

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

ЗАЛОЖ Віталій Іванович



УДК 621.436:629.128.6:656.6

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
МЕТОДУ АНАЛІТИЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ**

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис (монографія).

Робота виконана в Дунайському інституті Національного університету «Одеська морська академія» 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» (ОНМУ,
м. Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
ГОРОБЧЕНКО Олександр Миколайович
професор кафедри «Тяговий рухомий склад
залізниць», Державний університет
інфраструктури та технологій (ДУІТ, м. Київ)

кандидат технічних наук, доцент
САВЧУК Володимир Петрович
завідувач кафедри «Експлуатації суднових
енергетичних установок», Херсонська державна
морська академія (ХДМА, м. Херсон)

Захист дисертації відбудеться «02» липня 2020 року о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01 у Державному університеті інфраструктури та технологій за адресою: 04071, м. Київ, вул. Кирилівська, 9.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інфраструктури та технологій за адресою: 04211, м. Київ, пр. Героїв Сталінграда, 2.

Автореферат розісланий «02» червня 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.110.01



О.А. СЬОМІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з важливих задач експлуатації засобів транспорту є підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів. Моніторинг та параметрична діагностика робочого процесу є основою контролю технічного стану. Вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна ґрунтуються на аналізі індикаторних діаграм тиску газів в робочих циліндрах. Розрахунок індикаторної потужності, яка характеризує навантажувальний режим і на базі якої визначаються показники енергоефективності, також здійснюється за допомогою аналізу індикаторних діаграм. Розрахунок і аналіз індикаторних діаграм базуються на рішенні наукової проблеми синхронізації даних моніторингу робочого процесу, тобто на задачі перекладу даних з функції часу t в функцію по куту φ повороту колінчастого вала (ПКВ), де найбільше значення має точність визначення положення верхньої мертвої точки (ВМТ) поршня.

Найбільш поширеними є сучасні мобільні системи моніторингу. В цьому випадку рішення задачі синхронізації даних моніторингу робочого процесу за допомогою апаратних датчиків неприйнятне у зв'язку зі складністю, а часом і неможливістю установки апаратних датчиків положення ВМТ додатково до штатних датчиків. Також це призводить до ускладнення схеми вимірювань в поєднанні із високою похибкою, яка залежить від навантажувального режиму. Крім того, встановлення апаратних датчиків потребує часу та пов'язано з організаційними проблемами, бо тоді необхідним є тимчасове виведення двигуна з експлуатації. Вказані проблеми відсутні у разі аналітичної синхронізації даних.

Задача синхронізації повинна бути вирішена перед задачею моніторингу та параметричної діагностики двигуна. Від точності її рішення залежить похибка оцінки потужності та коректність діагностичних висновків. Існуючі методи аналітичної синхронізації недостатньо ефективні стосовно до умов експлуатації транспортних двигунів. В основному це пов'язано зі складністю формулювання критеріїв синхронізації або їх недостатньою точністю для забезпечення розрахунку потужності і основних параметрів робочого процесу з заданими величинами відносних похибок. Тому *актуальною* є розробка нового методу синхронізації, де вихідні дані представлені у вигляді часових серій, записаних в пам'ять комп'ютера через рівні інтервали часу. Потужність, отримана в результаті рішення завдання синхронізації, використовується для розрахунку показників ефективності експлуатації транспортних двигунів. В першу чергу це стосується коефіцієнта енергоефективності, який визначається за методикою Міжнародної морської організації *ІМО*.

Таким чином можливо сформулювати наукове завдання даної роботи. Підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів шляхом розроблення методу аналітичної синхронізації даних моніторингу для суттєвого спрощення схеми і організації роботи системи діагностування та більш точного визначення потужності транспортних двигунів. Впровадження сучасного методу діагностування, який забезпечує високу ефективність

використання та більш точне визначення діагностичних параметрів транспортних двигунів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень в області "Енергетика та енергоефективність. Технології енергетичного машинобудування", затверджених Постановою Кабінету Міністрів України №942 від 7 вересня 2011 р., «Стратегії розвитку суднобудування на період до 2020 року», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 6 травня 2009 року №581-р, «Транспортної стратегії України на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 року № 2174- р.

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Інженерних дисциплін» Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» та кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. Наукові результати, що представлені в дисертації, використані: в НДР «Підвищення енергоефективності у судноплавстві» ДР № 0118U007606 від 01.01.2019 та НДР «Удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок» ДР № 0216U000617 від 29.12.2017 в якості співвиконавця розділів, присвячених методам параметричної діагностики транспортних двигунів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації та подальше визначення основних параметрів робочого процесу.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів синхронізації даних з точки зору застосування їх для умов експлуатації транспортних двигунів.
2. Вибір методу фільтрації даних, який дозволяє провести числовий аналіз екстремумів першої і другої похідних діаграм тиску, отриманих методами числового диференціювання.
3. Розробка методу попередньої синхронізації даних моніторингу робочого процесу на етапі аналізу часових діаграм.
4. Розробка аналітичного методу визначення верхньої мертвої точки і подальшої синхронізації даних моніторингу робочого процесу із заданою малою величиною абсолютної похибки.
5. Аналіз відносної похибки визначення основних параметрів робочого процесу, отриманих після виконання завдання синхронізації.
6. Розрахунок і аналіз показників енергоефективності за методикою Міжнародної морської організації (ІМО), який базується на визначенні потужності.

Об'єктом дослідження є робочий процес транспортних дизелів в умовах експлуатації.

Предметом дослідження є методи аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних двигунів в експлуатації, які

базуються на алгоритмах визначення положення верхньої мертвої точки поршня шляхом аналізу часових діаграм тиску газів в робочому циліндрі без використання апаратних датчиків.

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження базується на основних положеннях теорії двигунів внутрішнього згорання і термодинаміки. Для визначення основних параметрів робочого процесу використовуються методи числової обробки даних моніторингу, включаючи методи числового диференціювання та цифрової фільтрації на базі дискретного перетворення Фур'є. В експериментах використовувалися методи визначення параметрів робочого процесу судових дизелів за допомогою системи моніторингу *DEPAS D4.0 HT*. При розробці алгоритмів використовувалось програмне середовище *Delphi* і математичні бібліотеки *MathToolbox*, компільовані в середовищі *Delphi*, а також метод нелінійної мінімізації *PowellMJD'64*. Для візуалізації даних і побудови регресійних моделей використовувалось середовище *Grapher 7.0*.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- *вперше* розроблено метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів, що забезпечило підвищення ефективності контролю їх технічного стану в експлуатації. На відміну від існуючих, розроблений метод послідовно використовує три етапи: лінійний, синусоїдальний і модель $P'=0$ (рівності нулю першої похідної від тиску при стисненні), що дозволяє проводити розрахунок основних параметрів робочого процесу з величиною відносної похибки менш ніж 2,5%, таким чином відповідаючи вимогам сертифікаційних товариств;

- *отримав подальший розвиток* метод первинної синхронізації шляхом аналізу екстремумів діаграм швидкості і прискорення зміни тиску в робочих циліндрах транспортного двигуна, отриманих методом числового диференціювання та згладжених фільтром низьких частот *Butterworth*, що на відміну від існуючих методів дозволяє забезпечити абсолютну похибку розрахунку верхньої мертвої точки не більше $0,5^\circ$ повороту колінчастого валу - достатню на етапі первинної синхронізації;

- *удосконалено* процедури лінійної і синусоїдальної синхронізації, які на відміну від існуючих використовують уточнені обмеження при побудові моделей, що дозволило підвищити точність синхронізації і забезпечити величину відносної похибки визначення верхньої мертвої точки за допомогою моделі $P'=0$ в діапазоні $0,1 \dots 0,3^\circ$ повороту колінчастого валу, що в свою чергу забезпечує розрахунок індикаторної потужності і основних параметрів робочого процесу з заданими величинами відносних похибок та дозволяє підвищити ефективність контролю технічного стану транспортних дизелів.

Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, що містяться в роботі, обумовлена використанням коректних математичних моделей і числових методів розв'язання задач обробки експериментальних даних. Достовірність наукових результатів роботи підтверджена відповідністю розрахункових значень параметрів робочого процесу результатам морських натурних випробувань з допустимою похибкою.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає в розробці методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу, імплементованого в нову версію програмного забезпечення системи моніторингу *DEPAS D4.0HT*, яка широко застосовується на морських суднах, на берегових дизельних електростанціях і на дизелях тепловозів. Отримані внаслідок аналітичної синхронізації значення індикаторної потужності та середнього індикаторного тиску, а також питомої індикаторної витрати палива використовуються для розрахунку коефіцієнта енергоефективності транспортних суден по методиці *ІМО*.

Розроблений в дисертації практичний метод визначення положення верхньої мертвої точки поршня в робочому циліндрі і подальша аналітична синхронізація дозволили виключити апаратний датчик визначення ВМТ. Підвищено точність визначення ВМТ і подальшої синхронізації при діагностуванні транспортних дизелів умовах практичної експлуатації.

Результати дисертації впроваджені при експлуатації суден судноплавних компаній «TRANSHIP» (Україна), ПрАТ «Українське Дунайське Пароплавання» отримано акти впровадження.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес кафедри Інженерних дисциплін (ІД) Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» та кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації (СЕУ і ТЕ) Одеського національного морського університету. Теоретичні і практичні результати роботи використовуються при читанні дисциплін «Електроніка і електронні засоби управління», «Системи діагностування», «Технічна експлуатація суднових енергетичних установок» для студентів, курсантів старших курсів та аспірантів судномеханічних факультетів спеціалізації «Експлуатація суднових енергетичних установок» зазначених вищих навчальних закладів.

Особистий внесок автора. Нові наукові положення, винесені на захист, отримані автором особисто. Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукопису. У дисертаційне дослідження з статей, написаних у співавторстві, включені тільки результати, отримані автором особисто або з безпосередньою його участю. У спільних роботах автору належать наступні положення, також зазначені в списку опублікованих праць.

У спільній роботі [1.1] здобувач здійснював аналіз розробленого ним методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу морських транспортних дизелів. Метод послідовно використовує три етапи: лінійний, синусоїдальний і модель $P'=0$, що дозволяє проводити розрахунок основних параметрів робочого процесу з величиною відносної похибки менш ніж 2,5%. Автор брав участь в підготовці експерименту і обробці експериментальних даних. У статті [1.2] здобувач брав участь у підготовці та проведенні експерименту, обробці експериментальних даних, аналізі літературних джерел та постановці проблеми. Здійснював дослідження співвідношення показників енергоефективності та кількості шкідливих викидів в атмосферу у внутрішньому судноплаванні. У спільній роботі [1.3] внесок дисертанта - аналіз показників енергоефективності, встановлених в

міжнародному морському судноплавстві, а також особливостей їх застосування у внутрішньому судноплавстві, графічні результати, формування висновків. У статті [1.4] внесок дисертанта – обробка експериментальних даних аналізу впливу навігаційних умов на характеристики економічності та екологічності роботи суден у внутрішньому дунайському судноплавстві, графічні результати, формування висновків. Внесок дисертанта у спільній роботі [1.5] полягає в формуванні результатів розрахунків та відображаючих їх графічних залежностей, визначення швидкості руху судна в умовах фарватеру змінної, обмеженої глибини на річкових ділянках, аналіз невизначеностей і факторів, що впливають на швидкість. В роботі [1.6] здобувач брав участь в обробці експериментальних даних, постановці проблеми визначення характерних точок в залежностях індексів енергоефективності. У спільній роботі [1.7] здобувачем проведений інформаційний пошук та систематизація праць з теми дослідження, формування висновків.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати дослідження представлялися і обговорювалися та були схвалені на 16 міжнародних науково-практичних конференціях, конгресах:

– XXIV-ій Міжнародний конгрес двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» - Харків - Коблево, 2-7 вересня 2019р.;

– VIII-ій, X-ій Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО», – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017, 2019;

– VI-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика», 11-14 вересня 2019 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2019;

– Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», 7-8 листопада 2019 р. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2019;

– VIII-ій, IX-ій, X-ій Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту», м. Ізмаїл: Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», 2017, 2018, 2019;

– Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті професорів Фомина Ю.Я. і Семенова В. С. (FS - 2019), 24–28 квітня 2019 р. – Одеса - Стамбул - Одеса, пором «Kaunas»: Одеський національний морський університет, 2019;

– *5-th International Scientific Conference «SEA-CONF 2019», 17 May, 2019, Constanta: “MIRCEA CEL BATRAN” NAVAL ACADEMY;*

– VIII-ій, IX-ій Міжнародних науково-практичних конференціях «Транспорт і логістика: проблеми та рішення», Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет – Одеса, 2018, 2019;

– Міжнародній науково-технічній конференції «100 років вищої морської освіти в Україні, 27 листопада 2018 р., Одеса: Одеський національний морський університет, 2018.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 23 наукові роботи, 7 з них у спеціалізованих науково-технічних виданнях, рекомендованих МОН України для публікації результатів дисертаційних досліджень і включених в наукометричні бази даних. Останні 2 публікації зроблені в 2019 році в виданнях, які входять до переліку міжнародної наукометричної бази *SCOPUS*.

Публікації у повному обсязі відображають основні результати дисертаційного дослідження.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 162 сторінки, в тому числі 34 рисунка і 8 таблиць. Список використаних джерел становить 121 найменування на 14 сторінках. У додатку А наведені акти впровадження результатів дисертаційного дослідження, у додатку Б наведено список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації. У додатку В наведено результати математичного моделювання робочого процесу.

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 наукових праць вітчизняних і закордонних авторів Фоміна Ю. Я., Семенова В. С., Івановського В. Г., Варбанця Р. А., *Stefan Neumann, Klaas Visser, Douwe Stapersma* та інших авторів виділені існуючі методи аналітичної синхронізації моніторингу транспортних двигунів. Показано, що рішення задачі синхронізації даних моніторингу актуально для всіх сучасних портативних систем експлуатаційної діагностики транспортних двигунів: *Kistler, IMES GmbH, Lemag Premet, Depas* і т.д.

Показано, що існуючі методи аналітичної синхронізації недостатньо ефективні стосовно до умов експлуатації транспортних двигунів. В основному це пов'язано зі складністю формулювання критеріїв синхронізації або їх недостатньою точністю внаслідок впливу шумів у вихідних даних. Необхідно врахувати той факт, що при числовому диференціюванні підвищується рівень шумів, пов'язаний з похибками вимірювання сигналів і їх дискретним поданням. Вплив шумів при аналізі першої похідної значно підвищує похибку визначення параметрів, пов'язаних з нею. Аналіз другої похідної взагалі неможливий без застосування спеціальних методів цифрової фільтрації. В результаті зроблено висновок про те, що повинні бути розроблені нові методи

аналітичної синхронізації або вдосконалені існуючі, що є суттю актуального наукового завдання, вирішенню якого присвячена дана робота.

Для розрахунку основних параметрів робочого процесу використовується аналіз визначених під час експлуатації індикаторних діаграм за методикою, прийнятою в системах *DEPAS D4.0HT*. Шуми при аналізі похідних, отриманих методами числового диференціювання, підвищують похибку визначення параметрів. У зв'язку з цим застосований цифровий фільтр *Butterworth* на базі дискретного перетворення Фур'є. Критерієм оцінки ефективності методу синхронізації є точність визначення середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності. Відомо, що максимальна допустима відносна похибка визначення потужності повинна не перевищувати 2,5%, що накладає дуже високі вимоги до точності процедури синхронізації.

У другому розділі розглянутий метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації, що базується на алгоритмі визначення координати верхньої мертвої точки, який послідовно використовує три етапи: лінійний, синусоїдальний і модель $P'=0$ (рівності нулю першої похідної від тиску при стисненні).

На рисунках 1, 2, 3 представлені діаграми $P(\varphi, deg)$ типових морських двигунів, що були отримані за допомогою якісних датчиків тиску *IMES GmbH* та їх похідні $dP/d\varphi$, отримані числовим методом після виключення високочастотного шуму, відповідно до методики наведеної в статті *S. Neumann, R. Varbanets, ...2018*.

