суспільство, конкурентоспроможна економіка, ефективна держава» (напрямок розвитку транспортної інфраструктури), «Транспортної стратегії України на період до 2020р.» (розпорядження КМУ від 20.10.2010р., №2174-р.) і планами науково-дослідних робіт НУ «ОМА», зокрема "Удосконалювання технічної експлуатації суднових енергетичних установок морських транспортних суден", № ДР 0102U007164, а також по темі НУ «ОМА», «Розвиток систем і методів удосконалювання технічної експлуатації суднових енергетичних установок на базі сучасних інформаційних технологій» № ГР 0110U005910, у яких автор дисертації виконав окремі розділи.

Метою дисертаційного дослідження є вдосконалювання контролю робочих процесів суднових дизелів в експлуатації шляхом розробки нових методів і засобів моніторингу паливоподачі.

Наукова гіпотеза дослідження полягає в тому, що використовуючи для реєстрації процесу впорскування палива комбіновані вимірювальні перетворювачі на базі конструктивних елементів паливної апаратури і її приводу, можна забезпечити оперативний контроль роботи паливної апаратури, істотно спрощуючи організацію моніторингу й підвищуючи ефективність експлуатації дизелів різного призначення.

Головне завдання дисертаційного дослідження полягає в розробці методу і способу моніторингу процесу паливоподачі, що забезпечують підтримку специфікаційних характеристик процесу впорскування палива в експлуатаційних умовах.

Головне завдання розв'язане шляхом спільного виконання наступних допоміжних завдань:

- аналіз сучасних методів контролю робочих процесів дизелів, їхньої реалізації і вибору перспективного напрямку досліджень у рішенні головного завдання;
- розробка методології експлуатаційного контролю паливоподачі на базі комбінованих вимірювальних елементів;
- методологічна підготовка експериментального дослідження пропонованого рішення і забезпечення експерименту відповідною комплектацією стендового устаткування і метрологічною базою;
- конструктивна розробка натурального зразка запропонованого комбінованого вимірювального перетворювача в складі вимірювального комплексу;
- порівняльне експериментальне дослідження метрологічних характеристик вимірювального комплексу на базі комбінованого вимірювального перетворювача;
- розробка і комп'ютерна реалізація методики амплітудно-частотного аналізу метрологічних параметрів системи контролю на базі комбінованого вимірювального перетворювача;
- дослідження метрологічних характеристик системи і розробка рекомендацій із застосування пропонованого методу моніторингу паливоподачі в дизелях;
- розробка методу аналізу технічного стану паливної апаратури шляхом використання математичного моделювання процесу впорскування.

Об'єкт дослідження – процеси впорскування палива в суднових дизелях і їхній моніторинг в експлуатаційних умовах.

Предмет дослідження – метрологічні характеристики вимірювальної системи на базі комплексного перетворювача і можливості математичного моделювання для аналізу стану паливної апаратури.

Методи дослідження:

- пошук і тематичний аналіз у сучасному інформаційному просторі (при аналітичному аналізі наукових і практичних аспектів розв'язуваного завдання);
- експертна оцінка і дедукція (при виборі напрямку дослідження і розробці технологічної карти дослідження);
- розрахункові методики напружено-деформованого стану (при конструктивному пророблянні вимірювального перетворювача);
- фізичне моделювання (при дослідженні процесів паливоподачі і метрологічних характеристик вимірювальної системи);
- пряме й зворотне перетворення Фур'є (при аналізі метрологічних параметрів вимірювальної системи);
- вибір математичної фізики як області моделювання і рішення чисельним методом телеграфного рівняння для опису гідродинамічних процесів у системі паливоподачі;
- імітаційне моделювання на персональному комп'ютері експлуатаційних режимів системи впорскування палива для оцінки технічного стану паливної апаратури.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що конструктивні елементи паливної апаратури можуть служити вимірювальними перетворювачами для реєстрації гідродинамічних процесів у паливній апаратурі з амплітудно-частотними параметрами, що забезпечують якісну реєстрацію в умовах стабільного впорскування. Математична модель процесу на базі рівнянь математичної фізики може бути використана для експлуатаційного контролю і аналізу стану паливної апаратури дизеля.

У результаті дослідження вперше:

- запропоновано використовувати, як вимірювальні пристрої для системи впорскування палива дизелів, комбіновані перетворювачі на базі елементів приводу паливних насосів високого тиску;
- виконана розробка конструктивної схеми перетворювача, визначені базові метрологічні характеристики перетворювача і елементів комплексу, що реєструє;
- розроблено методику експериментального дослідження процесів паливоподачі із застосуванням дослідного вимірювального комплексу;
- отримані порівняльні експериментальні дані реєстрації гідродинамічних процесів за допомогою базових і експериментальних вимірювальних перетворювачів;
- визначені особливості реєстрації процесів впорскування палива при використанні комбінованого перетворювача;
- розроблена і реалізована у формі програмного продукту зі спеціалізованим інтерфейсом методика частотного аналізу даних реєстрації процесів паливоподачі на базі рядів Фур'є;
- на базі експериментальних даних отримані порівняльні частотні характеристики вимірювальних трактів із застосуванням базового і комбінованого перетворювачів;
- шляхом імітаційного моделювання отримані експлуатаційні характеристики паливоподачі при зміні стану елементів системи впорскування палива.

Одержали подальший розвиток:

- сфера використання розрахункових методів дослідження процесів паливоподачі на базі гідродинамічної теорії руху грузлої стисливої рідини в трубопроводах при початкових і граничних умовах, обумовлених конструктивними і режимними факторами для дизельної паливної апаратури;
- методи гармонійного аналізу в додатку до дослідження гідродинамічних процесів у системах дизелів.

Сукупність отриманих результатів дозволяє сформулювати **наукове положення**: конструктивні елементи деталей двигуна внутрішнього згоряння можуть використовуватися як комбіновані елементи з функціями вимірювальних перетворювачів у системах контролю робочих процесів і динаміки вузлів дизеля. Амплітудно-частотні параметри вимірювальних трактів систем на базі комбінованих перетворювачів забезпечують якість реєстрації близьку до прямих вимірів параметрів паливоподачі для всіх експлуатаційних режимів крім високочастотних дробових на малих подачах палива в системах впорскування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- запропоновано спосіб використання конструктивних елементів паливної апаратури дизелів у якості комбінованих вимірювальних перетворювачів для систем моніторингу двигунів внутрішнього згорання;
- визначені метрологічні характеристики вимірювальних систем на основі запропонованих перетворювачів;
- запропоновано спосіб аналізу стану паливної апаратури шляхом використання математичного моделювання процесу впорскування палива.

Окремі практичні результати дисертаційної роботи були використані в науковій та практичній діяльності:

- в НУ «ОМА» під час:

викладання дисциплін кафедри суднових енергетичних установок Суднові двигуни внутрішнього згорання і їх технічна експлуатація (акт використання від 26.06.19 р. -див. Додаток К);

- у ТОВ «Інтреско» під час експлуатаційних випробувань базового варіанту системи контролю на головних дизелях т/х «Тайфун» (акт використання від 03.07.19 р. -див. Додаток К).

Розрахований економічний ефект від використання системи контролю на базі розробленої у дисертаційній роботі на судах ТОВ «Інтреско» (акт використання від 03.07.19 р. -див. Додаток К).

Особистий внесок здобувача полягає в:

виконанні інформаційного пошуку і аналізу сучасного стану робіт в сфері моніторингу робочих процесів дизелів,

визначенні напрямку досліджень по темі дисертації,

розробці конструкції комбінованого вимірювального перетворювача,

підготовці й проведенні експериментального дослідження,

аналізі результатів експерименту і розробці рекомендацій з використання вимірювальних систем на базі комбінованих перетворювачів,

розробці методики амплітудно-частотного аналізу реєстрації процесу паливоподачі,

виборі методу і підготовці пакета моделювання процесу паливоподачі,

моделюванні процесу впорскування палива з метою оцінки стану паливної апаратури,

розробці рекомендацій з впровадження результатів дослідження в практику експлуатації суднових дизелів.

Сформульовано наукову новизну і наукове положення.

Основні дослідження з дисертації виконані автором особисто, а в окремих випадках у співавторстві його частка склала не менш ніж 70 %.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, окремі розділи і наукові результати доповідалися, обговорювалися і були схвалені на Міжнародних наукових і науково-технічних конференціях: Одеса: ОНМА «Енергетика судна: експлуатація та ремонт» (05.04.2011- 07.04.2011). Одеса: ОНМА, 2011. – С. 28 – 31; «Суднові енергетичні установки: Експлуатація та ремонт» (20.03.2013–22.03.2013). Частина І. – Одеса: ОНМА, 2013. –С. 13-14;

«Енергетика судна: експлуатація та ремонт» (26.03.2014 – 28.03.2014).

Частина I. – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 31 – 34; 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (28–29 вересня 2017 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 167-172; «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (22 – 23 березня 2018 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 14 – 20; «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (20 – 21 березня 2019 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С. 134 – 141; «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (18 – 19 березня 2020 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 136 – 143.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у: 7-ох статтях наукових видань [1–7], що входять до переліку наукових фахових видань України, рекомендованих Міністерством освіти і науки України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук; одна стаття у закордонному фаховому виданні [6]; у збірках матеріалів наукових конференцій — тез доповідей [8–14]. Також патент на корисну модель [15].

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 6 додатків; списку використаних літературних джерел з 132 найменувань. Повний обсяг роботи - 167 с., з яких основний текст - 106 с., у тому числі 59 рисунків, 1 таблиця, додатків - 42 с., список літератур-них джерел - 16 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладена актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання дослідження, відображені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведені дані апробації результатів дисертаційної роботи і публікації.

У першому розділі виконаний огляд наукових досліджень по темі дисертації і обраний напрямок досліджень.

У даній сфері працювали автори, дослідження яких розглянуті в огляді публікацій: Т. В. Алексеев, В. А. Амахин, В. Д. Бабанская, Т. М. Башта, Р. А. Варбанец, Ф. А. Васькевич, И. В. Возницкий., Л. В. Грехов, С. В. Данилов, В. Г. Ивановский, Ю. П. Макушев, А. А. Маркелов, Л. Ю. Михайлова, А. В. Неговора, А. А. Обозов, С. А. Пальтов, А. Ю. Самойленко, Е. И. Сковородников, В. И. Соловьёв, Б. Н. Файнлейб, В. А. Шишкин, Andy C. C., A. Albarbar, Bhavani Tripathy, C. Ludwig, David Toth, E. Kim, F. Gu, Marek T. Wlodarczyk, O. Chandroth, J. A. Steel, J. D. Gill, J. Powell, Kuratle R. H., Liangdao Xia, Märki B, R. Schwarz, R. L. Reuben, S. Leonhardt, T. Poorman, Tan and Joseph Mathew, Tian Ran Lin та інші.

Застосування технічного діагностування при експлуатації суднових дизелів являє собою комплексну проблему, рішення якої вимагає проведення досліджень, спрямованих на вивчення робочих процесів дизелів як об'єкта технічного діагностування, на розробку ефективних алгоритмів діагностування, на створення інструментальних засобів діагностування.

