

УДК 621.431.74

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Яковенко А.Ю.  
ДП «Интреско ЛТД»

Представлена система регистрации процесса топливоподачи на базе комбинированного измерительного преобразователя давления топлива. Разработаны средства гармонического анализа данных и определены сравнительные амплитудно-частотные характеристики результатов. Система обеспечивает метрологические параметры близкие к базовому датчику давления топлива.

**Ключевые слова:** дизели, топливоподача, измерение, гармонический анализ, амплитудно-частотные характеристики.

**Постановка проблемы.** Одним из направлений развития измерительной техники в ДВС является разработка для регистрации рабочих процессов, встроенных или совмещённых с функциональными элементами преобразователей (датчиков) [1, с. 1-5; 2, с. 1-6; 3, htm – без форматирования; 4, с. 1-20].

Очевидным достоинством такого подхода является отсутствие дополнительных элементов двигателя, к которым относятся специальные измерительные преобразователи и соответствующие монтажные элементы. Одновременно обеспечивается непрерывный контроль измеряемых параметров. При этом мониторинг может быть автоматизированным и обеспечивать функции аварийно-предупредительной сигнализации. Таким образом, решение данной проблемы является актуальным и своевременным.

**Анализ основных исследований и публикаций.** Как инструмент определения метрологических характеристик средств контроля рабочих процессов ДВС, гармонический анализ находит достаточно широкое применение. Так, А.Ю. Самойленко [5, с. 75-77] использует гармонический анализ для восстановления индикаторной диаграммы, записанной датчиком давления газов через индикаторный канал.

Во многих случаях, подобно рассматриваемым данным, исходная функция  $f(x)$  задается в виде таблицы или в виде графической кривой. В этом варианте использовано приближенное представление периодической функции  $f(x)$  тригонометрическим многочленом вида

$$s_n = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)),$$

а коэффициенты Фурье вычислены при помощи приближенного метода интегрирования – формулы прямоугольников

$$a_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k, \quad a_k = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n y_k \cos(kx_k), \quad b_k = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n y_k \sin(kx_k)$$

где,  $a_k, b_k$  – коэффициенты Фурье;  $a_0$  – постоянная,  $k$  – номер гармоники.

Поскольку исходная функция в этом случае представлена в виде дискретного конечного набора данных, то произведенное преобразование является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ).

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Амплитудно-частотный анализ записи рабочих процессов дизелей измерительными

системами различной конфигурации позволяет дать оценку достоверности информации и обеспечить корректировку полученных данных при наличии погрешностей.

Частотная характеристика является основным параметром, определяющим качество регистрации динамических процессов.

Впрыскивание топлива является одним из основных процессов, определяющих все эксплуатационные характеристики дизелей. В области его мониторинга остаются нерешённые задачи, связанные с высокой динамичностью и метрологической сложностью контроля топливоподачи.

**Цель статьи.** Разработать методику, алгоритм и программу гармонического анализа по методу Фурье с целью создания программного комплекса, обеспечивающего амплитудно-частотный анализ измерений и интерфейс с пакетом, обеспечивающим оптимальный режим его использования.

**Изложение основного материала статьи.** В данной публикации представлены результаты разработок в этой области, выполненных на кафедре Судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» под руководством проф. Половинки Э.М.

Разработан метод контроля процесса топливоподачи судового среднеоборотного дизеля с использованием комбинированного измерительного преобразователя, совмещённого с конструктивным элементом топливного насоса высокого давления (ТНВД). При этом в качестве контролируемого параметра рассматривалось давление топлива в ТНВД, как основной показатель процесса впрыскивания.

При анализе конструкции ТНВД предпочтение, в качестве базовой детали для комбинированного измерительного преобразователя, отдано шпильке крепления ТНВД к двигателю, воспринимающей давление топлива в надплунжерном пространстве (датчик «Ш-Д»). Чертеж препарированной шпильки для монтажа проволочных решёток приведен на рис. 1.

Преобразование деформации шпильки осуществлено с использованием тензодатчиков проволочного типа.

Исследования выполнены на базе топливной аппаратуры среднеоборотного судового дизеля ЧН25/34. Испытания проведены на безмоторном стенде. Фотография ТНВД с датчиком «Ш-Д» приведена на рис. 2.

Исследование метрологических характеристик измерительной системы на базе датчика «Ш-Д» потребовало создания программного ком-

плекса, обеспечивающего амплитудно-частотный анализ данных измерений.