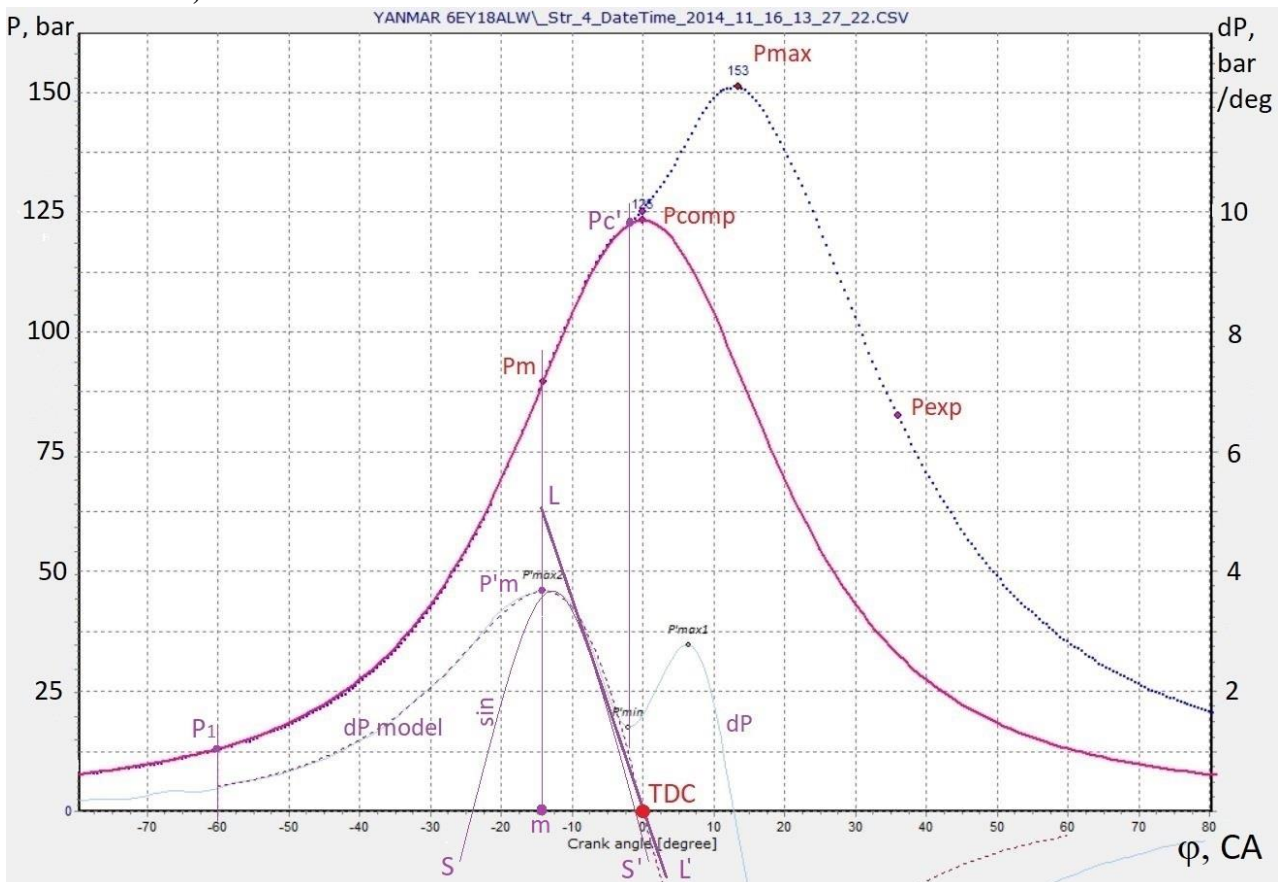


Рисунок 1 – Діаграми $P(\varphi, deg)$, $dP/d\varphi$ середньооборотного морського дизеля *Yanmar 6EY18ALW*

Лінійна модель. Якщо розглянути відрізок діаграми $dP/d\varphi$ від максимуму швидкості при стисненні (точка $P'm$) до початку згоряння (координата точки Pc'), то видно, що ця ділянка може бути промодельована прямою лінією LL' або частиною синусоїди SS' . Без врахування термодинамічного зсуву діаграми тиску (а він буває зневажливо малим) апроксимуюча пряма LL' повинна перетнути «0» в положенні ВМТ. Це положення витікає з того, що швидкість зміни тиску в ВМТ в цьому випадку дорівнює нулю. Рівняння прямої запишемо у вигляді $LL' = b_0 + b_1\varphi$.

Для підвищення точності методу лінійної регресії потрібно виключити частину точок ϑ після координати Pm і перед координатою Pc' . Таким чином уточнюється база для побудови регресійної моделі. У випадку, коли запис індикаторних діаграм передбачає 2 точки на 1° ПКВ, $\vartheta=3\dots 5$ точок в залежності від виду діаграми $dP/d\varphi$ і фактичної довжини ділянки цієї діаграми від Pm до Pc' .

Істотна проблема методу лінійної регресії, яка значно підвищує похибку визначення ВМТ, з'являється тоді, коли інтервал ділянки $[Pm, Pc']$ діаграми $dP/d\varphi$ занадто малий (див. рис. 2) внаслідок ранніх кутів впорскування палива і раннього початку згоряння в циліндрі. У деяких випадках, коли геометричні кути випередження впорскування палива доходять до величин $15\dots 20^\circ$ ПКВ до ВМТ, ця ділянка пропадає зовсім. В таких випадках метод уточнення ВМТ, запропонований в системах *Electronic Indicator Lemag «Premet XL, C»*, буде працювати з великою похибкою.

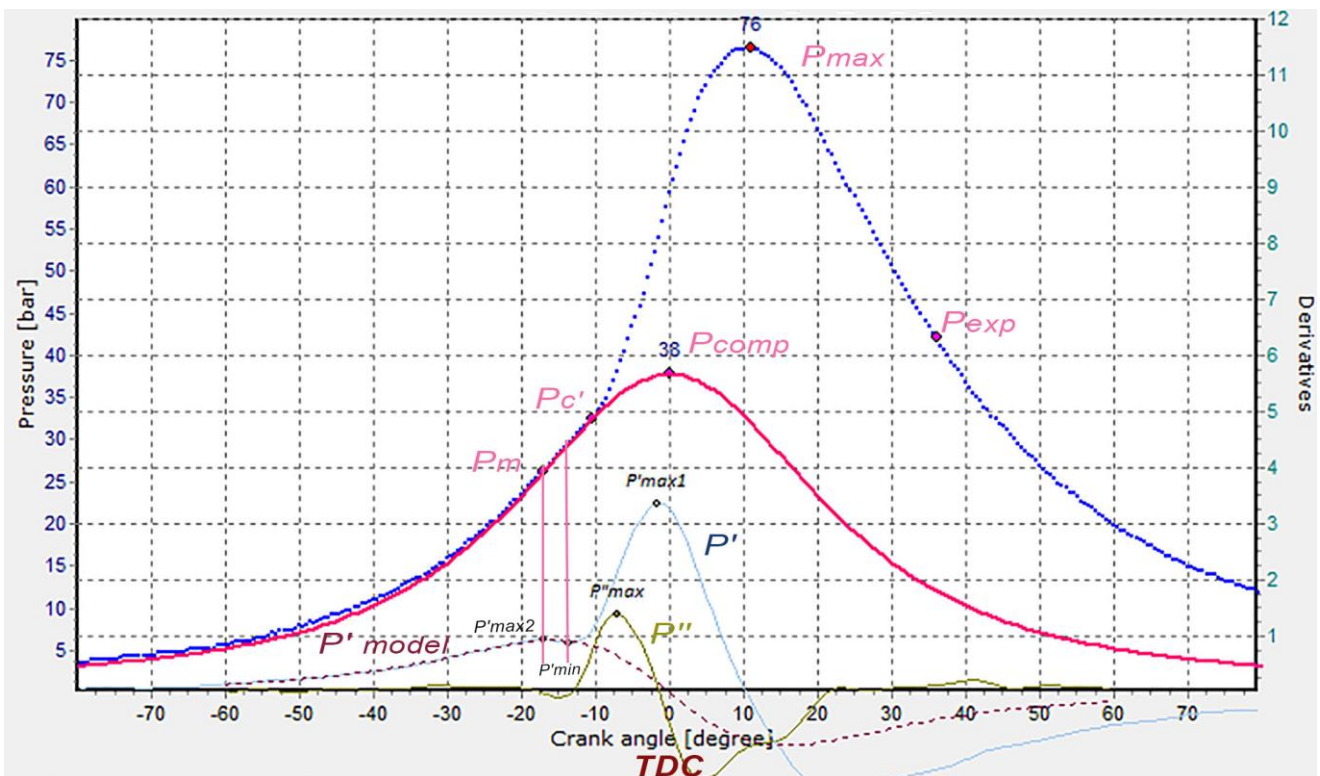


Рисунок 2 – Індикаторна діаграма MAN 9L58/64 з раннім кутом випередження впорскування палива

