

УДК 689.12-8.004.5.001.5

Р.А. ВАРБАНЕЦ

Одесский национальный морской университет (ОНМУ), Украина

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДИЗЕЛЕЙ SBV6M540 И PEGASO 9156

Представлены результаты диагностики главного дизеля Deutz BV6M-540 и вспомогательных дизелей Pegaso 9156 тх «PS Gatieer». На ГД Deutz установлены индикаторные краны, что дало возможность определить индикаторные показатели рабочего процесса, параметры топливоподачи и газораспределения. Высокооборотный дизель Pegaso 9156 не оборудован индикаторными кранами и рассматривается пример диагностики топливной аппаратуры высокого давления и механизма газораспределения в этом случае.

рабочий процесс, топливоподача, газораспределение

## Введение

19 мая 2005 г. вступило в силу Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ-73/78 – «Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов». В приложении выдвинут ряд требований, ограничивающих, в том числе, выбросы окислов азота (NOx) в выпускных газах судовых дизелей мощностью более 130 кВт (кроме аварийных). В связи с этим становится особенно актуальной проблема контроля параметров рабочего процесса главных и вспомогательных дизелей, диагностика технического состояния их топливной аппаратуры высокого давления (ТА) и механизма газораспределения (МГР). Процент окислов азота в выпускных газах дизелей в значительной мере зависит от «жесткости» – максимальной скорости повышения давления на первой фазе сгорания  $v_m = dp/d\phi$ , от степени повышения давления  $\lambda = P_z / P_C$  и в целом от качества процесса сгорания топлива. Кроме того, результаты параметрической диагностики используются для устранения неисправностей и последующей регулировки ТА и МГР с целью равномерного распределения нагрузок и уменьшения неравномерности тепловых напряжений по цилиндрам. Это способствует повышению резерва мощности и увеличению моторесурса ДВС.

**Постановка проблемы.** На главных судовых дизелях, как правило, установлены индикаторные кра-

ны, что дает возможность произвести индицирование рабочего процесса и определить индикаторные показатели:  $RPM // n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $\Delta = \pm 0,1rpm$ ;  $MIP // P_i$  – среднее индикаторное давление, МПа;  $P_i // N_i$  – индикаторная мощность цилиндра;  $P_t$  – среднее по времени давление рабочего цикла;  $P_{max} // P_z$  ( $\phi P_z$ ) – максимальное давление сгорания топлива и соответствующий угол поворота коленчатого вала (за в.м.т.), МПа;  $P_{comp} // P_c$  – максимальное давление сжатия в цилиндре, МПа;  $P_c' (\phi P_c')$  – давление в момент самовоспламенения топлива и соответствующий угол поворота коленчатого вала (до/за в.м.т.), МПа;  $P_{exp}$  – давление на линии расширения ( $36^\circ \text{ПКВ}$  за в.м.т.), МПа;  $V_m$  – максимальная скорость повышения давления при сгорании топлива,  $\text{МПа}/^\circ \text{ПКВ}$ ;  $\lambda$  – степень повышения давления при сгорании топлива.

В результате индицирования инженер получает индикаторные диаграммы рабочих процессов в цилиндрах дизеля, как функции от угла поворота коленчатого вала  $P(\phi)$  или от объема цилиндра  $P(V)$ . Техническое состояние ТА и МГР отдельных цилиндров влияют на характер рабочего процесса, т.е. изменяются значения параметров и формы самих индикаторных диаграмм. Попытки непосредственного определения характеристик ТА и МГР в ряде систем диагностирования вынуждают разработчи-

ков устанавливать дополнительные датчики в штатную аппаратуру дизелей. Для главных дизелей МОД рядом фирм разработаны специальные клапаны высокого давления [3, 4, 6]. Вследствие значительных величин давления топлива в системе высокого давления (до 2000 бар в современных СОД и ВОД ДВС), установка дополнительных датчиков является процедурой трудоемкой и пожароопасной.

На практике фазы газораспределения и технические характеристики МГР определяются только на неработающем двигателе. Датчики, фиксирующие углы открытия / закрытия клапанов газораспределения устанавливаются только на лабораторных двигателях. Очевидно, что получение реальных характеристик работы ТА и МГР на эксплуатируемом дизеле, безусловно, позволило бы осуществлять качественный контроль работы этих механизмов.

