

УДК 621.436:656.6

doi: 10.32620/aktt.2020.7.17

Р. А. ВАРБАНЕЦ¹, В. И. ЗАЛОЖ², Т. В. ТАРАСЕНКО²,
Т. П. БЕЛОУСОВА³, А. В. ЕРЫГАНОВ¹

¹ Одесский Национальный морской университет, Одесса, Украина

² Дунайский институт Национального университета
«Одесская морская академия», Измаил, Украина

³ Херсонский Национальный Технический Университет, Херсон, Украина

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Задача аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса является базовой при решении общей проблемы параметрической диагностики транспортных двигателей в режиме эксплуатации. Эта задача актуальна для диагностики всех видов транспорта (авиационного, железнодорожного, морского, и т.д.). Недостаточная точность решения задачи синхронизации является причиной значительных ошибок в определении мощности и расхода топлива, а также ошибок в диагностике основных узлов и систем двигателя. Расчет индикаторной и эффективной мощности транспортных дизелей необходим не только для диагностики и контроля технического состояния. Точный расчет мощности также важен для определения показателей энергоэффективности, согласно требованиям Международной морской организации. Задачей аналитической синхронизации считается перевод данных мониторинга рабочего процесса, полученных при индицировании двигателя, из функций времени в функции по углу поворота коленчатого вала. Наибольшее влияние на точность решения задачи синхронизации оказывает погрешность определения координаты верхней мертвой точки (ВМТ) поршня. Метод базируется на использовании трех последовательных этапов определения ВМТ: линейного, синусоидального и метода решения уравнения $P'=0$ (равенства нулю первой производной сигнала давления на участке сжатия от закрытия впускных клапанов до момента начала сгорания в цилиндре). Применение трех последовательных этапов обеспечивает определение координаты ВМТ с абсолютной погрешностью 0,1 ... 0,3 градуса коленчатого вала. Такая точность обеспечивает расчет мощности и других параметров рабочего процесса с максимальной относительной погрешностью менее 2,5 %, что соответствует требованиям классификационных обществ. Для переносных систем мониторинга рабочего процесса морских дизелей предлагаемый метод аналитического определения ВМТ и последующей синхронизации данных дает ряд преимуществ. Во-первых, уменьшается количество датчиков и кабелей при индицировании, что снижает вероятность сбоев и ошибок. Во-вторых, автоматически учитываются смещения ВМТ за счет разных факторов во время эксплуатации. Автоматически учитывается влияние канала индикаторного крана. Погрешность метода аналитического определения ВМТ и последующей синхронизации индикаторных диаграмм значительно меньше, чем при аппаратном методе определения. Также отсутствует необходимость предварительной подготовки двигателя.

Ключевые слова: транспортный дизель; мониторинг рабочего процесса; верхняя мертвая точка; индикаторная мощность; аналитическая синхронизация.

Введение

Решение задачи аналитической синхронизации данных при мониторинге рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации имеет большое значение, поскольку по результатам мониторинга происходит управление работой основных систем двигателя и его диагностика. Задача формулируется как перевод данных из функций времени в функции по углу поворота коленчатого вала, где самое большое влияние оказывает точность определения по-

ложения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня

$$f(t) \xrightarrow{\text{TDC}} f(\varphi) [1].$$

Существует два метода решения этой задачи: аналитический – путем анализа кривой давления газов $P(t)$ в рабочем цилиндре и аппаратный – с помощью датчиков на маховике двигателя.

Аппаратный метод синхронизации очевиден и традиционно применяется на транспортных дизелях с самого начала использования на них первых систем мониторинга рабочего процесса. С помощью

датчиков на маховиках синхронизировали данные мониторинга следующие системы: одна из первых, широко распространённых в 1990-х гг. на флоте систем мониторинга морских дизелей NK-5 и последующие NK-100, NK-200 норвежской фирмы Autronica A/S; европейские системы *Kyma*, *Premet*, *Malin*, *Doctor* и многие другие системы, разработанные до начала 2000-х гг. Затем, когда на смену дорогим стационарным системам начали применяться портативные переносные системы периодического мониторинга, начали развиваться аналитические методы синхронизации [2 – 4].

Стало очевидным, что неудобные при работе с переносными системами аппаратные датчики ВМТ еще и вносят ряд существенных погрешностей в расчет среднего индикаторного давления и индикаторной мощности. Установка и калибровка датчиков ВМТ осуществляется в статике. Затем, когда двигатель работает под нагрузкой, положение ВМТ, регистрируемое датчиками, смещается вследствие крутильных колебаний вала и выборки микролюфтов в подшипниках кривошипно-шатунного механизма. Дополнительную, существенную погрешность вносит канал измерения давления – канал индикаторного крана, который установлен на всех мало и среднеоборотных дизелях. Все переносные системы мониторинга регистрируют давление в рабочем цилиндре путем присоединения датчика к индикаторному крану, который имеет стандартную резьбу на всех транспортных дизелях с момента получения патента Рудольфом Дизелем в 1892 году. Во время измерения давления канал вносит погрешности типа запаздывания сигнала и дросселирования, причем первая может быть весьма существенна – до нескольких градусов поворота коленчатого вала (ПКВ) – и увеличивается с повышением частоты вращения.

Цель данной работы - представить метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации, базирующийся на алгоритме определения положения верхней мёртвой точки поршня. В отличие от существующих, разработанный метод последовательно использует три этапа: линейный, синусоидальный и модель $P'=0$ (равенства нулю первой производной от давления при сжатии), что позволяет производить расчет основных параметров рабочего процесса с величиной относительной погрешности менее 2,5 %, таким образом соответствуя требованиям сертификационных сообществ.

1. Постановка задачи

Задача синхронизации должна быть решена перед задачей параметрической диагностики. И от точности ее решения зависит корректность последующих

диагностических выводов. Существующие методы аналитической синхронизации недостаточно эффективны применительно к условиям эксплуатации транспортных двигателей. В основном это связано со сложностью формулировки критериев синхронизации или их недостаточной точностью для обеспечения расчета мощности и основных параметров рабочего процесса с заданными величинами относительных погрешностей. Поэтому актуальной является разработка нового метода синхронизации, где выходные данные представлены в виде временных серий, записанных в память компьютера через равные промежутки времени. Полученная в результате решения задачи синхронизации мощность используется для расчета показателей эффективности эксплуатации транспортных двигателей. В первую очередь это касается коэффициента энергоэффективности, определяемого по методике Международной морской организации *ИМО*.