Найбільш стійка робота методу визначення ВМТ за допомогою лінійної регресії буде на сучасних двотактних морських двигунах з пізнім уприскуванням палива і початком згоряння за ВМТ, рис. 3. В цьому разі ділянка $[P_m, P_c']$ діаграми $dP/d\varphi$ має достатню кількість точок для побудови лінійної регресійної моделі. Більш того, діаграма $dP/d\varphi$ перетинає «0», і не потрібно екстраполювати лінійну модель, підвищуючи тим самим вірогідність похибки. Положення ВМТ в цьому випадку знаходиться всередині ділянки $[P_m, P_c']$, що дозволяє визначати ВМТ з високою точністю, як, наприклад, для двигуна *Wartsila 6RT-FLEX82C* (див. рис. 3).

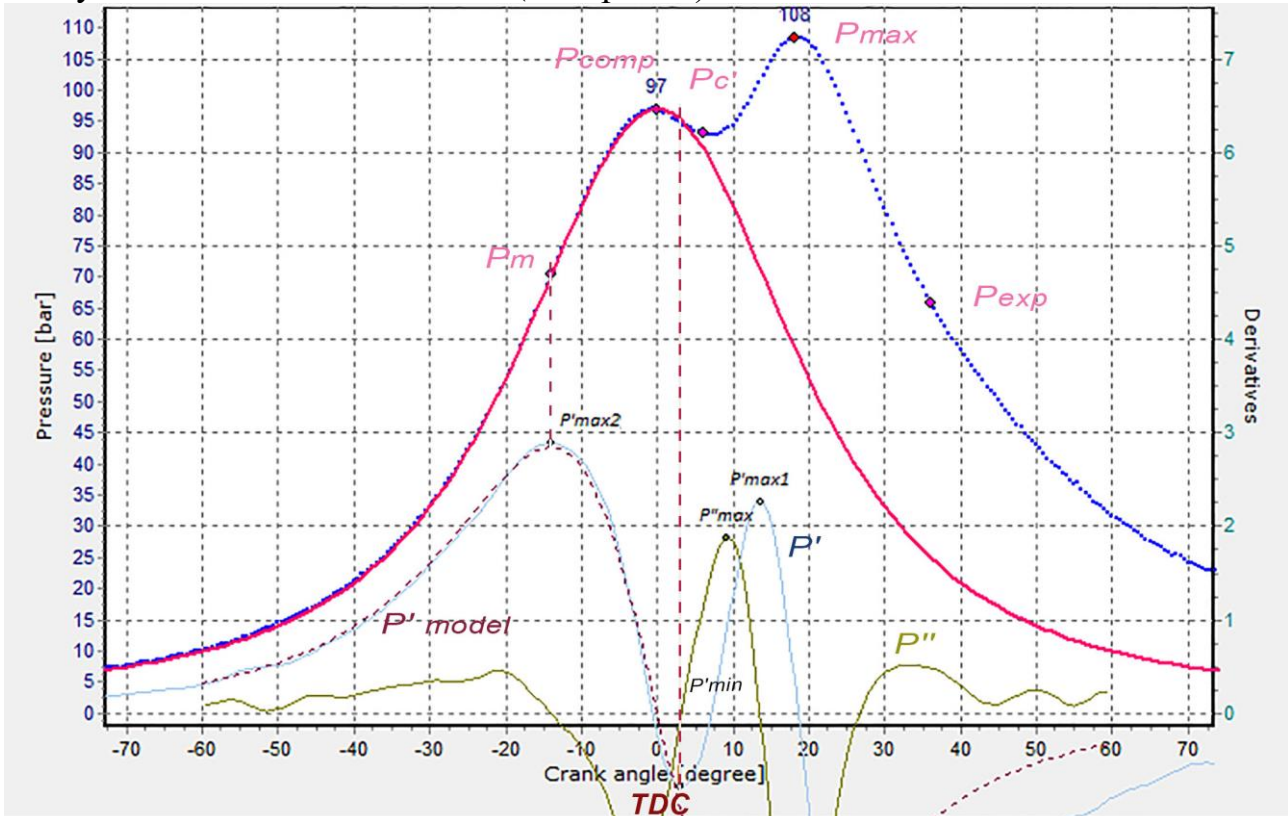


Рисунок 3 – Індикаторна діаграма *6RT-FLEX82C* з пізнім кутом випередження впорскування палива

Синусоїдальна модель. Отож, ділянку $[P_m, P_c']$ діаграми $dP/d\varphi$ з істотно меншою похибкою можна промодельовати синусоїдальною моделлю SS' (див. рис. 1). В цьому випадку $SS' = P'_m \sin(B\varphi_i + A)$, де B, A – коефіцієнти синусоїдальної моделі; P'_m – максимум першої похідної діаграми тиску на ділянці стиснення.

На відміну від лінійної моделі, де для її побудови використовується частина кривої $dP/d\varphi$ до точки P'_m . При побудові синусоїдальної моделі може використовуватися до $\vartheta = 6 \dots 10$ точок до координати P_m і після координати P_c' (при записі індикаторних діаграм з кроком 2 точки на 1 ПКВ).

Коефіцієнти синусоїдальної моделі SS' визначаються за допомогою мінімізації методом *Powell'64* функціоналу F_s , побудованого відповідно вимогам методу найменших квадратів.

$$F_s = \sum [P'_m \sin(B\varphi_i + A) - P'_i]^2 \rightarrow \min,$$

де знаком суми позначається підсумовування на ділянці моделювання:

$$\sum = \sum_{i=\varphi_i P'_m - \mathcal{G}}^{\varphi_i P'_C + \mathcal{G}}$$

Синусоїдальна модель SS' з більшою точністю, ніж лінійна модель LL' , описує ділянку кривої $dP/d\varphi$ до початку згоряння і дозволяє визначити координату ВМТ з меншою абсолютною похибкою.

В точці мінімуму функціоналу F_s повинні дорівнювати нулю всі частинні похідні цільової функції: $\frac{\partial F_s}{\partial P'_m} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial B} = 0$; $\frac{\partial F}{\partial A} = 0$.

$$\begin{cases} \sum [2[P'_m \sin(B\varphi_i + A) - p'_i] \sin(B\varphi_i + A)] = 0; \\ \sum [2[P'_m \sin(B\varphi_i + A) - p'_i] P'_m \cos(B\varphi_i + A) \varphi_i] = 0; \\ \sum [2[P'_m \sin(B\varphi_i + A) - p'_i] P'_m \cos(B\varphi_i + A)] = 0; \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P'_m = \frac{\sum p'_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)}; \\ \frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} = \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A) \varphi_i}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A) \varphi_i}; \\ \frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} = \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)}. \end{cases}$$

Система розв'язується числовим методом. Алгоритм методу *Powell'64* – пошук по системі сполучених напрямків – добре підходить для мінімізації гладких функцій парних степенів і для тригонометричних функцій. Якщо скористатися цим методом, то коефіцієнти P'_m , B , A визначаються після декількох послідовних кроків мінімізації функціоналу $\overline{F_s}$.

$$\begin{aligned} \overline{F_s} = & \left(P'_m - \frac{\sum p'_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} \right)^2 + \left(\frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} - \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A) \varphi_i}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A) \varphi_i} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} - \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)} \right)^2 \rightarrow \min \end{aligned}$$

Мінімум функціоналу $\overline{F_s}$, знайдений з початкової точки $(P'_m, 0, 0)$ (рис. 1), визначає координату ВМТ. При цьому метод *Powell'64* визначає глобальний мінімум функціоналу $\overline{F_s}$ за менш, ніж 10 кроків пошуку для всіх досліджених P -діаграм різних типів морських двигунів. Для реалізації методу необхідно мати початкове наближення ВМТ і кутів φ повороту колінчастого валу, які були отримані за допомогою лінійної регресійної моделі.

