

УДК 621.436

М.Р. Ткач, канд. техн. наук, Б.Г. Тимошевский, д-р техн. наук, Б.А. Тхы, инж.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДИКАТОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДВС МЕТОДОМ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

### Формулирование проблемы

При проведении экспериментальных исследований рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) широко используются датчики давления в цилиндре с электрическим выходом. Обработка, полученной развернутой индикаторной диаграммы, позволяет определить показатели рабочего процесса в цилиндре двигателя: среднее индикаторное давление  $p_{mi}$ , максимальное давление  $p_{max}$  и др. Однако в таких измерительных системах на точность результатов индицирования существенное влияние оказывают ряд погрешностей. Это ошибки, связанные с колебанием давления газов в канале, соединяющем цилиндр и датчик; ошибки, связанные с определением положения ВМТ; ошибки, связанные с недостаточно частотной характеристикой измерительной аппаратуры.

Эти погрешности приводят к искажению индикаторной диаграммы, вызывают трудности при сравнении экспериментальных и расчетных результатов, особенно в измерительных системах, где шаг опроса датчиков недостаточно высокой.

### Решение проблемы

Для выбора рациональных значений параметров системы измерения индикаторного давления предлагается использовать сравнительный метод, основанный на преобразовании Фурье. После обработки сигналов от датчиков получают мгновенные значения давления в цилиндре по углу поворота коленчатого вала, т.е.  $p(\varphi) = f(\varphi)$ . С помощью прямого преобразования Фурье временное представление сигнала давления переводится в частотную область, высшие гармоники сигнала отсеиваются и затем с

помощью обратного преобразования Фурье обеспечивается возврат к временному представлению сигнала. Ряд Фурье для функции  $p(\varphi)$  имеет вид

$$p(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{i_{max}} [a_i \cos(i \varphi) + b_i \sin(i \varphi)], (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} p(\varphi_i) \cos(i \varphi_i) d\varphi_i \\ b_i &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} p(\varphi_i) \sin(i \varphi_i) d\varphi_i \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $i_{max}$  – номер максимально учитываемой гармоники;  $a_i, b_i$  – коэффициенты ряда Фурье;  $\varphi$  – угол п.к.в. двигателя;  $\varphi_i$  – начальная фаза  $i$ -й гармоники.

Из этого определяется среднее индикаторное давление [2]

$$p_{mi} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} p(\varphi) \mu(\varphi) d\varphi (3)$$

где  $\mu(\varphi) = \sin(\varphi) + \frac{\lambda}{2} \sin(2\varphi)$ ;  $\lambda$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна двигателя.

Благодаря фильтрации помех посредством преобразования Фурье, полученные данные более точны и надежны. В качестве примера синтеза сигналов использованы мгновенные значения давления в цилиндре, полученные путем математического моделирования рабочего процесса, с наложенными на него компонентами помех (как исходный сигнал), искажение которых изменяется в интервале 0...5%  $p(\varphi)$ . Результаты синтеза сигналов с помощью прямого преобразования Фурье показан на рис.1.

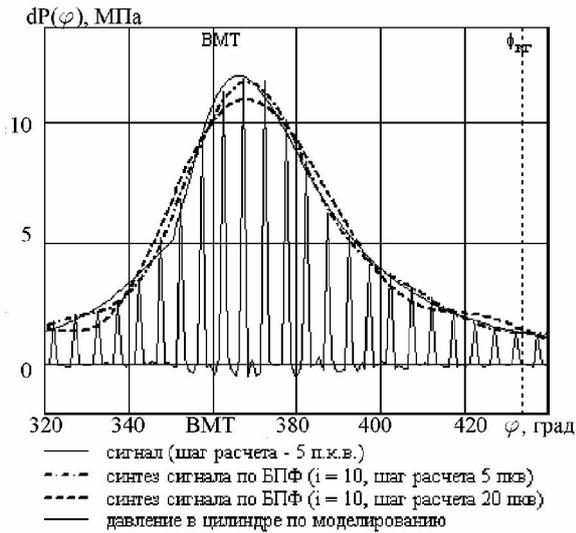


Рис. 1. Синтез сигнала с помощью прямого Фурье-преобразования

Как видно на рис. 1, полученные результаты после процесса синтеза не содержат большей части высокочастотных помех и приближаются к исходным данным (без компонентов помех) – кривой давления в цилиндре по результатам математического моделирования. Численное исследование показало, что выбор рационального шага расчета существенно зависит от регистрации параметров на стадии горения топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя, особенно в районе ВМТ. В случае получения и обработки сигналов без регистрации значения максимального давления сгорания, синтез процесса приводит к искажениям реальной индикаторной диаграммы. При преобразовании сигналов, в которых параметры рабочего процесса регистрируются, искажения носят минимальный характер, даже в случае больших шагов вычислений. В этих случаях проявляется только искажение среднего значения давления синтезированных данных, и эти искажения, в свою очередь зависят от шага вычислений.

Расчет по данному методу рабочего процесса в судовом дизель-генераторе 6ЧН12/14 показывает, что погрешность среднего индикаторного давления синтезированного процесса находится в интервале с

1...4% при шаге 5...20 п.к.в. Этот вывод свидетельствует о влиянии частотной характеристики измерительной аппаратуры на результат измерения среднего индикаторного давления.