Погрешность аппаратных датчиков столь велика и непостоянна в зависимости от нагрузки, что стало очевидным, что в пределах этой погрешности и даже точнее, положение ВМТ можно рассчитать, анализируя кривые $P(t)$. С другой стороны, влияние погрешности определения положения ВМТ на точность расчета среднего индикаторного давления очень велико: 6...9 % на 1° ошибки ВМТ (*M. Tazerout, S. Polanowski, Per Tunestal, Y. Nilsson and L. Eriksson, E. Pipitone*) [5 – 8]. Таким образом, чтобы получить приемлемый расчет среднего индикаторного давления и индикаторной мощности, необходимо определять положение ВМТ с максимальной абсолютной погрешностью не более 0,1...0,3° ПКВ.

Предлагаемый авторами метод решения уравнения равенства нулю первой производной от давления при сжатии ($P'=0$), с последующим учетом термодинамического смещения ВМТ (*M. Tazerout, E. Pipitone*) [9], обеспечивает требуемую точность расчета ВМТ 0,1...0,3° ПКВ. Моделирование кривой $P'=0$ производится на участке от закрытия впускных клапанов до начала воспламенения в цилиндре. Соответствующие границы участков определяются путем анализа экстремумов кривых первой и второй производных от давления, которые возможны после фильтрации исходной кривой давления [10]. Авторами применяется цифровой фильтр *Butterworth LowPass filter*, который имеет гладкую характеристику во всем частотном диапазоне и не смещает фазу исходного сигнала. Таким образом обеспечивается требуемая точность окончательного расчета среднего индикаторного давления с последующим расчетом индикаторной и эффективной мощности двигателя с максимальной относительной погрешностью не более 2,5 % [13].

Расчет эффективной мощности на морских двигателях необходим не только для оценки удельного расхода топлива и диагностики технического состояния, но и для актуального в настоящее время расчета коэффициента энергоэффективности судов, введенного морской международной организацией *IMO*. Резолюция Международной морской организации *IMO MEPC.282 (70)* представляет собой руководство по разработке судового плана управления энергоэффективностью (*SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan*) [14, 15], в котором предложены подходы к управлению экологичностью и экономичностью работы, а также возможные пути улучшения общих эксплуатационных показателей судна. Основные факторы, влияющие на энергоэффективность, изложенные в Резолюции, применимы для судов внутреннего плавания в различной степени «весомости». По сути, все возможные методы мониторинга энергоэффективности в соответствии с Приложением VI к Конвенции МАРПОЛ также справедливы для судов внутреннего плавания, находящиеся в эксплуатации, только лишь с некоторыми допущениями.

Активность *IMO* и признанные *MEPC* реальные объемы снижения выбросов CO_2 в результате внедрения мероприятий по улучшению показателей энергоэффективности актуальны и для судов внутреннего плавания. Данная задача постепенно находит свое отражение в проектах развития судоходства на конвенциональных (Рейн, Дунай, Сава, Мозель) внутренних водных путях Европы, прежде всего, в экологических проектах. В настоящее время на внутренних водных путях стран Европейского Союза ежегодно перевозится свыше 550 млн. тонн грузов.

Таким образом, задача аналитической синхронизации данных, необходимая для корректной оценки мощности и технической диагностики, повышающей экономические и экологические показатели транспортных дизелей, является актуальной.

2. Аналитические методы определения ВМТ

2.1 Линейная модель. На рисунках 1, 2, 3 представлены диаграммы $P(\varphi, \text{deg})$ типичных морских двигателей, записанные с помощью качественных датчиков давления IMES GmbH [16] и их производные $dP/d\varphi$, полученные численным методом после исключения высокочастотного шума, согласно методике описанной в статье *S. Neumann, R. Varbanets* [11].

Если рассмотреть участок диаграммы $dP/d\varphi$ от максимума скорости при сжатии (точка P^m) до начала сгорания (координата точки P_c'), то видно,

что он может быть промоделирован прямой линией LL' или участком синусоиды SS' . Без учета термодинамического смещения диаграммы давления (а оно бывает пренебрежительно мало) аппроксимирующая прямая LL' должна пересечь «0» в положении ВМТ. Это положение вытекает из того, что скорость изменения давления в ВМТ в этом случае равна нулю.

Уравнение прямой запишем в виде:

$$LL' = b_0 + b_1\varphi. \quad (1)$$

Координату ВМТ определяем из условия:

$$LL' = 0 \rightarrow \varphi_{\text{ГДС}} = -b_0 / b_1. \quad (2)$$

Согласно требованиям метода наименьших квадратов, выражение для b_1 и b_0 запишем в виде:

$$b_1 = \frac{\sum \varphi_i \sum P_i' - n \sum P_i' \varphi_i}{(\sum \varphi_i)^2 - n \sum \varphi_i^2}, \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{1}{n} (\sum P_i' - b_1 \sum \varphi_i), \quad (4)$$

где знаком суммы обозначается суммирование на участке от максимального давления на участке сжатия P_m до давления начала сгорания в цилиндре P_c' :

$$\sum = \sum_{i=\varphi_i P_m}^{\varphi_i P_c'}, \quad (5)$$

n – количество точек на участке.

Для повышения точности метода линейной регрессии нужно исключать часть точек ϑ после координаты P_m и перед координатой P_c' . Таким образом уточняется база для построения регрессионной модели, и можно записать:

$$\sum = \sum_{i=\varphi_i P_m + \vartheta}^{\varphi_i P_c' - \vartheta}. \quad (6)$$

В случае, когда запись индикаторных диаграмм предполагает 2 точки на 1° ПКВ, $\vartheta = 3 \dots 5$ точек в зависимости от вида диаграммы $dP/d\varphi$ и фактической длины участка этой диаграммы от P_m до P_c' .

