

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ D4.0H

*Ивановский В.Г., Варбанец Р.А.,
Одесский национальный морской университет*

Введение. Среднеоборотные дизеля (СОД) получили широкое распространение на судах морского флота благодаря ряду их достоинств по сравнению с малооборотными дизелями (МОД): большей удельной мощности, меньшим габаритам, массе и требованиям к размерам машинного отделения; большей живучести судна благодаря наличию 2-4 двигателей; облегченной организации агрегатного ремонта.

Актуальность темы. По сравнению с малооборотными дизелями СОД присущи: меньший моторесурс; больший удельный эффективный расход топлива; больший риск и трудоемкость использования тяжелых топлив; усложнение установки и понижение к.п.д. передачи мощности на винт из-за наличия редуктора и специальных муфт; повышенная вибрация и шумность в работе; большие затраты на техническую эксплуатацию.

Современные СОД эксплуатируются при более высоких параметрах механической и тепловой напряженности по сравнению с МОД. Например, на некоторых моделях СОД максимальное давление сгорания P_z на номинальном режиме доходит до 250 бар (максимум 180 у МОД), температура выпускных газов – до 500°C и более (250–300°C у МОД), давление надувочного воздуха – до 4 бар и более (до 3 бар у МОД) [1].

Вследствие этих причин эффективность эксплуатации большинства судовых СОД существенно зависит от качества работы и технического состояния топливной аппаратуры (ТА) и механизма газораспределения (МГР), контроль состояния которых безусловно является одной из основных эксплуатационных задач.

Постановка проблемы. Базовым диагностическим параметром, определяемым всеми системами мониторинга рабочего процесса, является давление газов в цилиндре $P(\varphi)$. Эту величину в большинстве случаев определяют с помощью специальных датчиков давления, устанавливаемых на индикаторный кран [2]. В некоторых системах применяются стационарные встроенные датчики давления с большим моторесурсом, рассчитанным на весь период эксплуатации двигателя. Наиболее известные из стационарно устанавливаемых датчиков – это: пьезокварцевые датчики фирмы Kistler [3], оптические датчики фирмы Optrand [4], магнитострикционные датчики АВВ [5].

Параметры работы топливной аппаратуры определяются с помощью специальных датчиков, рассчитанных на высокие импульсные давления (до

2000 бар и более), и клапанов, встраиваемых в систему высокого давления и предназначенных для отключения датчиков в случае их разгерметизации [6]. Поскольку использование нештатной измерительной аппаратуры в топливной системе высокого давления является дорогостоящим и рискованным мероприятием (в случае разгерметизации и распыливания топлива создается пожароопасная ситуация), актуальным является метод виброакустического анализа, применяемый в системе DEPAS D4.0H. С помощью вибродатчика VS-20m фиксируются геометрические и действительные фазы топливоподачи, а также характер движения иглы форсунки, что особенно важно для определения технического состояния, как самой форсунки, так и топливной аппаратуры высокого давления в целом.

Параметры работы механизма газораспределения во время работы двигателя не определяются ни одной из известных диагностических систем. В данном случае, использование в системах D4.0H методов виброакустического анализа позволяет определять фазы газораспределения по виброимпульсам при закрытии клапанов и производить оценку их технического состояния по форме вибродиаграмм.

В большинстве моделей СОД, вследствие близких расстояний между клапанами и форсункой, запись вибродиаграмм с одной контрольной точки (торец форсунки) позволяет определять одновременно действительные параметры топливоподачи и газораспределения, что является еще одной отличительной особенностью систем D4.0H (рис. 1).

Основные характеристики системы D4.0H

Модуль реального времени системы D4.0H предназначен для непосредственной записи данных рабочего процесса и предварительного расчета 3-х ключевых параметров (тактность двигателя определяется автоматически):

- $P_z(P_{max})$ – максимальное давление сгорания в цилиндре (среднее, минимальное и максимальное значения за несколько рабочих циклов);
- RPM – частота вращения коленчатого вала дизеля;
- P_t – среднее давление в цилиндре.

Автоматическое определение тактности двигателя позволяет проводить мониторинг без предварительной настройки на тип дизеля. Данные индицирования отдельных цилиндров передаются из модуля D4.0H в компьютер по интерфейсу RS-232 со скоростью 115200 б/с.

