

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Обозов, к.т.н.

ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод»

В статье описывается система технического диагностирования топливной аппаратуры (СТД ТА) судового малооборотного дизеля, использующей в качестве источника информации импульс давления топлива, образующийся за топливным насосом высокого давления (ТНВД). По мнению автора, созданная система обладает достаточно хорошими характеристиками и может эффективно использоваться по своему назначению. Отличительной особенностью системы от существующих является то, что ее можно отнести к категории систем с «самообучением».

В практике эксплуатации судовых малооборотных дизелей в настоящее время достаточно широко применяются СТД ТА, поставляемые преимущественно зарубежными фирмами (например, фирмой «Autronica» Норвегия), однако стоимость таких систем значительна и достигает 20–30 тыс. долларов США. Данное обстоятельство послужило мотивом для разработки СТД ТА.

На начальном этапе разработки были сформулированы основные требования к создаваемой СТД ТА:

- система должна содержать по возможности минимальное количество электронных компонентов, быть компактной, простой в реализации, (соответственно дешевой) и обладать приемлемыми метрологическими свойствами (однако простота и невысокая стоимость системы не должны отрицательно влиять на ее функциональные качества);

- управление системой, обработка получаемой информации и ее визуализация должны производиться стандартными вычислительными средствами (обычным персональным компьютером) и не требовать от оператора специальных знаний из области компьютерных технологий. Должен максимально использоваться так называемый принцип «виртуальности» системы, т. е. принцип построения на основе применения минимума аппаратных средств;

- система должна быть достаточно информативной и помогать оператору в проведении процедуры диагностирования основных, наблюдаемых в эксплуатации, отклонений регулировок и

технического состояния ТА судового дизеля. В системе должен быть реализован принцип «самообучения», т. е. принцип *автоматизированного* получения эталонных характеристик впрыска, адаптированных под исследуемый режим работы дизеля.

Элементной базой для построения системы диагностирования послужили две микросхемы ЦАП типа К572ПА2 (AD574), управляемые компьютером через параллельный порт передачи данных (порт LPT). Порт LPT был выбран из соображений его доступности и легкости программирования в стиле «по железу». Одна из микросхем, о которых идет речь, используется по своему прямому назначению (в режиме ЦАП) для получения напряжения компенсации температурного дрейфа нуля, свойственного тензометрическому датчику давления. Другая микросхема в режиме управления компьютером выполняет функцию (совместно с компьютером) аналого-цифрового преобразования регистрируемого сигнала. Хотя микросхему К572ПА2 нельзя отнести к микросхемам высокого быстродействия, тем не менее с ее использованием удастся измерять уровень входящего сигнала с частотой выборки 3–5 кГц, что вполне достаточно для исследования импульса давления топлива, образующегося за ТНВД малооборотного дизеля.

Для регистрации импульса давления в топливной магистрали используются тензометрический датчик давления типа GT-30 и предварительный (нормирующий) усилитель типа GE-11 фирмы «Autronica»<sup>1</sup>.

В связи с тем, что температура топлива и металла в месте установки датчика не постоянна и может изменяться в достаточно широких пределах (от 20 до 120 °С), потребовалось введение специальных мер для компенсации температурного дрейфа нуля датчика. С этой целью в программу был включен фрагмент расчета требуемого компенсационного напряжения и подачи его через ЦАП на входную микросхему предварительного усилителя. Подробно вопросы компенсации температурного дрейфа нуля датчика изложены в [1].

<sup>1</sup> В настоящее время фирма «Autronica» входит в состав компании «Kongsberg» (Норвегия) — *Примеч. авт.*

Диапазон давлений, измеряемый системой диагностики, составляет 0–1000 бар, т. е. вполне соответствует параметрам импульса давления топлива за ТНВД современных судовых дизелей. Для преобразования аналоговый сигнал–код, по мнению автора, достаточно использовать разрядность ЦАП 10 бит, при этом погрешность в определении давления за счет ограничения разрядности не превышает  $\pm 1$  бар.