С целью проведения такого анализа для рассматриваемой системы разработаны методика, алгоритм и программа гармонического анализа по методу Фурье. Был создан интерфейс с пакетом, обеспечивающим оптимальный режим его использования.

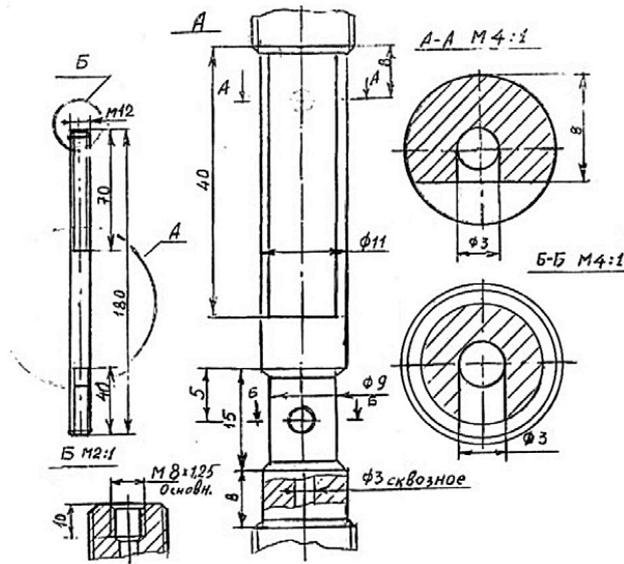


Рис. 1. Шпилька, препарированная для монтажа тензорезисторов

Источник: разработано автором

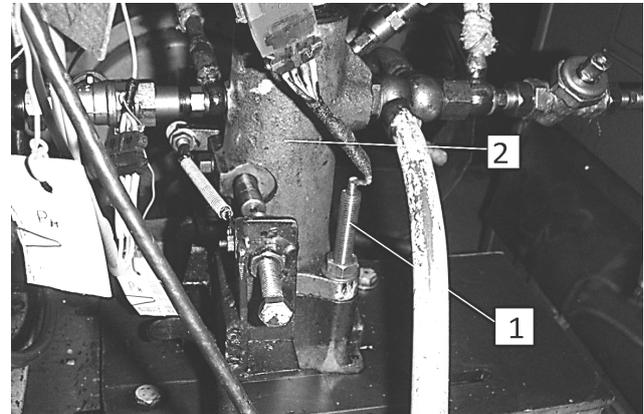
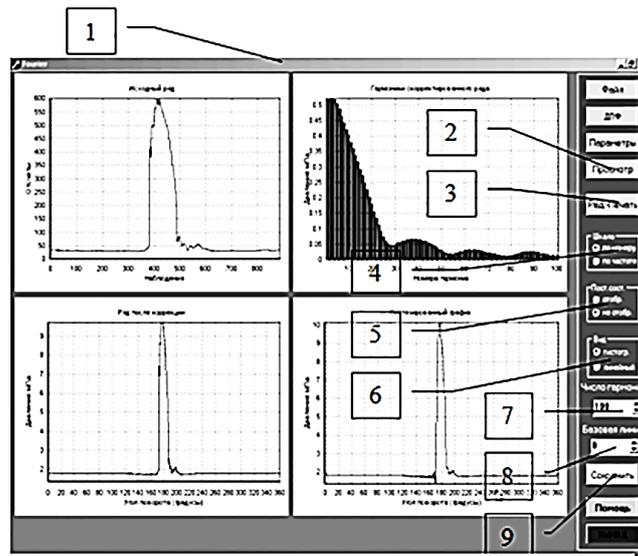


Рис. 2. Датчик давления топлива («Ш-Д») на ТНВД безмоторного стенда: 1 – датчик – шпилька; 2 – ТНВД

Источник: разработано автором [6, с. 41-49]



1- вид на экран монитора после нажатия кнопки 'ДПФ'; 2- кнопка 'Просмотр', вызывает на экран окно для просмотра числовых значений скорректированного ряда и гармоник; 3- кнопка 'Ред - Печать', вызывает диалоговое окно для выбора графика для редактирования и печати или для записи файла гармоник; 4- переключатель вида отображения для шкалы абсцисс гармоник; 5- переключатель выбора отображения постоянной составляющей; 6- переключатель вида отображения графика гармоник; 7- окно ввода числа рассчитываемых гармоник (по умолчанию 100); 8- окно ввода постоянной составляющей; 9- кнопка 'Сохранить', позволяет сохранить выбранный график в электронном виде как файл рисунка формата \*.bmp.

