

УДК 689.12-8.004.5.001.5

*В.Г. Ивановский, д-р техн. наук, Р.А. Варбанец, канд. техн. наук*

## МОНИТОРИНГ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

### Введение

Одной из важных составляющих безопасности мореплавания является мониторинг судовых дизелей (главных и вспомогательных) во время эксплуатации. Информация о текущих значениях параметров рабочего процесса судовых дизелей во время эксплуатации позволяет обслуживающему персоналу поддерживать нормальное техническое состояние дизелей и предупреждать возникновение аварийных ситуаций. Широко используемые на судах "максиметры" определяют только пиковые значения давлений по цилиндрам ( $p_z$ ) либо давления в конце сжатия ( $p_c$ ) при отключенной подаче топлива. Однако кроме  $p_z$  и  $p_c$  существует целый ряд других параметров, мониторинг которых во время эксплуатации дает возможность осуществлять более качественный контроль рабочего процесса дизеля и производить точную регулировку отдельных узлов.

Так например: контроль среднего индикаторного давления ( $p_i$ ) позволяет определить перегрузку отдельных цилиндров и равномерно распределить мощность по всем цилиндрам дизеля. Контроль максимальной скорости повышения давления при сгорании топлива (жесткости  $\Delta p / \Delta \varphi$ ) позволяет ограничить ударные нагрузки на подшипники отдельных цилиндров и выявлять недостатки в работе топливной аппаратуры (ТА). С помощью контроля геометрических и действительных фаз топливоподачи производится комплексная оценка технического состояния топливной аппаратуры. Контроль фаз газораспределения во время работы дизеля позволяет оперативно оценить техническое состояние газораспределительного механизма (МГР) и поддерживать паспортные значения углов закрытия

и открытия клапанов. Кроме вышеперечисленных, существует еще целый ряд параметров рабочего процесса, мониторинг которых во время эксплуатации в значительной степени поможет обслуживающему персоналу поддерживать нормальное техническое состояние дизеля.

### Формулирование проблемы

До настоящего времени большинство систем мониторинга СДВС было спроектировано как единый программно-аппаратный комплекс, производящий запись параметров и частичный расчет рабочего процесса в режиме реального времени. Наиболее характерными системами такого типа являются NK-5, NK-100, NK-200 фирмы Autronica AS, а также ряд аналогичных систем других фирм [1]. В системах подобного типа объединены две задачи: получение данных в реальном времени и частичный расчет рабочего процесса, что позволило производителям выпускать завершённые комплексы мониторинга СДВС и предоставлять техническому персоналу судна большой объем информации, необходимой для качественной технической эксплуатации двигателей.

Однако, на наш взгляд, такой подход к решению задачи мониторинга СДВС имеет ряд недостатков:

1) очевидно недостаточно полное (или точное) моделирование рабочего процесса, поскольку современные математические модели требуют больших ресурсов времени и производительности вычислительной техники, что не дает возможности использовать их в режиме реального времени;

2) в качестве исходных данных используется ограниченное количество измеряемых параметров,

что также связано со сложностью одновременного получения данных и их обработкой в реальном времени;

3) соединение измерительной и расчетной частей систем мониторинга СДВС значительно увеличивает их сложность. Для передачи сигналов от двигателя к вычислительному комплексу используются длинные (до 50 м и более) кабельные линии. Устанавливаются дополнительные усилители и преобразователи сигналов, что снижает надежность функционирования системы в целом. Кроме того, затруднен процесс обмена информацией между оператором и техническим персоналом, производящим непосредственное измерение на двигателе;

4) стоимость систем подобного типа остается весьма высокой, поскольку складывается из стоимости не только датчиков и первичных преобразователей, но и всего промежуточного оборудования плюс стоимость вычислительного комплекса и программного обеспечения. В качестве вычислительного комплекса используются компьютеры промышленного исполнения, стоимость которых приблизительно в 4÷5 раз выше аналогичных по производительности обычных ПК. Компьютеры в таких системах задействованы только

для решения задачи мониторинга СДВС.