В целях привязки сигнала давления топлива к углу поворота коленчатого вала на маховике устанавливается датчик отметки верхней мертвой точки (ВМТ). В системе применяется датчик на ИК-диодах (АЛ156 — излучающий, КД 256 — приемник излучения), который, как показали длительные испытания, обладает высокой надежностью. Датчик устанавливается на специальном кронштейне. На маховике устанавливается шторка, которая прерывает прохождение ИК-сигнала к приемнику излучения в момент, когда поршень 1-го цилиндра находится в положении ВМТ. В электронной схеме датчика отметки ВМТ используется широко распространенная микросхема — компаратор напряжения К554СА3. Питание системы осуществляется от встроенного блока питания, преобразующего переменное напряжение 220 В в стабилизированное двуполярное

напряжение +24 В и –12 В. Общий вид элементов системы диагностики ТА приведен на рис. 1.

Наиболее трудоемкой частью создания системы является разработка программного обеспечения. Программа, заложенная в систему, разрабатывалась в среде программирования «Microsoft Visual Studio C++» версии 6.0. В последних версиях операционной системы «Windows ...» для пользовательских приложений прямой доступ к I/O-портам компьютера полностью запрещен. Для того чтобы управлять LPT-портом, использовалась WinIo-библиотека функций, которые выполняются на базовом уровне и обходят механизмы блокирования прямого доступа к портам.

«Виртуальная панель» системы диагностики ТА представлена единым элементом в единственном основном окне (рис. 2) для удобства пользователя (отсутствуют другие окна, требующие своего вызова, под-окна, вкладки, меню и пр.). Дополнительно при работе с системой используется только стандартное падающее меню для функций сохранения данных в файлах, вызова данных из файлов и печати.

В качестве основных, определяемых системой диагностики, параметров процесса топливоподачи были выбраны следующие наиболее информативные для решения задач диагностирования ТА:

- максимальное давление импульса впрыскивания  $p_{f \max}$ ;
- угол поворота коленчатого вала (КВ), соответствующий максимальному давлению впрыскивания  $\alpha p_{f \max}$ ;
- давление, соответствующее моменту открытия форсунки  $p_{f \text{open}}$ ;
- угол поворота КВ, соответствующий моменту открытия форсунки  $\alpha p_{f \text{open}}$ ;
- угол поворота КВ, соответствующий окончанию процесса впрыскивания  $\alpha p_{f \text{close}}$ ;
- продолжительность впрыскивания топлива  $\alpha p_{f \text{dur}}$  ( $\alpha p_{f \text{dur}} = \alpha p_{f \text{close}} - \alpha p_{f \text{open}}$ );
- максимальная скорость нарастания давления на фазе предварения впрыскивания топлива  $(dp_f / d\alpha)_{\max}$ ;
- давление прокачки топлива  $p_{f \min}$ ;
- среднее давление топлива в течение фазы впрыскивания топлива  $p_{f \text{mean}}$ ;
- максимальная скорость истечения топлива из распылителя форсунки  $V_{f \max}$ ;
- средняя скорость истечения топлива из распылителя форсунки  $V_{f \text{mean valve}}$ ;
- цикловая подача топлива (рассчитанная по кривой впрыска)  $G_{f \text{cycle valve}}$ ;
- энергетический эквивалент, соответствующий цикловой подаче топлива  $E_{f \text{valve}}$ ;

Дополнительные определяемые СТД ТА основные характеристики процесса топливоподачи