Модель $\frac{dP}{d\varphi} = 0$. Якщо скористатися моделлю швидкості зміни тиску на ділянці стиснення, отриманої з рівняння політропи стиснення $PV^n = const$, то можна використовувати велику базу експериментальних точок. Наприклад, можна використати всі точки від початку процесу стиснення (після закриття впускних клапанів) до початку згоряння в циліндрі. Однак при аналізі реальних індикаторних діаграм вплив шумів на ділянках після закриття клапанів занадто великий, що вносить додаткову похибку до побудови регресійної моделі. Вплив шумів значно менший, якщо розглядати ділянку діаграми від координати $P_1 \sim 0.1 P_{max}$ (див. рис. 1) до координати P'_c .

Таким чином, базою для побудови моделі $dP/d\varphi = 0$ приймаємо ділянку

діаграми $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \mathcal{G}]$. Тиск газів на вказаній ділянці стиснення дорівнює:

$$\tilde{p}_{comp} = P_a \left(\frac{V_a}{V_\varphi} \right)^{n_1},$$

де P_a – тиск на початку стиснення; V_φ – поточний об'єм циліндра:

$$V_\varphi = V_C + 0,5V_S \left[1 + \frac{1}{\lambda_{III}} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda_{III}} \sqrt{1 - (\lambda_{III} \sin \varphi)^2} \right],$$

Об'єм, описаний повним ходом поршня: $V_S = V_C (\varepsilon - 1)$,

де V_C – об'єм камери стиснення; λ_{III} – відношення радіуса кривошипа до довжини шатуна $\lambda_{III} = \frac{R_{KP}}{L_{III}} = \frac{S}{2L_{III}}$.

Відповідно до рекомендацій для малооборотних і середньооборотних двигунів значення n_1 приймаємо рівним 1,34...1,37. Подальший аналіз показав, що в задачі визначення ВМТ подібне допущення доречно і наближене середнє значення n_1 в зазначених межах не погіршує якість моделювання $dP/d\varphi$.

Вираз для швидкості зміни тиску на ділянці стиснення можна записати:

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} \cdot \frac{dV_\varphi}{d\varphi}.$$

Після нескладних перетворень остаточно отримаємо:

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} \cdot 0,5V_S \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_{III} \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda_{III}^2 \sin^2 \varphi}} \right)$$

В даному випадку параметрами моделі $dP_{comp}/d\varphi \in P_a$ і n_1 . Відповідно до вимог методу найменших квадратів напишемо функціонал F_P , мінімізація якого визначить значення цих параметрів на ділянці $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \mathcal{G}]$.

$$F_P = \sum_{j=1}^m \left(P'_j - \frac{dP_{comp}}{d\varphi_j} \right)^2 \rightarrow \min$$

де m - кількість точок на ділянці $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \mathcal{G}]$.

Для мінімізації функціоналу F_P скористаємося методом *Powell-64*, оскільки він ефективний для мінімізації квадратичних і тригонометричних функцій.

Для видалення шумів на цих ділянках автором застосовується цифровий фільтр *Butterworth*, який має гладку характеристику на всьому частотному діапазоні і не зміщує фазу вихідного сигналу.

Використання відносно великої бази експериментальних точок $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \mathcal{G}]$ для побудови моделі $dP_{comp}/d\varphi$ дає хороші результати. Побудована таким чином модель з високою точністю описує процес стиснення для різних типів двигунів, навіть у випадку значно ранніх кутів початку згоряння палива в циліндрі, як показано на рис. 2. Права межа моделювання $\varphi_i P'_C - \mathcal{G}$ найбільше впливає на точність побудови моделі, оскільки після

впорскування палива в циліндр відбуваються передпонуменеві процеси і крива тиску вже не носить характер політропи стиснення. Завдання знаходження координати початку згоряння $P's$ і правої межі вирішується за допомогою аналізу екстремумів діаграм похідних від діаграми тиску.

Третій розділ присвячений аналізу математичної моделі робочого процесу транспортного дизеля. Модель базується на 1-му законі термодинаміки:

$$dQ_x = dU + pdV + dQ_w,$$

де dQ_x – теплота, виділена при згорянні палива; pdV – робота газів в циліндрі; dU – зміна внутрішньої енергії робочого тіла; dQ_w – передача тепла через стінки циліндра.

Вирази для визначення зазначених складових наведені в роботах Фоміна Ю.Я і В.С. Семенова.

Для оцінки швидкості тепловиділення в циліндрі використовується трифазна модель Семенова – Квятковського.

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{A_1}{\varphi_1} k_1 e^{-0,5k_1^2} + \frac{A_2}{\varphi_2} k_2 e^{-0,5k_2^2} + \frac{A_3}{\varphi_3} k_3 e^{-0,5k_3^2};$$

де φ_i – кут затримки спалахування палива; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – зміщення максимумів швидкості тепловиділення на кожній з трьох фаз; A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти, що визначаються за допомогою навантажувальних критеріїв $P_n, P_{n1}, P_{n2}, P_{n3}$ за методом проф. Семенова В.С.

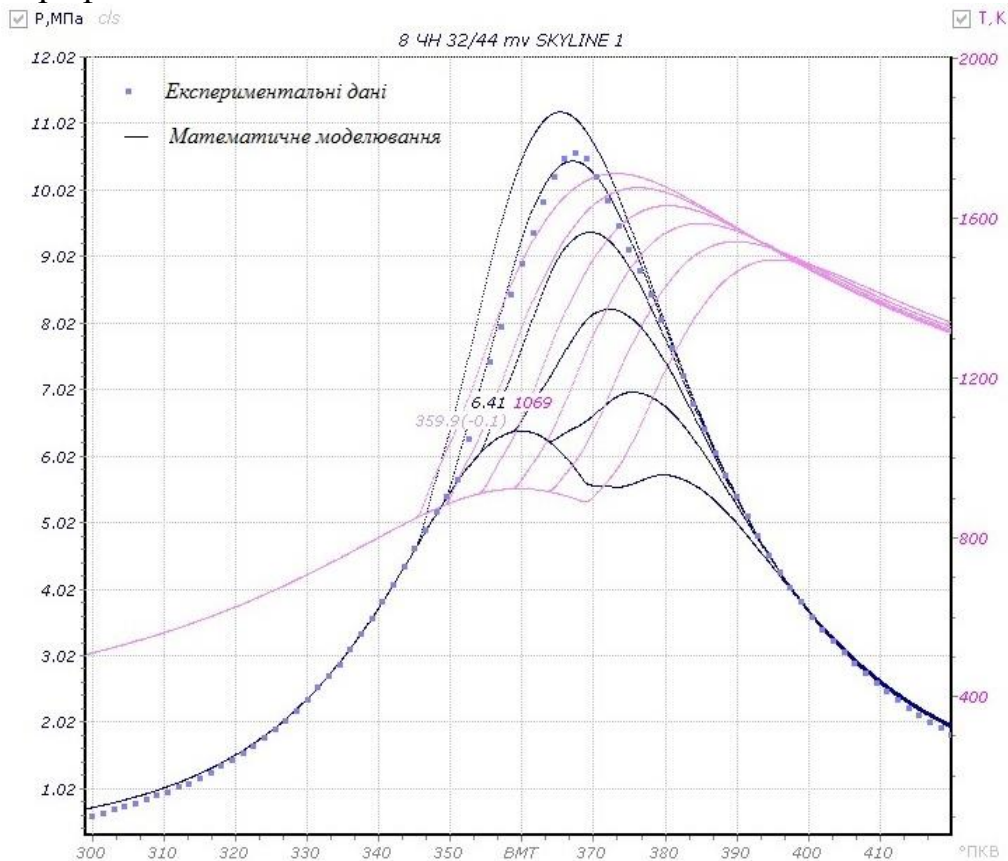


Рисунок 4 – Результати верифікації математичної моделі для середньооборотного дизеля 8ЧН 32/44

Використання трифазної моделі тепловиділення в циліндрі дозволяє моделювати багатозафазне впорскування палива шляхом зміщення фаз тепловиділення, реалізоване в сучасних середньооборотних дизелях. Крім того, для них характерний багатозафазний (в загальному випадку трифазний) процес згоряння.