### Пример решения проблемы определения параметров рабочего процесса, топливоподачи и газораспределения на дизелях в эксплуатации

Основные параметры топливоподачи и газораспределения параллельно с основной индикаторной диаграммой рабочего процесса можно получить с помощью анализа виброакустических сигналов соответствующих узлов дизеля [3, 6].

Рассмотрим результаты определения параметров рабочего процесса дизеля *BV6M-540* (6ЧН 37/40) производства фирмы *Deutz* – среднеоборотного (600 мин<sup>-1</sup>) шестицилиндрового рядного четырехтактного с газотурбинным наддувом и высокооборотного дизеля *Pegaso 9156* (1500 мин<sup>-1</sup>).

Двигатели работали на топливе MGO со следующими характеристиками:  $\rho=0,8386$  (15°C), кинематическая вязкость  $\nu=3$  (50°C), температура вспышки 70°C min, температура застывания -14°C max, содержание серы 0,2% max.

Большие величины углов опережения впрыска топлива характеризуют «жесткую работу» обоих двигателей (рис. 1).

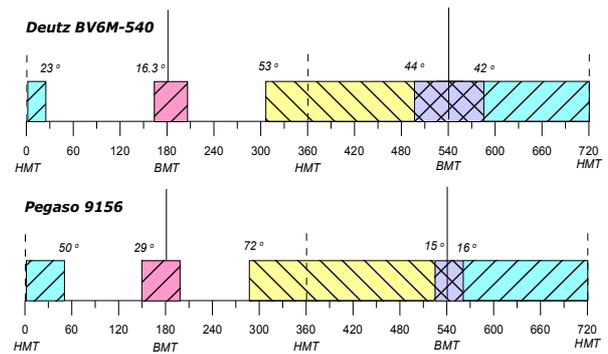


Рис. 1. Диаграммы газораспределения и топливоподачи дизелей *BV6M-540* и *Pegaso 9156*

Дизель *BV6M-540* был продиагностирован при частоте вращения коленчатого вала 583-585 мин<sup>-1</sup>. В первую очередь были определены и устранены неравномерности в регулировке цикловых подач и углов опережения отдельных цилиндров. В результате удалось добиться более ровного распределения нагрузки между цилиндрами (рис. 2). На цилиндре №5 был уменьшен угол опережения подачи топлива до значения  $\alpha = 16^\circ \text{ПКВ}$  и уменьшена цикловая подача. На цилиндре №4 увеличение угла опережения до значения  $\alpha = 17,7^\circ \text{ПКВ}$  и увеличение цикловой подачи на 2/28 деления рейки позволило привести значения  $P_z$  и основных параметров в диапазон допуска. Дальнейшее увеличение угла опережения впрыска топлива на цилиндре №4 привело бы к значительному повышению «жесткости» рабочего процесса и увеличению ударных нагрузок на подшипники КШМ. Дальнейшее увеличение цикловой подачи на цилиндре №4 было неэффективным – повышалась температура выпускных газов, при незначительном увеличении среднего индикаторного давления и мощности.

Форма вибродиаграммы форсунки цилиндра №4 позволяет сделать вывод о ее хорошем техническом состоянии [3], таким образом, ревизии подлежал топливный насос высокого давления (нагнетательный клапан и плунжерная пара).

После регулировки топливной аппаратуры были устранены дефекты в регулировке механизма газораспределения (МГР) – отбалансированы приводы двухклапанной системы и отрегулированы тепловые

зазоры. На дизеле установлены по два впускных и два выпускных клапана на каждом цилиндре.

При нормальном техническом состоянии каждая группа клапанов должна открываться и закрываться одновременно и фазы газораспределения должны соответствовать паспортным значениям.

