

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(ОНМУ)

Кучеренко Юрій Миколайович



УДК 621.436:629.128.6

**МЕТОД КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
СУДНОВОЇ ДИЗЕЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ
В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2018

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі «Суднових енергетичних установок і технічної експлуатації» Одеського національного морського університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Варбанець Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет,
завідувач кафедри «Суднових енергетичних установок і технічної експлуатації» (м. Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент,
Грицук Ігор Валерійович
Херсонська державна морська академія,
професор кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок» (м. Херсон)

кандидат технічних наук, доцент,
Зенкін Євген Юрійович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри
«Технічної експлуатації та сервісу автомобілів»
(м. Харків)

Захист дисертації відбудеться “30” жовтня 2018 року о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.060.01 в Одеському національному морському університеті за адресою: вул. Мечникова, 34, м. Одеса 65029, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці ім. проф. Г.К. Суслова Одеського національного морського університету за адресою: вул. Мечникова, 34, м. Одеса 65029, Україна.

Автореферат розісланий “28” вересня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.060.01
кандидат технічних наук, доцент



Акімова О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Спочатку при експлуатації суднових дизельних установок (СДУ) склалася суперечлива ситуація, пов'язана з поданням паспортних даних дизелів і можливостями їх контролю. У паспортах вказані значення ефективної потужності, ефективного моменту, середнього ефективного тиску і питомої ефективної витрати палива і мастила. При цьому на практиці можна визначити лише середній індикаторний тиск і, відповідно, розрахувати індикаторну потужність, індикаторний момент і питому індикаторну витрату палива. Тобто, в розпорядженні екіпажу є засоби контролю індикаторних параметрів, але при цьому звітні форми необхідно вести в ефективних параметрах, приблизно оцінюючи величину механічного коефіцієнта корисної дії на поточному навантажувальному режимі. При цьому визначення ефективних параметрів роботи суднових дизелів під час експлуатації є проблемою в зв'язку зі складністю і неоднозначністю кількісної оцінки механічних втрат.

В якості основного документа, що зобов'язує контролювати роботу СДУ в ефективних параметрах, можна вказати резолюцію ІМО МЕРС.254 (67) в частині визначення коефіцієнта енергоефективності судів, а також положення Регістру Судноплавства України, в якому судновласників зобов'язують проводити випробування суднових дизелів з обов'язковим вимірюванням ефективних обертаючих моментів і потужності на валу.

Такі вимірювання можна проводити за допомогою електронних торсіометров, наприклад *Siemens, Datum Elektronik, MARIDIS* та ін. Встановлення і калібрування таких пристроїв здійснюється виключно силами зовнішніх метрологічних фірм і пов'язана з матеріальними і тимчасовими витратами.

У деяких випадках керуючі компанії прямо вказують судновим фахівцям, які значення механічних втрат слід застосовувати в розрахунках. Наприклад, в сервісних листах корпорації *MAN (MAN Diesel & Turbo)* для головних дизелів типу МС вказується величина механічного коефіцієнта корисної дії (ККД) 0,87 ... 0,93, а для дизелів типу МЕ механічний ККД дорівнює 0,90 ... 0,95 на номінальних режимах. У той же час, експлуатація СДУ часто відбувається на економічних режимах 40-80% від номінальної потужності, а іноді навіть нижче. Значення механічного ККД на цих режимах істотно менше, а його оцінка, виконана без спеціальних засобів і методів, здійснюється дуже приблизно.

У зв'язку з викладеним, розробка методів визначення ефективних параметрів роботи СДУ в процесі експлуатації є актуальною науковою задачею. Внаслідок переважного розповсюдження на морському флоті СДУ великої потужності з сучасними вискоелективними системами газотурбонаддування (ГТН), це завдання є актуальним не тільки з точки зору контролю потужності, витрати палива і моторесурсу СДУ, але і в зв'язку з можливістю здійснення діагностики пропульсивного комплексу по трендам ефективних параметрів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідницькою тематикою кафедри «Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація» судномеханічної спеціальності Одеського національного морського університету. У період з

2009 по 2016 рр. автор брав участь в розробці держбюджетних науково-дослідницьких робіт «Удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок» ГР № 0111U08970 від 05.03.2012, ГР № 0215U001681 від 17.01.2013, ГР № 0215U004492 від 05.03.2014, ГР № 0216U000617 від 29.12.2015 як виконавець розділів, присвячених методам діагностики і визначення ефективних параметрів суднових дизельних енергетичних установок.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методу контролю ефективних параметрів роботи СДУ, що реалізуються під час експлуатації.

Для досягнення мети в роботі поставлені такі основні завдання:

- аналіз існуючих методів контролю ефективних параметрів СДУ з точки зору застосування їх в експлуатаційних умовах;
- визначення ефективних параметрів СДУ за допомогою методів доступних і реалізованих в процесі експлуатації;
- розробка методу визначення ефективних параметрів СДУ з використанням індикаторних параметрів робочого процесу і частотних характеристик ГТН.
- оцінка точності визначення частоти обертання ГТН за допомогою аналізу віброакустичних сигналів повітряного компресора з урахуванням зашумленості вихідних даних;
- розробка і апаратна реалізація методу розрахунку ефективних параметрів СДУ, що використовує віброакустичний контроль частотних характеристик ГТН;
- забезпечення визначення ефективних параметрів СДУ з точністю, яка регламентується вимогами ГОСТ 21792-89 для непрямих методів розрахунку, відповідно до сучасних вимог ІМО.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації СДУ і, пов'язані з ним, методи визначення ефективних параметрів СДУ.

Предметом дослідження є визначення залежностей ефективних параметрів СДУ від параметрів системи газотурбонаддування і синтез методу контролю ефективних параметрів СДУ, що застосовується в експлуатації.

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження базується на основних положеннях теорії двигунів внутрішнього згоряння і на методах системного аналізу і синтезу технічних систем. Для моделювання і розрахунку параметрів робочого циклу в циліндрах СДУ використовувалося рівняння теплового балансу з урахуванням тепловиділення в циліндрі за методами І. І. Вібе і В. С. Семенова. Для оцінки механічних втрат використовувався модифікований автором метод професора Г. О. Конакова. Крім того використовувалися:

- метод гармонійного аналізу в задачі аналізу вібраційних характеристик системи турбонаддування СДУ;
- методи цифрової фільтрації даних;
- метод нелінійної оптимізації в задачі моделювання робочого процесу СДУ;
- методи статистичної обробки експериментальних даних.

В експериментах використовувалися методи визначення параметрів робочого процесу суднових дизелів за допомогою систем моніторингу *DEPAS* (D2.34sp, D3.0 і D4.0H), апаратна частина яких була розроблена автором. Методи реєстрації параметрів за допомогою сучасних *DSP* контролерів. Інтерфейс розрахункових програм був розроблений за допомогою програмних середовищ *Delphi 7.0*, математичних бібліотек *Numeric Toolbox* і методів нелінійного програмування. Для аналізу спектрів вібрації був використаний пакет *RightMark Audio Analyzer 6.2.3* (<http://audio.rightmark.org>). Для візуалізації даних і побудови регресійних моделей використовували середовище *Grapher*.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблений метод контролю ефективних параметрів СДУ в експлуатації за допомогою аналізу індикаторних параметрів робочого процесу і частотних характеристик газотурбонагнітача;
- отримав розвиток метод визначення механічного ККД суднового дизеля Г.О. Конакова, в якому для визначення навантажувального режиму використовується відношення частот обертання газотурбонагнітачів;
- удосконалено метод віброакустичного контролю частоти обертання ГТН, що дозволив розробити електронний обчислювач для визначення параметрів ГТН і механічного ККД в якому точність підвищена за рахунок вирішення наукової задачі усунення «витоку потужності».

Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, що містяться в роботі, зумовлена використанням достовірних і коректних математичних моделей і чисельних методів розв'язання задач обробки експериментальних даних. Достовірність наукових результатів роботи підтверджена відповідністю результатів морських натурних випробувань розрахункових значень ефективних параметрів СДУ.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження полягає в розробці методу контролю ефективних параметрів СДУ за допомогою визначення з малою похибкою (до 3%) в експлуатації параметрів робочого процесу і частотних характеристик газотурбонагнітача. Розроблений метод відповідає вимогам резолюції ІМО МЕРС.254(67) і приписами класифікаційних товариств, які зобов'язують судновласників проводити випробування суднових дизелів з обов'язковим вимірюванням ефективних параметрів СДУ.

Практична частина роботи базується на створенні програмно-апаратного комплексу, що дозволяє вирішувати наступні завдання:

- визначати в експлуатації індикаторні параметри робочого процесу, включаючи середній індикаторний тиск і індикаторну потужність СДУ за допомогою системи діагностики D4.0H, в якій автор розробляв апаратну частину;
- визначати в експлуатації частоту обертання ротора ГТН і обертів колінчастого валу (КВ), уточнену за допомогою розробленої в дисертації методики;
- розраховувати механічний ККД і визначати ефективні параметри роботи СДУ: середній ефективний тиск, ефективну потужність і обертаючий момент на валу, питомі ефективні витрати палива і мастила на експлуатаційному режимі;

Результати дисертації впроваджені на:

- на т/х «ГЕРОЇ ПЛЕВНИ» ГСК «УКРФЕРРІ» (Україна, м. Одеса, акт впровадження);
- на т/х «СHEROKEE», Prestige Shipmanagement Ltd. (Туреччина, м. Стамбул, акт впровадження);
- на т/х «Сибірський-2116», ОАО «ДОНРЕЧФЛОТ» (РФ, м. Ростов-на-Дону, акт впровадження);

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес Одеського національного морського університету і використовуються при читанні лекцій з дисципліни «Системи діагностування» для студентів старших курсів судномеханічної спеціальності.

Особистий внесок автора. Всі результати, винесені на захист, отримані автором особисто. Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукопису, написаної автором особисто. У спільних роботах автору належать положення, зазначені у списку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися на 12-ти науково-технічних конгресах і конференціях, 6 з яких міжнародні:

- XVI-XXI міжнародних конгресах двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. Н.С. Жуковського «ХАІ» - Харків - Коблево (Рибальське), вересень 2011-2017 рр.;
- Всеукраїнські науково-практичні конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія - Херсон, жовтень 2011-2017 рр.;
- Міжнародні науково-практичні конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT)", Херсонська державна морська академія - Херсон, травень 2011-2017 рр.;
- II Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та проблеми двигунобудування», НУК ім. адмірала Макарова - Миколаїв, 28-29 листопада 2012р.;
- V Міжнародна науково-технічна конференція «Судова енергетика: стан та проблеми», НУК ім. адмірала Макарова - Миколаїв, 10-11 листопада 2011р.;
- Міжнародна науково-практична конференція «Штучний інтелект. Інтелектуальні системи» ШІ-2012 - сел. Кацівелі, АР Крим, 01-05 жовтня 2012р.;
- V Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективність, надійність і безпека енергетичних установок (Енергоустановки-2010)» СевНТУ, Севастополь - Батіліман, 7-11 червня 2010 р.;

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт в спеціалізованих науково-технічних збірниках, рекомендованих МОН України для публікації результатів дисертаційних досліджень, з яких 12 опубліковані у виданнях, включених до наукометричних баз даних.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи

становить 158 стор., в тому числі 38 рисунків і 12 таблиць. Список використаних джерел становить 128 найменувань на 15 сторінках. У додатку наведені акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено актуальність теми дисертаційного дослідження та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, обґрунтована наукова новизна і показано практичне значення отриманих результатів, показаний особистий внесок здобувача, наведені дані апробації результатів дисертаційного дослідження.

У першому розділі дано аналіз стану проблеми і досліджено шляхи її вирішення. На підставі аналізу вітчизняних і зарубіжних літературних джерел виділено основні методи визначення ефективних параметрів СДУ в процесі експлуатації судна. Визначення ефективних параметрів СДУ є проблемою в зв'язку з труднощами здійснення точної кількісної оцінки механічних втрат і визначення величини механічного ККД на поточному навантажувальному режимі. У розділі розглянуті методи визначення механічних втрат і механічного ККД СДУ. Дан аналіз відповідних апаратних і аналітичних методів. Для визначення параметрів навантажувального режиму СДУ обрано метод професора Г. О. Конакова, який засновано на співвідношенні індикаторних потужностей. Досліджено можливість використання методів спектрального аналізу віброакустичних полів газотурбонагнітачів СДУ для ідентифікації навантажувального режиму. Показано, що визначення індикаторних параметрів СДУ під час експлуатації проводиться з максимальними відносними похибками до 3% з допомогою систем моніторингу робочого процесу. Частота обертання колінчастого вала СДУ може визначатися з похибкою до 1%. В цьому випадку сумарна похибка визначення механічного ККД по вже апробованій методиці професора Г. О. Конакова може досягати 5%, що порівнянно з похибкою емпіричного визначення механічного ККД за даними ходових випробувань СДУ.

Аналіз розглянутих методів визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації дозволив сформулювати основні напрямки дисертаційного дослідження, засновані на визначенні навантажувального режиму СДУ методами спектрального аналізу.

Далі обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження, показана її актуальність і відповідність паспорту спеціальності "05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту". Розроблено технологічну карту наукового дослідження, яка дозволяє логічно зв'язати запит практики, цілі і завдання дослідження, основні наукові результати, і практичну цінність роботи. Способами реалізації наукового дослідження стали теоретичні та експериментальні методи: математичне моделювання робочого процесу СДУ на базі основних законів термодинаміки; аналітичне вирішення проблеми витоку потужності в дискретному спектрі, що уточнює частотний аналіз віброакустичних полів ГТН СДУ; чисельний аналіз даних морських випробувань СДУ різних типів морських су-

ден. Огляд теоретичних і експериментальних методів дослідження дозволив визначити необхідний обсяг математичного моделювання та методику проведення експериментальних робіт на різних типах СДУ в експлуатації.

В основу дисертаційної роботи покладені багаторічні експериментальні дослідження робочих процесів СДУ, проведені автором за допомогою програмно-апаратних діагностичних комплексів DEPAS 2.34, 2.34sp і D4.0H. Ці дослідження були проведені на більшості типів морських суден, на всіх типах СДУ (2-тактних малообертових дизелях (МОД) і 4-тактних середньообертових (СОД) та високообертових (ВОД) дизелях). Автор, брав безпосередню участь в розробці комплексів DEPAS і проведенні чисельних експериментів на борту суден в умовах експлуатації.

Отримані результати дозволили розробити теоретичні основи і методи з розрахунку механічного ККД із застосуванням частот обертання ГТН СДУ які визначаються за допомогою діагностичних комплексів значень індикаторних параметрів. Показано, що частоти обертання ГТН ідентифікуюють навантажувальний режим і визначаються в експлуатації.

Другий розділ присвячений розробці методів визначення основних параметрів СДУ, що характеризують навантажувальний режим під час експлуатації. Також в розділ входить математичне моделювання робочого процесу СДУ з метою визначення характеристик дольових режимів і дослідження впливу зовнішніх факторів на основні параметри робочого процесу. Моделювання проводилося на базі першого початку термодинаміки, згідно з яким теплота виділена за елементарний час витрачається на зміну внутрішньої енергії газу, здійснення роботи і тепловіддачу в стінки.

Відносна швидкість тепловиділення в циліндрах СДУ:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{dQ_x}{q_c Q_H d\varphi}, \quad (1)$$

де x – частка теплоти, що виділилася при згоранні циклової подачі палива до моменту часу, відповідного поточного кута φ повороту колінчастого валу; q_c - циклова подача і Q_H - нижча теплота згорання палива.