Программное обеспечение производит расчет следующих параметров:

- Среднее индикаторное давление $P_i \\\ \ MIP .$
- Индикаторная мощность цилиндра $N_i \\\ \ P_i .$
- Частота вращения коленчатого вала $RPM .$
- Максимальное давление сгорания в цилиндре
 $p_z, p_z^{\min}, p_z^{\max} (\varphi p_z) \\\ \ p_{\max}, p_{\max}^{\min}, p_{\max}^{\max} (\varphi p_{\max}) .$
- Максимальное давление сжатия $P_{comp} .$
- Давление на линии расширения (36° после ВМТ) $P_{exp} .$

- Максимальная скорость повышения давления $v_m = \frac{\Delta p}{\Delta \varphi}$.
- Степень повышения давления $\lambda = \frac{P_{\max}}{P_{\text{comp}}}$.
- Давление в начале сгорания $p'_c (\varphi P'_c)$.
- Действительные и геометрические фазы топливоподачи $\alpha, \alpha^G, \varphi_{\text{INJ}}, \varphi_{\text{INJ}}^G$.
- Период и угол задержки самовоспламенения топлива $\tau_D, \varphi \tau_D$.
- Фазы газораспределения $\varphi_{\text{in}}^{\text{op}}, \varphi_{\text{in}}^{\text{cls}}, \varphi_{\text{exh}}^{\text{cls}}, \varphi_{\text{exh}}^{\text{op}}$.
- Анализ технического состояния ТА и МГР.
- Давление в любой точке диаграммы p_x .
- Данные спектрального-FFT анализа (опция).

	<p><u>Датчик давления газов PS-16</u> Диапазон измерения: 0-220 bar; конденсаторного типа, неохлаждаемый рабочая температура поверхности корпуса: до 350°C Макс. погрешность: <= 1.5% Вес: 0.42 kg Устанавливается на стандартный индикаторный кран, W27x1/10</p> <p><u>Вибродатчик VS-20</u> Частотный диапазон: 0.1 ÷ 18 kHz Полоса пропускания фильтра: 1.0 KHz Макс. рабочая температура: до 90°C Датчик имеет магнитную основу</p> <p><u>Модуль реального времени D4.0H</u> На базе процессора RCM2000, 128 kb RAM, 256 kb flash, 25 MHz; ПО: Dynamic C, Assembler АЦП AD7888 – 125 kHz, 12 bit, 8 ch.; автоматическое определение тактности дизеля; контрастный дисплей; управление одной кнопкой; RS-232 интерфейс, скорость передачи 115200 б/с; Время автономной работы ~ 10 часов; Габариты: 130 x 80 x 40 мм; вес ~ 0.45 кг Питание: 6VDC (4 x A1)</p>
---	---

Рисунок 1. Технические характеристики системы D4.0H

Характеристики програмного забезпечення:

- 1) $P(\varphi), P(V)$ – индикаторные диаграммы;
- 2) $dP/d\varphi$ – диаграммы производных (угловая скорость изменения давления газов в цилиндре);
- 3) вибродиаграммы $vib(\varphi)$ – для анализа фаз топливоподачи, газораспределения и оценки технического состояния топливной аппаратуры и механизма газораспределения;
- 4) сводные диаграммы, сводные бар-диаграммы, сводная таблица основных расчетных параметров;
- 5) расчетный метод определения ВМТ цилиндра (PLS-алгоритм);
- 6) отчет по рабочему процессу в каждом цилиндре и сводный отчет по двигателю;
- 7) Windows XP/98, оптимальное разрешение экрана 1280 x 1024 точек.

Синхронизация данных в системе D4.0H

Определение ВМТ, НМТ и последующая синхронизация данных производится расчетным путем, с помощью PLS-алгоритма «бесфазовой синхронизации». Первая версия PLS-алгоритма была разработана в 1994 г. для переносных систем DEPAS 2.34. К настоящему времени он существенно модифицирован и прошел тщательное тестирование на двигателях МОД, СОД и ВОД. Коррекция расчетного значения ВМТ производится исходя из того, что при отсутствии сгорания в цилиндре скорость изменения давления в ВМТ равна нулю [7]:

$$\frac{dP_{comp}}{d\varphi_{ВМТ}} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\varphi^{n_1+1}} * \frac{dV_\varphi}{d\varphi} = 0,$$

где P_a, V_a – давление и объем в начале сжатия; n_1 – показатель политропы сжатия.