Рис. 3. Блок-схема (а) программы гармонического анализа и графический интерфейс (б) метрологических характеристик системы на базе датчика «Ш-Д»

Источник: разработано автором

Алгоритм созданного пакета предусматривает выполнение спектрального анализа периодических процессов, представленных в виде дискрет-

ного ряда с полной длиной не более 20000 точек. Результат работы программы – график амплитуд гармонических составляющих, причем чис-

ло анализируемых гармоник устанавливается пользователем в диапазоне 1-500.

Программой производится дискретное преобразование Фурье с выводом результата в виде графика амплитуд спектральных составляющих на экран, а затем обратное преобразование Фурье также с выводом графика функции на экран.

Блок-схема пакета приведена на рис. 3, а.

Программа позволяет оперативно менять число вычисляемых гармоник, вид графика отображения спектра, представление спектра в виде зависимости от частоты либо по номерам гармоник, отображать или нет постоянную составляющую, а также выводить на печать или сохранять в виде электронной копии (рисунок формата .bmp) с возможностью редактирования любого графика.

Графический интерфейс с обработанными данными метрологических характеристик системы на базе датчика «Ш-Д» показан на рис. 3, б.

Графическое представление данных гармонического анализа, выполненного с использованием описанных выше средств, показано на рис. 4-11.

Из них первые три рисунка содержат информацию по режиму с частотой вращения распределительного вала  $n_p = 46 \text{ мин}^{-1}$  и выходом рейки  $m = 27 \text{ мм}$ . Запись давления топлива проведена синхронно двумя датчиками: базовым  $p_{ш}$ , подключённым к штуцеру ТНВД (рис. 5), и комбинированным «Ш-Д» –  $p_{ш}$  (рис. 4 и рис. 6). Для сравнения двух вариантов вывода данных на рис. 4 и рис. 6, относящихся к одному набору параметров, графики гармоник представлены в форме огибающей (рис. 4) и гистограммы (рис. 6). Основная информация в данном разделе показана в виде огибающей дискретного ряда. Этот подход определён необходимостью дополнительного построения совмещённых характеристик.

Приоритетной задачей проведенного исследования с использованием частотного

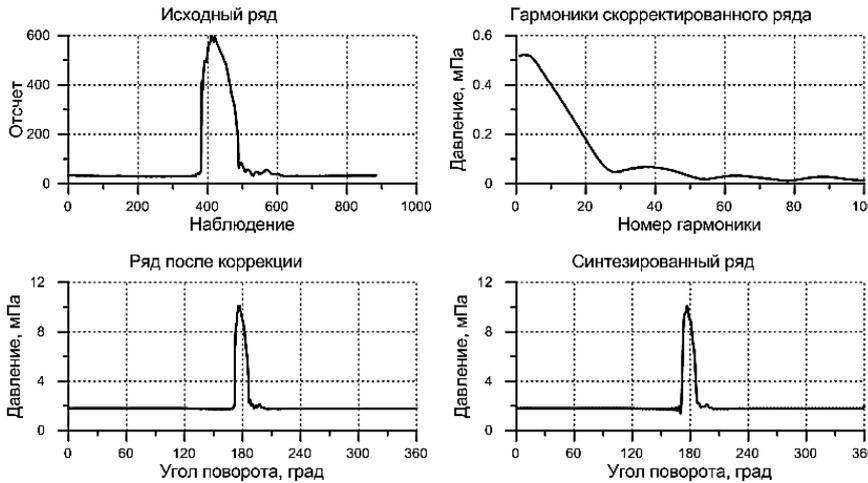


Рис. 4. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{ш}$  комбинированным датчиком Ш-Д:  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 27$