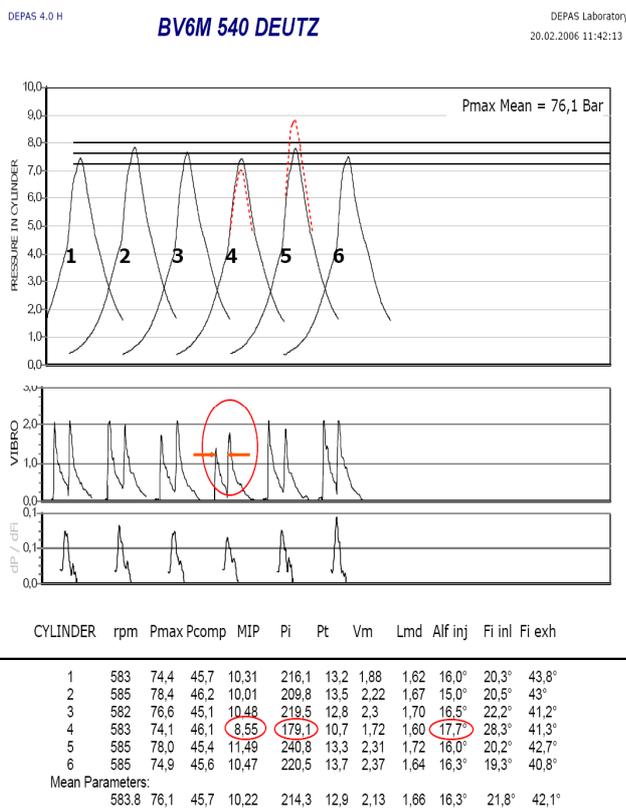


Рис. 2. Сводный отчет по цилиндрам дизеля Deutz BV6M-540

Вибродиаграммы механизма газораспределения отражают качество закрытия клапанов: в случае одновременного закрытия обоих клапанов вибродиаграмма имеет форму импульса с одним пиком, острым передним фронтом и затухающим по экспоненциальному закону задним фронтом.

На рис. 3 приведен отчет системы D4.0H [3,4] по цил.№2 двигателя BV6M-540. В верхней части отчета развернута  $P(\varphi)$  индикаторная диаграмма рабочего процесса с диаграммой сжатия-расширения и таблицей определяемых параметров рабочего процесса. В таблицу выведен программно определяемый угол опережения впрыска топлива  $\alpha$  и фазы газораспределения по углам закрытия клапанов [3]:

- $\alpha$  – угол опережения впрыска топлива (либо угол опережения подачи топлива ТНВД), в зависимости от места установки вибродатчика, °ПКВ;
- $\varphi_{inl}$  – угол закрытия впускных клапанов °ПКВ за н.м.т.;
- $\varphi_{exh}$  – угол закрытия выпускных клапанов °ПКВ за в.м.т.;

Параметры правой таблицы ‘DIAG NOTES’ задаются по показаниям местных приборов:

- $T_{exh}$  – температура выпускных газов, °С;
- $TUR_{rpm}$  – частота вращения вала турбонагнетателя, мин<sup>-1</sup>;
- $P_{scav}$  – давление надувочного воздуха, bar;
- $T_{scav}$  – температура надувочного воздуха, °С;
- $Rack$  – индекс топливной рейки ТНВД;
- $Governor$  – показатель общей нагрузки двигателя на регуляторе частоты вращения;
- $Load\%$  – нагрузка двигателя, %.

$P_{max} \sim // Pz(Pz_{MIN}, Pz_{MEAN}, Pz_{MAX})$  – среднее, минимальное и максимальные значения  $Pz$  за несколько рабочих циклов определяются в модуле реального времени системы D4.0H и отображаются в момент индицирования.

В случае невозможности определения давления надувочного воздуха  $P_s$  по местному прибору, его оценка производится по следующим зависимостям:

$$P_a = P_s * \xi_a;$$

$$P_c = P_a * \varepsilon^{n1};$$

$$P_s = P_a / \xi_a = \frac{P_c}{\varepsilon^{n1} * \xi_a},$$

где  $P_a$  – давление в начале сжатия в цилиндре, МПа;  $\xi_a$  – доля потери давления на впускных клапанах (может приниматься =1 для четырехтактных дизелей) [1];  $\varepsilon$  – степень сжатия в цилиндре;  $n1$  – коэффициент политропы сжатия (для СОД  $n1=1.37...1.39$  [1, 2]).

Из диаграмм на рис. 3 видно, что индикаторная диаграмма рабочего процесса имеет «классическую» для СОД форму с достаточно высокими значениями  $V_m, \lambda$ , что характеризует повышенную жесткость

рабочего процесса. Вибродиаграмма форсунки без искажений, связанных с дробным впрыском или подвпрыском топлива.