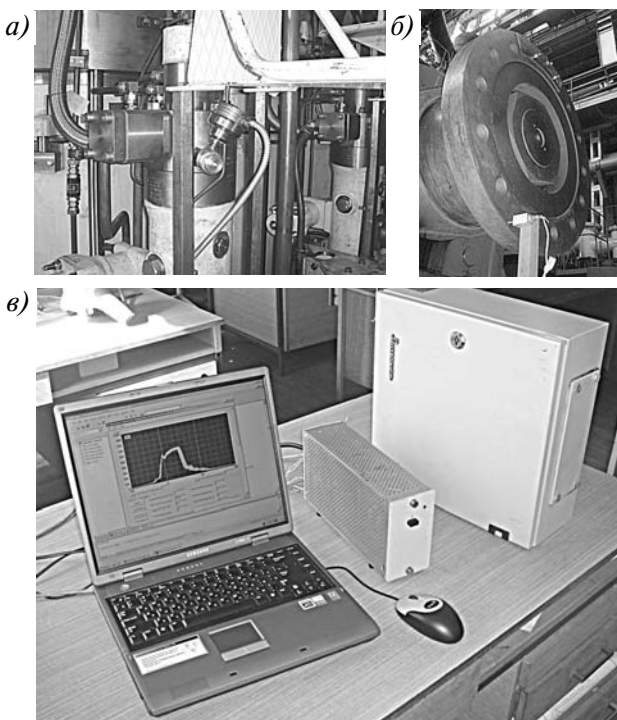


Рис. 1. Основные элементы системы диагностики топливной аппаратуры:

а — клапан высокого давления и датчик давления (установлены на топливном насосе дизеля); б — датчик-отметчик ВМТ (установлен на фланце гидротормоза испытательного стенда); в — блок ЦАП–АЦП (подключается через параллельный порт к компьютеру) и бокс с датчиками и соединительными кабелями

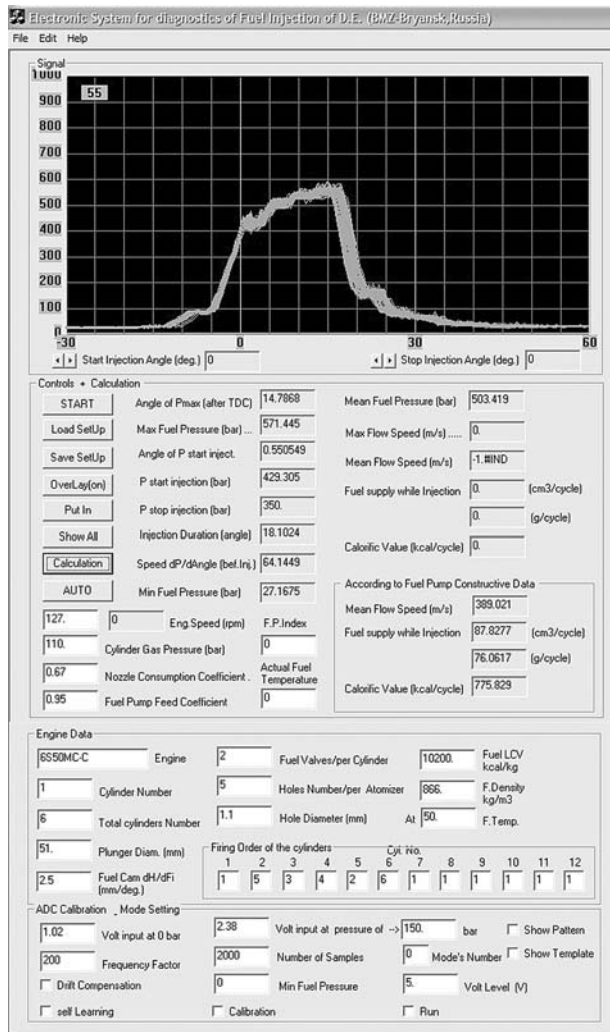


Рис. 2. Вид виртуальной «передней панели» системы технической диагностики ТА судового малооборотного дизеля

с учетом конструктивных характеристик топливного насоса высокого давления:

- средняя скорость истечения топлива из распылителя форсунки  $V_f$  mean pump;
- цикловая подача топлива  $G_f$  cycle pump ( $\text{см}^3/\text{цикл}$ ),  $G_f$  cycle pump ( $\text{г}/\text{цикл}$ );
- энергетический эквивалент, соответствующий цикловой подаче топлива  $E_f$  pump.

На рис. 3 дается пояснение ряда параметров процесса топливоподачи:  $p_f$  max,  $\alpha p_f$  max,  $p_f$  open,  $\alpha p_f$  open,  $\alpha p_f$  close,  $\alpha p_f$  dur,  $(dp_f/d\alpha)$  max,  $p_{\text{min}}$ .