Источник: разработано автором

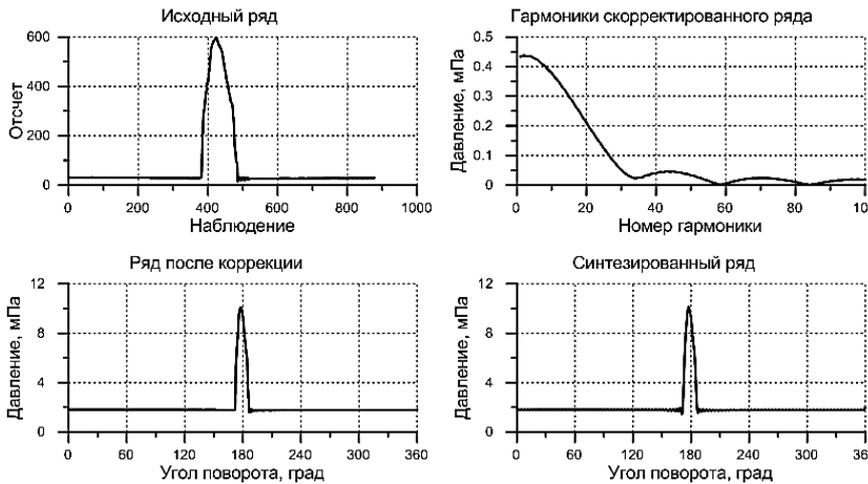


Рис. 5. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{ш}$  базовым датчиком:  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 27$

Источник: разработано автором

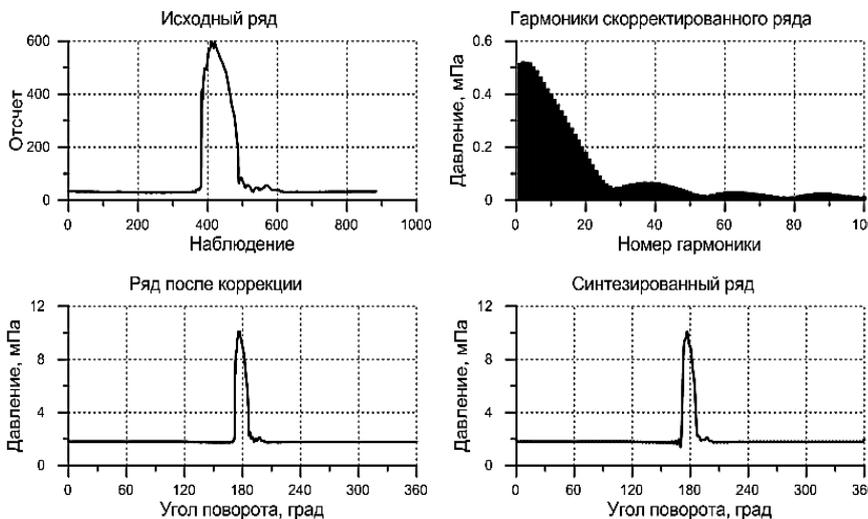


Рис. 6. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{ш}$  комбинированным датчиком Ш-Д в виде гистограммы:  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

анализа, как указывалось ранее, является сопоставление амплитудно-частотных характеристик записи давления топлива двумя типами датчиков при равнозначных параметрах остальных элементов измерительной схемы.

Для рассматриваемого режима такое сопоставление проведём с помощью рис. 4 и рис. 5. Соотношение кривых, представляющих исходный ряд, после коррекции (на протяжении периода) и синтезированный график соответствуют проведенному анализу осциллограмм [6, с. 41-49]. Можно лишь отметить, что синтезированные кривые практически совпадают с исходными.

Амплитудно-частотные параметры в записи  $p_{ш}$  (рис. 4) и  $p_{н}$  (рис. 5) имеют некоторые различия. По амплитудам гармоник в области минимальных частот,  $p_{ш}$  несколько выше. Зона начального массива, наоборот, уже. Так, низкочастотная полоса у  $p_{ш}$  ограничена минимумом номеров гармоник, соответствующих порядку 28, а  $p_{н}$  – 34.

Для более высоких порядков (графики включают максимально 100 гармоник) форма и амплитудные величины для обоих вариантов записи близки. Граничные значения периодических зависимостей смещены в большую сторону (на 3-5 порядков) у  $p_{н}$ .

На рис. 7 и рис. 8 приведен анализ осциллограмм дробного впрыскивания. Такой характер процесса получен путём увеличения затяжки пружины форсунки.

Различная форма исходных кривых отражена и в данных гармонического анализа. При небольшой разнице в максимальных значениях амплитуд распределение их по частотам отличается более существенно. На графике  $p_{н}$  имеется непрерывная область вплоть до 84 гармоники, у  $p_{ш}$  в диапазоне 20-84 выделяются три отдельных участка в форме затухающих колебаний с периодом в 20 порядков.