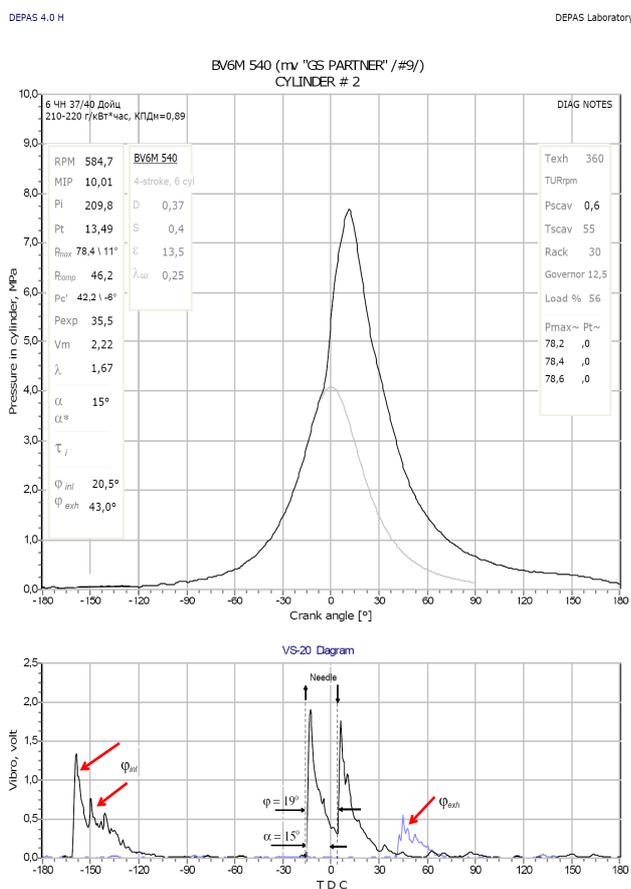


Рис. 3. Развернутая индикаторная диаграмма и вибродиаграмма топливоподачи и газораспределения цил.№2 Deutz BV6M-540

Передние фронты четко определяют фазы подъема и посадки иглы форсунки. Фазовая длительность впрыска, определенная по вибродиаграмме форсунки, равна  $\varphi = 19^\circ$  ПКВ. Вибродиаграмма закрытия впускных клапанов показывает их незначительную асинхронность. Определенные системой D4.0H углы закрытия клапанов:

$$\varphi_{inl} = 20.5^\circ \text{ПКВ за НМТ (} 23^\circ \text{ по паспорту);}$$

$$\varphi_{exh} = 43.0^\circ \text{ПКВ за ВМТ (} 42^\circ \text{ по паспорту, рис. 1).}$$

Общий анализ индикаторных диаграмм, вибродиаграмм и сводной таблицы параметров рабочего процесса шести цилиндров дизеля Deutz BV6M-540 после регулировки (рис. 2) показывает хорошее техническое состояние топливной аппаратуры, удовле-

творительную балансировку двигателя по мощностям цилиндров и удовлетворительное состояние механизма газораспределения. Необходимо отметить, что топливная аппаратура в целом настроена на достаточно большие для СОД углы опережения подачи топлива, что приводит к «жесткой» работе двигателя и повышенным ударным нагрузкам на подшипники КШМ [1, 2, 4].

Вспомогательные дизеля *Pegaso 9156* не оборудованы индикаторными кранами, поэтому на них был возможен только анализ вибродиаграмм топливной аппаратуры и механизма газораспределения. Запись вибродиаграмм производилась с помощью вибродатчика VS-20 системы D4.0H [3, 6]. Анализ спектра вибрации форсунки дал возможность определить центральную частоту колебаний и уточнить частоту вращения коленчатого вала. Центральная частота дискретного спектра уточнялась с помощью параболической интерполяции максимума второй гармоники, причем для расчета выбирались точка максимума и две точки – справа и слева от максимума ( $x_0, x_1, x_2$  см. рис. 4):

$$\omega_0 = 0.5 \frac{A(x_0)(x_2 + x_1) - 2A(x_1)(x_2 + x_0) + A(x_2)(x_1 + x_0)}{A(x_0) - 2A(x_1) + A(x_2)},$$

где  $x_0 = i\text{Max}-1$ ;  $x_1 = i\text{Max}$ ;  $x_2 = i\text{Max}+1$ .

Погрешность определения частоты КВ с помощью моделирования максимума спектра в среднем в 2.5 раз ниже погрешности полученной при анализе дискретного спектра  $\delta' \leq 2.5 * \delta DFT$ . Для частоты максимума 2-й гармоники 25.12 Гц получим обороты двигателя  $n = 1057 \text{rpm}$ . Длительность 4-х тактов (одного рабочего цикла  $720^\circ$ ПКВ) двигателя в данном случае равна  $T_4 = 79.6$  мс. На рис. 5 показана вибродиаграмма форсунки и клапанов газораспределения с наложенной фазовой диаграммой рабочего процесса дизеля *Pegaso 9156* (рис. 1). В записи выделено три полных рабочих цикла и частично четвертый. Импульс от закрытия впускных клапанов практически не выделяется на первых трех циклах и немного появляется только на 4-м (маркер 5). Ревизия МГР показала необходимость регулировки теп-

лового зазора впускных клапанов. Маркер 4 указывает на двойной импульс, соответствующий закрытию пары выпускных клапанов.