Математичне моделювання робочого процесу дозволило проаналізувати похибку аналітичної синхронізації. Наявність експериментальних даних дозволяє уточнювати коефіцієнти тепловиділення за допомогою методу *Powell'64*.

Для верифікації математичної моделі були взяті експериментальні дані для середньооборотного дизеля 8ЧН 32/44 на основному експлуатаційному режимі при значенні кута випередження впорскування палива $\alpha = 15,4^\circ$, рис 4. Відносна похибка математичного моделювання склала менше 1,5%. Математична модель була прорахована для значень кутів випередження впорскування палива $\alpha = 15,4^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 0^\circ, -5^\circ$ для перевірки роботи алгоритму аналітичної синхронізації і визначення впливу кута випередження впорскування палива на параметри робочого процесу (див. рис 4).

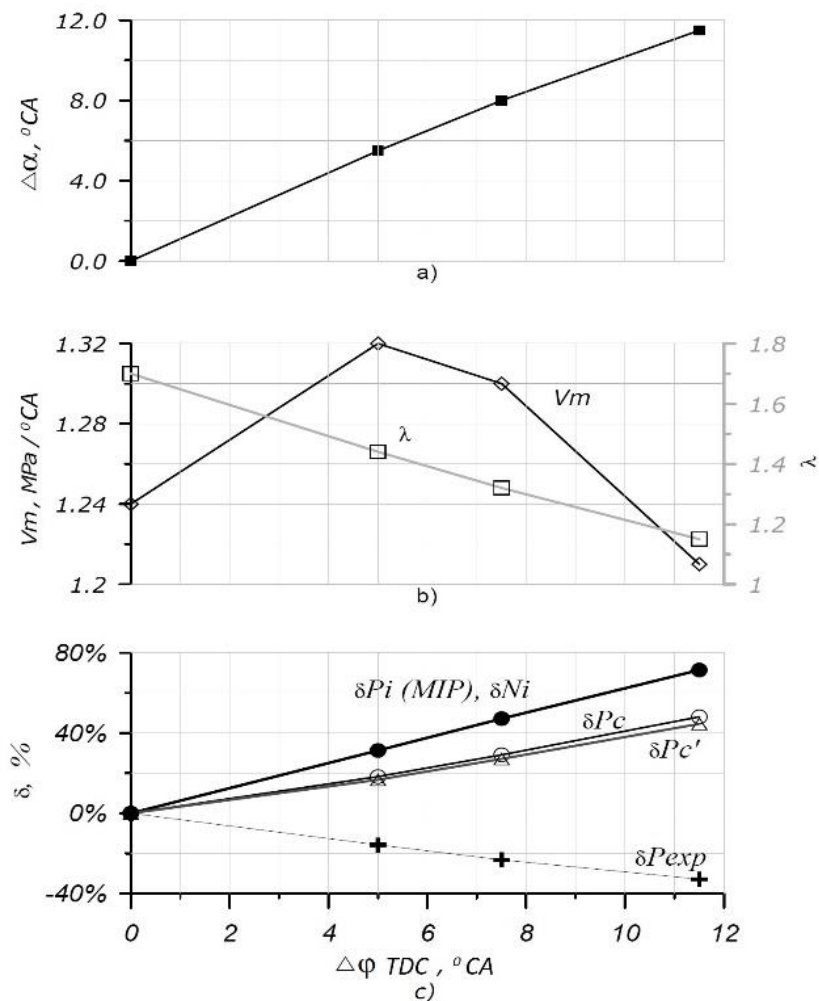


Рисунок 5 – Вплив похибки визначення ВМТ на розрахункові параметри робочого процесу двигуна 8ЧН 32/44

За допомогою математичної моделі викладено аналіз впливу похибки визначення ВМТ на розрахунок основних параметрів робочого процесу: середнього індикаторного тиску, індикаторної потужності, швидкості і ступеня підвищення тиску при згорянні, розрахункових значень тиску початку згоряння палива і тиску на лінії розширення, рис. 5. Внаслідок помилки визначення ВМТ відбувається істотне спотворення результатів розрахунку параметрів робочого процесу. Розрахункове значення кута випередження впорскування палива α збільшується лінійно відповідно до помилки синхронізації, рис. 5a. Розрахункове значення ступеня підвищення тиску λ лінійно зменшується, а значення швидкості підвищення тиску V_m збільшується, а потім зменшується, рис. 5b. Розрахункові значення середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності циліндра практично лінійно підвищуються на 7,2 %/°ПКВ, рис. 5c. Таким чином, щоб отримати прийнятний на практиці розрахунок середнього індикаторного тиску і індикаторної потужності (з максимальною відносною похибкою не більше 2,5%), необхідно визначати положення ВМТ з максимальною абсолютною похибкою не більше 0,1...0,3 °ПКВ.

Четвертий розділ. На підставі експериментальних даних індикаторної потужності, середнього індикаторного тиску, а також питомої індикаторної витрати палива, отриманих методом аналітичної синхронізації і описаних в попередніх розділах, при різних способах формування баржо-буксирних комплексів виконано оцінку характеру залежностей індексу енергоефективності (*EEI*) від швидкості руху різних за формою і масовими характеристиками комплексів. Розглянуто можливість їх застосування для визначення раціональної швидкості руху, а також показників економічності і екологічності в умовах фарватеру змінної обмеженою глибини. Розрахунково-експериментальними методами визначено наявність характерних точок в залежностях індексів енергоефективності від основних визначальних факторів, віднесених до швидкості комплексів, при яких має місце різке зростання *EEI*.

Показано, що довірливі діапазони цих швидкостей можуть збігатися, що дає можливість коректно сформулювати завдання пошуку раціональних швидкостей руху за критеріями допустимого значення *EEI* і собівартості рейсу.

Специфічний характер застосування індексу енергоефективності в річкових умовах плавання полягає в тому, що він розглядається спільно з індексом собівартості перевезення тони вантажу, як величина, пов'язана з основною змінною експлуатаційною витратою, а саме, споживанням палива.

Розглянуті питання ідентифікації індикаторів енергоефективності у внутрішньому судноплаванні. Виконано аналіз індексів енергоефективності, які застосовуються Міжнародною морською організацією у міжнародному морському судноплаванні.

У проведеному дослідженні також розглянуті питання нормування шкідливих викидів до атмосфери у судноплаванні на європейських внутрішніх водних шляхах. Показані відмінності технологій перевезень в міжнародному морському, європейському внутрішньому і дунайському судноплаванні. Виконано аналіз показників енергоефективності, встановлених в міжнародному

морському судноплавстві, а також особливості їх застосування у внутрішньому судноплавстві. Визначено принципи застосування показників енергоефективності до оцінки екологічних показників роботи суден у внутрішньому судноплавстві з урахуванням специфіки навігаційних умов та інших факторів, що визначають режими роботи судового пропульсивного комплексу.

Сучасний стан дунайського судноплавства відрізняється недостатньою забезпеченістю навігаційних умов, віковим складом флоту, а також специфікою самого флоту - його здатністю працювати протягом усього Дунаю (більше 2000 км) при завантаженні важкими караванами з суден несамохідного флоту. Така специфіка значно відрізняє дунайське судноплавство від судноплавства по іншим внутрішніми водними шляхами Європи, на яких цілий рік забезпечені прохідні глибини, дальність переходів в десятки разів менше, а роботу здійснюють здебільшого самохідні суховантажні і наливні судна.

Відповідно, є підстави стверджувати, що судовласники існуючого дунайського тягового і самохідного флоту без суттєвої його модернізації та оновлення зможуть виключно управляти показниками енергоефективності, показано співвідношення характеристик енергоефективності та екологічності та визначено умови, в яких можливе досягнення підвищення енергоефективності при одночасному зниженні кількості шкідливих викидів в атмосферу.