### Решение проблемы. Разработка систем «разделенного мониторинга» рабочего процесса СДВС

Анализ характеристик и функциональных возможностей существующих систем мониторинга СДВС показал, что высокая степень интеграции (полное объединение измерительной и расчетной частей) является, во многих случаях, избыточной для получения практически значимых параметров и, одновременно, недостаточной для точного моделирования рабочего процесса.

Таким образом, основной идеей разделенного мониторинга СДВС является разбиение системы на два функциональных модуля:

- модуль получения данных и предварительного расчета параметров в режиме реального времени (МРВ) – аппаратная часть системы;
- модуль расчета и анализа рабочего процесса не в режиме реального времени (РМ) – внешнее программное обеспечение.

Связь между модулями осуществляется по последовательному интерфейсу USB или RS-232 (см. рис. 1).

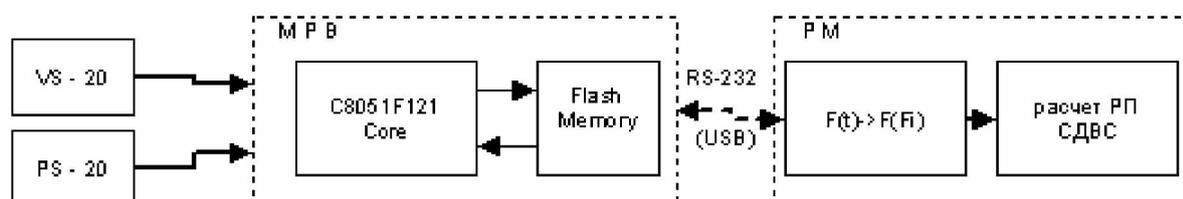


Рис. 1. Связь между модулями

#### Модуль реального времени

Задачей модуля является получение данных от датчиков, установленных на двигателе, предварительный расчет и отображение на внутренний экран следующих параметров:

- $n$  (rpm) – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>;
- $p_i$  – среднее давление газов за рабочий цикл, МПа;
- $p_z$  – максимальное давление газов за рабочий

цикл, МПа.

Данные в модуль поступают от двух установленных на работающем двигателе датчиков: PS-20 (модифицированная версия датчика давления PS-16) и виброакустического датчика VS-20. Принцип использования датчиков описан в [2].

В МРВ записываются данные о нескольких последовательных рабочих циклах каждого цилиндра. Количество циклов может задаваться из настроечной части расчетного модуля. Такой подход позволяет получать не только средние значения параметров и их отклонения, но и производить статистическую оценку равномерности работы топливной аппаратуры.

Указанные параметры могут быть рассчитаны по несинхронизированным временным записям рабочих циклов и являются наиболее значимыми для экспресс-оценки состояния цилиндра.

### Расчетный модуль

Выполняет последовательное решение задач синхронизации данных, поступающих от МРВ и, затем, расчета и анализа рабочего процесса. Под синхронизацией данных подразумевается определение координат основных положений поршня (ВМТ - верхняя мертвая точка и НМТ - нижняя мертвая точка) и дальнейший перевод индикаторных диаграмм из функций времени в функции по углу поворота коленчатого вала [3]

$$F(t) \Rightarrow F(\varphi_{ПКВ}).$$

При этом учитывается неравномерность вращения коленчатого вала, что особенно актуально для современных малооборотных длинноходовых двигателей (L-MC, S-MC, RTA и др.). При решении задачи синхронизации используется метод минимизации нелинейной  $n$ -параметрической функции без использования производных (Powell-64 [4]). В процессе расчета алгоритм Powell-64 используется дважды: сначала для поиска

приближенного положения ВМТ (синусная модель) и затем окончательный расчет, путем моделирования скорости изменения давления  $dp/d\varphi$ . Алгоритм Powell-64 оказался очень устойчивым, даже для случая значительной зашумленности данных. Несмотря на то, что, по сути, это метод поиска с условным окончанием итераций, нам удалось сформулировать такие начальные условия, что общее время решения задачи синхронизации приемлемо малое для большинства современных ПЭВМ.