Із загальних позицій організації технічної діагностики інформацію про технічний стан системи визначають як різницю ентропії системи до і після одержання інформації. В якості основних властивостей сукупності діагностичних ознак розглядають інформаційну цінність, вагу і чутливість.

З урахуванням можливої несправності системи діагностування впливає, що при експлуатації має місце зниження експлуатаційної надійності об'єкта діагностування, у тому числі й за рахунок помилок системи контролю, що приводять до "помилкових" і "невиявлених" відмов.

Загальним у більшості методик обробки сигналів діагностичних параметрів є використання еталонних характеристик, розроблених для конкретних двигунів і певних умов їхньої роботи.

Інший напрямок у побудові діагностичних методик складається в застосуванні багатомірного (кореляційного й регресійного) статистичного аналізу, методів теорії інформації (інформаційної міри по Шеннону) і методів статистичної теорії розпізнавання образів (методи, в основі яких лежить теорема Байеса, що оцінює апостеріорну ймовірність появи статистичного об'єкта). Перераховані питання широко розглянуті в роботах А. А. Обозова і ін. Необхідний статистичний матеріал може бути отриманий шляхом статистичного моделювання робочого процесу на електронних обчислювальних машинах і шляхом натурних експериментів.

Як інструмент контролю робочих процесів використовуються нейронні технології. У результаті навчання нейронна мережа формує модель, що може бути використана для керування й діагностики. Авторами S. Leonhardt, C. Ludwig, R. Schwarz, Norbert Müller, Rolf Isermann запропонована схема контролю паливоподачі в дизелі, що використовує два входи: циклову подачу палива й кут впорскування. Вихідними сигналами є: крутний момент на валу двигуна, вміст сажі й характеристики відпрацьованих газів.

В процесі розробки й використання систем контролю вирішуються завдання апаратної реалізації й методології їхнього застосування.

До першої ставиться, у першу чергу, створення вимірювальних перетворювачів, що забезпечують прийняті метрологічні характеристики. Найбільш складною є проблема створення датчиків тиску газів у циліндрі, що працюють у динамічному режимі при високих температурах вимірюваного середовища.

Одним з напрямків сучасного розвитку методики й техніки контролю робочих процесів є вбудовування вимірювальних перетворювачів у конструктивні елементи двигунів. Цій проблемі присвячені дослідження Tom Roogman, Jacob Arnold, Terry Coleman, Marek T. Wlodarczyk. Так, у свічі накалювання встановлюють п'єзоелементи або оптичні перетворювачі на базі оптоволоконної технології.

При аналізі досліджень у системах контролю процесу паливоподачі й робочого процесу увага приділяється вірогідності параметрів, для яких характерна більша циклічність процесу, мала тривалість і високі швидкості зміни параметрів. Цим питанням присвячені дослідження В. А. Амахина, Ф. А. Васькевича, Kuratle R. H., Marki B.

Автори С. А. Пальтов, А. Ю. Самойленко, А. А. Обозов визначили, що ос-

новними елементами, що впливають на якість запису індикаторного процесу в циліндрі двигуна, є сполучний канал перетворювача з обсягом циліндра й коректність координаті робочих параметрів із ВМТ.

Певний інтерес викликає використання для реєстрації процесу паливоподачі акустичної й вібраційної інформації. Аналіз вібродіаграм, виконаний F. Gu, A. D. Ball, дає можливість оцінити фази паливоподачі за допомогою контактного вібродатчика.

Наведений аналіз сучасного стану проблеми контролю робочих процесів дизелів різного призначення дозволяє зробити наступні висновки.

Підвищення вимог до експлуатаційних характеристик дизелів призводить до розвитку додаткових методів керування робочими процесами. Це, у свою чергу, вимагає більше детального моніторингу й підвищення інформативності способів реєстрації й аналізу отриманих даних.

Одним з основних процесів, що визначають всі експлуатаційні характеристики дизелів, є впорскування палива в циліндр. В сфері його моніторингу залишаються невирішені проблеми, пов'язані з високою динамічністю й метрологічною складністю контролю паливоподачі.

Зважаючи на викладений огляд, основні дослідження дисертаційної роботи були спрямовані на вдосконалювання контролю й діагностики систем паливоподачі судових дизелів.

Розроблено технологічну схему досліджень.

У другому розділі висвітлені роботи, що виконані при розробці й комплектації елементів вимірювальної системи на основі конструктивного компонента паливної апаратури судового середньообертового дизеля й підготовці експериментального дослідження метрологічних характеристик цієї системи.

Програмою дослідження метрологічних властивостей системи контролю процесу впорскування на базі розробленого комбінованого датчика тиску палива в ПНВТ були передбачені випробування на безмоторному стенді. Із цією метою був здійснений аналіз сучасних вимірювальних компонентів і підібрані складові вимірювального комплексу.

Основна увага була приділена розробці вимірювального перетворювача на основі конструктивних елементів паливної апаратури. З раніше розглянутих фізичних принципів датчиків перевага віддана дровим тензометричним. Крім високих метрологічних характеристик їм властива технологічність, невисока вартість і доступність.

Більш детально розглянуті метрологічні характеристики дрових перетворювачів. Зокрема визначені частотні параметри.

Використовуючи залежність власної частоти перетворювача від величини його бази l і швидкості деформації v , визначена припустима гранична частота вимірюваного процесу

$$f = \frac{v}{\pi \cdot l} \sqrt{6 \cdot \Delta \epsilon}, \text{ c}^{-1}$$

де $\Delta \epsilon$ — відносне відхилення величини деформації (на відстані $l/2$ від середини ґратівниці) від величини відносної деформації для центра ґратівниці.

Так, при зміні деформації по синусоїді й $\Delta \epsilon = \pm 2 \%$, $l = 10$ мм (пружний

елемент – сталевий, $\nu = 5000$ м/с), припустима частота вимірюваного процесу становить приблизно 55100 с⁻¹, що забезпечує якісну реєстрацію гідродинамічних процесів у паливній апаратурі.

Для реєстрації тиску палива в системі впорскування й підйому голки форсунки на кафедрі СЕУ НУ «ОМА» (ОНМА) розроблені й проведені метрологічні випробування відповідних датчиків.

Дротові тензогратівниці датчиків тиску палива є перетворювачами параметричними, тому для них необхідне джерело живлення. Оскільки досліджувані за допомогою цих перетворювачів процеси можуть містити й змінні й постійну складові частотного спектра, то живлення перетворювачів здійснюється змінним струмом.

Принципова блок-схема такого приладу, призначеного для роботи з датчиком, чутливим елементом якого є дротові перетворювачі, наведена на рис. 1.

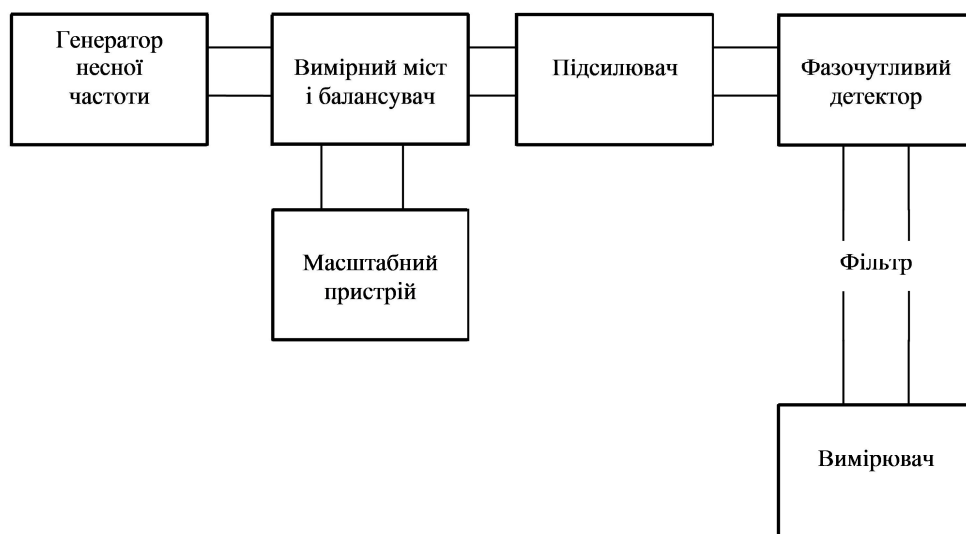


Рис.1. Блок-схема приладу, що працює із дротовими перетворювачами на несній частоті

Сумарна відносна похибка виміру визначена таким чином

$$\delta_{\Sigma} = 2\delta_{\Gamma} + \delta_0 + \delta_1 + \delta_A + \delta_{\lambda}$$

де δ_{Γ} – похибка гальванометра осцилографа; δ_0 – похибка при обробці тарировальних осцилограм; δ_1 – похибка при обробці осцилограм досліджуваного процесу; δ_A – похибка, обумовлена нелінійністю амплітудної характеристики вимірювального каскаду; δ_{λ} – похибка, обумовлена нелінійністю амплітудно-частотної характеристики вимірювального каскаду.

З урахуванням цих складових основної похибки загальна погрішність буде складати $\delta_{\Sigma} = 4,7\text{--}5,0$ %. Практично ж загальна похибка при вимірі нестационарних тисків у паливному трубопроводі високого тиску, як показує досвід, не перевищує 3%.

Всі дослідження проведені на паливній апаратурі суднового середньооборотного дизеля ЧН25/34.

Загальна схема стендової паливної системи з вузлами системи впорскування наведена на рис. 2. Деякі елементи із загальної комплектації в даному дослідженні не використані.

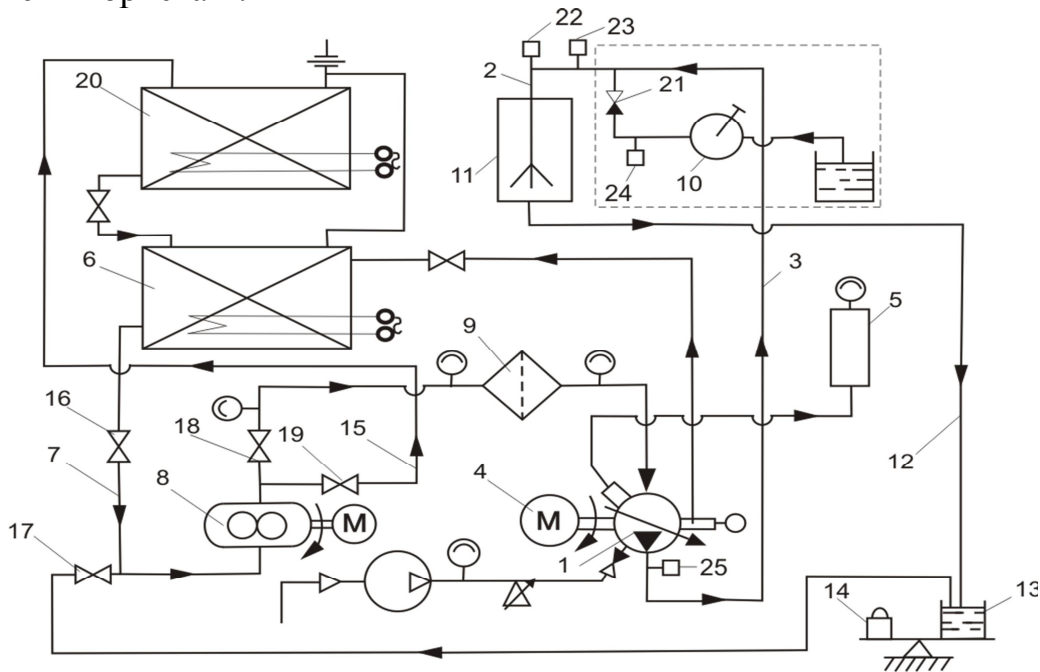


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 - паливний насос високого тиску; 2 - форсунка; 3 - паливопровід високого тиску; 4 - електродвигун; 5 - демпфер; 6 - видаткова цистерна легкого палива; 7, 12, 15 - паливний трубовід; 8 - паливо підкачувальний насос; 9 - фільтр; 10 - ручний насос високого тиску; 11 - глушник; 13 - ємність; 14 - ваги; 16-19 - вентилі; 20 - цистерна; 21 - блок регулювання залишкового тиску; 22 - датчик підйому голки; 23 - датчик тиску палива перед форсункою; 24 - датчик тиску палива в блоці регулювання залишкового тиску; 25 - датчик тиску палива після ПНВТ