Автор наводить оцінку інтенсивності дунайського судноплавства у порівнянні з інтенсивністю судноплавства на основних магістралях внутрішніх водних шляхів Європи, порівнює характеристики суден та караванів суден, які працюють на різних частинах, а також акцентує увагу на гідрологічних особливостях та забезпеченості прохідних глибин європейських внутрішніх водних шляхів та водного шляху ріки Дунай. Автор окреслює визначне значення впливу навігаційних умов на характеристики економічності та екологічності роботи суден у внутрішньому дунайському судноплавстві, що пов'язано з постійними змінами режимів роботи пропульсивних комплексів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вирішене науково завдання підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів шляхом розроблення методу аналітичної синхронізації даних моніторингу для суттєвого спрощення схеми і організації роботи системи діагностування та більш точного визначення потужності транспортних двигунів. Здійснено впровадження сучасного методу діагностування, який забезпечує високу ефективність використання та більш точне визначення діагностичних параметрів транспортних двигунів. Отримані в роботі наукові та практичні результати дозволяють зробити наступні висновки.

1. Аналіз показав, що існуючі методи аналітичної синхронізації недостатньо ефективні стосовно до умов експлуатації транспортних двигунів. В основному це пов'язано зі складністю формулювання критеріїв синхронізації або їх недостатньою точністю для забезпечення розрахунку потужності і

основних параметрів робочого процесу із заданими величинами відносних похибок.

2. Обрано метод цифрової обробки даних моніторингу діаграми із застосуванням фільтра низьких частот *Butterworth*, що дозволяє здійснювати числовий аналіз екстремумів першої і другої похідних діаграм тиску, отриманих методами числового диференціювання. В результаті стало можливим розмежування процесів стиснення і згорання в робочому циліндрі, визначення приблизної (до $0,5^\circ$ ПКВ) координати ВМТ і попередня синхронізація даних моніторингу робочого процесу на етапі аналізу часових діаграм.

3. Вперше розроблено метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації, що базується на алгоритмі визначення координати верхньої мертвої точки, який на відміну від існуючих послідовно використовує три етапи: лінійний, синусоїдальний і модель $P'=0$ (рівності нулю першої похідної від тиску при стисненні), що дозволяє проводити розрахунок основних параметрів робочого процесу з величиною відносної похибки менше 2,5%.

4. Удосконалено методи синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в експлуатації, що базуються на лінійному і синусоїдальному алгоритмах, які на відміну від існуючих використовують уточнені обмеження при побудові моделей, що дозволило підвищити точність першого етапу синхронізації і забезпечити величину відносної похибки остаточного визначення ВМТ за допомогою моделі $P'=0$ в діапазоні $0,1 \dots 0,3^\circ$ ПКВ, що забезпечує розрахунок індикаторної потужності і основних параметрів робочого процесу з максимальною відотною похибкою не більше 2,5%.

5. Точність у визначенні потужності транспортного двигуна (максимальна відносна похибка не більше 2,5%) дозволяє прогнозувати його навантажувальні режими, діагностувати технічний стан вузлів і систем, розраховувати питомі показники і для судових двигунів визначати коефіцієнт енергоефективності за методикою Міжнародної морської організації *IMO*.

6. Розроблені алгоритми і методи використані в новій версії програмного забезпечення системи моніторингу морських дизелів *DEPAS D4.0HT*, яка використовується в судноплавній компанії «*TRANSSHIP*» (Україна), на берегових дизельних електростанціях і тепловозних дизелях. Акти впровадження додаються.

7. Результати дисертаційного дослідження можна використовувати в навчальному процесі спеціалізованих технічних ВНЗ. У зв'язку з цим вони впроваджені в навчальний процес Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» та кафедри судових енергетичних установок і технічної експлуатації (СЕУ і ТЕ) Одеського національного морського університету.

8. Для переносних систем моніторингу робочого процесу морських дизелів запропонований метод аналітичного визначення ВМТ і подальшої синхронізації даних дає наступні переваги:

- зменшується кількість датчиків і кабелів при індиціюванні, що

знижує ймовірність збоїв і помилок;

- автоматично враховуються зсуви ВМТ за рахунок різних факторів під час експлуатації та вплив каналу індикаторного крана;
- похибка методу аналітичного визначення ВМТ і подальшої синхронізації індикаторних діаграм значно менше (0,1...0,3° ПКВ), ніж при апаратному методі, де похибка перевищує 0,5 ° ПКВ.

9. На підставі експериментальних даних індикаторної потужності, середнього індикаторного тиску, а також питомої індикаторної витрати палива, отриманих методом аналітичної синхронізації виконано оцінку характеру залежностей індексу енергоефективності (*EEI*) від швидкості руху різних за формою і масовими характеристиками составів при різних способах формування баржо-буксирних комплексів дунайського судноплавства.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1.1. Varbanets R.A., Zalozh V.I., Shakhov A.V., Savelieva I.V., Piterska V.M. Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka. Polish society of technical diagnostics*. 2020. №21(1). P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585> (Наукометричні бази: **SCOPUS** [CiteScore (2017): 1,01; SJR (SCImago Journal Rank) (2017): 0.356; SNIP(Source Normalized Impact per Paper) (2017): 0.864], Crossref, IndexCopernicus (ICV): 121.41, EBSCO, BazTech, WorldWideScience.org].

Здійснено перевірку розробленого методу аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу морських транспортних дизелів в експлуатації. Участь в підготовці експерименту і обробці експериментальних даних.

1.2. Tarasenko T, Zalozh V and Maksymov S. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1297, conference 1. P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019> (Журнал включено до НМБД **SCOPUS** [SJR(SCImago Journal Rank) (2018): 0.22; Q3]

Участь у підготовці та проведенні експерименту, виконано обробку експериментальних даних, аналіз літературних джерел та постановка часткової задачі. Здійснено дослідження співвідношення показників енергоефективності та кількості шкідливих викидів в атмосферу у внутрішньому судноплавстві.

1.3. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. О соотношении энергоэффективности и экологичности для судов внутреннего плавания. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. Вип. № 3[251]. С. 168-175. (Наукометрична база Index Copernicus, Google Scholar, academia.edu)

Здійснено аналіз показників енергоефективності, встановлених в міжнародному морському судноплавстві, а також особливостей їх

застосування у внутрішньому судноплаванні, оброблено графічні результати, сформовано висновки.

1.4. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. Оценка энергоэффективности для условий навигационных неопределенностей во внутреннем судоходстве. *Автоматизация судовых технических средств*. 2019. Вып. 25. С. 90-100. DOI: 10.31653/1819-3293-2019-1-25-90-100.

Здійснено обробку експериментальних даних аналізу впливу навігаційних умов на характеристики економічності та екологічності роботи суден у внутрішньому дунайському судноплаванні, графічні результати, формування висновків.

1.5. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. Принципы определения индикаторов энергоэффективности для судов внутреннего плавания. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. Вип. № 2. С. 203-207. (Наукометрична база *Index Copernicus, Google Scholar, academia.edu*)

Виконано розрахунки та відображаючи їх графічні залежності швидкості руху судна в умовах фарватеру змінної, обмеженої глибини на річкових ділянках, проаналізовано невизначеності і фактори, які впливають на швидкість.

1.6. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. Оценка факторов, определяющих энергоэффективность судов внутреннего плавания. *Автоматизация судовых технических средств*. 2018. Вып. 24. С. 94-102.

Участь в обробці експериментальних даних, постановка проблеми визначення характерних точок в залежностях індексів енергоефективності та формування висновків.

1.7. Данилян А.Г., Залож В.И., Руденко М.И. Создание новых направлений снижения вредных выбросов в отходящих газах двигателей внутреннего сгорания. *Вісник Одеського національного морського університету* . 2017. Вип. №2(51). С.73-81.

Виконано інформаційний пошук, представлено результати та систематизовано праці з теми дослідження.

2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

2.1. Варбанец Р.А., Залож В.И., Пизинцали Л.В. Метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации *XXIV Міжнародний конгрес двигунобудівників*, 2-7 вересня 2019 р. Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського, 2019. С. 20-21;

2.2. Варбанец Р.А., Залож В.И., Губанов В.П., Пизинцали Л.В. Метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019*: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 вересня 2019 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2019. С 166-167.

2.3. Варбанец Р.А., Залож В.И., Губанов В.П., Пизинцали Л.В. Аналитическая синхронизация данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 11-14 вересня 2019 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2019. С. 188-190.

2.4. Руденко Е.В., Варбанец Р.А., Залож В.И., Абросимов В. Г. Метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации. *Суднова енергетика: стан та проблеми*: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 7-8 листопада 2019 р. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2019. С. 3-4.