Вирази для визначення зазначених складових наведені в тому числі в роботах Фоміна Ю. Я. і Семенова В. С. Для оцінки швидкості тепловиділення в циліндрі СДУ використовується трьохфазна модель В. С. Семенова - В. І. Квятковського. Модель розроблена на кафедрі СЕУ і ТЕ ОНМУ, пройшла апробацію і адаптована для широкого класу СДУ:

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{A_1}{\varphi_1} k_1 e^{-0.5k_1^2} + \frac{A_2}{\varphi_2} k_2 e^{-0.5k_2^2} + \frac{A_3}{\varphi_3} k_3 e^{-0.5k_3^2}; \quad (2)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – зміщення максимумів швидкості тепловиділення на кожній з трьох фаз;

$A_1, A_2, A_3, k_1, k_2, k_3$ – коефіцієнти навантажувального режиму, що залежать від кута повороту колінчастого валу.

Використання трифазної моделі тепловиділення в циліндрі дозволяє моделювати багатозафазне впорскування палива. З рівняння першого закону термодинаміки і рівняння стану газу можна вивести залежність для термодинамічних параметрів робочого тіла

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{j+1} = \frac{q_c Q_H \Delta x + M_j c_{vj} T_j - 500 p_j (V_{j+1} - V_j) - \Delta Q_w}{0,5(V_{j+1} - V_j) + c_{vj} V_{j+1} / R} \times 10^{-3}; \\ T_{j+1} = \frac{p_{j+1} V_{j+1}}{R M_{j+1}}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де p_{j+1}, T_{j+1} – тиск і температура в $j+1$ точці;

Δx – частка теплоти, що виділилася на розрахунковій ділянці;

M_j, c_{vj} – число молей і теплоємність газу в циліндрі на ділянці;

V_j, V_{j+1} – об'єм циліндра на початку і в кінці розрахункової ділянки;

ΔQ_w – втрата теплоти в стінки циліндра;

R – універсальна газова стала.

В результаті рішення системи отримуємо значення тиску і температури в $(J + 1)$ точці. Середній індикаторний тиск отримано методом збільшення об'єму:

$$p_i = \frac{1}{V_s} \sum_{j=1}^m \frac{p_{j+1} + p_j}{2} (V_{j+1} - V_j),$$

де робочий об'єм циліндра $V_s = \frac{\pi D^2}{4} S$, S, D – хід і діаметр поршня;

поточний об'єм циліндра:

$$V_{ci} = V_c + 0,5 V_s \left[1 + \frac{1}{\lambda_{ш}} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda_{ш}} \sqrt{1 - (\lambda_{ш} \sin \varphi)^2} \right],$$

де V_c – об'єм камери стиснення;

$\lambda_{ш} = S / 2 L_{ш}$ – відношення радіуса кривошипа КВ до довжини шатуна між осями його підшипників.

Індикаторна потужність дизеля розраховується за формулою

$$N_i = c_1 D^2 S n p_i,$$

де n – частота обертання КВ двигуна, хв^{-1} ; i – число циліндрів; c_1 – коефіцієнт, що враховує тактність дизеля і розмірності вхідних величин для приведення результату до системи СІ ($c_1 = 6,55$ для 4-тактних дизелів; $c_1 = 13,1$ для 2-тактних дизелів).

У **третьому розділі** наведена реалізація методу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації. Аналіз характеристик систем торсіографування показав, що на практиці похибка визначення ефективного крутильного моменту знаходиться в межах 3-5%. Оцінка механічного ККД теж може бути проведена з аналогічною точністю при наявних значеннях механічного ККД на номінальному режимі і потужності поточного експлуатаційного режиму. Згідно досліджень професора Г. О. Конакова механічний ККД на часткових режимах

$$\eta_m = 1 - Z \frac{N_{iH}}{N_i} (1 - \eta_{mH}), \quad (4)$$

де $Z = (1 + 2 \frac{n}{n_H}) \frac{n}{3n_H}$, що відповідає зазначеній вище похибці для СДУ типу МОД і СОД;

H – індекс номінального експлуатаційного режиму; n - значення величини частоти обертання колінчастого валу на експлуатаційному режимі;

N_i – індикаторна потужність експлуатаційного режиму.

Виходячи з того, що для більшості суднових дизелів коефіцієнт кореляції між потужністю, тиском наддувного повітря і частотою обертання ГТН близький до одиниці, пропонується модифікувати залежність (4) таким чином, щоб використовувати точно контрольовану на практиці величину частоти обертання ротора ГТН ($TURrpm$). Відносна похибка визначення в експлуатації за допомогою методів спектрального аналізу віброакустичних сигналів компресора в 2-3 рази нижче похибки визначення тиску наддувного повітря в ресивері за допомогою штатних приладів або за допомогою систем дистанційного контролю. Таким чином, модифікація формули (4) зводиться до наступної функціональної залежності механічного ККД: $\eta_m = f\left(\frac{TURrpm_H}{TURrpm}\right)$.

Нелінійність в співвідношенні потужності СДУ і частоти обертання ГТН слабо виражена, - коефіцієнт кореляції $R > 0,92$, при цьому в відносному вигляді ця залежність носить квадратичний характер

$$\Phi = \frac{N_{iH}}{N_i} = A \left(\frac{TURrpm_H}{TURrpm} \right)^2 + B \frac{TURrpm_H}{TURrpm} + C \quad (5)$$

З урахуванням (5) формула (4) може бути записана у вигляді

$$\eta_m = 1 - Z\Phi(1 - \eta_{mH}) \quad (6)$$

Потужність номінального режиму і механічний ККД на номінальному режимі вказані в паспортній документації або в даних ходових випробувань. Середній індикаторний тиск і індикаторна потужність поточного експлуатаційного режиму визначається за допомогою систем моніторингу робочого процесу типу DEPAS. Тоді:

- середній ефективний тиск $p_e = p_i \eta_m$;
- ефективна потужність в циліндрах СДУ $N_e = N_i \eta_m$;
- питома ефективна витрата палива $b_e = b_i / \eta_m$;
- ефективний ККД СДУ на поточному навантажувальному режимі

$$\eta_e = \eta_i \eta_m.$$

де N_e, N_i - ефективна і індикаторна потужності СДУ; p_e, p_i - середнє ефективне і індикаторний тиск в робочому циліндрі; η_m, η_i - механічний і індикаторний ККД; b_e, b_i - питома ефективна і індикаторна витрати палива.

У четвертому розділі наведені результати використання методу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації. Для розрахунку механічного ККД на поточному режимі використовується відношення частот обертання ГТН, що визначаються на експлуатаційному режимі за допомогою спектрального аналізу віброакустичних сигналів турбокомпресора.

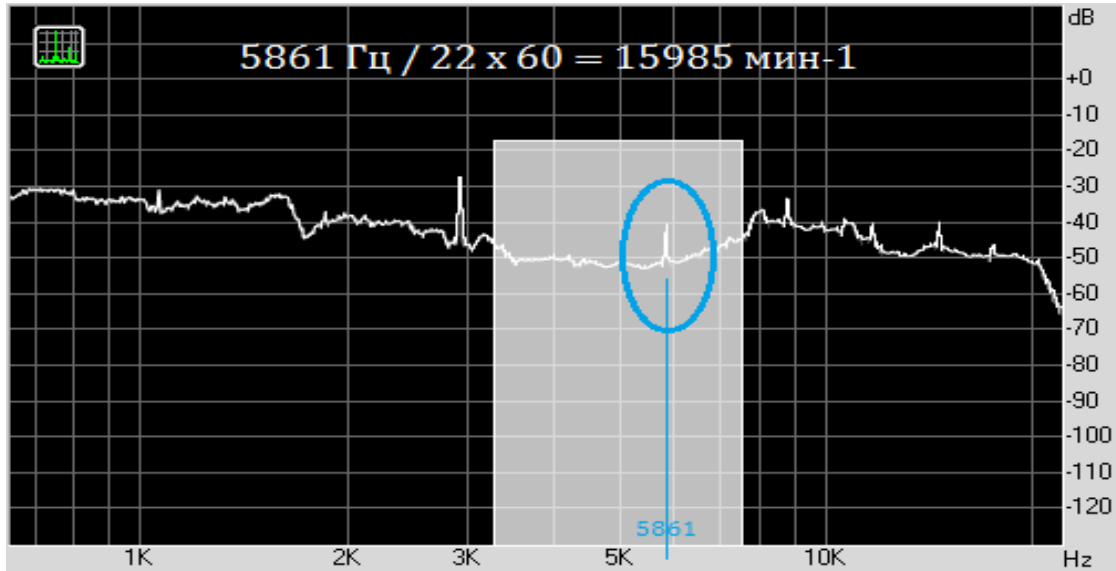


Рис. 1 - Амплітудний спектр вібрації турбокомпресора ГД т/х «GREIFSWALD» типу Н6-1/2.263 і визначення частоти обертання $TURrpm$

