

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРОМЕТРИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

*С.Н. Кирюхин, к.т.н., доцент; А.Н. Терехин, к.т.н.; А.О. Шиманская к.т.н.;  
А.С. Рубан, старший преподаватель; В.Ю. Доронкин, преподаватель  
Военный инженерно-технический университет*

В статье представлены результаты синтеза индикаторных диаграмм, полученных обработкой виброграмм силовой шпильки дизельного двигателя методом главных компонент. Основное достоинство метода состоит в том, что при определенной последовательности обработки случайных данных типа «временной ряд» (вибрация деталей) возможно измерение индикаторного давления в цилиндре двигателя с достаточной точностью.

С середины 1990-х гг. в Военном инженерно-техническом университете ведутся исследования виброакустических характеристик работы различных дизельных двигателей (4Ч8,5/11, 6Ч12/14, 6Ч15/15, 6Ч15/18 и др). Как показывают результаты этих и других многочисленных исследований, именно вибрация (из всех возможных косвенных параметров) наиболее ярко отражает информацию о внутрицилиндровых процессах в двигателях. Иногда она является единственным доступным источником измерительной информации, по которому можно синтезировать целый ряд эксплуатационных характеристик. Но чаще всего вибрационные параметры используются в диагностике для оценки технического состояния деталей и узлов двигателя.

Не прекращающийся интерес к исследованию вибрации подтверждается многочисленными ранними и современными публикациями [1–9], а также внедрением в практику эксплуатации новых средств измерений и специального программного обеспечения, реализующего новые методы ее обработки.

Вибрация в деталях двигателя возникает вследствие низкочастотных вынужденных колебаний (как проявление упругой деформации) от действия изменяющегося давления в цилиндре двигателя в результате сгорания топлива. Это в свою очередь определяет действующие динамические нагрузки на детали двигателя и вызывает их упругую деформацию [4].

Газодинамические процессы на такте рабочего хода порождают вынужденные колебания цилиндрической втулки, частотный спектр которых зависит

от скорости распространения пламени, линейных размеров камеры сгорания и колебаний давления газа в каждой точке камеры сгорания. Эти колебания носят случайный характер, их частотный спектр расположен в диапазоне 0,2–40 кГц и имеет практически равномерную амплитудную интенсивность. Анализ возмущающих факторов позволяет представить колебания втулки  $x(t)$  аддитивной моделью вида

$$x(t) = s(t) + \xi(t),$$

где  $s(t)$  — составляющая вынужденных колебаний (полезный сигнал);  $\xi(t)$  — широкополосная составляющая собственных колебаний (помехи).

Существует устойчивая зависимость между уровнем регистрируемой вибрации и амплитудой давления газа в цилиндре. Максимальная интенсивность виброакустических процессов, как правило, наблюдается в частотном диапазоне  $f = 2–6$  кГц на такте рабочего хода [2]. Экспериментально доказано, что именно на такте рабочего хода двигателя вибросигнал обладает наибольшей информативностью. Однако мощные вибропомехи, создаваемые при работе деталей цилиндропоршневой группы (перекладка поршня, работа газораспределительного механизма и т. п.), а также традиционные методы обработки вибросигнала [4] не позволяют получить точную информацию о внутрицилиндровых процессах.

Для повышения отношения сигнал/помеха необходимо максимально локализовать и выделить составляющую  $s(t)$ . Выбор эффективного метода селекции составляющей из сложного (с большим количеством случайных составляющих) сигнала является ключевым моментом в решении этой задачи.

Упругие колебания силовой шпильки и давление газа в цилиндре двигателя, зарегистрированные вибросигналом, содержат широкополосную случайную составляющую. При обработке вибросигнала методом главных компонент он рассматривается как временной ряд, имеющий  $p$  случайных переменных  $X_1, \dots, X_p$  с многомерным, необязательно нормальным, совместным распределением, вектором средних значений  $\mu^{p \times 1} = (\mu_1, \dots, \mu_p)'$  и ковариационной матрицей  $\Sigma^{p \times p} = (\sigma_{ij})$ . Целью обработки этого временного ряда является выделение таких гармонических состав-

ляющих, которые наиболее полно соответствуют колебаниям давления газа в цилиндре двигателя (индикаторному давлению). Для этого требуется определить взаимосвязь между переменными  $X_1, \dots, X_p$ , которая определяет структуру искомой зависимости и может быть измерена ковариациями, или дисперсиями и корреляциями между  $X_1, \dots, X_p$ . В некоторых случаях можно найти линейные комбинации  $Y_1, \dots, Y_q$  переменных  $X_1, \dots, X_p$  ( $q < p$ ), по которым можно получить структуру зависимости между  $X_1, \dots, X_p$ . Такое сжатое описание структуры зависимости передает почти всю информацию, содержащуюся в самих переменных и позволяет выделить только те зависимости, которые необходимы для последующего анализа.