Графики на рис. 9 и рис. 10 соответствуют номинальной частоте вращения. Более плавный характер исходной кривой  $p_{н}$  отражается и на амплитудно-частотной характеристике этой записи. Область действующих гармоник ограничена 34 порядком, в то вре-

мя как для  $p_{ш}$  соответствующий диапазон гораздо шире – до 80 порядка. Естественно при этом, что максимум амплитуд выше у  $p_{н}$ .

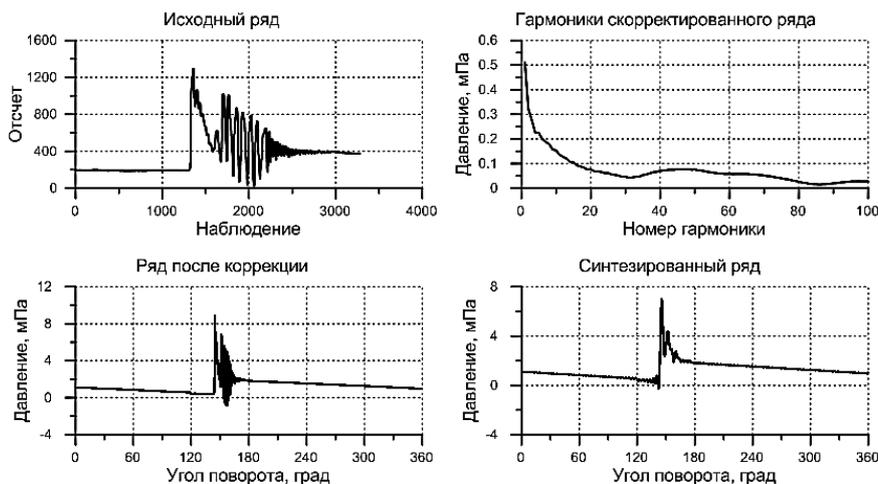


Рис. 7. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{н}$  базовым датчиком:  $n = 33 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

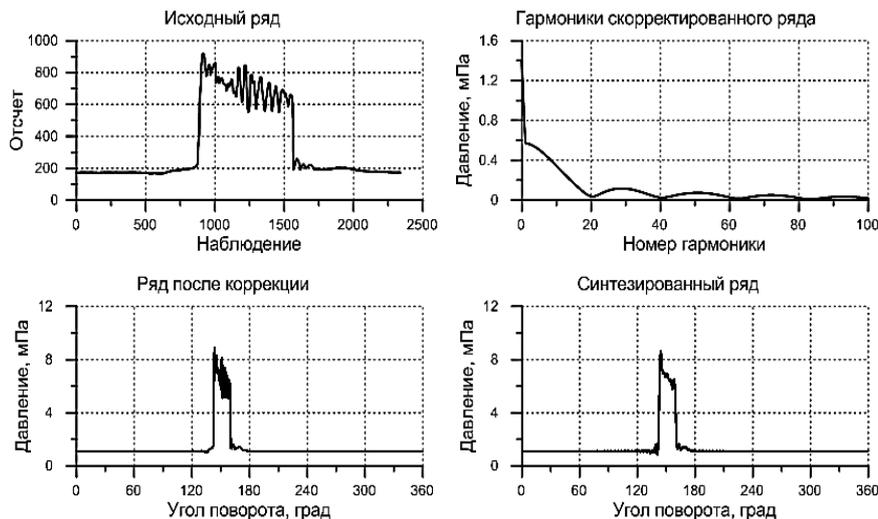


Рис. 8. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{ш}$  комбинированным датчиком III-D:  $n = 33 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

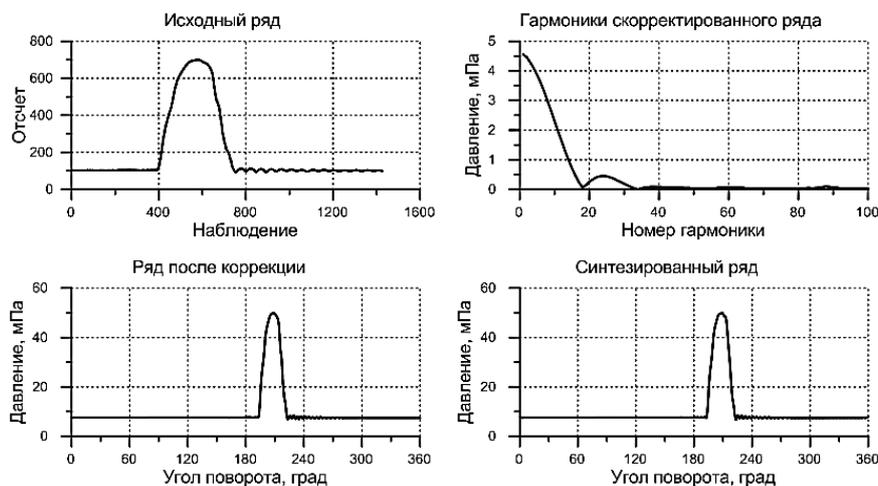


Рис. 9. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{н}$  базовым датчиком:  $n = 248 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