Приклад визначення частоти обертання ротора ГТН типу Н6-1/2.263 на експлуатаційному режимі т/х «GREIFSWALD» показаний на рис. 1. Для більшості ГТН лопаточна частота компресора знаходиться в межах 3-7 кГц і може бути визначена з похибкою менш 10 Гц, що зводить максимальну відносну похибку до величини менше 1%. Для ГТН даного типу мінімальна частота обертання на навантажувальному режимі становить 9000 хв^{-1} (лопаточна частота компресора 3300 Гц) і максимальна частота, вище якої гарантовано неможлива робота ГТН - 20000 хв^{-1} (лопаточна частота компресора 7333 Гц). У середині цього діапазону знаходимо лопаточну частоту компресора ГТН на даному навантажувальному режимі (5861 Гц) і, знаючи кількість лопаток компресора (22 шт.), частоту обертання ротора ГТН:

$$TURrpm = \frac{5861}{22} \times 60 = 15985 \text{ хв}^{-1}.$$

В результаті застосування такого методу можна з високою точністю визначити частоту обертання ротора газотурбонагнітача $TURrpm$, а також здійснювати діагностику технічного стану ГТН по амплітуді гармоніки на основній частоті обертання. У якості аналізованих величин розглядаються частоти і амплітуди окремих гармонік. Ефект «витоку потужності» спектра (*DFT leakage effect*), побудованого в результаті дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), призводить до суттєвих (до 50%) спотворень у визначенні амплітуд гармонік. Похибка визначення частоти може дорівнювати кроку дискретизації. Для змен-

шення ефекту «витоку» найбільш широке поширення отримав метод віконних перетворень: для зменшення розривів на краях ряду з метою ослаблення витоку потрібно зменшити амплітуду сигналу біля країв. Таке масштабування здійснюється в ході множення реалізації на вікно спеціальної форми (наприклад вікно Хеннінга). Але, метод віконних перетворень не виключає, а лише зменшує дію ефекту «витоку» потужності і спотворення істинних величин амплітуди, частоти і фази аналізованого сигналу. Розрахункові параметри вихідного сигналу залежать від співвідношення частоти цього сигналу і частоти дискретизації. Частота дискретизації може бути задана постійною (як прийнято в більшості технічних систем), а частота аналізованого сигналу змінюється довільно. Таким чином, похибка оцінки параметрів вимірюваного періодичного сигналу буде не постійною і буде змінюватися до 50%.

Розрахувати частоту m і фазу ϕ вихідного сигналу можна за значеннями двох максимальних гармонік в спектрі X_k, X_{k+1} . Для цього пропонується чисельно вирішити систему комплексних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} |E(m, \phi)_k / E(m, \phi)_{k+1}| = |X_k / X_{k+1}| \\ \text{Arg}(E(m, \phi)_k) = \text{Arg}(X_k) \end{array} \right\}, \quad (7)$$

де $E(m, \phi)_k$ - комплексна функція, яка не залежить від амплітуди, але залежить від частоти і фази:

$$E(m, \phi)_k = e^{j\phi} \frac{e^{2\pi j(m-k)} - 1}{e^{\frac{2\pi j(m-k)}{N}} - 1} + e^{-j\phi} \frac{e^{-2\pi j(m+k)} - 1}{e^{\frac{-2\pi j(m+k)}{N}} - 1}; \quad (8)$$

параметри k -ї гармоніки $X_k = \text{Re}_k + j\text{Im}_k$, $A_k = \frac{1}{N} \sqrt{\text{Re}_k^2 + \text{Im}_k^2}$, $\phi_k = \text{arctg}(\frac{\text{Im}_k}{\text{Re}_k})$.

Система рівнянь (7) вирішується методом ітерацій в тому випадку, якщо гармоніки зліва і праворуч від центральної не рівні нулю, тобто більше заданої малої величини δ . Збіжність методу була перевірена на даних різних режимів для МОД, СОД і ВОД..

У дисертації проведено дослідження даного методу в разі наявності шумів у вихідному сигналі. На рис. 2 показано рішення системи (7) для чистого сигналу і сигналів з накладенням білого шуму 5% і 10% від амплітуди.

Для всіх досліджених випадків було потрібно не більше 5 повних ітерацій для забезпечення заданої похибки (менше 0,5% по частоті і фазі). При цьому амплітуда центральної (максимальної) гармоніки в спектрі після ДПФ до процедури відновлення дорівнювала $A_1 = 0.562$ (помилка $\sim 40\%$), а похибка частоти дорівнювала половині кроку дискретизації. В результаті рішення системи (7) фаза і частота сигналу зашумленого до 10% білим шумом, відновлюються до початкового значення з похибкою не більше 0.5%. Перевірка проводилася з використанням приладів лабораторної точності.