Паливний насос високого тиску 1 і форсунка 2 з'єднані паливопроводом високого тиску 3. Привід ПНВТ здійснюється за допомогою електродвигуна 4. Для гасіння коливальних процесів у системі, викликаних роботою ПНВТ, передбачений демпфер 5. Це дозволило вимірювати базове значення тиску в порожнині відсічення-усмоктування ПНВТ манометром. Паливо до ПНВТ подається з видаткової цистерни палива 6 по паливопроводу 7 паливопідкачувальним насосом 8 через фільтр 9.

Під час дослідження на безмоторному стенді вимірювальний комплекс був призначений для запису параметрів паливоподачі системами різної комплектації, зокрема, тисків робочих тіл, фазових і лінійних параметрів елементів паливної апаратури.

На безмоторному стенді забезпечене осцилографування процесу паливоподачі й вимір циклової подачі $q_{\text{ц}}$. Під час осцилографування можлива реєстрація наступних параметрів: тиску палива у форсунці $p_{\text{ф}}$; тиску палива в насосі $p_{\text{н}}$; тиску відсічення палива $\Delta p_{\text{отс.}}$; залишкового тиску палива $p_{\text{т}}$; кута початку впорскування $\varphi_{\text{н}}$; кута кінця впорскування $\varphi_{\text{к}}$; кута впорскування $\varphi_{\text{вп}}$.

Фазові параметри $\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{к}}$, орієнтовані на умовну оцінку ВМТ розподільного вала.

Третій розділ присвячений розробці й дослідженню метрологічних властивостей вимірювальної системи на базі комбінованого датчика тиску палива.

Ідея використання як первинних перетворювачів конструктивних елементів паливної апаратури покликана забезпечити оптимальну реалізацію методів контролю процесів паливоподачі.

У результаті аналізу конструкції ПНВТ і його приводу, як деталь, придатна для використання в ролі первинного перетворювача тиску, визнана шпилька кріплення приводу й насоса до полиці розподільного вала. Креслення препарованої шпильки для монтажу дровових ґратівниць наведено на рис. 3.

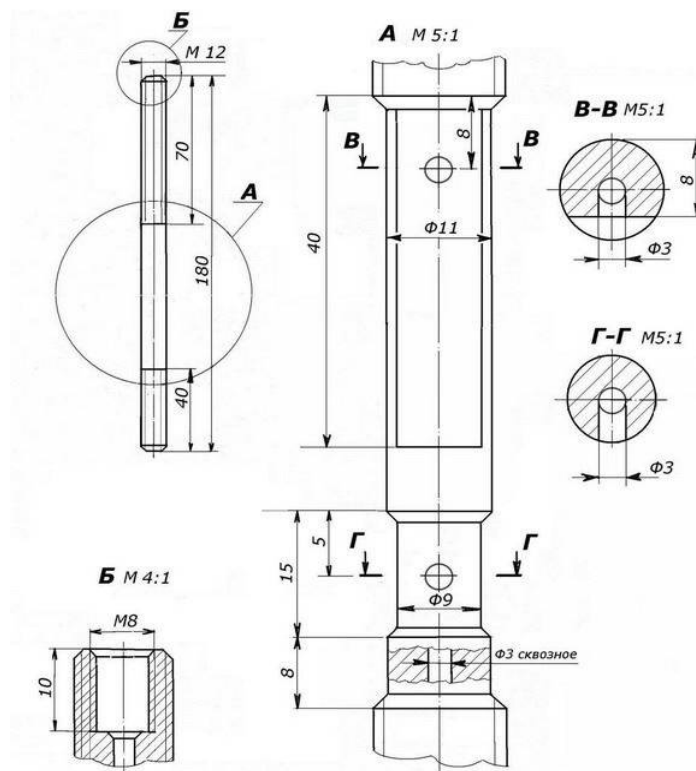


Рис. 3. Шпилька, препарована для монтажу тензорезисторів

Було виконане попереднє пророблення комплектації вимірювальної системи з комбінованим датчиком на базі шпильки («шпилька-датчик» - «Ш-Д») наведено на рис. 4.

Проведено оцінку метрологічних параметрів вимірювального комплексу, що включає деформований елемент, тензометричний перетворювач (дротовий тензодатчик), тензометричний підсилювач і блок, що реєструє (гальванометри в складі променевого осцилографа). Всі елементи системи перевірені на відповідність умовам реєстрації тиску палива в ПНВТ.

Зокрема, робоча напруга датчика «Ш-Д» склала 23 МПа, що відповідає відносній деформації $\delta = 0,118 \cdot 10^{-3}$. Дані параметри перебувають у межах пружної деформації матеріалу, забезпечуючи якісний запис реєстровуваного процесу.

Як підсилювачі в системі використалися тензостанції типу ТА-5 і 8АНЧ-7М. Діапазон вимірюваних деформацій становить для них

$\delta_{\text{тстс}} = (0,25 - 10,0) \cdot 10^{-3}$ і $\delta_{\text{тс}} = (0,5 - 5,0) \cdot 10^{-3}$ відносних одиниць (во) відповідно, що в повній мірі задовольняє параметрам вимірювального перетворювача.

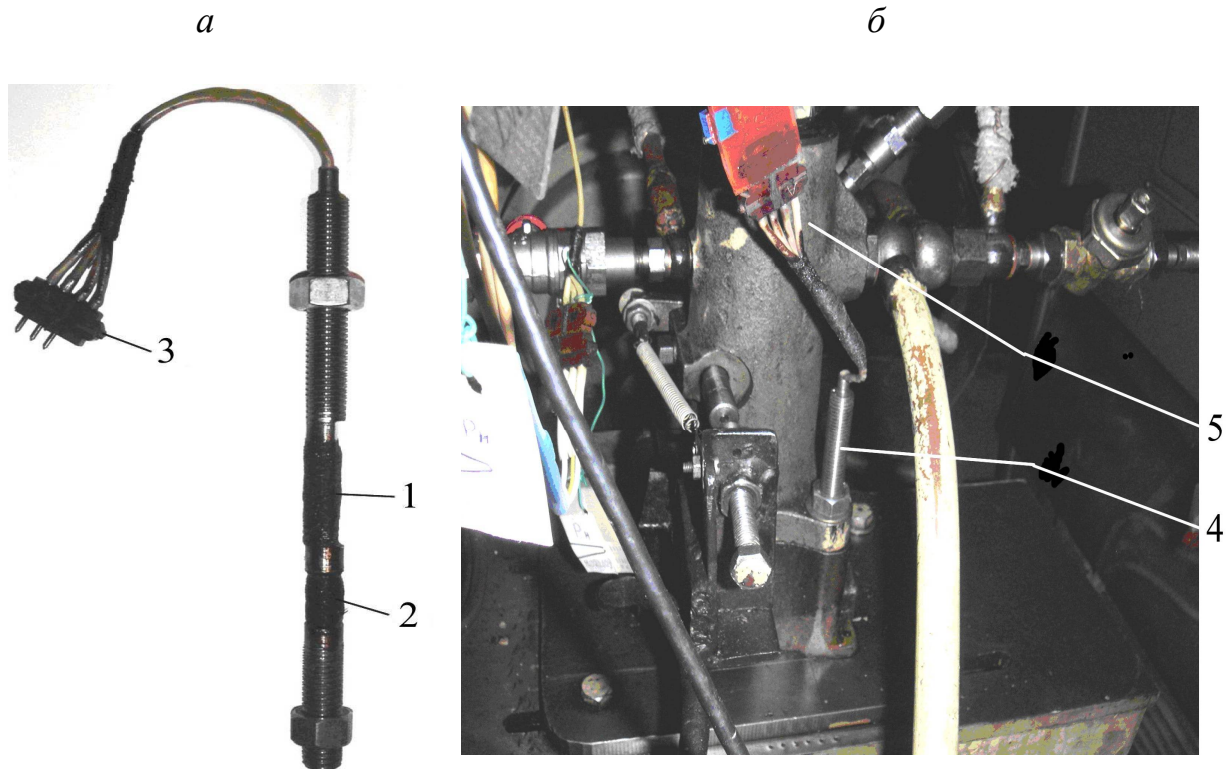


Рис. 4. Комбінований датчик (а) тиску палива «Ш-Д» і його розташування (б) на ПНВТ безмоторного стенда:

1- активні датчики, 2- компенсаційні датчики, 3- електричний роз'єм, 4 - датчик-шпилька, 5 - ПНВТ

Два інших параметри, що визначають метрологічні властивості: межа пропорційності матеріалу перетворювача й робочі діапазони дровових ґратівниць датчиків, також відповідають вимогам системи й становлять, відповідно, $\delta_c = 0,8 \cdot 10^{-3}$ і $3,0 \cdot 10^{-3}$ во.

Після комплектації вимірювальної системи й настроювання стенда проведене осцилографування тиску палива двома датчиками: звичайним тензометричним, встановленим на штуцері ПНВТ (тиск p_n) і датчиком «Ш-Д» (тиск $p_{ш}$). Копії осцилограм представлені на рис. 5.

Режими, на яких проводилися випробування, відповідають повному діапазону робочих частот ($33 \div 248$ хв⁻¹) обертання розподільного вала двигуна з істотним перекриттям мінімальної частоти.

Для візуального порівняльного аналізу якості реєстрації тиску палива проведене зіставлення запису тиску базовим датчиком у штуцері ПНВТ p_n і датчиком «Ш-Д» $p_{ш}$. Детально розглянуті осцилограми (рис. 5) із крайніми частотами обертання розподільного вала, на яких спостерігався стабільний режим впорскування.

На номінальному режимі (рис. 5,а) відзначена реакція датчика «Ш-Д» на появу додаткового навантаження на початку руху плунжера ПНВТ. Цьому від-

різку на осцилограмі відповідає незначний підйом кривої. Швидкий ріст тиску фіксується обома датчиками синхронно.

Таким чином, істотних відмінностей у записі процесу паливоподачі на режимах стабільного впорскування обома типами датчиків не спостерігається.