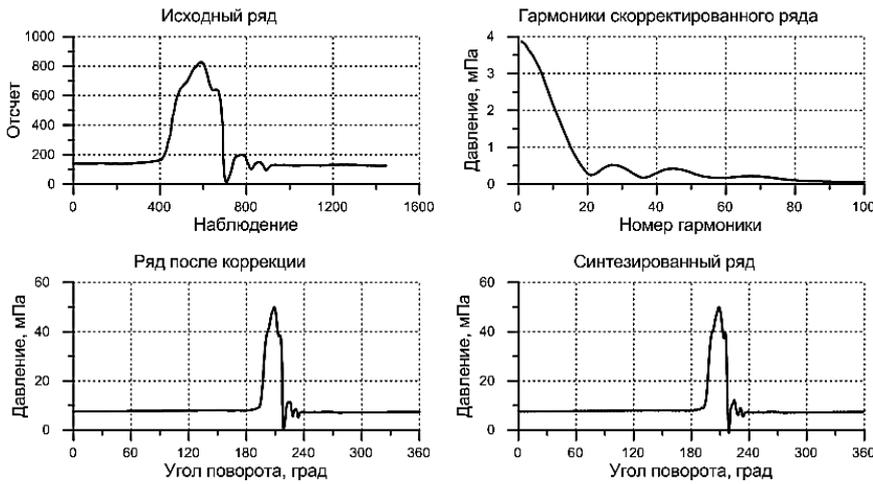


Рис. 10. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_{ш}$  комбинированным датчиком Ш-Д:  $n = 248 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

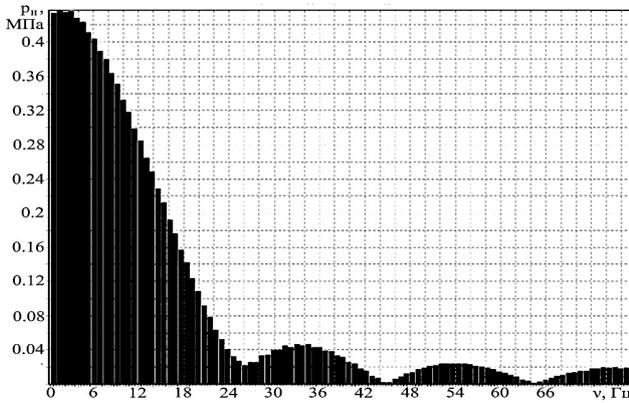


Рис. 11. Гармонический анализ записи давления топлива  $p_n$  базовым датчиком в частотном диапазоне:  $n = 248 \text{ мин}^{-1}$ ,  $m = 32$

Источник: разработано автором

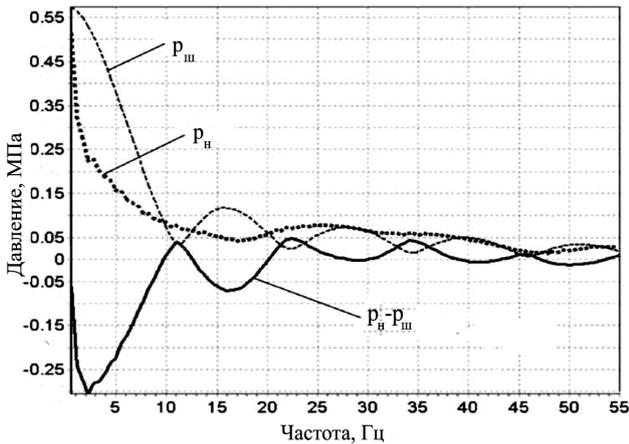


Рис. 12. Сравнение частотных характеристик  $p_n$  и  $p_{ш}$  при  $n = 33 \text{ мин}^{-1}$

Источник: разработано автором

Разработанные программные средства гармонического анализа позволяют провести сравнение частотных характеристик в графической форме. Такое представление информации приведено на рис. 12-14.