Вместе с тем детальный анализ результатов обратного преобразования Фурье также показывает, что практическое совпадение оценок подтверждает достаточность использования только первых двух гармоник процесса для получения  $p_{mi}$ . Кроме того, с небольшим номером гармоник ( $i = 2...7$ ) искажение максимального значения синтезированного процесса соответственно устраняется. Параметры и погрешности определения индикаторного давления, синтезированные с использованием различных гармоник по данным моделирования и компонентами помех, представлены на рис.2 и 3.

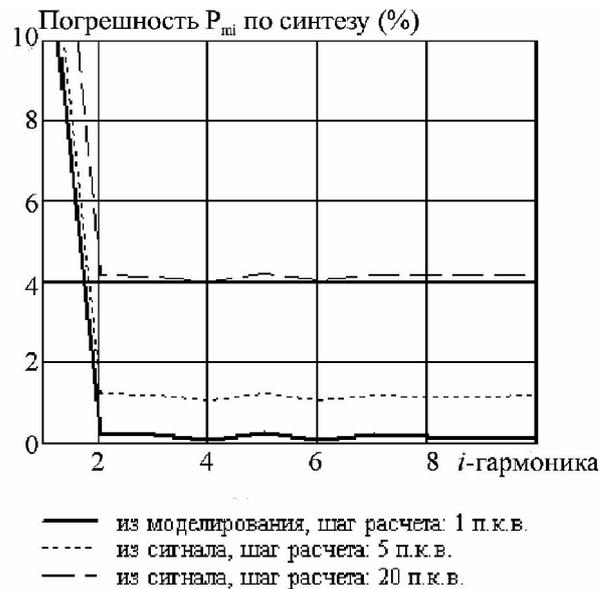


Рис. 2. Погрешность среднего индикаторного давления по синтезу в зависимости от шага расчета и числа гармоник

Оценка погрешности измерения индикаторного давления с помощью преобразования Фурье также представлена на рис.4. Для этого использован сигнал с измерительным шагом 20° п.к.в. Объектом сравнения является индикаторное давление в цилиндре по моделированию (шаг расчета 1 п.к.в.). Для определения коэффициентов ряда Фурье полученного сигнала

используются зависимости (2) по измерительному шагу и индикаторного давления по шагу расчета моделирования, и выполняет их разложение. Для оценки погрешности среднего и максимального индикаторного давления выполняется обратное преобразование с уменьшением числа гармоник синтеза  $i$ . Погрешность в этом случае составила соответственно 0,17%, 4,17 и 6%. Аналогичный расчет с числом гармоник  $i = 4$  дает соответственно следующие результаты: 0,05%, 4% и 0,01%.



Рис. 3. Погрешность максимального индикаторного давления по синтезу в зависимости от шага расчета и числа гармоник

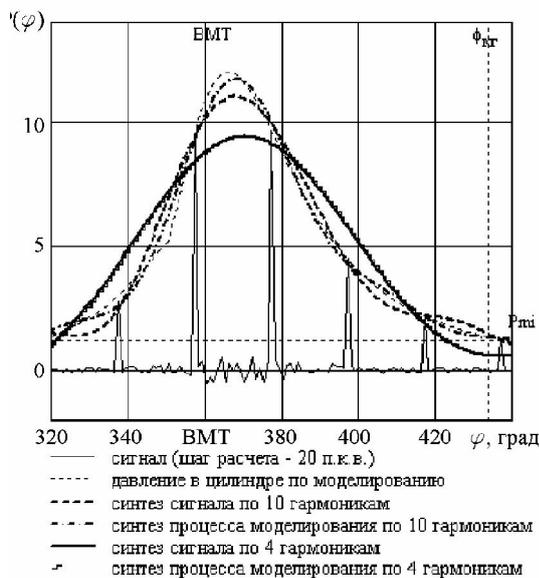


Рис. 4. Оценка погрешности индикаторного давления с помощью прямого преобразования Фурье

### Заключение

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- погрешность определения среднего индикаторного с помощью преобразования Фурье зависит только от шага расчета (частотной характеристики измерительной аппаратуры), а не числа учитываемых гармоник (в случаях  $i \geq 2$ );

- увеличение количества учитываемых гармоник не только не дает никакой дополнительной информации, но и является источником дополнительной погрешности.

Полученные результаты дают возможность синтезировать полученные экспериментальные данные и анализировать индикаторную диаграмму в частотной области. Результат этой работы может использоваться для оценки погрешности, вызванной измерительной аппаратурой и для проверки адекватности математических моделей рабочих процессов, протекающих в ДВС.

### Список литературы:

1. Построение диаграмм изменения параметров рабочих процессов, сил и моментов в кривошипно-шатунном механизме. Учебное пособие. Л.А. Захаров, В.Л. Химич, В.А. Звонцов, С.Н. Хрунков. – НГТУ, Нижний Новгород, 2000.
2. Самойленко А. Ю. Определение среднего индикаторного давления на основе гармонического анализа индикаторной диаграммы дизеля // Двигателестроение – 2004. - N 1. - С. 17 – 19.
3. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ: Учеб. пособие для студентов вузов по специальности "Двигатели внутреннего сгорания"/; Под общ. ред. Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, 1990, 328 с.