Остальные параметры процесса топливоподачи определяются по формулам, приведенным ниже:

$$p_f \text{ mean} = \text{mean} \{p_f [i]\};$$

$$V_f \text{ max} = \max \{V_f [i]\};$$

$$V_f \text{ mea valve} = \text{mean} \{V_f [i]\},$$

где  $p_f [i]$  — полученный массив давлений топлива на участке  $\alpha p_f \text{ open} \leq \alpha \leq \alpha p_f \text{ close}$  (бар);  $V_f [i]$  — скорость истечения топлива из сопел распылителя форсунки, рассчитываемая по формуле [4]

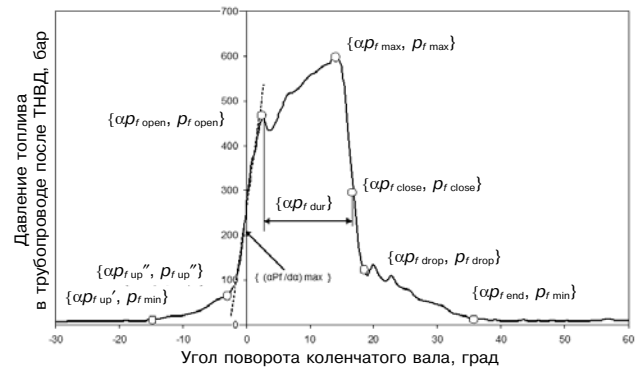


Рис. 3. Основные характеристики процесса топливоподачи

$$V_f [i] = 1000 \sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\right) \left(\frac{p_f [i] - p_{\text{cyl}}}{10}\right)} \quad (\text{м}/\text{с}),$$

где  $\rho$  — плотность топлива ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), приведенная к температуре топлива перед насосом;  $p_f [i]$  — полученный массив давлений топлива на участке  $\alpha p_f \text{ open} \leq \alpha \leq \alpha p_f \text{ close}$ , бар;  $p_{\text{cyl}}$  — среднее давление газов в цилиндре дизеля на участке  $\alpha p_f \text{ open} \leq \alpha \leq \alpha p_f \text{ close}$  бар,

$$G_f \text{ cycle valve} = \frac{1}{10} \rho (\mu F_c) \int_{\alpha p_f \text{ open}}^{\alpha p_f \text{ close}} V_f (\alpha) \left(\frac{d\alpha}{d\alpha}\right) d\alpha \quad (\text{г}/\text{цикл}),$$

где  $\mu F_c$  — эффективное проходное сечение сопел распылителя,  $\text{см}^2$  (коэффициент  $\mu$  подбирается по результатам испытаний двигателя (автором принято  $\mu = 0,65$ );  $F_c$  — суммарное проходное сечение сопел распылителя  $F_c = (\pi d_c^2 / 4) Z N_{\text{ф}}$ ;  $d_c$  — диаметр сопла распылителя, мм;  $Z$  — количество сопел на одной форсунке;  $N_{\text{ф}}$  — количество форсунок, устанавливаемых на один цилиндр);  $(d\alpha/d\alpha) = 1/6n$ ;  $n$  — частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин. Интегрирование осуществляется численным методом

$$E_f \text{ valve} = G_f \text{ cycle valve} \left(\frac{LCV_f}{1000}\right) \quad (\text{ккал}/\text{цикл}),$$

где  $LCV_f$  — низшая теплотворная способность топлива (ккал/кг).

**Примечание.** В формуле для определения  $V_f [i]$  было бы более корректно использовать параметр «давление топлива» в полости распылителя форсунки (а не давление топлива за ТНВД). Однако в связи с тем что измерение давления топлива в полости распылителя форсунки представляет определенные трудности, измеряется и используется в расчетах параметр давления за ТНВД. Возникающая в результате погрешность в определении  $V_f [i]$  и  $G_f \text{ cycle valve}$  может быть компенсирована введением в формулу дополнительного эмпирического коэффициента.