Рассматриваются те же, что и ранее режимы: минимальной частоты вращения  $n_p = 33$

и  $46 \text{ мин}^{-1}$ , а также, близкой к номинальной частоте вращения  $n_p = 248 \text{ мин}^{-1}$ .

На каждом графике показаны три кривые. Две относятся к огибающим амплитуд частот для различных датчиков ( $p_n$  и  $p_{ш}$ ), а третья соответствует их разности  $(p_n - p_{ш})$ .

Наиболее существенным является различие в параметрах на частоте вращения  $n = 33 \text{ мин}^{-1}$ . Максимальное расхождение относится к 2 Гц, что соответствует гармонике четвертого порядка. Начиная с частоты  $f = 10 \text{ Гц}$ , амплитудные значения гармоник обоих датчиков отличаются незначительно.

С повышением частоты вращения частотные параметры датчиков сближаются.

На следующей частоте вращения  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 13) значительного различия нет (разность амплитуд почти в 5 раз меньше по сравнению с предыдущим режимом). Что касается частотного диапазона рассматриваемых гармоник, то он расширяется с ростом частоты вращения. Так, если в первом случае он укладывается в 10 Гц, то при  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$  – уже в 20 Гц.

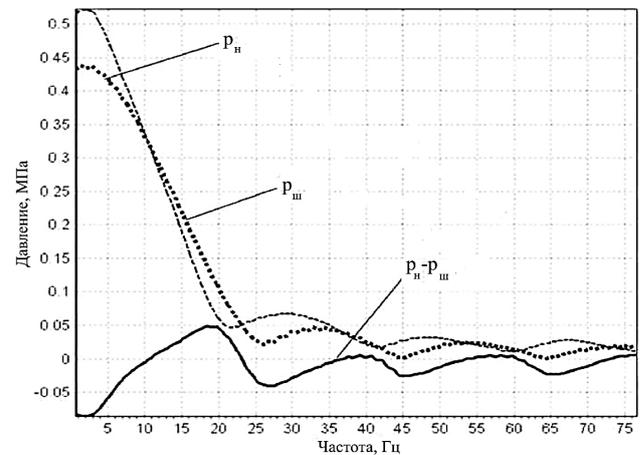


Рис. 13. Сравнение частотных характеристик  $p_n$  и  $p_{ш}$  при  $n = 46 \text{ мин}^{-1}$

Источник: разработано автором

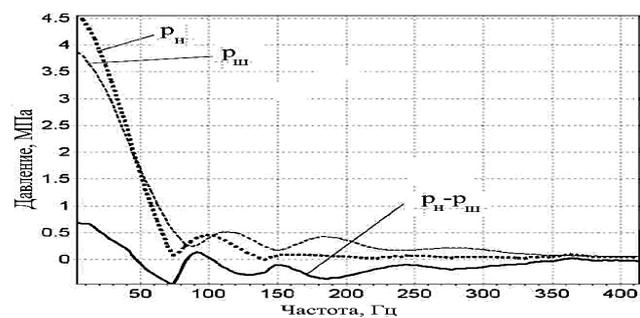


Рис. 14. Сравнение частотных характеристик  $p_n$  и  $p_{ш}$  при  $n = 248 \text{ мин}^{-1}$

Источник: разработано автором



Рис. 15. Частотные характеристики собственных колебаний стэнда

Источник: разработано автором

Качественно эта тенденция справедлива и на третьем из рассматриваемых режимов  $n = 248 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 14). Кривые  $p_n$  и  $p_{ш}$  отличаются незначительно, изменяется лишь знак разности. Диапазон существенных частот продолжает расширяться и составляет 70 Гц.

Для анализа метрологических особенностей записи давления с помощью Ш-Д необходимо провести оценку влияния собственных колебаний элементов, участвующих в передаче усилия от давления топлива в ТНВД к шпильке Ш-Д. Логичным является вызвать эти колебания независимым источником – с помощью ударной нагрузки.

Такой эксперимент был проведен, а анализ деформаций датчика представлен на рис. 15.

Частотный диапазон для анализа установлен со значительным запасом по отношению к режиму максимальной частоты вращения (превышение более чем в два раза). Шкала амплитуд является условной, поскольку сопоставление вы-

полняется по суммарному значению в условиях процесса впрыскивания.