Що стосується дрібного впорскування палива (рис. 5,б), то розходження в кривих більш істотно. Природно думати, що система, елементом якої є датчик «Ш-Д», робить дію, що демпфує, згладжуючи реакцію на зміну тиску палива.

При цьому, однак, частота процесу зберігається. Форма ліній p_n і $p_{ш}$ відрізняється істотно.

При аналізі умов роботи датчика «Ш-Д» логічно припустити, що комбінований датчик сприймає деформацію корпусних деталей стенда. Для перевірки даного положення записана обома датчиками вібрація стенда після ударного навантаження плити, на якій змонтовані підшипники розподільного вала. Прикладене навантаження значно перевищує динамічну складову робочих зусиль.

Ця осцилограма (рис. 6) підтверджує попередню оцінку метрологічних особливостей датчика «Ш-Д». Дійсно, якщо лінія p_n ніяк не відбиває коливання стенда після удару, то на кривій $p_{ш}$ записана інтенсивна загасаюча вібрація.

Отже, датчик «Ш-Д» реагує на деформацію деталей стенда. У той же час, для оцінки впливу цього факту на кінцевий результат запису, необхідний більш докладний аналіз співвідношення «сигнал-шум» при робочих параметрах. Такий аналіз проведений далі.

Таким чином, на режимах стабільного впорскування датчик тиску й датчик деформацій мають близькі метрологічні характеристики.

При дрібному впорскуванні палива запис за допомогою датчика «Ш-Д» істотно відрізняється від процесу, фіксуемого в ПНВТ, через демпфуючу дію деталей, пов'язаних з передачею зусиль від тиску палива на шпильку.

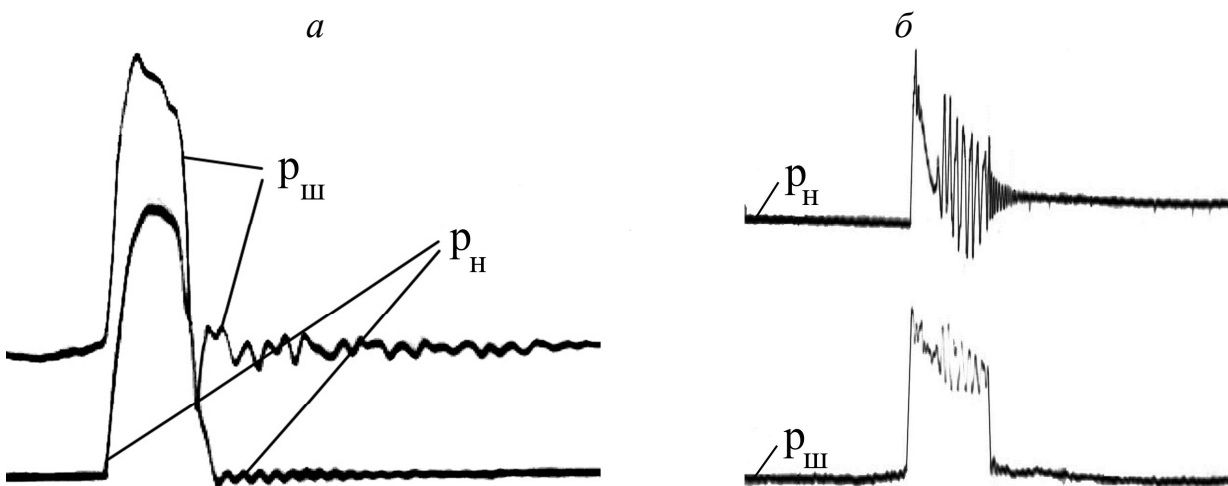


Рис. 5. Осцилограма паливоподачі:
а – при $n_p = 248 \text{ хв}^{-1}$, $m = 32$; б – при $n_p = 33 \text{ хв}^{-1}$, $m = 32$

Як додатковий результат можна розглядати використання датчика «Ш-Д» для запису вібрації двигуна в місці установки комбінованого датчика при відключенні паливоподачі або в періоди між впорскуванням палива.

Більш детальне дослідження метрологічних характеристик вимірювальної системи на базі датчика «Ш-Д» поставило вимогу створення програмного комплексу, що забезпечує амплітудно-частотний аналіз даних вимірів.

З метою проведення такого аналізу для розглянутої системи підготовлена методика, розроблені алгоритм і програма гармонійного аналізу по методу Фур'є. Значна увага приділена створенню інтерфейсу з пакетом, що забезпечує оптимальний режим його використання.

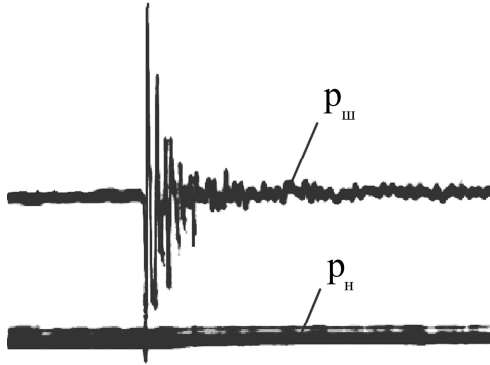


Рис. 6. Осцилограма вібрації стенда

У багатьох випадках, подібно розглянутому даним, вихідна функція $f(x)$ задається у вигляді таблиці або у вигляді графічної кривої. У цьому варіанті використане наближене подання періодичної функції $f(x)$ тригонометричним багаточленом виду

$$s_n = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)),$$

а коефіцієнти Фур'є обчислені за допомогою наближеного методу інтегрування – формули прямокутників;

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k, \quad a_k = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n y_k \cos(kx_k), \quad b_k = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n y_k \sin(kx_k), \quad c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2},$$

де a_0, a_k, b_k – коефіцієнти Фур'є.

Оскільки вихідна функція в цьому випадку представлена у вигляді дискретного кінцевого набору даних, то зроблене перетворення є дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ).

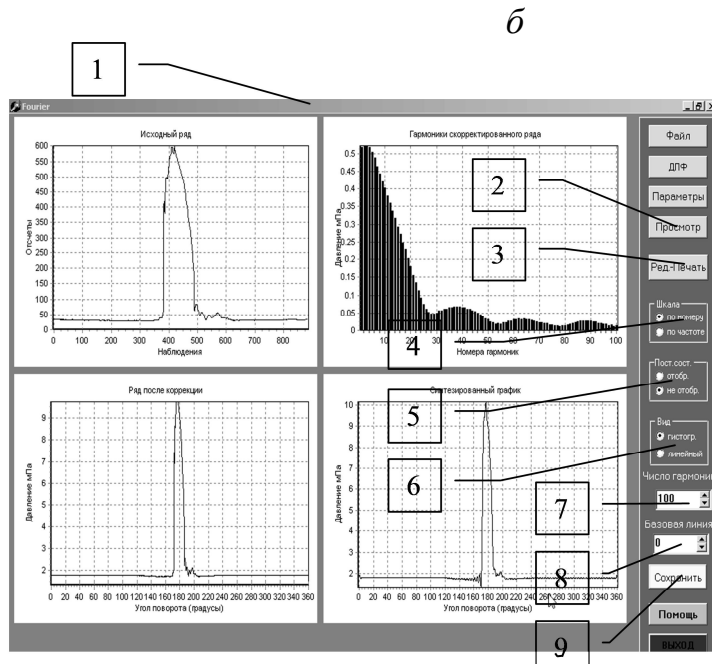
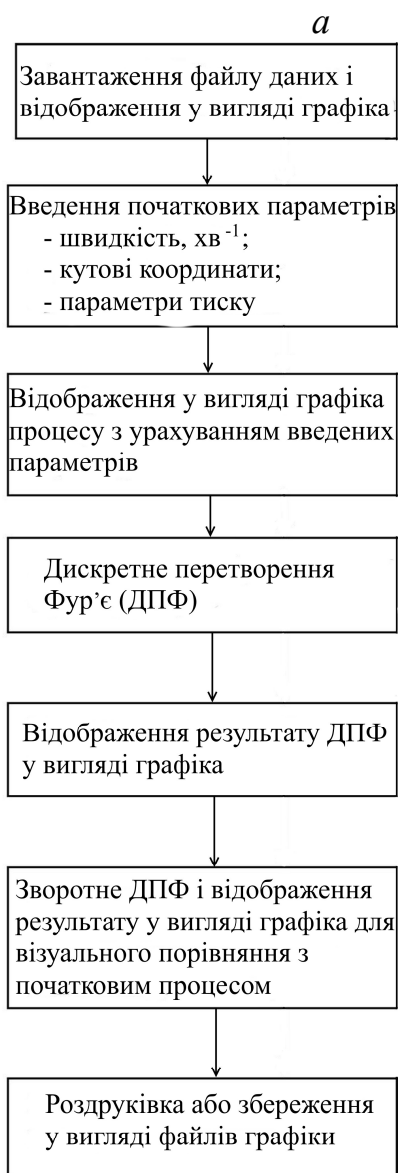
Алгоритм створеного пакета передбачає виконання спектрального аналізу періодичних процесів, представлених у вигляді дискретного ряду з повною довжиною не більше 20000 точок. Результат роботи програми - графік амплітуд гармонійних складових, причому число аналізованих гармонік встановлюється користувачем у діапазоні 1–500.

Програмою виконується дискретне перетворення Фур'є з виведенням результату у вигляді графіка амплітуд спектральних складових на екран, а потім зворотне перетворення Фур'є також з виведенням графіка функції на екран.

Блок-схема пакета наведена на рис. 7, а.

Програма дозволяє оперативно міняти число гармонік, що обчислюють, вид графіка відображення спектра, подання спектра у вигляді залежності від частоти або по номерах гармонік, відображати чи ні постійну складову, а також виводити на роздрук або зберігати у вигляді електронної копії (рисунку формату *.bmp) з можливістю редагування будь-якого графіка.

Графічний інтерфейс із обробленими даними метрологічних характеристик системи на базі датчика «Ш-Д» показаний на рис. 7, б.



1- вид на екран монітора після натискання кнопки 'ДПФ'; 2- кнопка 'Перегляд', викликає на екран вікно для перегляду числових значень скоригованого ряду і гармоник; 3-кнопка "Ред-Печать" викликає діалогове вікно для вибору графіка для редагування і друку або для запису файлу гармоник; 4-перемикач виду відображення для абсцис шкали гармоник; 5-перемикач вибору відображення постійної складової; 6-перемикач вибору відображення графіка гармоник; 7-вікно введення числа розраховуваних гармоник (за замовчуванням-100); 8- вікно введення постійної складової; 9 - кнопка "Сохранить" дозволяє зберегти обраний графік в електронному вигляді як файл рисунку формату *.bmp.

Рис. 7. Блок-схема (а) програми гармонічного аналізу й графічний інтерфейс (б) метрологічних характеристик системи на базі датчика «Ш-Д»

Графічне подання даних гармонічного аналізу, виконаного з використанням описаних вище засобів, показане на рис. 10÷14.

З них перші три рисунки містять інформацію з режиму із частотою обертання розподільного вала $n_p = 46 \text{ хв}^{-1}$ і виходом рейки $m = 27 \text{ мм}$. Запис тиску палива проведений синхронно двома датчиками: базовим p_n , підключеним до штуцера ТНВД (рис. 9), і комбінованим "Ш-Д" - $p_{ш}$ (рис. 8 і рис. 10).