Благодаря использованию PLS-алгоритма мониторинг рабочего процесса проводится без установки синхронизирующих датчиков на маховике двигателя, что делает систему D4.0H универсальной – готовой к использованию на любом двигателе без его предварительной подготовки. Кроме преимуществ системы, связанных с возможностью оперативного мониторинга, PLS-алгоритм обладает следующими важными свойствами:

- PLS-алгоритм автоматически учитывает скручивания коленчатого вала на нагруженном двигателе;
- PLS-алгоритм автоматически учитывает возможные несоответствия между истинным положением ВМТ и отметкой на маховике, которое может возникнуть вследствие неточной маркировки;
- PLS-алгоритм автоматически учитывает смещение ВМТ во время эксплуатации вследствие влияния зазоров в деталях КШМ и других эксплуатационных факторов;

- PLS-алгоритм автоматически учитывает влияние конечной скорости прохождения волны давления в канале индикаторного крана (от камеры сгорания до мембраны датчика давления);

- PLS-алгоритм дает возможность производить мониторинг рабочего процесса без предварительной подготовки двигателя (во время работы с системами мониторинга, использующими аппаратную синхронизацию, наиболее трудоемкая и длительная часть подготовки системы к работе – установка фазового датчика и маркировка маховика);

- отсутствуют временные и финансовые затраты на установку датчиков (применение PLS-алгоритма позволяет производить индицирование дизеля непосредственно в процессе его эксплуатации, без специальной подготовки, которая необходима при аппаратной синхронизации данных).

Лабораторные тестирования и практические испытания систем DEPAS показали, что точность синхронизации при использовании PLS-алгоритма соответствует точности аппаратной синхронизации для первого от маховика цилиндра. Максимальная абсолютная фазовая погрешность определения ВМТ, НМТ и в целом синхронизации не превышает 0.5° ПКВ, что дает возможность максимально точно рассчитывать среднее индикаторное давление и индикаторную мощность цилиндра во время эксплуатации. Неучет вышеперечисленных факторов приводит к погрешности аппаратной синхронизации на дальних от маховика цилиндрах до 1.5° ПКВ.

Фазы топливоподачи и газораспределения, а также техническое состояние ТА и МГР определяются с помощью контактного вибродатчика VS-20. Датчик имеет магнитную основу и прочно фиксируется в местах контактов. Определение указанных параметров происходит без непосредственного внедрения в топливную аппаратуру высокого давления и специальных креплений к МГР.

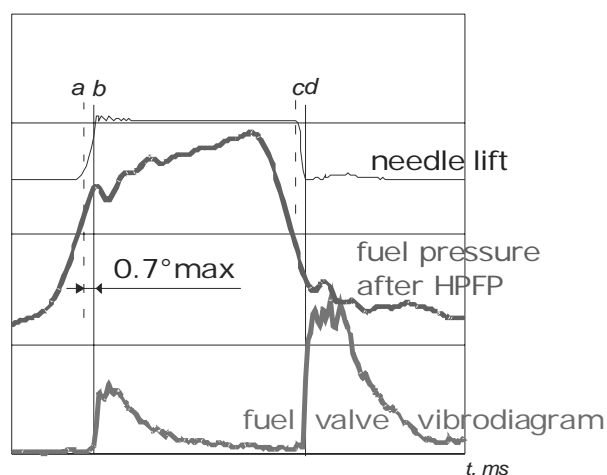


Рисунок 2. Диаграммы впрыскивания топлива форсункой СОД

Использование вибродатчика в системе поясняется рисунком 2: верхняя диаграмма – ‘needle lift’ – перемещение иглы форсунки во время впрыска топлива; средняя диаграмма – ‘fuel pressure’ – давление топлива за ТНВД; нижняя диаграмма – ‘fuel valve vibrodiagram’ – преобразованная вибродиаграмма торца форсунки. Фазы впрыска топлива (начало, соответствующее подъему иглы и окончание, соответствующее посадке – по верхней диаграмме) совпадают с передними фронтами виброимпульсов на нижней вибродиаграмме.

Анализ вибродиаграмм дает возможность оценить фазы топливоподачи с помощью контактного вибродатчика, без препарирования форсунки и без внедрения специальных датчиков в систему высокого давления. Кроме того, форма виброимпульсов отражает техническое состояние форсунки и всей топливной аппаратуры высокого давления в целом. При нормальном техническом состоянии ТА форсунка генерирует два импульса (в начале и в конце впрыска) с четко выраженными передними фронтами (рис. 3). В случае установки вибродатчика на торец форсунки, фазовое расстояние от переднего фронта до ВМТ характеризует действительный угол опережения впрыска топлива. При установке вибродатчика на заглушку, напротив отсечного окна ТНВД, фазовое расстояние от переднего фронта виброимпульса до ВМТ характеризует геометрический угол начала подачи топлива ТНВД (угол, определяемый по «мениску»).