Существенная проблема метода линейной регрессии, которая значительно повышает погрешность определения ВМТ, появляется тогда, когда участок $[P_m, P_c']$ диаграммы $dP/d\varphi$ слишком мал. На рис. 2 приведена индикаторная диаграмма судового двигателя MAN 9L58/64 с большим углом опережения впрыска топлива.

В случае ранних углов опережения впрыска топлива участок $[P_m, P_c']$ диаграммы $dP/d\varphi$ сокращается, как показано на рис. 6. В некоторых случаях, когда геометрические углы опережения впрыска топлива доходят до величин $15 \dots 20^\circ$ ПКВ до ВМТ, этот участок пропадает вовсе.

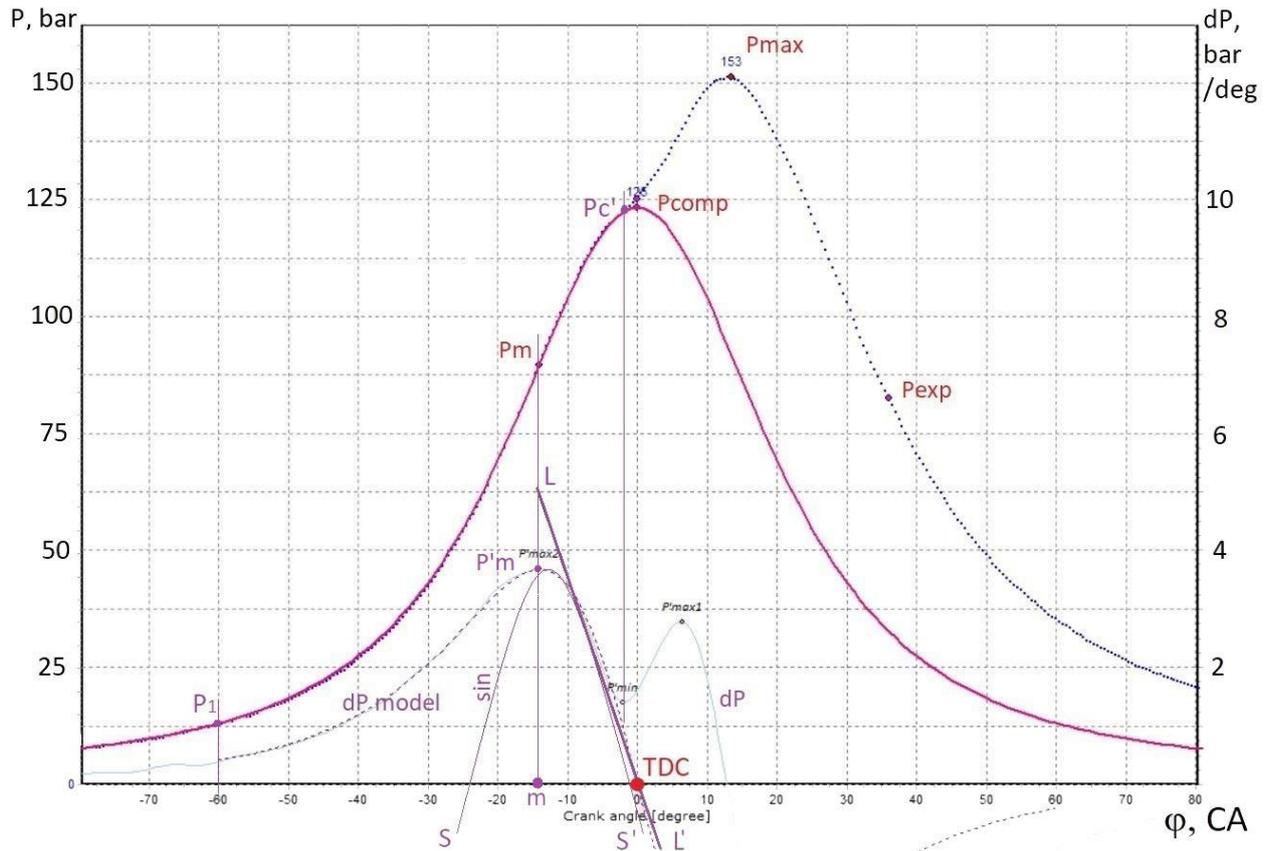


Рис. 1. Аналитические способы определения положения верхней мёртвой точки поршня (дизель Yanmar 6EY18ALW)