Для порівняння двох варіантів виведення даних на рис. 8 і рис. 10, що належать до одного набору параметрів, графіки гармоник представлені у формі оригінальної кривої (рис. 8) і гістограми (рис. 10). Основна інформація тут показана у вигляді оригінальної дискретного ряду. Цей підхід визначений необхідністю додаткової побудови суміщених характеристик.

Пріоритетним завданням проведеного дослідження з використанням частотного аналізу є зіставлення амплітудно-частотних характеристик запису тис-

ку палива двома типами датчиків при рівнозначних параметрах інших елементів вимірювальної схеми.

Для розглянутого режиму таке зіставлення проведено за допомогою рис. 8 і рис. 9. Співвідношення кривих, що представляють початковий ряд, після корекції (протягом періоду) і синтезований графік відповідають проведеному аналізу осцилограм. Можна лише відзначити, що синтезовані криві практично збігаються з початковими.

Амплітудно-частотні параметри в запису $p_{ш}$ (рис. 8) і $p_{н}$ (рис. 9) мають деякі розходження. По амплітудах гармонік в області мінімальних частот, $p_{ш}$ трохи вище. Зона початкового масиву, навпаки, вужче. Так, низькочастотна смуга в $p_{ш}$ обмежена мінімумом номерів гармонік, що відповідають порядку 28, а $p_{н}$ - порядку 34.

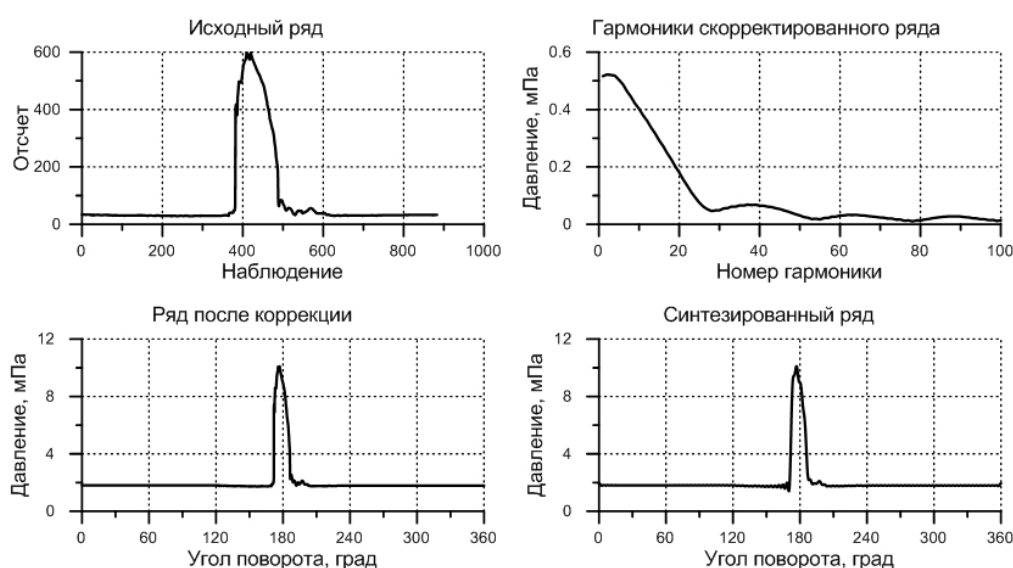


Рис. 8. Гармонічний аналіз запису тиску палива $p_{ш}$ комбінованим датчиком Ш-Д: $n = 46 \text{ хв}^{-1}$, $m = 27$

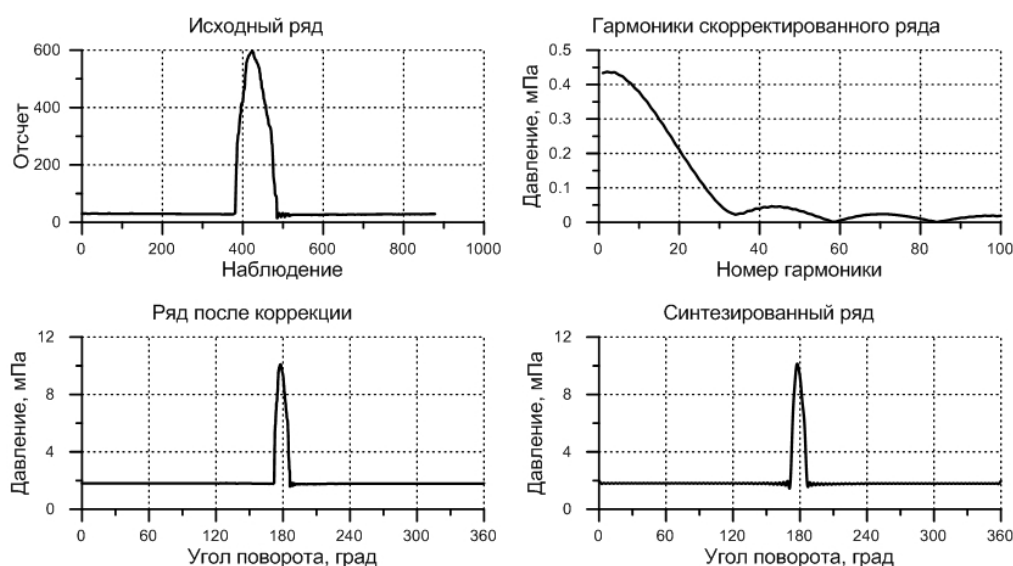


Рис. 9. Гармонічний аналіз запису тиску палива $p_{н}$ базовим датчиком: $n = 46 \text{ хв}^{-1}$, $m = 27$

Для більш високих порядків (графіки включають максимально 100 гармонік) форма й амплітудні величини для обох варіантів запису близькі. Граничні значення періодичних залежностей зміщені в більшу сторону (на 3-5 порядків) в p_n .

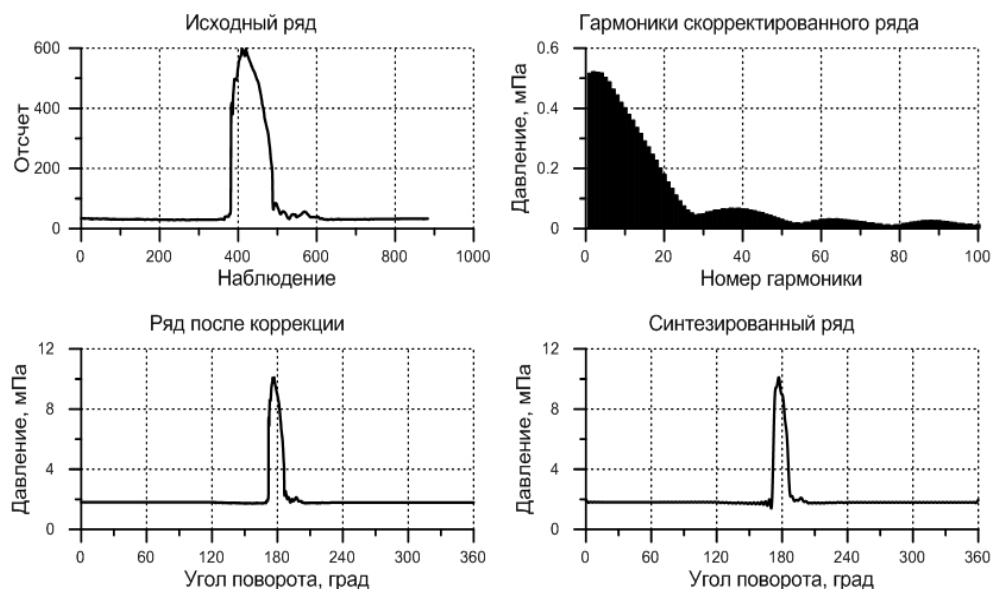


Рис. 10. Гармонічний аналіз запису тиску палива $p_{ш}$ комбінованим датчиком Ш-Д у вигляді гістограми: $n = 46 \text{ хв}^{-1}$, $m = 27$.

На рис. 11 і рис. 12 наведений аналіз осцилограм дрібного упорскування. Такий характер процесу отриманий шляхом збільшення затягування пружини форсунки.

Різна форма вихідних кривих відбита й у даних гармонічного аналізу. При невеликій різниці в максимальних значеннях амплітуд розподіл їх по частотах відрізняється більш істотно. На графіку p_n є безперервна область аж до 84 гармоніки, в $p_{ш}$ у діапазоні 20-84 виділяються три окремі ділянки у формі загасаючих коливань із періодом в 20 порядків.

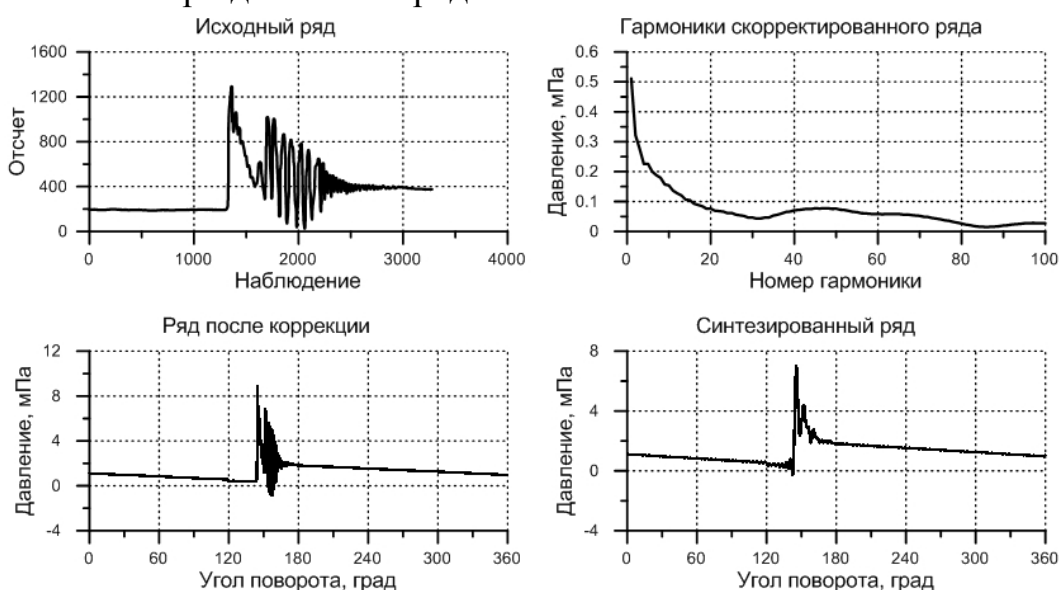


Рис. 11. Гармонічний аналіз запису тиску палива p_n базовим датчиком: $n = 33 \text{ хв}^{-1}$, $m = 32$