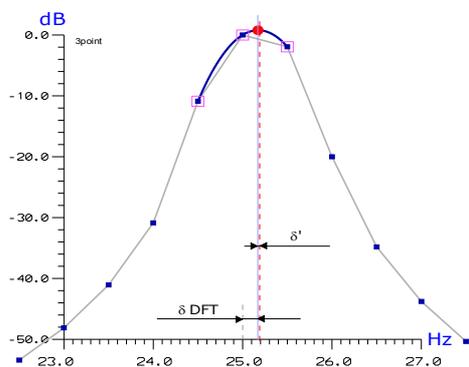


Рис. 4. Коррекция частоты вращения КВ по максимуму 2-й гармоники спектра вибродиаграммы форсунки

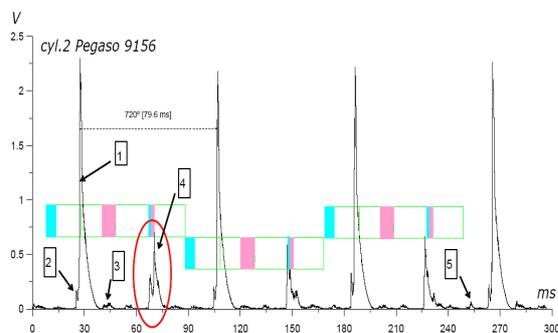


Рис. 5. Вибродиаграмма форсунки и МГП 4-х рабочих циклов дизеля Pegaso 9156

Повторяющийся, от цикла к циклу, двойной импульс характеризует одновременное закрытие клапанов и необходимость регулировки приводного синхронизирующего механизма. Во время открытия клапанов отсутствует четко выраженный ударный импульс, как при их закрытии, поэтому виброимпульс открытия слабый или вообще отсутствует (маркер 3). Маркер 1 указывает на самый мощный импульс, возникающий при работе форсунки, причем начало впрыска – подъем иглы - показано маркером 2.

## Заключение

Анализ вибродиаграмм дизеля, не оборудованного индикаторными кранами, не позволяет провести полную параметрическую диагностику цилиндра,

поскольку невозможно получить основную индикаторную диаграмму  $P(\varphi); P(V)$ . Тем не менее, сделать экспресс-оценку технического состояния топливной аппаратуры высокого давления и механизма газораспределения таким методом можно.

Необходимо отметить, что анализ фаз топливоподачи и газораспределения провести таким методом так же невозможно, поскольку нет необходимой информации для точной синхронизации вибродиаграммы (нет импульса от фазового датчика и нет индикаторной диаграммы, по которой можно было бы провести синхронизацию [5]). Фазовые диаграммы на рис.5 наложены с учетом известного угла опережения топливоподачи, указанного в табл. 2.

## Литература

1. Большаков В.Ф., Фомин Ю.Я., Павленко В.И. Эксплуатация судовых среднеоборотных дизелей. – М.: Транспорт, 1983. – 160 с.
2. Хандов З.А., Браславский М.И. Судовые среднеоборотные дизели. – Л.: Судостроение, 1975. – 320 с.
3. Ивановский В.Г., Варбанец Р.А. Применение виброакустического метода для анализа топливоподачи дизеля в эксплуатации // Вісник Одеського державного морського університету. – 2003. – № 1. – С. 131-134.
4. Возницкий И.В. Современные судовые среднеоборотные двигатели: Учебное пособие. – СПб., 2003. – 138 с.
5. Motohiro Takai, Shigeji Tsukahara. Performance and Combustion Analysis of High-speed Diesel Engine in Fast Ferry under Normal Service Condition (National Maritime Research Institute, Japan) // CIMAC Congress 2004, Kyoto. – Paper No.43. – 8 p.
6. Лаборатория **DEPAS** [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [www.depas.odessa.ua](http://www.depas.odessa.ua).

Поступила в редакцию 6.04.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Г. Ивановский, Одесский национальный морской университет, Одесса.