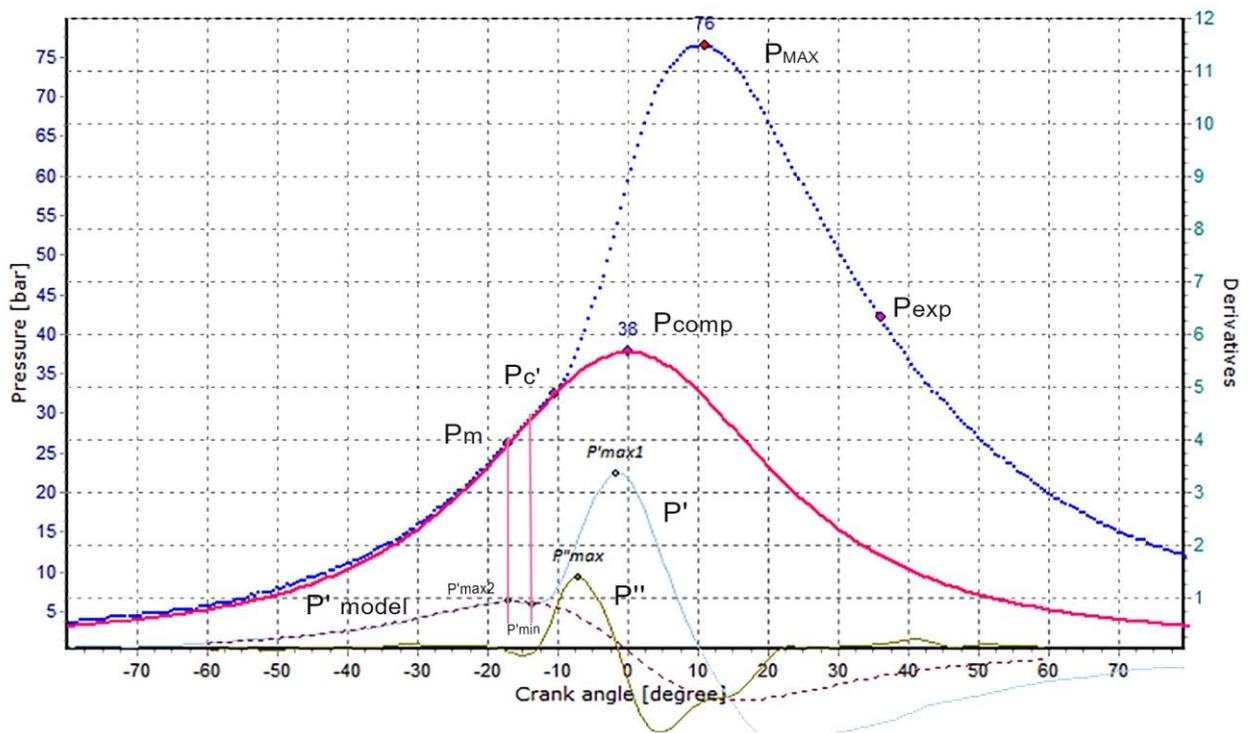


Рис. 2. Индикаторная диаграмма двигателя MAN 9L58/64 с ранним углом впрыска топлива

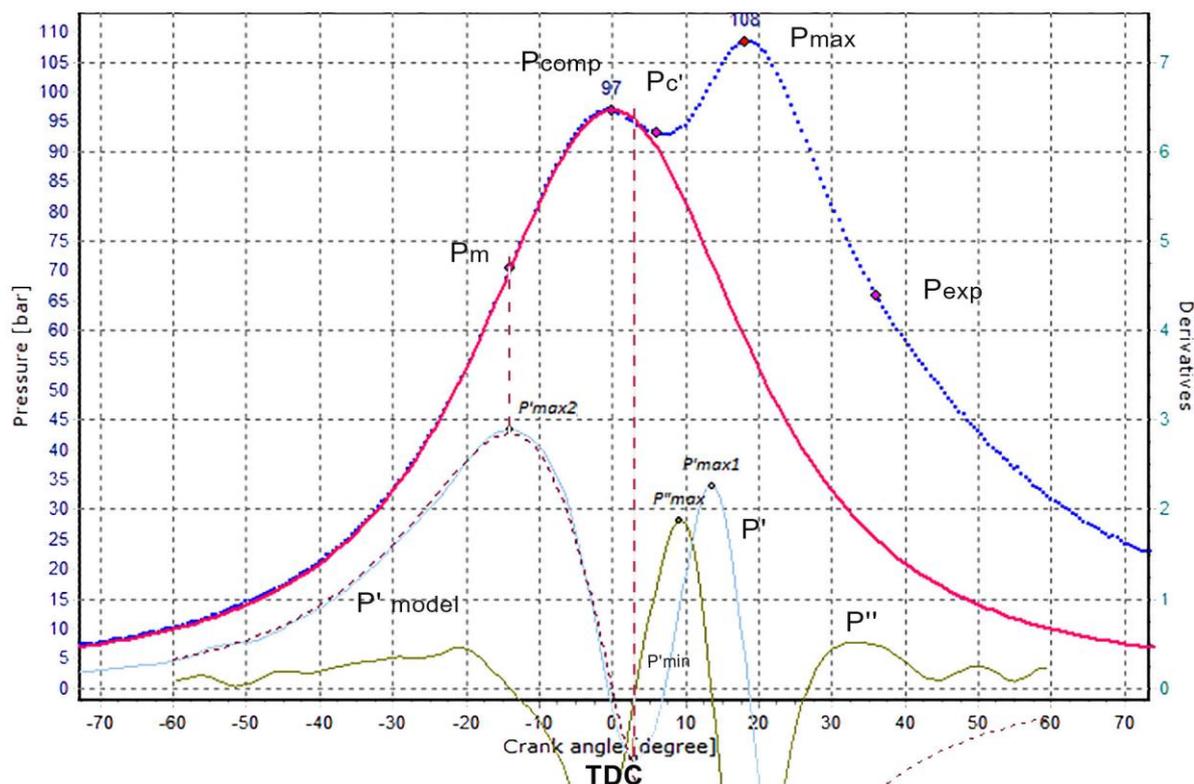


Рис. 3. Индикаторная диаграмма двигателя 6RT-FLEX82C с поздним углом впрыска топлива

Наиболее устойчивая работа метода определения ВМТ с помощью линейной регрессии будет на современных двухтактных морских двигателях с поздним впрыском топлива и началом сгорания за ВМТ (см. рис. 2).

В этом случае участок $[P_m, P_{c'}]$ диаграммы $dP/d\varphi$ имеет достаточное количество точек для построения линейной регрессионной модели. Более того, диаграмма $dP/d\varphi$ пересекает «0», и не нужно экстраполировать линейную модель, повышая тем самым вероятность погрешности. Положение ВМТ в этом случае находится внутри участка $[P_m, P_{c'}]$, что позволяет определять ВМТ с высокой точностью, как, например, для двигателя Wartsila 6RT-FLEX82C (см. рис. 3).

2.2 Синусоидальная модель. Во всех случаях производные от исходной диаграммы $P(t)$ определяются методом численного дифференцирования, при этом удаляются высокочастотные шумы (как показано в [11]), что дает возможность проводить дальнейший анализ полученных диаграмм $P'(t)$ и $P''(t)$. С помощью этого анализа можно определить координаты экстремумов $P'(t)$ и $P''(t)$ на участках сжатия и, таким образом, определить фазу начала сгорания $P_{c'}$ с достаточной точностью [18]. Фаза $P_{c'}$ приближенно является концом процесса сжатия в цилиндре и служит правой границей моделирования участка $[P_m, P_{c'}]$.

Очевидно, что линейная регрессионная модель

недостаточно точно передает характер изменения давления на участке $[P_m, P_{c'}]$, который совсем не линейный по своей физической сути. Можно даже сказать, что с очень большим приближением этот участок похож на линейную зависимость. Очевидно, что участок $[P_m, P_{c'}]$ диаграммы $dP/d\varphi$ с существенно меньшей погрешностью можно промоделировать синусоидальной моделью SS' (см. рис. 1). В этом случае

$$SS' = P'_m \sin(B\varphi_i + A), \quad (7)$$

где P'_m – максимум первой производной диаграммы давления на участке сжатия;

A, B – коэффициенты синусоидальной модели.