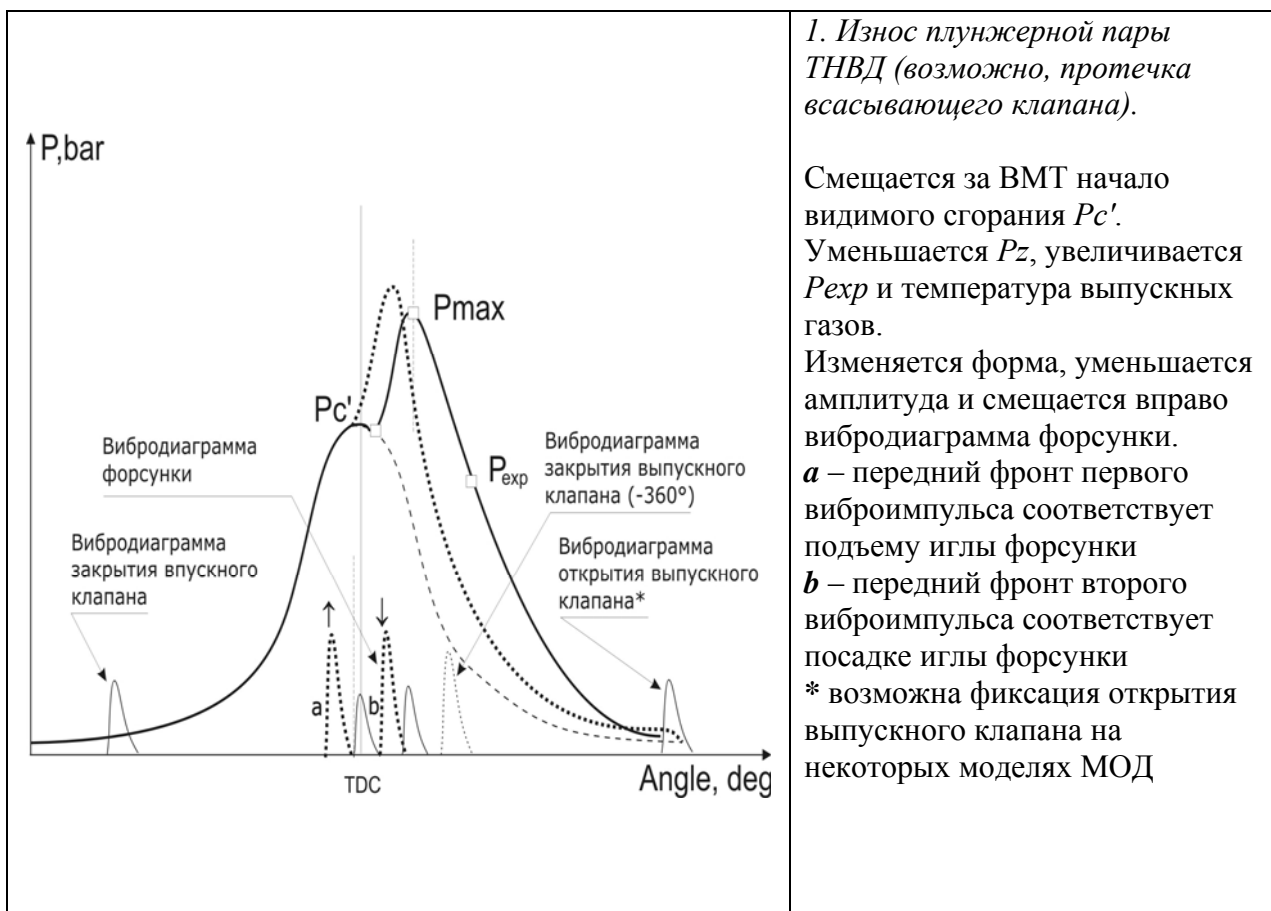
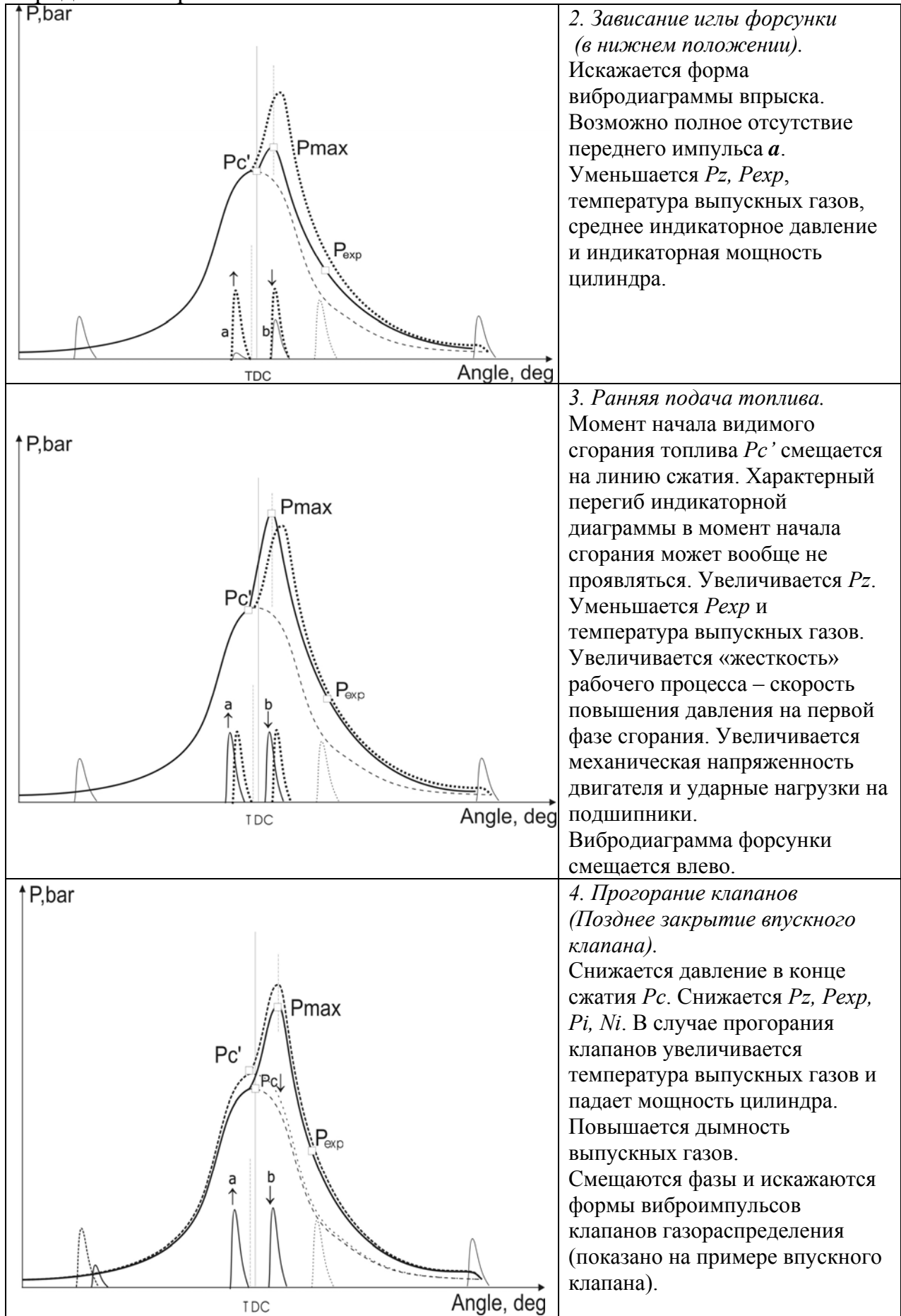