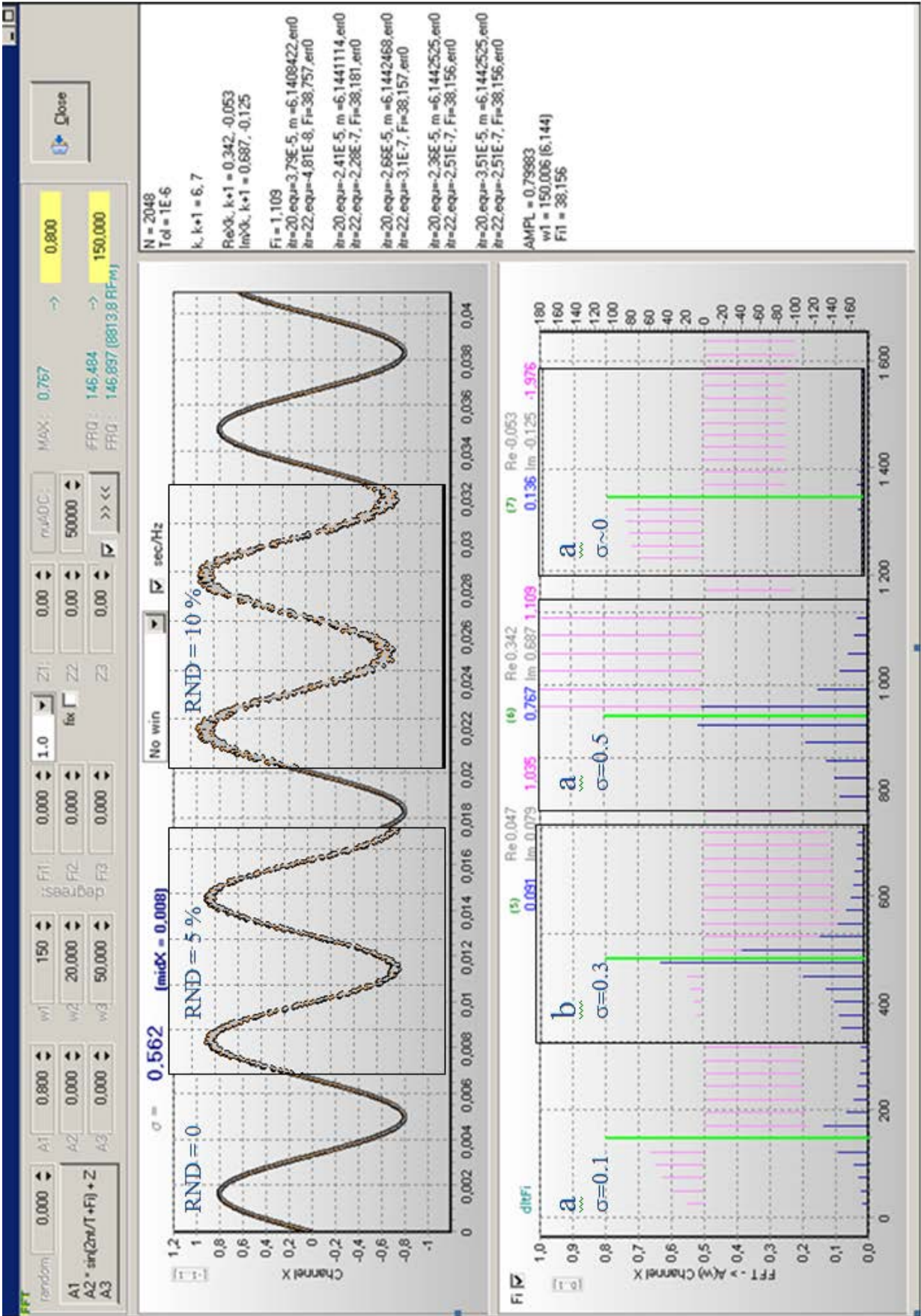


Рис. 2 - Програма демонстрації ДПФ і вирішення проблеми «витоку» сигналу з 5% і 10% білого шуму

Апробація розробленого в дисертації методу проводилася під час рейсових випробувань СДУ СОД 6VDS48/42AL-2 т/х "GREIFSWALD" (рис.3) і СДУ МОД 6L80МС т/х "FATHER S" (рис. 4).

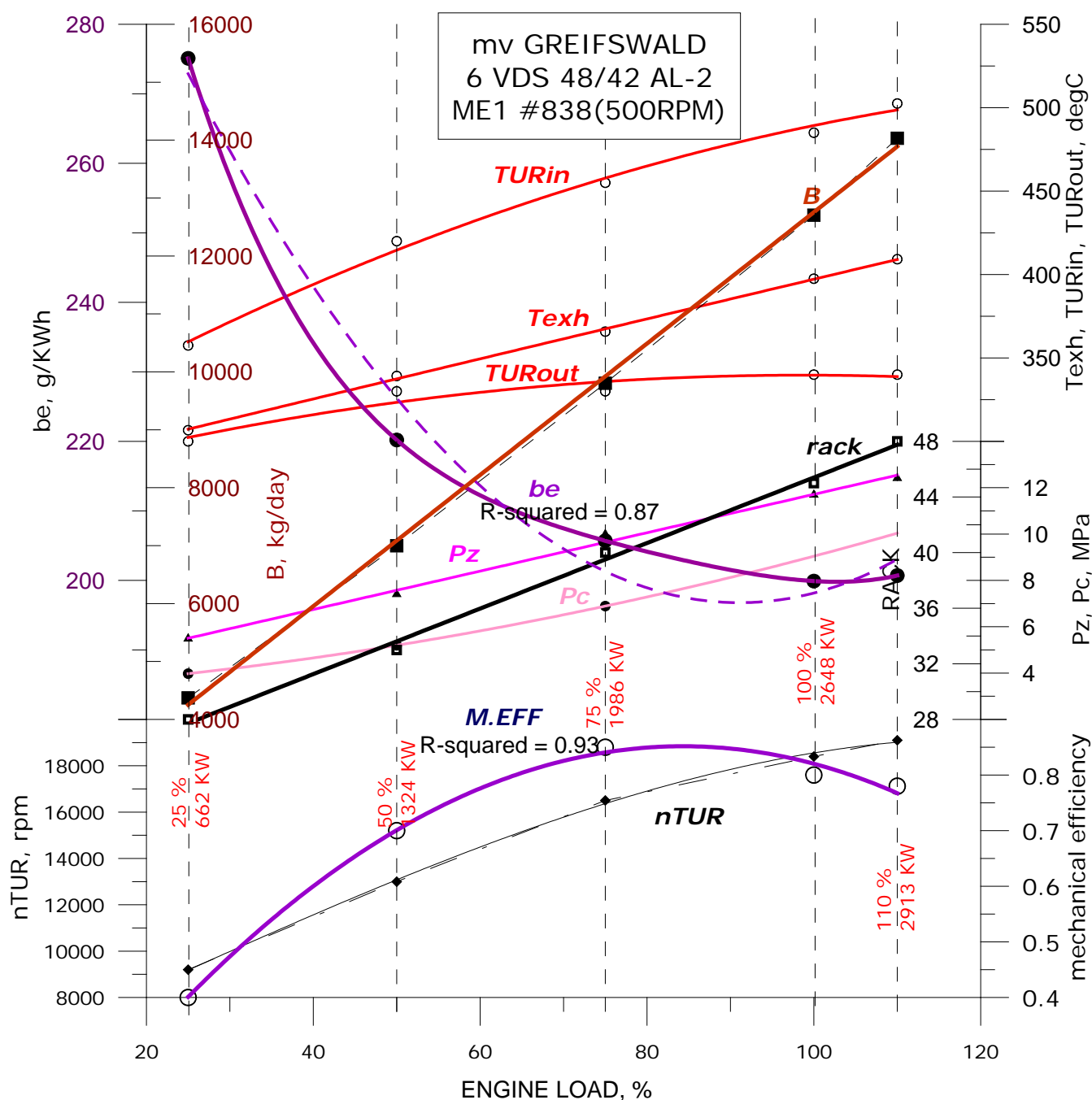


Рис. 3 - Моделювання даних ходових випробувань СДУ СОД 6VDS48/42AL-2 т/х "GREIFSWALD" на п'яти режимах по навантажувальній характеристиці (500 хв^{-1}). TUR_{in} , TUR_{out} , $Texh$ - температури газів до, після ГТН і після циліндрів; b_e - питома ефективна витрата палива; $rack$ - індекс рейки ПНБТ; $M.EFF$ - значення механічного ККД; $nTUR$ - частота обертання ГТН