В отличие от линейной модели, для ее построения используется часть кривой $dP/d\varphi$ до точки P'_m . При построении синусоидальной модели может использоваться до $\vartheta = 6 \dots 10$ точек до координаты P_m и после координаты $P_{c'}$ (при записи индикаторных диаграмм с шагом 2 точки на 1° ПКВ).

Коэффициенты синусоидальной модели SS' определяются с помощью минимизации функционала F_S , построенного согласно требованиям метода наименьших квадратов:

$$F_S = \sum [P'_m \sin(B\varphi_i + A) - P'_i]^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где знаком суммы обозначается суммирование на участке моделирования:

$$\sum = \sum_{i=\varphi_1 P'_m - \vartheta}^{\varphi_1 P'_c + \vartheta} \quad (9)$$

Синусоидальная модель SS' с большей точностью, чем линейная модель LL', описывает участок кривой dP/dφ до начала сгорания и позволяет определить координату ВМТ с меньшей абсолютной погрешностью.

В точке минимума функционала F_S должны быть равны нулю все частные производные целевой функции:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_S}{\partial P'_m} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial B} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial A} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Окончательно получим систему из 3-х трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} P'_m = \frac{\sum p'_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)}; \\ \frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} = \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)\varphi_i}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)\varphi_i}; \\ \frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} = \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)}. \end{cases} \quad (11)$$

Система решается численным методом. Алгоритм метода Powell'64 [23] – поиск по системе сопряженных направлений – хорошо подходит для минимизации гладких функций четных степеней и для тригонометрических функций. Если воспользоваться этим методом, то коэффициенты P'_m, B, A определяются после нескольких последовательных шагов минимизации функционала \overline{F}_S .

$$\begin{aligned} \overline{F}_S = & \left(P'_m - \frac{\sum p'_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} - \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)\varphi_i}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)\varphi_i} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{\sum p_i \sin(B\varphi_i + A)}{\sum \sin^2(B\varphi_i + A)} - \frac{\sum p_i \cos(B\varphi_i + A)}{\sum \sin(B\varphi_i + A) \cos(B\varphi_i + A)} \right)^2 \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (12)$$

Минимум функционала \overline{F}_S , найденный из начальной точки (P'_m, 0, 0) (рис. 1), определяет координату ВМТ. При этом метод Powell'64 определяет глобальный минимум функционала \overline{F}_S за менее, чем 10 шагов поиска для всех исследованных P-диаграмм разных типов морских двигателей. Для реализации метода необходимо иметь начальное приближение ВМТ и углов φ поворота коленчатого вала, которые были получены с помощью линейной регрессионной модели.

2.3 Модель решения уравнения равенства нулю первой производной от давления при сжатии P'=0.

При построении линейной регрессионной модели методом наименьших квадратов используется малый участок численно взятой производной dP/dφ: [φ₁P_m+θ, φ₁P'_c-θ]. При построении синусоидальной модели используется несколько больший участок [φ₁P_m-θ, φ₁P'_c-θ]. В тех ситуациях, когда угол опережения впрыска топлива близок к «0» или меньше (поздний впрыск), база точек на указанных участках достаточна для построения моделей (см. рис. 1, 3).

Для двигателей с ранним углом опережения впрыска топлива (см. рис. 2) указанные участки слишком малы для построения регрессионных моделей.

Если воспользоваться моделью скорости изменения давления на участке сжатия, полученной из уравнения политропы сжатия P Vⁿ = const, то можно использовать большую базу экспериментальных точек. Например, можно использовать все точки от начала процесса сжатия (после закрытия впускных клапанов) до начала сгорания в цилиндре. Однако при анализе реальных индикаторных диаграмм влияние шумов на участках после закрытия клапанов слишком велико, что вносит дополнительную погрешность в построение регрессионной модели. Влияние шумов значительно меньше, если рассматривать участок диаграммы от координаты P₁ ~ 0.1 P_{max} (см. рис. 1) до координаты P'_c. Таким образом, базой для построения модели P'=0 принимаем участок диаграммы [φ₁P₁, φ₁P'_c-θ].

Давление газов на указанном участке сжатия равно:

$$\tilde{P}_{comp} = P_a \left(\frac{V_a}{V_\varphi} \right)^{n1}, \quad (13)$$

где P_a – давление в начале сжатия;

V_φ – текущий объем цилиндра:

$$V_\varphi = V_C + 0,5V_S \left[\begin{aligned} & 1 + \frac{1}{\lambda_{III}} - \cos\varphi - \\ & - \frac{1}{\lambda_{III}} \sqrt{1 - (\lambda_{III} \sin\varphi)^2} \end{aligned} \right], \quad (14)$$

где V_C – объем камеры сжатия;

λ_{III} – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна.

Объем, описываемый полным ходом поршня:

$$V_S = V_C(\varepsilon - 1). \quad (14)$$

Применительно к поставленной задаче определения координаты ВМТ, принимаем значение n_1 постоянным. Согласно рекомендациям [1, 19] для малооборотных и среднеоборотных двигателей значение n_1 принимаем равным 1,34...1,37. Дальнейший анализ показал, что в задаче определения ВМТ подобное допущение уместно и приближенное среднее значение n_1 в указанных пределах не ухудшает качество моделирования $dP/d\varphi$, которое в значительной степени зависит от уровня шумов на линии сжатия и от точности определения координаты конца сжатия P'_C – правой границы участка моделирования [11].

Выражение для скорости изменения давления на участке сжатия можно записать

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} \cdot \frac{dV_\varphi}{d\varphi}. \quad (15)$$

После несложных преобразований окончательно получим:

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} \times 0,5V_S \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_{III} \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda_{III}^2 \sin^2 \varphi}} \right). \quad (16)$$

В данном случае параметрами модели $dP_{comp}/d\varphi$ являются P_a и n_1 . Согласно требованиям метода наименьших квадратов, запишем функционал F_P , минимизация которого определит значения этих параметров на участке $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \vartheta]$.

$$F_P = \sum_{j=1}^m \left(P'_j - \frac{dP_{comp}}{d\varphi_j} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (17)$$

где m – количество точек на участке $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \vartheta]$.