Рисунок 3. Примеры нескольких характерных дефектов в отчетах системы D4.0H

Продолжение рис. 3



Выводы. Использование программно-аппаратного комплекса D4.0H при эксплуатации СОД дает возможность получить следующие преимущества:

- увеличить экономичность рабочего процесса, за счет точной регулировки топливной аппаратуры и механизма газораспределения;
- увеличить межремонтный период и сократить затраты на техническое обслуживание, за счет расчета и равномерного распределения нагрузки между цилиндрами;
- исключить риск возникновения аварийных ситуаций и существенно поднять уровень технического обслуживания ЭУ, благодаря своевременному мониторингу и контролю рабочего процесса;
- сократить затраты на эксплуатацию ЭУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов В.С. Современные проблемы теории судовых дизелей (рабочий процесс и теплопередача) / В.С.Семенов. – М. : В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 112 с.
2. Варбанец Р.А. Стационарные системы диагностики рабочего процесса судовых дизелей NK-100, Kuma Diesel Analyzer / Р.А.Варбанец, В.Г.Ивановский. – Проблемы техники : научно-технический журнал. Хмельницкий национальный университет, 2006. – № 1. – С. 91–102.
3. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kistler.ch>.
4. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.optrand.com>.
5. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.abb.com/pressductor>.
6. Ивановский В.Г. Применение виброакустического метода для анализа топливоподачи дизеля в эксплуатации / В.Г.Ивановский, Р.А.Варбанец. – Вестник Одесского национального морского университета, 1998. – № 1. – С. 131–134.
7. Варбанец Р.А. Синхронизация данных при индицировании СДВС / Р.А.Варбанец // Сборник научных трудов Севастопольского ВМИ им. П.С.Нахимова. – Севастополь, 2005. – № 2 (8). – С. 255–259.