Суть метода главных компонент состоит в поиске таких линейных комбинаций исходных переменных

$$Y_1 = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j} X_j, \dots, Y_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{pj} X_j,$$

которые обеспечивают выполнение условий

$$\text{cov}(Y_i, Y_j) = 0, \quad i, j = 1, \dots, p, \quad i \neq j;$$

$$V(Y_1) \geq V(Y_2) \geq \dots \geq V(Y_p);$$

$$\sum_{i=1}^p V(Y_i) = \sum_{i=1}^p \sigma_{ii}.$$

Приведенные выражения показывают, что переменные  $Y_1, \dots, Y_p$  не взаимозависимы и упорядочены по возрастанию дисперсии. Общая дисперсия

$$V = \sum_{i=1}^p \sigma_{ii}$$

после преобразования остается без изменений. В этом случае подмножество первых  $q$  переменных  $Y_i$  формирует большую часть общей дисперсии и, таким образом, составляет сжатое описание структуры зависимости исходных переменных. Расчетная часть метода главных компонент состоит в определении коэффициентов  $\alpha_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, p$ . Совместное распределение исходных переменных не обязательно может быть многомерным нормальным. Однако такое предположение удобно, поскольку линейные комбинации нормально распределенных величин тоже имеют нормальное распределение и, следовательно, полностью определяются параметрами  $\mu$  и  $\Sigma$ . Тогда можно предположить, что  $\mu = (0, \dots, 0)'$ , и структура зависимости, задаваемая матрицей  $\Sigma$ , будет полностью описывать совместное распределение переменных  $X_1, \dots, X_p$ . Если матрица  $\Sigma$  известна, и определена зависимость  $Y_1 = \alpha_{11}X_1 + \dots +$

$\alpha_{1p}X_p$ , то требуется найти такие значения  $\alpha_{11}, \dots, \alpha_{1p}$ , чтобы величина

$$V(Y_1) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \alpha_{1i} \alpha_{1j} \sigma_{ij}$$

была максимальной при выполнении условия

$$\sum_{j=1}^p \alpha_{1j}^2 = 1,$$

которое обеспечивает единственность решения. Решение  $\alpha_1 = (\alpha_{11}, \dots, \alpha_{1p})'$  является собственным вектором и соответствует максимальному собственному значению матрицы  $\Sigma$ , которое равно дисперсии  $V(Y_1)$ . Линейная комбинация  $Y_1 = \alpha_{11}X_1 + \dots + \alpha_{1p}X_p$  является первой главной компонентой переменных  $X_1, \dots, X_p$ , что и позволяет выделить полезный сигнал  $s(t)$  из всего спектра зарегистрированных колебаний  $x(t)$ .

Для проверки эффективности метода обработки вибросигнала на испытуемые двигатели устанавливались датчики, регистрирующие как вибрацию силовой шпильки блока цилиндров, так и датчики внутрицилиндрового давления. Как правило, пьезокварцевый вибродатчик устанавливался непосредственно в плоскости колебаний (вертикальной) силовой шпильки (рис. 1).

Для снижения погрешности измерений использовался механический способ крепления вибропреобразователя. При этом учитывались конструктивные особенности двигателя, а также условия монтажа датчика, учитывающие нелинейное искажение сигнала вследствие его распространения в среде, имеющей неоднородную виброакустическую проницаемость.

Учитывая, что все происходящие в цилиндре процессы являются функцией угла поворота коленчатого вала, при виброметрировании использовались определенные участки временных реализаций  $x(t)$  вибросигнала с предварительной

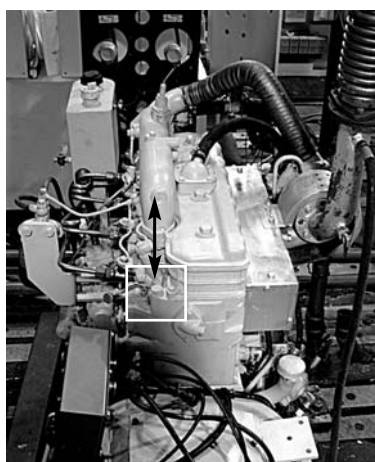


Рис. 1. Место установки датчика вибрации и плоскость измерения параметров вибрации