Для минимизации функционала F_P воспользуемся методом *Powell-64*, поскольку он эффективен для минимизации квадратичных и тригонометрических функций.

Для удаления шумов на этих участках авторами применяется цифровой фильтр *Butterworth* [4], который имеет гладкую характеристику во всем частотном диапазоне и не смещает фазу исходного сигнала. Результаты моделирования скорости изменения давления $dP_{comp}/d\varphi$ на участках сжатия до начала

сгорания P'_C на разных типах индикаторных диаграмм показаны на рис. 1 – 3.

Использование относительно большой базы экспериментальных точек $[\varphi_i P_1, \varphi_i P'_C - \vartheta]$ для построения модели $dP_{comp}/d\varphi$ дает хорошие результаты.

Построенная таким образом модель с высокой точностью описывает процесс сжатия для разных типов двигателей, даже в случае значительно ранних углов начала сгорания топлива в цилиндре, как на рис. 2.

Правая граница моделирования $\varphi_i P'_C - \vartheta$ оказывает наибольшее влияние на точность построения модели, поскольку после впрыска топлива в цилиндр происходят предпламенные процессы и кривая давления уже не носит характер политропы сжатия. Задача определения координаты начала сгорания P'_C и правой границы решается с помощью анализа экстремумов диаграмм производных от диаграммы давления, как показано в [11, 18].

Заключение

В связи с тем, что индикаторные диаграммы записываются в память компьютера в виде временных серий $P(t)$, первым методом аналитического определения ВМТ служит метод линейной регрессии. Для его работы не нужна предварительная оценка углов ПКВ.

После первичного определения ВМТ с помощью метода линейной регрессии производится предварительное преобразование нескольких подряд идущих рабочих циклов $f(t) \xrightarrow{TDC} f(\varphi)$. В результате может быть применен метод синусоидальной аппроксимации участка диаграммы скорости изменения давления $dP_{comp}/d\varphi$, который уточняет положение ВМТ нескольких циклов.

Окончательное положение ВМТ и перевод диаграмм из временных серий в зависимости от угла ПКВ $f(t) \rightarrow f(\varphi)$ осуществляется с помощью решения уравнения $P' = 0$. При этом начальное приближение ВМТ нескольких циклов получено на предыдущем шаге с помощью синусоидальной модели.

Указанный алгоритм позволяет рассчитать положение ВМТ с максимальной абсолютной погрешностью не более 0,1...0,3° ПКВ. Таким образом обеспечивается требуемая точность окончательного расчета среднего индикаторного давления с последующим расчетом индикаторной и эффективной мощностей двигателя с максимальной относительной погрешностью не более 2,5 %.

Такая точность в определении мощности двигателя позволяет прогнозировать его нагрузку, рас-

считывать удельные показатели, рассчитывать показатели энергоэффективности согласно требованиям ИМО и в целом повышать эффективность эксплуатаций транспортных двигателей.

Для переносных систем мониторинга рабочего процесса морских дизелей предлагаемый метод аналитического определения ВМТ и последующей синхронизации данных дает следующие преимущества:

- уменьшается количество датчиков и кабелей при индицировании, что снижает вероятность сбоев и ошибок;
- автоматически учитываются смещения ВМТ за счет разных факторов во время эксплуатации;
- автоматически учитывается влияние канала индикаторного крана;
- погрешность метода аналитического определения ВМТ и последующей синхронизации индикаторных диаграмм значительно меньше, чем при аппаратном методе определения;
- не нужна предварительная подготовка двигателя, и двигатель может быть продиагностирован сразу во время обычной эксплуатации.

Литература

1. *Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis [Text] / R. Varbanets, V. Zalozh, A. Shakhov et all // Diagnostyka. – 2020. – № 21(1). – P. 51–60. DOI: 10.29354/diag/116585.*
2. *IMES cylinder pressure sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imes.de> (дата звернення: 16.12.2019).*
3. *Pressure and TDC sensors from Kistler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kistler.com> (дата звернення: 04.11.2019).*
4. *AVL OT-sensor 428 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.avl.com> (дата звернення: 07.09.2019).*
5. *Tazerout, M. TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the Temperature-Entropy Diagram [Text] / M. Tazerout, O. Le Corre, S. Rousseau. // SAE Technical Paper 1999-01-1489. – 1999. – 11 p.*
6. *Polanowski, S. Determination of location of Top Dead Centre and compression ratio value on the basis of ship engine indicator diagram [Text] / S. Polanowski // Polish Maritime Research. – 2008. – Vol. 15, № 2(56). – P. 59–64. DOI: 10.2478/v10012-007-0065-2.*
7. *Nilsson, Y. Determining TDC Position Using Symmetry and Other Methods [Text] / Y. Nilsson, L. Eriksson // SAE Technical Paper 2004-01-1458. – 2004. – 13 p. DOI: 10.4271/2004-01-1458.*
8. *Pipitone, E. Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach [Text] / E. Pipitone, A. Beccari // Applied Thermal Engineering. Elsevier. – 2010. – №30(15). – P. 1914–1926. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.04.012.*
9. *Tazerout, M. Compression Ratio and TDC calibrations using Temperature - Entropy Diagram [Text] / M. Tazerout, O. Le Corre, P. Stouffs. // SAE Technical Paper 1999-01-3509. – 1999. – 11 p. DOI: 10.4271/1999-01-3509.*
10. *Varbanets R. Analyse of marine diesel engine performance [Text] / R. Varbanets, A. Karianskiy // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. – Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Tech: Gdansk University of Technology, 2012. – P. 269–275.*
11. *Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data [Text] / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash et all // Diagnostyka. – 2019. – № 20(2). – P. 19–26. DOI: 10.29354/diag/104516.*
12. *Varbanets, R. Application of the optimization method in the objectives of the analysis of the working process of ship diesels [Text] / R. Varbanets, E. Belousov, A. Yeryganov // Transport Development, 2018. – № 2(3). – P. 90–103. DOI: 10.33082/td.2018.2-3.09*
13. *Yeryganov, O. Features of the fastest pressure growth point during compression stroke [Text] / O. Yeryganov, R. Varbanets. // Diagnostyka. – 2018. – №19(2). – P. 71–76. DOI: 10.29354/diag/89729.*
14. *Resolution MEPC.282(70). 2016 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP). International Maritime Organization (IMO) [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.282\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.282(70).pdf) (дата звернення: 28.02.2019)*
15. *Tarasenko T. The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage [Text] / T. Tarasenko, V. Zalozh, S. Maksymov // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1297/1/012019.*
16. *Neumann, S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control [Text] / S. Neumann // CIMAC Congress. – Hamburg : Digest, 2001. – P. 1–12.*
17. *Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lemag.de/>. (дата звернення: 4.11.2019)*
18. *Powell, M. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [Text] / M. J. D. Powell // The Computer Journal. 1964. – Vol. 7, Iss. 2. – P. 155–162. DOI: 10.1093/comjnl/7.2.155.*
19. *Heywood, John B. Internal combustion engine fundamentals [Text] / Heywood, B. John. – New York : McGraw-Hill, 1988. – 930 p.*
20. *Ding, Y. Cylinder process simulation with heat release analysis in diesel engine [Text] / Y. Ding, D. Stapersma, H. Grimmelius // 2009 Asia-Pacific Pow-*