Для моделирования рабочего процесса используются паспортные данные двигателя и реальные синхронизированные диаграммы рабочих циклов  $F(\varphi)$ . Это позволяет добиться максимальной точности моделирования, произвести детальный анализ текущего технического состояния цилиндра и составить достоверный прогноз по данным предыдущих расчетов.

### Заключение

Таким образом, можно сформулировать основные цели проектируемой системы мониторинга СДВС.

1. Логическое разделение задач получения наиболее значимых параметров и полного расчета рабочего процесса.

В процессе текущей эксплуатации СДВС техническому персоналу, как правило, нет необходимости производить полный расчет рабочего процесса и процесса тепловыделения в цилиндрах, но абсолютно необходимо иметь возможность быстрой оценки нескольких наиболее значимых параметров рабочего процесса. С другой стороны, в тех ситуациях, когда требуется более детальный анализ состояния цилиндра, необходимо произвести расчет и анализ рабочего процесса в нем. Для этого достаточно иметь специальное программное обеспечение, построенное на базе современной

итерационной математической модели рабочего процесса. Исходные данные для моделирования и последующего анализа могут быть накоплены в модуле реального времени и переданы в расчетный модуль по одному из последовательных интерфейсов компьютера.

2. Значительное упрощение схемы системы мониторинга.

Система разделенного мониторинга фактически представляет собой переносной, компактный прибор, выполненный на базе современного микроконтроллера с внутренней энергонезависимой Flash памятью, и программное обеспечение работающее под управлением Windows. По данным непосредственных измерений на двигателе производится предварительный расчет нескольких значимых параметров и отображение их на внутреннем экране MPV. Временные реализации рабочих циклов, необходимые для построения диаграмм и детального анализа рабочего процесса в цилиндре накапливаются в архиве (Flash памяти). За счет коротких связей из системы исключены кабельные трассы и все промежуточные преобразователи. Процесс мониторинга может производить один специалист. Находиться возле двигателя ему достаточно только в течение короткого времени измерений. Расчетный модуль устанавливается с компакт-диска на любой судовой компьютер. Все отчеты и диаграммы могут быть распечатаны на установленном в системе принтере.

3. Существенное уменьшение стоимости системы мониторинга.

Одним из аргументов недостаточно широкого использования на судах систем мониторинга СДВС

как раз являлась их высокая стоимость. На судах с небольшим водоизмещением и небольшой мощностью энергетической установки использование систем мониторинга было нерентабельным, несмотря на высокую практическую ценность данных о параметрах и диаграммах рабочего процесса во время эксплуатации. Предлагаемое разделение функций системы мониторинга СДВС дает возможность сократить стоимость системы до уровня стоимости судового "максиметра" и дать возможность пользоваться результатами мониторинга более широкому кругу технических специалистов.

#### Список литературы:

1. Варбанец Р.А. Системы компьютерной диагностики судовых дизелей // Судостроение. – 1996. – № 6. – С. 24 – 27.
2. Ивановский В.Г., Варбанец Р.А. Применение виброакустического метода для анализа топливоподачи дизеля в эксплуатации // Вісник Одеського державного морського університету. – 1998. – №1. – С. 131 – 134.
3. Варбанец Р.А., Ивановский В.Г., Савиных А.С. Расчетный метод обнаружения верхней мертвой точки поршня двигателя внутреннего сгорания, "Техническая эксплуатация флота". – М.: В/О Мортехинформреклама. – 1994. – № 6 (816). – С. 1 – 6.
4. Powell M.J.D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives // Computer J. – 1964, № 7. – P. 155.