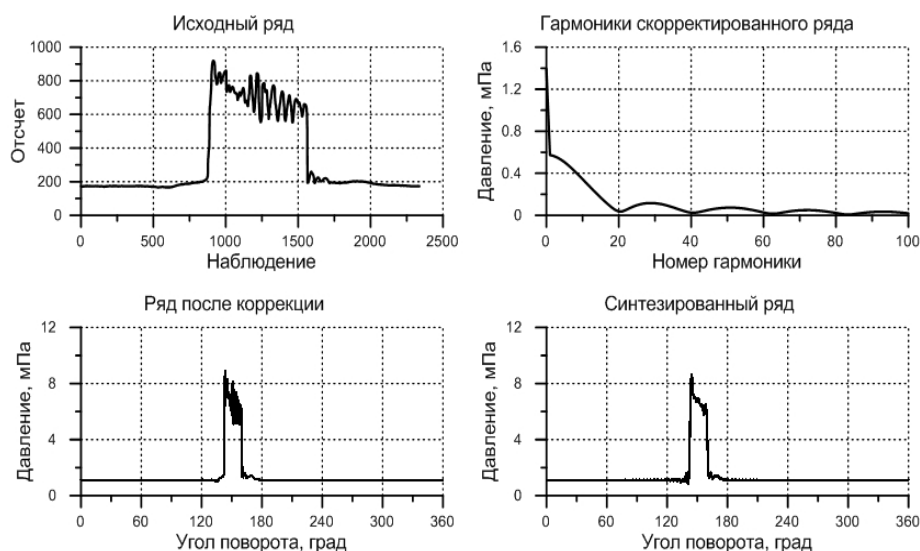


Рис. 12. Гармонічний аналіз запису тиску палива $p_{ш}$ комбінованим датчиком Ш-Д:
 $n = 33 \text{ хв}^{-1}$, $m = 32$

Графіки на рис. 13 і рис. 14 відповідають номінальній частоті обертання вала. Більш плавний характер початкової кривої p_n відбивається й на амплітудно-частотній характеристиці цього запису. Область діючих гармонік обмежена 34 порядком, у той час як для $p_{ш}$ відповідний діапазон набагато ширше - до 80 порядку. Природно при цьому, що максимум амплітуд вище в p_n .

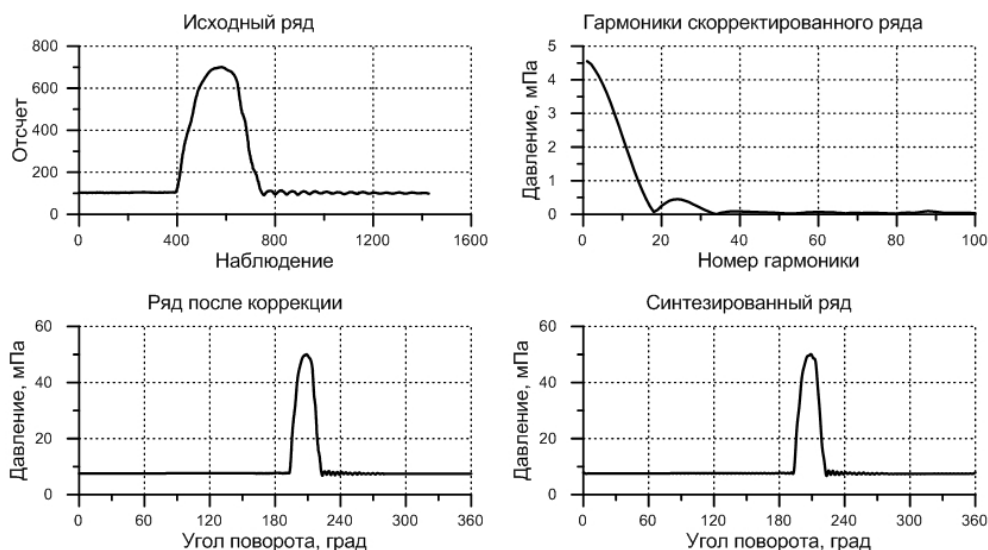


Рис. 13. Гармонічний аналіз запису тиску палива p_n базовим датчиком:
 $n = 248 \text{ хв}^{-1}$, $m = 32$

Таким чином, результати частотного аналізу підтвердили дані, отримані порівнянням осцилограм. Амплітудно-частотні параметри запису обома датчиками не мають істотних відмінностей на всіх режимах за винятком дрібного упорскування. На цьому режимі при мінімальній частоті обертання вала, рівної 33 хв^{-1} , спостерігається найбільша розбіжність при 2 Гц.

Розроблені програмні засоби гармонійного аналізу дозволили провести порівняння частотних характеристик у графічній формі. Таке подання

інформації наведено на рис. 15.

На кожному графіку показані три криві. Дві відносяться до оригінальних амплітуд частот для різних датчиків (p_n і $p_{ш}$), а третя відповідає їхній різниці – ($p_n - p_{ш}$).

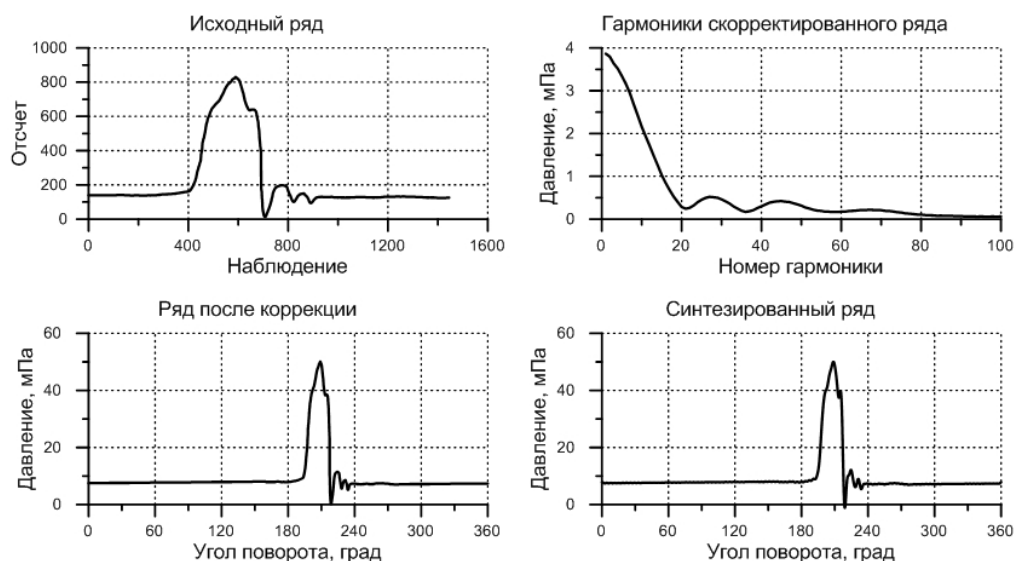


Рис. 14. Гармонічний аналіз запису тиску палива $p_{ш}$ комбінованим датчиком Ш-Д: $n = 248 \text{ хв}^{-1}$, $m = 3$

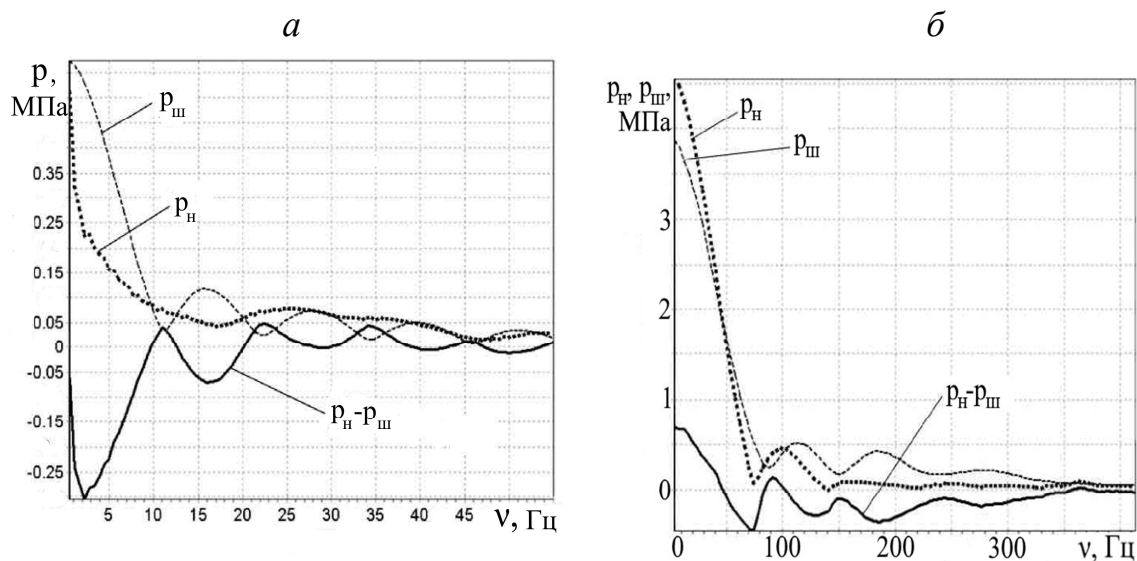


Рис. 15. Порівняння частотних характеристик p_n і $p_{ш}$:
а - при $n = 33 \text{ хв}^{-1}$; б - при $n = 248 \text{ хв}^{-1}$

Найбільш істотним є розходження в параметрах на частоті обертання $n = 33 \text{ хв}^{-1}$. Максимальна розбіжність відноситься до 2 Гц, що відповідає гармоніці 4 порядку. Починаючи із частоти $f = 10 \text{ Гц}$, амплітудні значення гармонік обох датчиків відрізняються незначно.

З підвищенням частоти обертання частотні параметри датчиків зближаються й значного розходження немає. Що стосується частотного діапазону розглянутих гармонік, то він розширюється з ростом частоти обертання.

Якісно ця тенденція справедлива й на номінальному режимі $n = 248 \text{ хв}^{-1}$. Криві p_n і $p_{ш}$ відрізняються незначно, змінюється лише знак різниці. Діапазон істотних частот продовжує розширюватися й становить 70 Гц.

Для аналізу метрологічних особливостей запису тиску за допомогою датчика «Ш-Д» на стенді була проведена оцінка впливу власних коливань елементів, що беруть участь у передачі зусилля від тиску палива в ПНВТ до «Ш-Д». Логічним є викликати ці коливання незалежним джерелом - за допомогою ударного навантаження.

Частотний діапазон для аналізу був встановлений зі значним запасом стосовно режиму максимальної частоти обертання (перевищення більш ніж у два рази). Запис тиску $p_{ш}$ є сумарним від дії тиску палива й впливу власних коливань і в ньому не проглядається впливу власних коливань на тиск $p_{ш}$, що свідчить про незначну амплітуду гармонік власних коливань.

Четвертий розділ присвячений розробці методики експлуатаційного контролю процесу впорскування й технічного стану паливної апаратури дизелів. Реалізовано концепцію імітаційного моделювання для ідентифікації характеристик паливоподачі при зміні стану елементів систем паливоподачі.

Для імітаційного моделювання паливоподачі як базова модель був використаний гідродинамічний метод розрахунку процесу впорскування Ю.Я. Фоміна, що базується на рівняннях руху стисливого в'язкого палива, у яких ураховується гідравлічний опір нагнітального паливопроводу.

При розрахунку гідравлічного опору рух в'язкого палива в нагнітальному паливопроводі визначається системою наступних наближених диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + 2\rho k u &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{a^2 \rho} \frac{\partial p}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

де p і u – тиск і швидкість руху палива в паливопроводі; x – координата довжини нагнітального паливопроводу від його початку; k – фактор гідравлічного опору; ρ – густина палива; t – час; a – швидкість розповсюдження збурень по паливопроводу.