er and Energy Engineering Conference. – Wuhan, 2009. – P. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918248.

21. Staś, M. An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination [Text] / M. Staś // *SAE Technical Paper 2000-01-0561*. – 2000. – 9 p. DOI: 10.4271/2000-01-0561.

22. Tunestal, Per. Model Based TDC Offset Estimation from Motored Cylinder Pressure Data [Text] / Per Tunestal // *Proceedings of the 2009 IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling IFP, Rueil-Malmaison*. – France, 2009. – P. 241–247. DOI: 10.3182/20091130-3-FR-4008.00032.

23. Improvement of Diagnosing Methods of the Diesel Engine Functioning under Operating Conditions [Text] / R. Varbanets, S. Karianskyi, S. Rudenko, I. Gritsuk et al. // *SAE Technical Paper*. – 2017. – 12 p. DOI: 10.4271/2017-01-2218.

References

1. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Shakhov, A. V., Savelieva, I. V., and Piterska, V. M. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 2020, no. 21(1), pp. 51–60. DOI:10.29354/diag/116585.

2. IMES cylinder pressure sensors. Available at: <https://www.imes.de> (Accessed 16 December 2019).

3. Pressure and TDC sensors from Kistler. Available at: <https://www.kistler.com> (Accessed 04 November 2019).

4. AVL OT-sensor 428. Available at: <https://www.avl.com> (Accessed 07 September 2019).

5. Tazerout, M., Le Corre, O., Rousseau, S. TDC Determination in IC Engines Based on the Thermodynamic Analysis of the Temperature-Entropy Diagram, *SAE Technical Paper 1999-01-1489*, 1999, 11 p. DOI: 10.4271/1999-01-1489.

6. Polanowski, S. Determination of location of Top Dead Centre and compression ratio value on the basis of ship engine indicator diagram. *Polish Maritime Research*, 2008, vol. 15, no. 2(56), pp. 59–64. DOI: 10.2478/v10012-007-0065-2.

7. Nilsson, Y., Eriksson, L. Determining TDC Position Using Symmetry and Other Methods, *SAE Technical Paper 2004-01-1458*, 2004, 13 p. DOI: 10.4271/2004-01-1458.

8. Pipitone, E., Beccari, A. Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach, *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, 2010, vol. 30, iss. 14–15, pp. 1914–1926. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.04.012.

9. Tazerout, M., Le Corre, O., Stouffs, P. Compression Ratio and TDC calibrations using Temperature - Entropy Diagram, *SAE Technical Paper 1999-01-3509*, 1999, 11 p. DOI: 10.4271/1999-01-3509.

10. Varbanets, R., Karianskiy, A. Analyse of marine diesel engine performance, *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*, Gdansk, Faculty of Ocean

Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 269–275.

11. Neumann, S., Varbanets, R., Kyrylash, O., Yeryganov, O. V., Maulevych, V. O. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data”, *Diagnostyka*, 2019, vol. 20(2), pp. 19–26. DOI: 10.29354/diag/104516.

12. Varbanets, R., Belousov, E., Yeryganov, A., Maulevych, V., Aleksandrovskaya, N., Kryzhanovskaya, I. Application of the optimization method in the objectives of the analysis of the working process of ship diesels. *Transport Development*, 2018, no. 2(3), pp. 90–103. DOI: 10.33082/td.2018.2-3.09

13. Yeryganov, O., Varbanets, R. Features of the fastest pressure growth point during compression stroke, *Diagnostyka*, 2018, vol. 19(2), pp. 71–76. DOI: 10.29354/diag/89729.

14. Resolution MEPC.282(70) Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), *International Maritime Organization (IMO)*, 2016. 21 p. Available at: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.282\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.282(70).pdf) (Accessed 28 February 2019).

15. Tarasenko, T, Zalozh, V., 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, no. 1297(1), pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1297/1/012019.

16. Neumann, S. High temperature pressure sensor based on thin film strain gauges on stainless steel for continuous cylinder pressure control, *CIMAC Congress, Hamburg, Digest*, 2001, pp. 1–12.

17. Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator. Available at: <http://www.lemag.de> (Accessed 04 November 2019).

18. Powell, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, *The Computer Journal*, 1964, vol. 7, iss. 2, pp. 155–162. DOI: 10.1093/comjnl/7.2.155.

19 Heywood, John B. *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1988. 930 p.

20. Ding, Y., Stapersma, D., Grimmeliuss, H. T. Cylinder process simulation with heat release analysis in diesel engine, *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918248.

21. Staś, M. An Universally Applicable Thermodynamic Method for T.D.C. Determination, *SAE Technical Paper 2000-01-0561*, 2000. 9 p. DOI: 10.4271/2000-01-0561.

22. Tunestal, Per. Model Based TDC Offset Estimation from Motored Cylinder Pressure Data, *Proceedings of the 2009 IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling IFP, Rueil-Malmaison, France*, 2009, vol. 42 (26), pp. 241–247. DOI: 10.3182/20091130-3-FR-4008.00032.