2.5. Варбанец Р.А., Залож В.И. Задача аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации. *Сучасні підходи до вискоєфективного використання засобів транспорту (ДІ НУ «ОМА»-2019)*: збірник тез доповідей X-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 12-14 грудня 2019 р. Запоріжжя: АА Тандем, 2019. С. 86-92.

2.6. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. И., Максимов С. Б. Энергоэффективность и экологичность судов в Дунайском судоходстве. *FS – 2019*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В. С. (FS - 2019), 24–28 квітня 2019 р. Одеса - Стамбул - Одеса, пором «Kaunas»: Одеський національний морський університет, 2019. С. 270-280.

2.7. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific Danube inland vessels. First stage. *SEA-CONF 2019: 5-th International Scientific Conference*, Constanta: “MIRCEA CEL BATRAN” NAVAL ACADEMY, 2019, P. 20-21

2.8. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И., Максимов С.Б. Критерии энергоэффективности и экологичности для судов в дунайском судоходстве. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення*: збірник наукових праць за матеріалами IX-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 22-24 травня 2019 р. Одеса: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет, 2019. С. 130-136.

2.9. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. Снижение вредных выбросов в атмосферу во внутреннем судоходстве путем повышения энергоэффективности. *Столетие высшего кораблестроительного образования в Украине*: Міжнародна науково-технічна конференція, 27 листопада 2018 р. Одеса: Одеський національний морський університет, 2018. С. 4-5.

2.10. Залож В.И. Индицирование ДВС за допомогою цифрового манометра Leutert. *Сучасні підходи до вискоєфективного використання засобів транспорту (ДІ НУ «ОМА»-2018)*: збірник тез доповідей IX-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 6-7 грудня 2018 р., Запоріжжя: АА Тандем, 2018. С. 75-80.

2.11. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.И. Принципы определения индикаторов энергоэффективности для судов внутреннего плавания. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення*: збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 травня 2018р., Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет, Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2018. С. 178-183.

2.12. Залож В.И. Индуктивные датчики оборотов в системах электронного управления СДВЗ *Сучасні підходи до вискоєфективного використання засобів транспорту*: збірник тез доповідей за матеріалами VIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції, 7 грудня 2017, Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА», 2017. С. 88-94.

2.13. Залож В.И., Тарасенко Т.В. Эксплуатация и настройка регулятора оборотов ДГ WOODWARD *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2017*: матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 28-29 вересня 2017 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2017. С. 60-67.

2.14. Данилян А.Г., Маслов И.З., Залож В.И., Руденко М.И. Пути снижения вредных выбросов в отходящих газах судовых дизелей. *Topical researches of the World Science: proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, June 28, 2017. Dubai, UAE. 2017. Vol. 2, №7 (23). P. 24-31.

2.15. Varbanets R., Zalozh V. The analytical synchronization of the monitoring data of the working process in transport diesel engines operating. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку*: матеріали Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції, 20–21 листопада 2019 р. Київ: вид-во Державного університету інфраструктури та технологій, 2019. С. 107-110.

2.16. Varbanets R., Zalozh V., Tarasenko T. The working process monitoring in transport diesel engines operating. *Achievements of modern society: abstracts of the 4th International scientific and practical conference*, 4-6 December 2019. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2019. P. 36-41.

АНОТАЦІЯ

Залож В.И. Підвищення ефективності контролю технічного стану транспортних дизелів шляхом використання методу аналітичної синхронізації даних моніторингу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації, яке базується на алгоритмі визначення положення верхньої мертвої точки поршня шляхом аналізу часових діаграм тиску газів в робочому циліндрі без використання апаратних датчиків.

Показано вплив точності визначення положення верхньої мертвої точки на розрахунок середнього індикаторного тиску та індикаторної потужності.

Розроблено метод аналітичної синхронізації, що базується на алгоритмі визначення координати ВМТ, який використовує три етапи: лінійний, синусоїдальний і модель рівності нулю першої похідної від тиску при стисненні. Це, в свою чергу, забезпечує розрахунок індикаторної потужності і основних параметрів робочого процесу з максимальною відносною похибкою до 2,5%.

Ключові слова: транспортний дизель, верхня мертва точка, моніторинг робочого процесу, індикаторна потужність, коефіцієнт енергоефективності суден, аналітична синхронізація.

АННОТАЦИЯ

Залож В.И. Повышение эффективности контроля технического состояния транспортных дизелей путём использования метода аналитической синхронизации данных мониторинга. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Государственный университет инфраструктуры и технологий. – Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в условиях эксплуатации, которая базируется на алгоритме определения положения верхней мертвой точки поршня путем анализа временных диаграмм давления газов в рабочем цилиндре без использования аппаратных датчиков. Показано влияние точности определения положения верхней мертвой точки на расчет среднего индикаторного давления и индикаторной мощности.

Разработан метод аналитической синхронизации, базирующийся на алгоритме определения координаты верхней мёртвой точки, который использует три этапа: линейный, синусоидальный и модель равенства нулю первой производной от давления при сжатии. Это, в свою очередь, обеспечивает расчет индикаторной мощности и основных параметров рабочего процесса с максимальной относительной погрешностью до 2,5 %.

Ключевые слова: транспортный дизель, мониторинг рабочего процесса, верхняя мертвая точка, индикаторная мощность, коэффициент энергоэффективности судов, аналитическая синхронизация.

ANNOTATION

Zalozh V.I. Efficiency control improvement of diesel engines conditions by using the method of analytical synchronization of monitored data. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree of Technical Studies. Specialty 05.22.20 -

«Operation and repair of vehicles». - State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the actual problem of analytical synchronization of data monitoring working process in transport diesel engines operation. The solution to this problem attaches great importance in operation. The accuracy of data synchronization determines the error in determining power, control of the main engine systems operation and its diagnostics. The advantages and disadvantages of different methods are disclosed. Diagnostics of marine engines during operating and the selection of optimal operating conditions is based on the analysis of gas pressure diagrams, as well as fuel supply and gas distribution diagrams. As a result of the analysis of the pressure diagrams, the indicator engine power is calculated, which is further used in the management of engine operation modes, in the calculation of specific indicators, as well as in the calculation of energy efficiency coefficients of marine vessels according to International maritime organization recommendations. The influence of the accuracy of determining the position of the top dead center on the calculation of the mean indicated pressure and indicator power is classified. The error of the hardware sensors is so large and unstable depending on the load that it became obvious that within this error and even more accurately, the position of the top dead center can be calculated by analyzing of the gas pressure diagrams. On the other hand, the influence of the top dead center error on the accuracy of calculating the average indicator pressure is very large: 6...9 % per 1° top dead center error. Thus, in order to obtain an acceptable calculation of the average indicator pressure and indicator power, it is necessary to determine the top dead center with a maximum absolute error of not more than 0,1...0,3 degrees of crankshaft rotation.

An analytical synchronization method is developed based on the top dead center coordinate determination algorithm, which uses three stages: linear, sinusoidal and model equal to zero the first derivative of the pressure under compression. The model equal to zero the first derivative of the pressure under compression is simulated from the closing of the intake valves to the start of ignition in the cylinder. Appropriate boundaries are determined by analyzing the extreme of the curves first and second derivative of the pressure under compression, which is possible after filtering the initial pressure curve. The author has applied digital filter Butterworth Low Pass filter that has a smooth characteristic across the frequency range and does not offset the phase of the original signal. This ensures the required accuracy of the final calculation of the average indicator pressure with the subsequent calculation of the indicator and effective engine power with a maximum relative error of no more than 2.5%.

The developed algorithms and methods have been used in the new version of the marine diesel monitoring system software DEPAS D4.0HT, used by the shipping company TRANSSHIP (Ukraine), on shore diesel power plants and diesel locomotives.

Keywords: transport diesel, monitoring working process, top dead center, indicated power, energy efficiency coefficient, analytical synchronization.

Підп. до друку 01.06.2020. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,19
Тираж 100 прим. Зам. № ІД-35.

Виготовлено копіцентром Дунайського інституту
Національного університету «Одеська морська академія»
68600, м. Ізмаїл, Фанагорійська вул., 9
Тел. (0484) 771-61-01