Система рівнянь перетворюється до виду, зручному для проведення розрахунку процесу впорскування. У результаті маємо так зване телеграфне рівняння

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{2k}{a^2} \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

Рішення наведеного рівняння виконується різницеvim методом у прямокутній сітці-таблиці.

Базові рівняння граничних умов для паливної системи представляють рівняння суцільності потоку, тобто об'ємний баланс у порожнині ПНВТ, у штуцері нагнітального клапана й у форсунці.

Для порожнини ПНВТ

$$\alpha V_n \frac{dp_n}{dt} = f_0 \frac{dh}{dt} - \beta f_k \frac{dy}{dt} - \gamma \mu_{0.6} f_{0.6} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p_{ec}} - \delta \mu_{uc} f_{uc} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p'_n};$$

для штуцера

$$\alpha V'_n \frac{dp'_n}{dt} = \beta f_k \frac{dy}{dt} + \delta \mu_{uc} f_{uc} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_n - p'_n} - f_0 u_0;$$

для форсунки

$$\alpha V_\phi \frac{dp_\phi}{dt} = f_T u_L - \varepsilon f_u \frac{dz}{dt} - \varsigma \mu_c f_c \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{p_\phi - p_u},$$

де p_{ec} , p_n , p'_n , p_ϕ – відповідно, тиск палива в усмоктувальній порожнині ПНВТ, у порожнині над плунжером, у штуцері, у камері розпилювача; h – хід плунжера ПНВТ; y – підйом нагнітального клапана; f_{uc} – площа прохідного перетину нагнітального клапана при його підйомі; μ_{uc} – коефіцієнт витрати палива через прохідну щілину між нагнітальним клапаном і його сідлом; $\mu_{uc} f_{uc}$ – ефективний перетин нагнітального клапана; $\mu_{0.6} f_{0.6}$ – ефективний перетин всмоктувальних і відсічних вікон плунжерної втулки; $\mu_c f_c$ – ефективний перетин розпилювача;

V_n , V'_n и V_ϕ – відповідно, обсяг порожнини над плунжером, у штуцері і камері розпилювача форсунки; f_u – площа поперечного перерізу голки форсунки.

Як об'єкт дослідження прийнята паливна апаратура суднового середньо-обертового двигуна ЧН25/34, що використалася й при експериментальних дослідженнях.

Для оцінки ефективності імітаційного моделювання при аналізі даних поточного контролю процесів впорскування проведені розрахунки паливоподачі при різних значеннях ефективного перетину розпилювача форсунки.

Імітаційне моделювання проведене в діапазоні від 0,6 до 1,6 від номінального значення ефективного перетину розпилювача $\mu_c f_c$. При базовій величині $\mu_c f_c = 0,589 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, це склало $(0,353 - 0,942) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Результати проведеного дослідження представлені в графічній формі на рис. 16.

Побудова графіків виконана в пакеті Grapher10, розробленого при виконанні дисертаційної роботи.

З початком підйому голки спостерігається істотне розходження в ході подальшої зміни тиску у форсунці. Поперше, характерне для систем безпосередньої дії короточасне припинення наростання тиску й одночасне його падіння більш інтенсивне для збільшеного $\mu_c f_c$. Подруге, що більш істотно, більша частина основного впорскування відбувається при незначних коливаннях тиску. Характеристика впорскування близька до процесу в акумуляторній системі.

Крива тиску при мінімальній величині $\mu_c f_c$ характерна для систем безпосередньої дії. Можна відзначити лише наявність пологого переднього й крутого заднього фронту на кривій p_ϕ . Загальною порівняльною оцінкою розвитку про-

цесу у форсунці є значне підвищення максимального тиску й сумарної енергії, підводжуваної до палива.

Сказане близько й до процесу в ПНВТ. Природним є зсув по куту збурювань, що приходять від форсунки, і також згладжений характер коливань тиску.

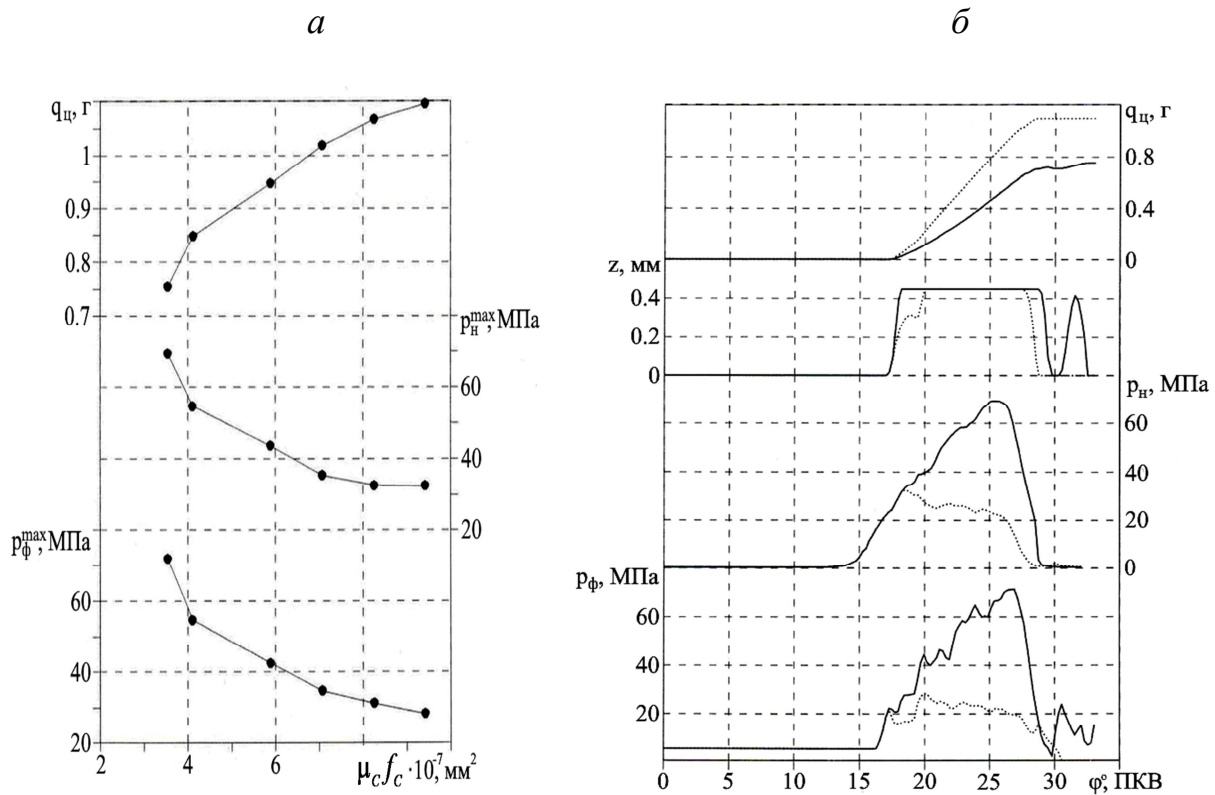


Рис. 16. Залежність параметрів паливopодачі від величини ефективного перетину розпилювача (а) і осцилограма паливopодачі (б) при різних величинах $\mu_c f_c$:

..... $\mu_c f_c = 0,942 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; — $\mu_c f_c = 0,353 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

Що стосується руху голки, то очікуваним є скорочення кута впорскування при зростанні $\mu_c f_c$ і поява підвпорскування палива у варіанті мінімального ефективного перетину розпилювача.

Таким чином, розроблена методика дозволяє оцінювати вплив експлуатаційних факторів на характеристики процесу впорскування палива в дизелях з використанням математичних моделей і імітаційного моделювання паливopодачі. На прикладі розпилювача форсунки показана можливість аналізу впливу зміни його стану на процес паливopодачі. Отримано кількісні характеристики зміни параметрів впорскування при загорянні й зношуванні соплових отворів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на рішення науково-прикладного завдання - підвищенню ефективності експлуатації суднових дизелів шляхом забезпечення специфікаційних показників протягом життєвого циклу за рахунок контролю й керування процесами впорскування палива, із застосуванням розробленого в дисертації методу реєстрації впорскування комбінованими вимі-

рювальними перетворювачами й ідентифікації якості процесу з використанням математичних моделей.

У дисертації це завдання вирішене шляхом застосування систем діагностики на базі комбінованих перетворювачів, що використовують для виміру конструктивні елементи паливної апаратури.

Розроблена й реалізована в дослідному зразку система реєстрації процесу впорскування забезпечує безперервний контроль за роботою паливної апаратури і створює можливість постійного автоматизованого аналізу її стану. Детальне дослідження показало, що метрологічні характеристики системи на основних експлуатаційних режимах рівноцінні традиційним пристроям із прямим виміром тиску. Останні, однак, не знаходять широкого застосування в експлуатації.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є створення способу контролю процесу впорскування палива, що використовує конструктивні елементи паливної апаратури у якості комбінованих вимірювальних перетворювачів. Амплітудно-частотні параметри вимірювальних трактів систем на базі комбінованих перетворювачів забезпечують якість реєстрації близьку до прямих вимірів параметрів робочих процесів у системах впорскування палива для всіх експлуатаційних режимів, крім височастотних дрібних на малих подачах.

Основні наукові й практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Основними інформативними властивостями діагностичних ознак є діагностична цінність (вага) і чутливість. Такими ознаками служать для робочого процесу тиск газів у циліндрі, а для паливоподачі тиск палива в ПНВТ. Для запису цього параметра використовуються тензометричні й п'єзоелектричні датчики.

2. Особливостями процесу паливоподачі, що визначають вимоги до методів і засобів контролю, є її більша циклічність, мала тривалість, високі швидкості зміни й великий діапазон вимірюваних величин. Потрібна реєстрація не тільки змінної, але й постійної складової процесу.

3. Здійснено вибір метрологічних засобів для експериментального комплексу, що забезпечує безмоторні випробування вимірювальної системи на базі створеного комбінованого перетворювача, суміщеного з конструктивними елементами системи впорскування.

У якості базового вимірювального компонента прийнятий тензометричний дротовий перетворювач, що володіє достатньою чутливістю й гарними технологічними властивостями. Детально розглянуті метрологічні характеристики тензорезисторів.

Досліджено метрологічні характеристики датчика підйому голки форсунки.

4. Проведено аналіз конструкції системи впорскування. Для розробки комбінованого датчика тиску палива прийнята шпилька кріплення ПНВТ («шпилька-датчик» - Ш-Д).

Виконано конструктивне пророблення й аналіз характеристик вимірювального тракту в складі: деформований елемент (шпилька) - тензодатчик - тензостанція - осцилограф. Всі елементи тракту задовольняють умовам реєстрації

тиску в порожнині ПНВТ.

5. Установлено, що якісні й кількісні характеристики, записані синхронно базовим і комбінованим датчиками, для більшості режимів роботи паливної апаратури близькі й система Ш-Д може бути використана для реєстрації гідродинамічних процесів впорскування палива. Виключення становлять режими мінімальної частоти обертання колінчатого валу із дрібним впорскуванням, коли спостерігається згладжування коливального процесу елементами, що беруть участь у передачі зусиль від тиску палива на Ш-Д. Але, і в цьому випадку отримана інформація може бути використана для інженерної оцінки процесу паливоподачі.