23. Varbanets, R., Karianskyi, S., Rudenko, S., Gritsuk, I. Improvement of Diagnosing Methods of the Diesel Engine Functioning under Operating Conditions, *SAE Technical Paper 2017-01-2218*, 2017. 12 p. DOI: 10.4271/2017-01-2218.

Поступила в редакцію 12.06.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.2020

МЕТОД АНАЛІТИЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Р. А. Варбанець, В. І. Залож, Т. В. Тарасенко,
Т. П. Білоусова, О. В. Ериганов*

Завдання аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу є базовою при вирішенні загальної проблеми параметричної діагностики транспортних двигунів в режимі експлуатації. Це завдання актуально для діагностики всіх видів транспорту (авіаційного, залізничного, морського, і т.д.). Недостатня точність рішення задачі синхронізації є причиною значних помилок у визначенні потужності і витрати палива, а також помилок в діагностиці основних вузлів і систем двигуна. Розрахунок індикаторної та ефективної потужності транспортних дизелів необхідний не тільки для діагностики й контролю технічного стану. Точний розрахунок потужності також важливий для визначення показників енергоефективності, відповідно до вимог Міжнародної морської організації. Завданням аналітичної синхронізації вважається переклад даних моніторингу робочого процесу, отриманих при індиціюванні двигуна, з функцій часу в функції по куту повороту колінчастого валу. Найбільший вплив на точність рішення задачі синхронізації надає похибка визначення координати верхньої мертвої точки (ВМТ) поршня. Метод базується на використанні трьох послідовних етапів визначення ВМТ: лінійного, синусоїдального і методу рішення рівняння $P' = 0$ (рівності нулю першої похідної сигналу тиску на ділянці стиснення від закриття впускних калпанів до моменту початку згоряння в циліндрі). Застосування трьох послідовних етапів забезпечує визначення координати ВМТ з абсолютною похибкою 0,1 ... 0,3 градуса колінчастого вала. Така точність забезпечує розрахунок потужності та інших параметрів робочого процесу з максимальною відносною похибкою менш 2,5 %, що відповідає вимогам класифікаційних товариств. Для переносних систем моніторингу робочого процесу морських дизелів пропонується метод аналітичного визначення ВМТ і подальшої синхронізації даних дає ряд переваг. По-перше, зменшується кількість датчиків і кабелів при індиціюванні, що знижує ймовірність збоїв і помилок. По-друге, автоматично враховуються зміщення ВМТ за рахунок різних факторів під час експлуатації. Автоматично враховується вплив каналу індикаторного крана. Похибка методу аналітичного визначення ВМТ і подальшої синхронізації індикаторних діаграм значно менше, ніж при апаратному методі визначення. Також відсутня необхідність попередньої підготовки двигуна.

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

THE METHOD OF ANALYTICAL SYNCHRONIZATION OF THE WORKING PROCESS DATA MONITORING IN TRANSPORT DIESEL ENGINES OPERATING

*R. Varbanets, V. Zalozh, T. Tarasenko,
T. Bilousova, O. Yeryganov*

An analytical synchronization for data of the transport diesel engines working process is a key issue of this publication. Of particular importance is that workflow data refers to engines in use. The lack of accuracy in determining the current characteristics of the working process is the cause of a significant error in determining power, fuel consumption, errors in monitoring the operation of engine systems, and its diagnosis. Calculation of the effective power of marine diesel engines is necessary not only to control the workflow and diagnose problems. It is also important for energy efficiency management as part of the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). The task of analytical synchronization is formulated as the transfer of data of a function by time to a function by the angle of rotation of the crankshaft. In this case, it becomes possible to determine the top dead center (TDC) most correctly. As the basis of the method of analytical data synchronization for determining TDC coordinates, it is proposed to use the sequential execution of three stages: linear, sinusoidal, and differential (compression pressure's first derivative is equal to zero). In addition, refinements have been made to linear and sinusoidal synchronization algorithms. They differ from their existing counterparts in using detailed restrictions. This allows one to have a further reduction of the error in TDC determining to a range of 0.1 ... 0.3 degrees of the crankshaft rotation. Also, this ensures the accuracy of the indicated power calculation and other basic workflow parameters with a maximum relative error of up to 2.5%. Obviously, such high accuracy allows avoiding diagnostic errors as much as possible, predicting

the engine load, performing more exact calculations of parameters and characteristics, and taking measures to achieve higher energy efficiency and economy. Undoubtedly, this helps to increase the efficiency of both transport engines in general and marine engines in particular.

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

Варбанец Роман Анатольевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский Национальный Морской Университет, Одесса, Украина.

Залож Виталий Иванович – ст. преп. каф. Инженерных дисциплин, Дунайский институт Национального университета «Одесская морская академия», Измаил, Украина.

Тарасенко Татьяна Владиславовна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. Инженерных дисциплин, Дунайский институт Национального университета «Одесская морская академия», Измаил, Украина.

Белюсова Татьяна Петровна – ст. преп. каф. Высшей математики и математического моделирования, Херсонский Национальный Технический Университет, Херсон, Украина.

Ерыганов Алексей Валериевич – канд. техн. наук, доц. каф. «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация», Одесский Национальный Морской Университет, Одесса, Украина.

Roman Varbanets – doctor of engineering sciences, full professor, head of department "The Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: roman.varbanets@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6730-0380.

Vitalii Zalozh – graduate student, department of Engineering Sciences, Danube institute of National university «Odessa maritime academy», Izmail, Ukraine, e-mail: zalogh@ukr.net, ORCID Author ID: 0000-0002-5213-6896.

Tetyana Tarasenko – Ph.doctor of engineering sciences, associate professor, head of department of Engineering Sciences, Danube institute of National university «Odessa maritime academy», Izmail, Ukraine, e-mail: sergeysunnysat@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8107-3524.

Tetiana Bilousova – Senior Lecturer, department of Higher Mathematics and Mathematical modeling, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: tbelousovane@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-6982-8960.

Oleksiy Yeryganov – Candidate of engineering sciences, associate professor of department "The Marine Power Plants and Technical Operation", Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine, e-mail: a.yeryganov@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-9736-3662.