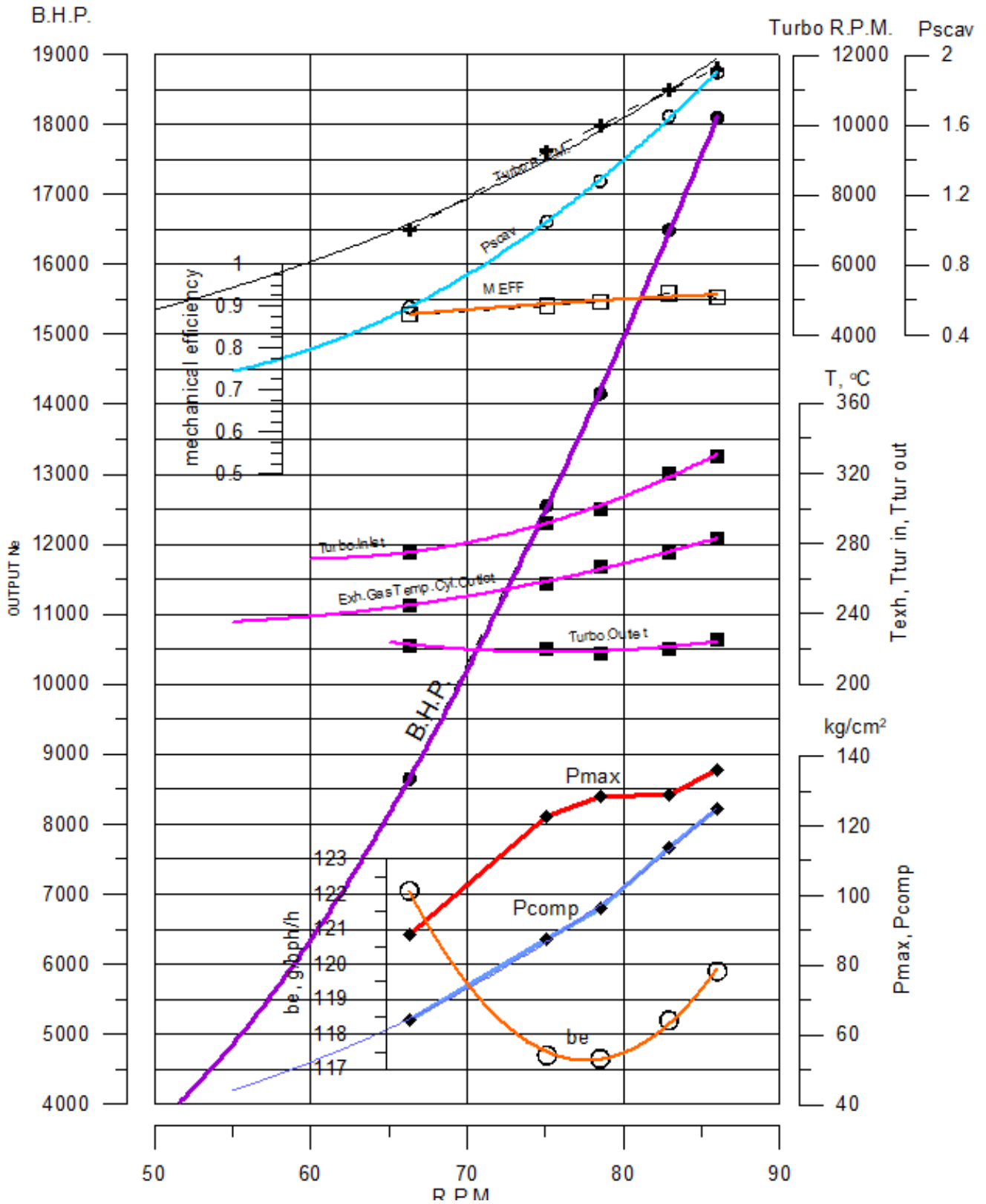


Рис. 4 - Моделювання СДУ МОД 6L80МС т/х "FATHER S" по гвинтовій характеристиці. P_{scav} - тиск наддувного повітря; $B.H.P.$ - потужність СДУ; P_{max} , P_{comp} - максимальні тиск згоряння і стиснення в робочому циліндрі.

На основних експлуатаційних режимах визначення механічного ККД за допомогою відношення частот обертання ГТН показало високу точність. Відносна похибка не перевищувала 3% в порівнянні з даними ходових випробувань СДУ. Максимальні значення механічного ККД припадали на режими 80-85% від номінальної потужності СДУ.

Для проведення вимірювань в процесі експлуатації СДУ був розроблений мікроконтролерний обчислювач, який реалізує досліджений в роботі метод визначення ефективних параметрів. Набір даних від перетворювачів фізичних величин, синхронізація і математичні обчислення виконуються на 32-розрядному мікроконтролері *STM32F4* компанії *STMicroelectronics*. До складу мікроконтролера входить модуль для роботи з числами з плаваючою точкою, що збільшує швидкість обробки в додатках, пов'язаних, наприклад зі спектральним аналізом. В якості дисплея застосований 4.3 "TFT LCD Intelligent Touch Display". В основному режимі на екран виводяться одночасно значення трьох параметрів: вимірювана лопаточна частота, розрахункове значення оборотів ГТН ($TURrpm$) і розрахункове значення механічного ККД (η_m) (рис. 5).



Рис. 5 - Основний екран обчислювача параметрів СДУ і екран налаштувань

У режимі «Налаштування» (рис. 5) можна задати значення параметрів для розрахунку лопаткової частоти, обертів ГТН ($TURrpm$) і значення механічного ККД. Так само в цьому режимі для зменшення ефекту «витоку» можна задати аналітичне рішення або одне з віконних перетворень, або уточнення основної частоти за допомогою апроксимації максимуму спектра. Режим «Опції» дозволяє підключити аналітичний метод усунення витоку потужності дискретного спектра, вирішивши систему рівнянь (7) для відновлення частоти вихідного сигналу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена і вирішена науково-практична задача розробки методу визначення ефективних параметрів суднової дизельної енергетичної установки (СДУ) в експлуатації. Представлено нове рішення задачі визначення механічного ККД СДУ на поточному експлуатаційному режимі. Отримані в роботі наукові та практичні результати дозволяють зробити нижчеперелічені висновки.

1. Аналіз показав, що, незважаючи на існуючі вимоги ІМО і більшості класифікаційних товариств, визначення ефективних параметрів СДУ є складним завданням, яке не вирішується в експлуатації без застосування спеціальних методів і засобів.

2. У зв'язку зі складністю метрологічної підтримки і високою вартістю апаратних систем вимірювання обертаючого моменту на валу більшість морських транспортних судів не обладнані ними в даний час. При цьому є можливість безпосередньо під час експлуатації визначати індикаторні параметри робочого процесу (середній індикаторний тиск і потужність) і частотні характеристики газотурбонагнітачів СДУ.

3. Аналіз показав, що визначення індикаторних параметрів СДУ під час експлуатації проводиться з максимальними відносними похибками до 3% з допомогою систем моніторингу робочого процесу. Розроблені методи дозволяють визначати частоти обертання колінчастого валу і газотурбонагнітача СДУ з похибкою до 1%. У цьому випадку визначення ефективних параметрів СДУ за розробленою в дисертації методикою може бути виконано з відносною похибкою до 5%, що задовольняє вимогам ГОСТ 21792-89 для непрямих методів розрахунку і порівняно з похибкою емпіричного визначення механічного ККД за даними ходових випробувань.

4. Встановлено, що після виходу ГТН на робочий режим (при навантаженні СДУ вище 35 - 40% і після відключення допоміжних вітрогінників) відношення частот обертання ГТН номінального і поточного режимів пропорційно відношенню індикаторних потужностей на відповідних режимах СДУ зі значеннями коефіцієнта кореляції 0.9 - 0.97. Такий тісний зв'язок було використано при розробці нового експрес-методу визначення ефективних параметрів СДУ.

5. Встановлено, що частота обертання ГТН СДУ на поточному навантажувальному режимі може бути визначена з похибкою менше 1% за допомогою методів спектрального аналізу віброакустичних сигналів компресора ГТН.

6. В діапазоні основних навантажувальних режимів суднового головного двигуна (60-80%) відносна похибка розрахунку η_m за пропонованим методом, нижче похибки поширених альтернативних методів (проф. Г.О. Конакова та інших непрямих методів) в середньому в 1.5-2 рази.

7. Отримані результати показали, що аналітичний метод усунення витоку потужності дискретного спектру стійкий до шумів у вихідному сигналі. В ре-

зультаті аналітичного вирішення фаза і частота сигналу зашумленого до 10% білим шумом, відновлюються до початкового значення з похибкою не більше 0,5 %.

8. Розроблені в дисертації методи реалізовані на сучасній елементній базі з використанням спеціалізованих FFT-мікроконтролерів. Це дозволяє розширити сферу застосування розроблених методів і сприяє підвищенню ефективності експлуатації СДУ морських підприємств різних типів.

9. Впровадження розроблених в дисертаційному дослідженні методів є альтернативою дорогим прямим (за допомогою торсіометрів на гребному валу) вимірам ефективних параметрів СДУ. Розроблені методи впроваджені судноплавними компаніями «UKRFERRY Shipmanagement», "TRANSHIP" (Україна), "ДОНРЕЧФЛОТ" (Ростов-на-Дону), "Prestige Shipmanagement Ltd." (Турція). Акти впровадження додаються.

10. Спрямованість на детальний аналіз робочого процесу і наукоємність отриманих результатів дозволяє використовувати їх в навчальному процесі спеціалізованих технічних ВНЗ. У зв'язку з цим результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес судномеханічної спеціальності Одеського національного морського університету. Результати дослідження також можуть бути використані у вищих технічних морських навчальних закладах і судноплавних компаніях при підготовці морських інженерів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ, ОПУБЛІКОВАНІ В СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ВИДАННЯХ

1. Варбанец Р.А. Параметрическая диагностика судовой дизельной энергетической установки в эксплуатации / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» – 2011. - №10(87). – С. 197-202. (*Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar*).