Датчик Ш-Д можна застосовувати для реєстрації вібрації двигуна, як додаткове джерело інформації.

6. З метою більш детального дослідження метрологічних характеристик вимірювальної системи на базі розробленого вимірювального перетворювача виконаний порівняльний аналіз амплітудно-частотних параметрів запису тиску палива.

7. Результати частотного аналізу підтвердили дані, отримані порівнянням осцилограм. Амплітудно-частотні параметри запису обома датчиками не мають істотних відмінностей на всіх режимах за винятком дрібного впорскування. На цьому режимі при мінімальній частоті обертання валу, рівної 33 хв^{-1} , спостерігається найбільша розбіжність при 2 Гц.

8. Запропоновано методику оцінки впливу експлуатаційних факторів на характеристики процесу впорскування палива в дизелях з використанням математичних моделей і імітаційного моделювання паливоподачі.

9. Проведено аналіз методів розрахунку процесу впорскування палива. Обрано метод вирішення рівнянь, складені вирази для граничних умов, підготовлений алгоритм, програма й визначені вихідні дані для розрахунку системи впорскування палива суднового середньообертового дизеля.

10. На прикладі розпилювача форсунки показана можливість аналізу впливу зміни стану розпилювача на процес паливоподачі.

11. Отримано кількісні характеристики зміни параметрів впорскування при загорянні й зношуванні соплових отворів розпилювача форсунки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Половинка Э. М. Разработка и исследование комбинированного датчика давления топлива / Э. М. Половинка, А. Ю. Яковенко // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. – 2013. – № 32. – Одесса: ОНМА. – С. 41-49.

Особистий внесок. Аналіз літературних джерел, опрацювання конструктивних рішень, вибір комплектації, проведення випробувань, аналіз даних, підготовка матеріалу статті.

Профільне спеціалізоване видання. Рекомендований МОН України для публікації дисертаційних матеріалів. <http://seu.nuoma.edu.ua/index.php?lang=ru>

2. Половинка Э. М. Программный комплекс для гармонического анализа

метрологических характеристик комбинированного датчика давления топлива / Э. М. Половинка, А. Ю. Яковенко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. -2013. - № 33. - Одесса: ОНМА. - С. 122-135.

Особистий внесок. Підготовка експериментальних даних для гармонічного аналізу, розробка алгоритму аналізу, вибір числового методу для гармонічного аналізу, розрахунок зразка гармонічного аналізу.

Профільне спеціалізоване видання. Рекомендований МОН України для публікації дисертаційних матеріалів. <http://seu.nuoma.edu.ua/index.php?lang=ru>

3. Половинка Э. М. Диагностика форсунок судовых дизелей в условиях эксплуатации / Э. М. Половинка, А. Ю. Яковенко // Судовые энергетические установки: науч. - техн. сб. - 2013. - № 33. - Одесса: ОНМА. - С. 137-144.

Вибір математичної моделі, підготовка вихідних даних для імітаційного моделювання, імітаційне моделювання, аналіз результатів, підготовка публікації.

Профільне спеціалізоване видання. Рекомендований МОН України для публікації дисертаційних матеріалів. <http://seu.nuoma.edu.ua/index.php?lang=ru>

4. Яковенко А. Ю. Метрологические характеристики регистрации высокого давления в системах топливоподачи дизелей с применением комбинированного датчика Научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания», Харьков №2 2018 року.- С. 47 – 54.

Особиста публікація.

Реєстрація ВАК України №1-05/1 від 10.02.2010 <https://web.kpi.kharkov.ua/dvs/glavnaya/>

5. Яковенко А. Ю. Гармонический анализ метрологических характеристик измерительных систем судовых дизелей журнал «Молодой вчений», Херсон №9 (49) вересень 2017 року. – С. 474 – 480. Особиста публікація.

Свідоцтво про державну реєстрацію ЗМІ:КВ №18987-7777Р від 05.06.2012 р.

Повний бібліографічний опис всіх статей журналу представлено у: НЕБ Elibrary.ru, НБУ ім. В.І. Вернадського

Журнал включено до міжнародних каталогів наукових видань і наукометричних баз: ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus <http://molodyvcheny.in.ua/ua/>

6. Половинка Э. М. Совершенствование мониторинга дизелей /Э.М., Половинка, А.Ю Яковенко// American Scientific Journal № (20) / 2018 - Vol.1- Энергетика - С.22 - 33

Огляд методів та засобів моніторингу дизелів, розробка комбінованого вимірювального перетворювача для моніторингу паливоподачі, експериментальне дослідження паливоподачі з реєстрацією системою на базі комбінованого вимірювального перетворювача.

Реєстрація в РИНЦ за договором № 338-06/2016. <https://american-issue.info/indeksacziya-zhurnala/>

7. Polovinka E.M Development and testing of systems for monitoring of marine diesel engines working processes on the basis of combined measuring converters / E.M. Polovinka, A.Y. Yakovenko // Судовые энергетические установки: науч. -

техн. сб. - 2019. - № 39. - Одеса: НУ «ОМА». - С. 129 - 142.

Вибір математичної моделі, підготовка вихідних даних для імітаційного моделювання, імітаційне моделювання, аналіз результатів, підготовка публікації.

Профільне спеціалізоване видання. Рекомендований МОН України для публікації дисертаційних матеріалів. <http://seu.nuoma.edu.ua/index.php?lang=ru>

Тези доповідей:

8. Яковенко А. Ю. Совершенствование мониторинга дизелей / А. Ю. Яковенко // ОНМА «Енергетика судна: експлуатація та ремонт» (05.04.2011-07.04.2011). Одеса: ОНМА, 2011. – С. 28 – 31.

9. Половинка Э. М. Метрологические характеристики комбинированного датчика давления топлива для систем впрыскивания судовых дизелей / Э. М. Половинка, А. Ю. Яковенко, А. С. Агопян // Матеріали Науково-технічної конференції «Суднові енергетичні установки: Експлуатація та ремонт» (20.03.2013–22.03.2013). Частина I. – Одеса: ОНМА, 2013. –С. 13-14.

10. Яковенко А. Ю. Гармонический анализ метрологических характеристик измерительных систем судовых дизелей./ А.Ю. Яковенко //«Енергетика судна: експлуатація та ремонт» (26.03.2014 – 28.03.2014). Частина I. – Одеса: ОНМА, 2014. – С. 31 – 34.

11. Яковенко А. Ю. Разработка и исследование метрологических свойств измерительной системы на базе комбинированного датчика давления топлива / А. Ю.Яковенко // Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (28–29 вересня 2017 р., м. Херсон). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2017. – С. 167-172.

12. Половинка Э.М. Применение комбинированного преобразователя для регистрации процесса топливopодачи в судовых дизелях/ Э.М. Половинка, А.Ю Яковенко// Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції на тему «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (22 – 23 березня 2018 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С. 14 - 20.

13. Половинка Е.М. Експлуатаційні випробування системи контролю дизелів на базі комбінованих вимірювальних перетворювачів/ Е.М. Половинка, А.Ю. Яковенко// Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції на тему «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (20 – 21 березня 2019 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С. 134 - 141.

14. Polovinka E.M. Development of operational control systems for marine diesel engines working processes based on combined measuring transducers/ Е.М. Polovinka, А.YU. Yakovenko // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції на тему «Річковий та морський флот. Експлуатація і ремонт. (18–19березня 2020 р. м. Одеса). – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 136 - 143.

15. Патент на корисну модель № 126226. Пристрій для діагностики паливної системи дизеля. Номер бюлетеня про видачу патента № 11 від 11.06.2018 р. Винахідники: Половинка Едуард Михайлович, Яковенко Анатолій Юрійович.

АНОТАЦІЯ

Яковенко А. Ю. Удосконалювання експлуатаційного контролю робочих процесів суднових дизелів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.03 - двигуни й енергетичні установки. - Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню важливого науково-прикладного завдання - підвищенню ефективності експлуатації суднових дизелів за рахунок забезпечення безперервного контролю робочих процесів із застосуванням нової методики і її реалізації шляхом використання комбінованих вимірювальних перетворювачів на основі конструктивних елементів паливної апаратури.

Виділений найбільш інформативний параметр процесу впорскування палива - тиск у насосі високого тиску. Для реєстрації запропонований новий метод - застосування комбінованого вимірювального перетворювача на основі елемента кріплення ПНВТ. Проведено розрахунок метрологічних параметрів перетворювача, виконано його конструктивне пророблення, komponування вимірювальної системи. Розробка реалізована в умовах безмоторного стенда.

У результаті експериментальних досліджень показана в порівнянні з базовим методом реєстрації гарна збіжність запису тиску обома способами.

Розроблено програмний комплекс для частотного аналізу метрологічних даних вимірювальної системи зі спеціалізованим інтерфейсом для експериментальних даних.

Виконано порівняльний амплітудно-частотний аналіз реєстрації тиску палива.

При стійкому впорскуванні амплітудно-частотні характеристики базового й експериментального датчиків відрізняються незначно. Для аналізу параметрів паливоподачі використовується метод гідродинамічного розрахунку проф. Ю. Я. Фоміна.

Визначено граничні умови для системи суднового середньообертного дизеля. Як приклад виконане імітаційне моделювання при зміні ефективного перетину розпилювача в діапазоні від 0,6 до 1,6 від номінального значення.

Ключові слова: судновий середньообертний дизель, паливоподача, комбінований вимірювальний перетворювач, характеристики, гармонічний аналіз, метод Фур'є.

THE SUMMARY

Jakovenko A. J. Improvement of operational control of marine diesel engines working procedures. - the Manuscript.

The thesis on competition of scientific degree of Cand.Tech.Sci. A speciality 05.05.03 - Drives and power installations. National university «Odessa maritime academy».

The thesis is devoted to solving an important theoretical and practical problem – improvement of efficiency of marine diesel engines operation through control performance enhancement.

Continuous control of working processes with application of a new technique and its realization by use of the combined measuring converters on the basis of structural fuel injection components is applied.

There is determined the most informative parameter of fuel injection process – the pressure in the high pressure fuel pump. A new method for pressure signals registration is suggested – the application of the combined measuring converter on the basis of high pressure fuel pump studding. The converter's metrology parameters calculation and its design study are performed. Measuring system layout is executed. The development process is realized in the motorless stand environment.

There is developed the program complex for the frequency analysis of metrology data of the measuring system with specialized interface for experimental data. The comparative amplitude-frequency assaying of registration of fuel pressure is made.

For the analysis of fuel supply parameters it is suggested to use mathematical simulation of fuel injection process. As the basis there is used the method of hydrodynamic calculation of prof. Y.Y. Fomin. Boundary conditions for marine middle speed diesel engine fuel supply system are defined.

As a result of the research there is displayed good convergence of pressure record in both modes - experimental researches in comparison with a basic approach registration.

The exception was admitted by fractional injection at which affects the combined converter - high pressure fuel pump and its drive gear system's detention lag.

Key words: diesel engine; fuel injection; fuel pressure sensor; characteristics.

Підп. до друку 1.04.2021. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,62.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-04-03

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