Объемная и массовая цикловые подачи топлива  $G_f \text{ cycle pump}$  и  $G_f' \text{ cycle pump}$  определяются по формулам:

$$G_f \text{ cycle pump} = \frac{\eta_H}{1000} \left(\frac{\pi d_{\text{пл}}^2}{4}\right) \left(\frac{dh}{d\alpha}\right) \alpha P_f \text{ dur} \quad (\text{см}^3/\text{цикл});$$

$$G_{f' \text{ cycle pump}} = G_{f \text{ cycle pump}} \left( \frac{\rho}{1000} \right) \text{ (г/цикл)},$$

где  $\eta_n$  — коэффициент подачи топливного насоса (принимается по результатам стендовых испытаний дизелей,  $\eta_n \approx 0,9$ );  $d_{пл}$  — диаметр плунжера (мм);  $dh/d\alpha$  — характеристика крутизны профиля топливной кулачной шайбы (на участке нагнетания топлива) (мм/град);  $\rho$  — плотность топлива (кг/м<sup>3</sup>), приведенная к температуре топлива перед насосом,

$$V_{f \text{ mean pump}} = G_{f \text{ cycle pump}} \frac{bn}{100 \mu F_c \alpha p_{f \text{ dur}}} \text{ (м/с)};$$

$$E_{f \text{ pump}} = G_{f' \text{ cycle pump}} \left( \frac{LCV_f}{1000} \right) \text{ (ккал/цикл)}.$$

Несколько подробнее остановимся на принципе «самообучения» системы. Большинство существующих СТД ТА представляют собой измерительные комплексы, осуществляющие только регистрацию импульса давления топлива и представление (показ) его оператору. При этом для оценки технического состояния ТА оператору необходимо располагать эталонными характеристиками процесса, которые должны соответствовать нагрузочному режиму дизеля, на котором проводится процедура диагностирования. Такая априорная информация о процессе топливоподачи, как правило, отсутствует, и основной причиной тому является значительная трудоемкость ее получения (получение ее возможно на исправном двигателе в период либо стендовых испытаний двигателя на заводе-изготовителе двигателя, либо в период ходовых испытаний судна при его вводе в эксплуатацию с использованием специальной измерительной аппаратуры). Описываемая в статье СТД ТА позволяет автоматизировать процесс получения необходимой исходной (эталонной) диагностической информации. При проведении испытаний технически исправного двигателя оператору достаточно перевести систему в режим «обучения» и с ее помощью выполнить измерения на нескольких эксплуатационных режимах дизеля (например, в диапазоне мощности от 75 до 100 %). После этого система обработает полученные данные и в последующем будет готова по требованию оператора в любой момент представить эталонные характеристики процесса, соответствующие режиму работы дизеля, на котором выполняется процедура диагностирования (информация о режиме работы дизеля задается оператором посредством ввода параметра — индекса ТНВД). На рис. 4 приведен вид «шаблона» и «образа характерных точек» импульса давления за ТНВД, получаемых в результате обучения системы.

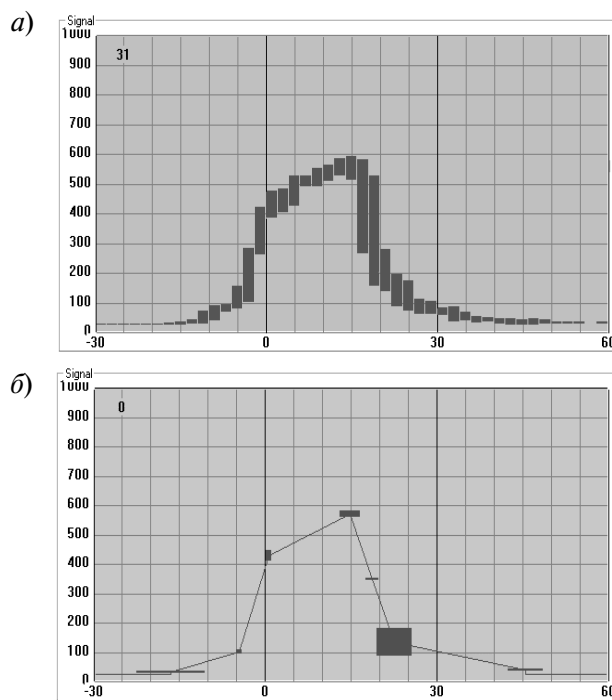


Рис. 4. Вид «шаблона» (а) и «образа характерных точек» (б) импульса давления за ТНВД на экране дисплея СТД ТА:

(показаны характеристики, полученные в режиме «обучения» при испытаниях дизеля MAN B&W 6S50MC-C; режим 90 % от номинальной мощности)

Более подробное описание алгоритма работы СТД ТА в режиме обучения при создании эталонов («Шаблона» и «Образа характерных точек») можно найти в [2, 3].