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи моніторингу та параметричної діагностики робочого процесу СДУ DEPAS 4.0H. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

2. Варбанец Р.А. Интернет-мониторинг эксплуатационных режимов судовой энергетической установки / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Вісник Одеського національного морського університету, 2011. - №32. - С.123-127.

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи інтернет-моніторингу СДУ. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

3. Варбанец Р.А. Определение эффективных параметров и диагностика судовой дизельной энергетической установки в эксплуатации / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Сборник научных трудов Академии военно-морских сил им. П.С. Нахимова, 2012. - № 1(9). – С. 195-201.

Здобувач розробив методи визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації. Модифікував метод професора Г.О. Конакова шляхом використання відношення частот обертання ГТН, з високою точністю, що визначаються в експлуатації за допомогою спектрального аналізу.

4. Варбанец Р.А. Виброакустический контроль частотных характеристик судового дизеля с турбонаддувом / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» - 2012. - №10(97). – С. 98-105. (Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar).

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи віброакустичного контролю частотних характеристик СДУ з турбонагнітачем. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

5. Варбанец Р.А. Комплексный контроль технического состояния судового двигателя с турбонаддувом / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Искусственный интеллект. – 2012. – № 3. – С. 366-376. (Наукометрична база Google Scholar).

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи віброакустичного контролю частотних характеристик СДУ з турбонагнітачем. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

6. Варбанец Р.А. Спектральный анализ частотных характеристик судового дизеля с турбонаддувом / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань // Сборник научных трудов Академии военно-морских сил им. П.С. Нахимова, 2012 – Вып. 4(12). – С. 158-164.

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи віброакустичного контролю частотних характеристик СДУ з турбонагнітачем. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

7. Варбанец Р.А. Мониторинг частотных параметров судового дизеля с турбонаддувом / Р. А. Варбанец, А. И. Головань, Ю. Н. Кучеренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология". Астрахань. – 2013. – № 1.– С. 103-110. (Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США), РИНЦ)

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи віброакустичного контролю частотних характеристик СДУ з турбонагнітачем. Брав

участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

8. Варбанец Р.А. Влияние системы VIT на характер рабочего процесса малооборотных дизелей MAN серии MC / Р.А. Варбанец, Ю.Н.Кучеренко, А.И. Головань, Н.И. Александровская // *Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал.* Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» - 2013. - №10(107). – С. 161–165. (*Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar*).

Здобувач брав участь у постановці експерименту, обробці даних моніторингу та формуванні висновків. Здійснював перевірку розробленого ним методу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації, проводив аналіз даних Sea Trials.

9. Варбанец Р.А. Экспериментальная проверка системы VIT малооборотного дизеля MAN 6L80MCE / Р.А. Варбанец, Н.И. Александровская, А.И. Головань, Ю.Н. Кучеренко // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* Астрахань. - 2013. – № 2.– С. 85–92. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США), РИИЦ*)

Здобувач брав участь у постановці експерименту, обробці даних моніторингу та формуванні висновків. Здійснював перевірку розробленого ним методу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації, проводив аналіз даних Sea Trials.

10. Варбанец Р.А. Спектральний аналіз у задачах діагностики систем турбонаддува судових дизелів / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, Л.В. Кошарская, Ю.Н. Кучеренко, В.И. Кырнац // *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Научно-технический журнал.* Донецк. 2013. – №34. – С. 141–145. (*Наукометрична база Google Scholar*).

Здобувач розробив принципову і електронну схеми системи віброакустичного контролю частотних характеристик СДУ з турбонагнітачем. Брав участь в постановці і проведенні експерименту, обробці даних діагностування та формуванні висновків.

11. Варбанец Р.А. Анализ метода устранения «утечки» спектра при диагностике систем турбонаддува судовых дизелей / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, А.И. Головань, Н.И. Александровская // *Искусственный интеллект.* - 2013. – №4(62). – С. 289–295. (*Наукометрична база Google Scholar*).

Здобувач виконав дослідження методу усунення витоку потужності в дискретному спектрі вібрації компресора ГТН СДУ при зашумленому сигналі.

12. Кучеренко Ю.Н. Анализ возможности вибродиагностики технического состояния судовых дизелей / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, В.И. Кырнац // *Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал.* Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

«ХАИ» - 2014. – № 6(113). – С. 75–79. (*Наукометричні бази: eLIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, AcademicKeys, Infobase Index, WordCat, Google Scholar*).

Здобувач брав участь у постановці експерименту, обробці даних моніторингу та формуванні висновків. Здійснював перевірку розробленого ним методу діагностування ГТН СДУ в експлуатації.

13. Кучеренко Ю.Н. Технологические карты научных исследований в задачах мониторинга и параметрической диагностики судовых дизелей / Р.А. Варбанец, Ю.Н. Кучеренко, В.И. Кырнац, Е.И. Жолтиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань. - 2016. – № 1.– С. 47–59. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США), РИНЦ*)

Здобувачем розроблена технологічна карта досліджень розробки методу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації.

14. Варбанец Р. А. Метод безградиентной минимизации Powell'64 в задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей / Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, А.В. Ерыганов, Ю.Н. Кучеренко, Е.И. Жолтиков, В.О. Маулевич // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань. - 2017. – № 4.– С. 49–61. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США), РИНЦ*)

Здобувачем здійснено підготовку даних для проведення процедури мінімізації та аналіз результатів нелінійної n-параметричної мінімізації.

15. Ивановский В. Г. Исследование пусковых качеств и экономичности дизеля при установке гидрозатворных и механических форсунок / В.Г. Ивановский, Р.А. Варбанец, В.П. Губанов, Е.И. Жолтиков, Ю.Н. Кучеренко, В.О. Маулевич // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. Астрахань. - 2018. – № 1.– С. 60–66. (*Наукометричні бази: Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ (Швеція), Academic Search Research & Development, Applied Science & Technology Source, BSCO Publishing (США), РИНЦ*)

Здобувач брав участь в обробці даних експериментальних досліджень і аналізі параметрів робочого процесу обраних в публікації для аналізу судових дизелів.

16. Кучеренко Ю. М. Спосіб випробування та перевірки агрегатів 4000 і 4001 / Ю. М. Кучеренко, С.І. Крайнов, О.І. Федоренко, В.В. Юхачов // Патент на корисну модель № 38833. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.01.2009.

Здобувач розробив систему автоматичної реєстрації параметрів авіаційних паливних агрегатів 4000 і 4001 при випробуваннях.

АНОТАЦІЯ

Кучеренко Ю. М. Метод контролю ефективних параметрів роботи суднової дизельної енергетичної установки в експлуатації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Одеський національний морський університет. – Одеса 2018.

Дисертація присвячена дослідженню і розробці методу визначення ефективних параметрів суднової дизельної енергетичної установки (СДУ) в експлуатації. Ефективна потужність і обертаючий момент на валу, середній ефективний тиск і питомі ефективні витрати палива і мастила є базовими характеристиками. Ці вихідні параметри повністю характеризують технічний стан СДУ в експлуатації. Вони використовуються для контролю навантажувального режиму, добових витрат і прогнозування залишкового експлуатаційного ресурсу. На підставі аналізу ефективних параметрів СДУ формується і юридично закріплюється фрахова швидкість судна і його експлуатаційні витрати. Таким чином, дисертаційне дослідження присвячене актуальній проблемі судноплавства, при зміні ефективних параметрів з часом в процесі експлуатації СДУ.

Основна проблема полягає в тому, що на переважній більшості морських транспортних суден технічний персонал може з допустимою похибкою визначати тільки індикаторні параметри СДУ (середній індикаторний тиск і індикаторну потужність). Переклад індикаторних параметрів в ефективні проводиться за допомогою приблизної оцінки механічних втрат і механічного ККД, що знижує точність розрахунків і достовірність діагностичних висновків.