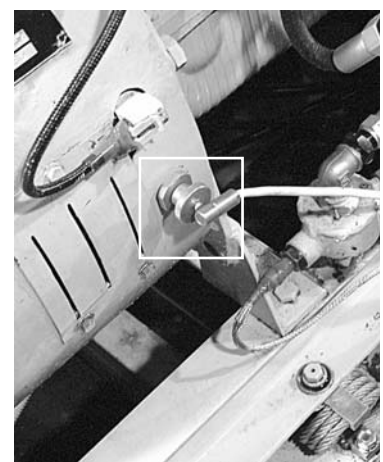


Рис. 2. Место установки датчика отметки ВМТ

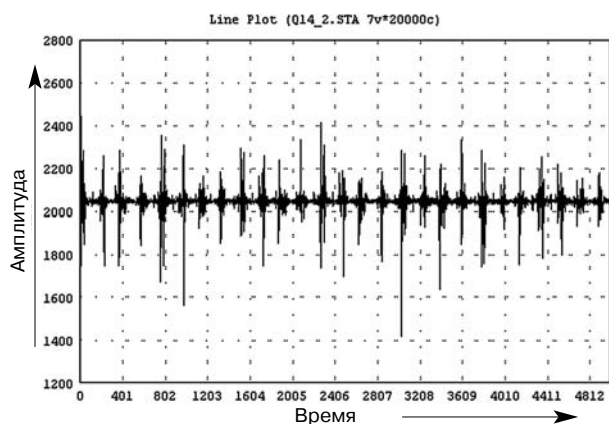


Рис. 3. Экспериментальная виброграмма

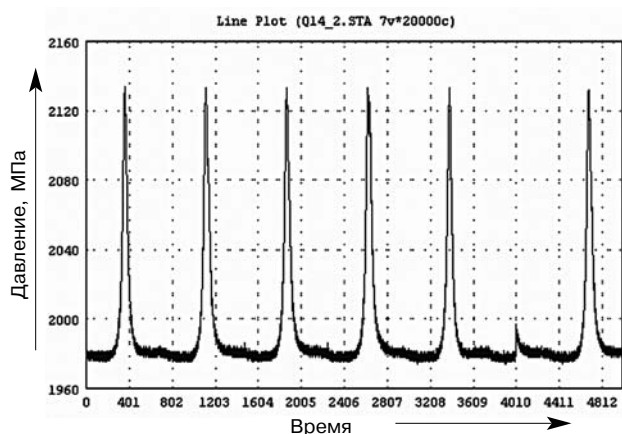


Рис. 4. Экспериментальная индикаторная диаграмма

селекцией по центральному частотному диапазону, соответствующему колебаниям давления газов. В этом случае частотная селекция осуществлялась узкополосным фильтром в диапазоне частот от 2 до 5 кГц (в соответствии с рекомендациями [2]). Для генерации синхроимпульса (отметка ВМТ) использовался индуктивный датчик, установленный над зубчатым венцом маховика (рис. 2). В экспериментах использовалась как отечественная, так и импортная виброакустическая измерительно-регистрирующая аппаратура, в частности фирмы SVANTEK. Испытания проводились во всем диапазоне нагрузок при номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Для учета систематической и случайной погрешностей измерений, в соответствии с ГОСТ 8.207-86, на каждом исследуемом режиме обработке подвергалось не менее 40 виброграмм (выборки) и соответствующих им индикаторных диаграмм, других результатов наблюдений. Проверка выполнялась с соблюдением условий воспроизводимости и независимости результатов экспериментов. При проведении повторных экспериментов использовался критерий Фишера (F), уровень значимости которого принимался равным 0,05 (5%). Полученные на всех иссле-

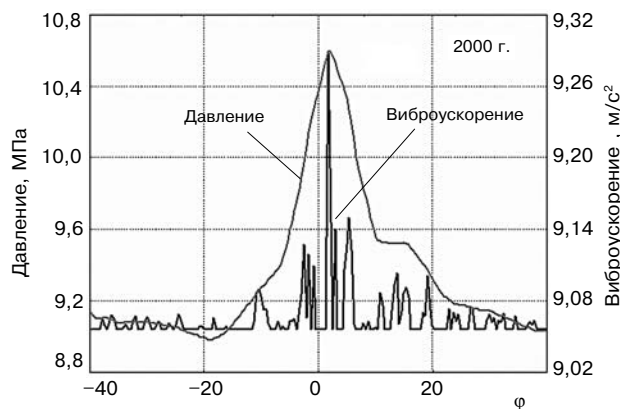


Рис. 5. Совмещенные диаграммы виброускорения и давления газов в цилиндре

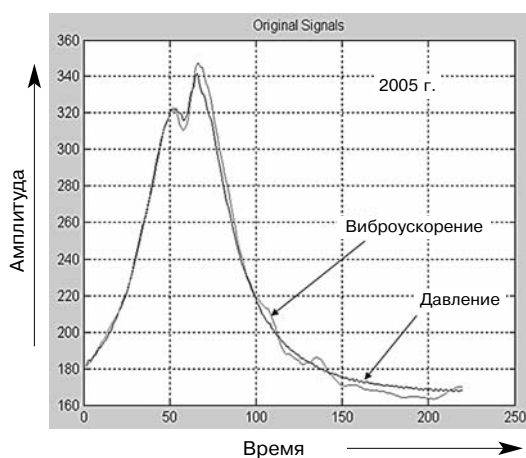


Рис. 6. Результат обработки экспериментальной виброграммы

дуемых режимах виброграммы (рис. 3) и индикаторные диаграммы (рис. 4) подвергались обработке описанным выше методом. Результаты обработки этих данных для различных режимов работы двигателя представлены на рис. 5.