Сравнивая запись  $p_{ш}$  на различных режимах впрыскивания с частотной характеристикой собственных колебаний, остановимся, в первую очередь, на диапазонах, где значение амплитуд гармоник являются значительными. Как отмечено выше это частоты с верхними значениями  $f = 10, 20$  и  $70$  Гц.

Обращаясь к графику собственных колебаний отметим что, очевидно, запись на рис. 3-5 является суммарной от действия давления топлива и влияния собственных колебаний. В рабочей записи не просматривается их влияния, что свидетельствует о незначительной амплитуде гармоник собственных колебаний.

**Выводы.** С целью детального исследования метрологических характеристик измерительной системы на базе разработанного измерительного преобразователя выполнен сравнительный анализ амплитудно-частотных параметров записи давления топлива.

Для этого использован метод дискретного (ДПФ) и обратного ДПФ преобразования Фурье. Подготовлена расчётная схема, разработаны алгоритм и программа обработки осциллограмм. Обеспечен специализированный интерфейс, ориентированный на решение поставленной задачи.

Результаты частотного анализа подтвердили данные, полученные путем сравнения осциллограмм. Амплитудно-частотные параметры записи обоими датчиками не имеют существенных отличий на всех режимах за исключением дробного впрыскивания. На этом режиме при минимальной частоте вращения, равной  $33 \text{ мин}^{-1}$ , наблюдается наибольшее расхождение при 2 Гц.

Измерительная системы на базе комбинированного преобразователя Ш-Д может быть использована для контроля вибрации двигателя при отключении ТНВД или в период между впрыскиванием топлива.

## Список литературы:

1. Marek T. Wlodarczyk. High Accuracy Glow Plug – Integrated Cylinder Pressure Sensor for Closed Loop Engine Control. – 5 pgs. – SAE 2006-01-0184.
2. Wlodarczyk M. T., Poorman T., Xia L., Arnold J. and Coleman T. Embedded fiber-optic combustion-pressure sensors for automotive engines. – 6 pgs.
3. Tom Poorman, Jacob Arnold, Terry Coleman, and Marek T. Wlodarczyk. Long-life fiber-optic pressure sensors for reciprocating machinery monitoring. Optrand, Inc. 46155 Five Mile Rd., Plymouth, MI 48170, USA. <http://optrand.com/MFPT99paper.htm>
4. David Toth, Bhavani Tripathy, Marek T. Wlodarczyk. Cylinder Head Gasket with Integrated Combustion Pressure Sensors. David Toth, Bhavani Tripathy Federal Mogul Corporation, Marek T. Wlodarczyk Optrand Incorporated. DEER 2010 Detroit, Michigan Sept. 27-30, 2010. – pgs <http://www.optrand.com/Papers/DEER2010.pdf>
5. Самойленко А. Ю., Кузнецов А. В. Гармонический анализ индикаторных диаграмм судовых дизелей / А. Ю. Самойленко, А. В. Кузнецов // Сб. научн. трудов НГМА. – 2003. – Вып. 8. – Новороссийск: НГМА. – С. 75-77.
6. Яковенко А. Ю. Разработка и исследование комбинированного датчика давления топлива / Э. М. Половинка, А. Ю. Яковенко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2013. – № 32. – Одесса: ОНМА. – С. 41-49.

**Яковенко А.Ю.**  
ДП «Інтреско ЛТД»

## **ГАРМОНІЙНИЙ АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ**

### **Анотація**

Представлено систему реєстрації процесу паливоподачі на базі комбінованого вимірювального перетворювача тиску палива. Розроблено засоби гармонійного аналізу даних і визначені порівняльні амплітудно-частотні характеристики результатів. Система забезпечує метрологічні параметри близькі до базового датчика тиску палива.

**Ключові слова:** дизелі, паливоподача, вимір, гармонійний аналіз, амплітудно-частотні характеристики

**Jakovenko A.J.**  
DP «Intresko LTD»

## **VELOCITY CHARACTERISTICS OF MARINE MEDIUM-REVERSE DIESEL FUEL-HANDLING SYSTEM AT VARYING DUTIES**

### **Summary**

The system of registration of the fuels submission process on the basis of the combined measuring converter. Pressure of fuel is presented. Means of the harmonious analysis of data are developed and comparative peak-frequency characteristics of results are certain. The system provides metrological parameters pressure of fuel close to the base gauge.

**Keywords:** diesels, fuel injection, measurement, the harmonious analysis, peak-frequency characteristics.