Математичне моделювання робочого процесу СДУ, а так само аналіз даних морських випробувань (*Sea Trials*) різних типів суден, наведені в дисертації, дозволили модифікувати методику професора Г.О. Конакова для визначення механічного ККД СДУ. В роботі запропоновано використовувати відношення частот обертання газотурбонагнітачів (ГТН) для визначення навантажувального режиму СДУ і подальшого визначення механічного ККД. При цьому використовується той факт, що визначення частоти обертання ротора ГТН (*TURrpm*) на поточному навантажувальному режимі проводиться з високою точністю за допомогою методів спектрального аналізу віброакустичних сигналів компресорної частини ГТН. В роботі удосконалено метод урахування витоку потужності дискретного спектра (*DFT Spectral Leakage*), в результаті чого підвищено точність визначення частот контрольних гармонік. На практиці відносна похибка визначення *TURrpm* в 2-3 рази менше похибки визначення тиску наддувного повітря в ресивері за допомогою вимірювальних приладів і на 30 ÷ 50% менше похибки визначення індикаторних показників.

Модифікація методики розрахунку механічного ККД, заснована на використанні точно визначених в експлуатації величин *TURrpm*, дозволила підвищити точність розрахунку механічного ККД і ефективних параметрів СДУ в 1,5 -2 рази. Головним чином, з'явилася можливість відійти від емпіричних оці-

нок в цій області і формалізувати процес отримання ефективних параметрів. Така формалізація є базою для автоматичного розрахунку ефективних параметрів СДУ в експлуатації за допомогою доступних цифрових вимірювальних систем, вартість яких значно менша за вартість суднових торсіометрів.

Розроблений в дисертації метод дозволяє вирішити актуальну задачу визначення ефективних параметрів СДУ в експлуатації на різних типах морських транспортних суден. Вирішення цього завдання підвищить якість експлуатації і ефективність управління судном.

Ключові слова: суднові дизельні установки, ефективні параметри, математичне моделювання, механічний ККД, газотурбонагнітачі, спектральний аналіз.

АННОТАЦІЯ

Кучеренко Ю. Н. Метод контроля эффективных параметров работы судовой дизельной энергетической установки в эксплуатации. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Одесский национальный морской университет. – Одесса, 2018.

Диссертация посвящена исследованию и разработке метода определения эффективных параметров судовой дизельной энергетической установке (СДУ) в эксплуатации. Выходные параметры: эффективная мощность и крутящий момент на валу, среднее эффективное давление и удельные эффективные расходы топлива и масла являются базовыми характеристиками СДУ. Они полностью характеризуют техническое состояние СДУ в эксплуатации и используются для контроля нагрузочного режима, суточных расходов и прогнозирования остаточного эксплуатационного ресурса. На основании анализа эффективных параметров СДУ формируется и юридически закрепляется фрахтовая скорость судна и его эксплуатационные расходы. Таким образом, диссертационное исследование посвящено актуальной проблеме судоходства, тем более, что со временем, в процессе эксплуатации происходит изменение эффективных параметров СДУ в сторону снижения мощности, увеличения расходов и повышения тепловой напряженности.

Основная проблема заключается в том, что на подавляющем большинстве морских транспортных судов технический персонал может с допустимой погрешностью определять только индикаторные параметры СДУ (среднее индикаторное давление и индикаторную мощность). Перевод индикаторных параметров в эффективные производится с помощью приблизительной оценки механических потерь и механического КПД, что снижает точность расчётов и достоверность диагностических выводов.

Математическое моделирование рабочего процесса СДУ, а так же анализ данных ходовых испытаний различных типов судов, приведенные в диссертации, позволили модифицировать методику профессора Г.А. Конакова для определения механического КПД СДУ. В работе предложено использовать отношение

частот вращения газотурбонагнетателей (ГТН) для определения нагрузочного режима СДУ и последующего определения механического КПД. При этом используется тот факт, что определение частоты вращения ротора ГТН $TURrpm$ на текущем нагрузочном режиме производится с высокой точностью с помощью методов спектрального анализа виброакустических сигналов компрессорной части ГТН. В работе усовершенствован метод учета утечки мощности дискретного спектра (*DFT Spectral Leakage*), в результате чего повышена точность определения частот контрольных гармоник. На практике относительная погрешность определения $TURrpm$ в 2-3 раза меньше погрешности определения давления наддувочного воздуха в ресивере с помощью измерительных приборов и на 30 ÷ 50 % меньше погрешности определения индикаторных параметров.

Модификация расчетной методики определения механического КПД, основанная на использовании точно определяемых в эксплуатации величин $TURrpm$, позволила повысить точность расчёта механического КПД и последующего определения эффективных параметров СДУ в 1,5 – 2 раза. Главным образом, появилась возможность уйти от эмпирических оценок в этой области и формализовать процесс получения эффективных параметров. Такая формализация является базой для автоматического расчёта эффективных параметров СДУ в эксплуатации с помощью доступных цифровых измерительных систем.

Разработанный метод может быть широко внедрен в практику эксплуатации морских судов разного типа, а используемые для его реализации средства являются доступными и их стоимость значительно меньше стоимости судовых торсиомеров. Решение этой научно-практической задачи повышает качество эксплуатации и эффективность управления судном.

Ключевые слова: судовые дизельные установки, эффективные параметры, математическое моделирование, механический КПД, газотурбонагнетатели, спектральный анализ.

ABSTRACT

Kucherenko Y.M. Marine diesels effective parameters monitoring method in operation. - The manuscript.

Scientific degree thesis for candidate of technical sciences, specialty 05.22.20 – operation and repair of vehicles. - Odessa National Maritime University. - Odessa, 2018.

Dissertation is devoted to research and development of a method for determining effective parameters of a marine diesel power plant (MDPP) in operation. Efficient power and shaft torque, mean effective pressure and specific oil and fuel consumption are the basic characteristics. These output parameters completely characterize a technical condition of a MDPP in operation. They are used to control a load mode, daily expenses and prediction of residual operational resource. Based on the analysis of effective inboard motor parameters are formed and

legally fixed the rate of chartering and operational costs of the vessel. Thus, the thesis is devoted to a current problem of shipping, especially since the effective parameters are changed over time of MDPP operation.

The main problem is that in a vast majority of marine vessels, technicians can only determine, with acceptable accuracy, indicating parameters (mean indicated pressure and power indicator). Translation of indicating parameters into the effective ones is performed by a rough estimation of mechanical and mechanical efficiency losses, which reduces an accuracy of the calculations and an accuracy of the diagnostic findings.

Mathematical modeling of a MDPP working process, as well as an analysis of a sea trials data (Sea Trials) of various types of vessels listed in the thesis allowed to modify the methodology of Professor G.A. Konakov for determining a mechanical efficiency of a MDPP. The paper proposed to use the ratio of turbo speeds (HHP) for determining the load mode of a MDPP and the subsequent determination of mechanical efficiency. This uses the fact that a determination of a rotor speed HHP ($TURrpm$) on a current load mode is made with high precision using methods of a GTP compressor part vibration signal spectral analysis. In the paper has been improved the method of accounting the DFT Spectral Leakage which results in increased accuracy of control harmonic frequencies definition. On practice relative $TURrpm$ determination error is 2-3 times less than an error in determining of a charge air pressure in a receiver with a help of measuring instruments and 30 ÷ 50% less than the error in determining the IMEP, IPOWER.

Modification of the calculation method based on the use of precisely defined RPMt in an operation values, has allowed to improve an accuracy of the calculation of the mechanical efficiency and effectiveness of the MDPP parameters in 1,5 – 2 times. Mainly, it is possible to escape from empirical estimates in this area and to formalize a process of obtaining the effective parameters. This formalization is a basis for an automatic calculation of an effective operation of a MDPP parameters using an available digital measuring systems, which cost is much less than the cost of ship torque meters.

The method designed in the thesis allows to solve a problem of determining an effective parameters of a MDPP in operation on different types of marine vessels. Solution to this problem will improve quality and efficiency of operation of a vessel.

Key words: marine diesel plants, effective parameters, mathematical modeling, mechanical efficiency, turbochargers, spectral analyses.