**Закключение.** В результате выполненных исследований была создана система технического диагностирования ТА судового малооборотного дизеля, в которой реализованы следующие основные функциональные возможности:

- непрерывный мониторинг процесса топливоподачи (производится циклическая регистрация и отображение процесса топливоподачи дизеля в режиме реального времени, т. е. без какой-либо ощутимой задержки по времени);

- выбор любой текущей интересующей реализации процесса (осуществляется прерывание цикличности работы системы) для ее более детального изучения или запоминания ее в файловой системе;

- статистическое накопление реализаций (накопление до 80 последовательных циклов) и отображение их на экране (отображение «статистического образа» кривой топливоподачи);

- работа системы в режиме «обучения», заключающаяся в статистическом накоплении реализаций (п. 3) и последующей математической обработке их для создания «шаблона» («Template») и «образа характерных точек» («Pattern») процесса топливоподачи.

➤ работа системы в режиме диагностирования; осуществляется отображение на экране полученных ранее (в процессе обучения) «шаблона» (или «образа характерных точек») процесса топливоподачи, *адаптированных под текущий режим работы дизеля*. Отображение исследуемых текущих реализаций процесса осуществляется по-прежнему «шаблона» или «образа характерных точек».

#### Литература

1. *Обозов А.А.* Аналоговый и цифровой методы компенсации температурного дрейфа нуля тензометрического датчика для измерения давления газов в цилиндрах ДВС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2008. — № 2. — С. 41–43.
2. *Обозов А.А.* Эталонные характеристики процесса топливоподачи судовых малооборотных

Разработанная СТД ТА успешно применялась автором для получения эталонных статистических характеристик («шаблонов» и «образов характерных точек») процесса топливоподачи и при проведении процедуры диагностирования нарушений регулировок ТА судовых малооборотных дизелей типа MAN B&W производства БМЗ.

дизелей // Судостроение. — 2007. — № 3. — С. 32–36.

3. *Обозов А.А.* Алгоритм нахождения характерных точек на характеристике топливоподачи судового дизеля // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 35–39.

4. *Фомин Ю.Я., Никонов Г.В., Ивановский В.Г.* Топливная аппаратура дизелей: справочник. — М.: Машиностроение, 1982. — 168 с.

**ЮБИЛЕЙ!**



## Валентину Иннокентьевичу Иовлеву 60 лет

9 декабря 2008 г. исполнилось 60 лет  
Валентину Иннокентьевичу Иовлеву,  
кандидату технических наук,  
директору ООО «Турбоком»

Более чем 30-летняя научно-производственная деятельность Валентина Иннокентьевича Иовлева была связана с Центральным научно-исследовательским дизельным институтом (ЦНИДИ), где он прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего отделом агрегатов наддува. Защитив кандидатскую диссертацию и став специалистом высокой квалификации, он принимал участие в развитии всех важнейших направлений, связанных с исследованием, проектированием и совершенствованием турбокомпрессоров, проводившихся в ЦНИДИ, руководил работами по созданию турбокомпрессоров для дизелей различного назначения.

Дальнейшее развитие научного потенциала и традиции коллектива Валентин Иннокентьевич продолжил, возглавив созданное на базе отдела агрегатов наддува ООО «Турбоком». В новых экономических условиях ООО «Турбоком» продолжает работы в области газодинамики, роторной динамики и вибропрочности элементов турбокомпрессоров. Производственная деятельность ООО «Турбоком» связана с модернизацией и ремонтом агрегатов наддува стационарных, судовых и автотранспортных дизелей российского и иностранного производства.

*Коллектив ООО «Турбоком» и редакция журнала «Двигателестроение» поздравляют Валентина Иннокентьевича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и дальнейших успехов в его научной и производственной деятельности.*