На рис. 6 представлен результат синтеза индикаторного давления (обозначен как виброускорение) по результатам виброметрирования колебаний силовой шпильки головки блока цилиндров двигателя 4Ч8,5/11 с использованием метода главных компонент (см. рис. 3). Синтезированная индикаторная диаграмма совмещена с измеренной при помощи традиционного датчика давления.

Обработка производилась независимо специалистами факультета ПМПУ СПбГУ (Гришкин А.Н., Петрова В.А. и др.) и факультета математической механики СПбГУ (Данилов Д., Некруткин В.А., Голяндина Н.П.) [8, 9].

Представленные результаты выполненных исследований пока еще не являются полностью завершенными, однако достаточно убедительно подтверждают эффективность разработанного метода обработки случайного сигнала, а созданные

алгоритмы и программное обеспечение имеют хорошую перспективу применения в условиях эксплуатации ДВС для целей диагностики и измерения.

#### Литература

1. *Тодес О.М.* Физические основы процесса горения. — Л. : ЛВВИСУ, 1977. — 54 с.
2. *Никитин Е.А., Станиславский Л.В., Улановский Э.А. и др.* Диагностирование дизелей. — М. : Машиностроение, 1987. — 224 с.
3. *Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б. и др.* Математическая теория горения и взрыва. — М. : Наука, 1980. — 478 с.
4. *Орлин А.С., Круглов М.Г.* ДВС: Теория поршневых и комбинированных двигателей. — 4-е изд. — М. : Машиностроение, 1983. — 372 с.
5. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. и др.* Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник; — 2-е изд., испр. и доп. / Под ред. В.В. Клюева. — М. : Машиностроение, 2003. — 656 с.

6. *Агафонов А.Н., Кирюхин С.Н.* К вопросу диагностирования ДЭУ СЦ по характеристикам тепловыделения // Автономные дизельные энергетические установки — основа энергоснабжения военно-строительных комплексов: Тез. докл. научн.-техн. семин. 1996 г. — СПб., 1996. — Вып. 2. — С. 42–44.

7. *Кирюхин С.Н., Шиманская А.О.* Математическая модель дизельного двигателя // Научные проблемы специальных военно-строительных и фортификационных комплексов, обустройства войск и управления производственной деятельностью строительных предприятий МО РФ: Сборник научных трудов НИГ-1 ВИТУ. 2006 г. — СПб., 2006. — Вып. 5. — С. 543–552.

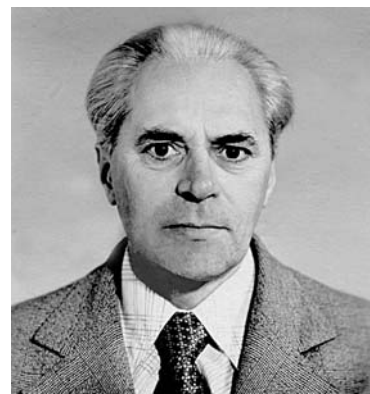
8. *Danilov D.L.* Principal components in time series forecast. — Proceedings of the statistical computing section of the american statistical association. — 1996. — P. 156–160.

9. *Danilov D., Solntsev V.N., Zhigljavsky A.* Analysis and forecast of time series on the base of the principal components. Abstracts of second international conference on computing in economics and finance. — Geneva, Switzerland, June 1996. — P. 26–28.

**ЮБИЛЕЙ!**

## Владимиру Ивановичу Решетову 80 лет

20 августа 2008 года исполнилось восемьдесят лет  
Владимиру Ивановичу Решетову,  
одному из старейших работников ОАО «Барнаултрансмаш»,  
Заслуженному конструктору РСФСР



Владимир Иванович Решетов — выпускник Алтайского машиностроительного института 1950 г. (ныне Алтайский Государственный технический университет им. И.И. Ползунова), кадровый работник предприятия, ветеран научно-исследовательских и конструкторских служб завода.

При его непосредственном участии и под его руководством в должности заместителя начальника экспериментального цеха по технической части в 1960–1970 гг. выполнен большой объем исследовательских, экспериментальных и доводочных работ по созданию новых быстроходных короткоходных двигателей семейства УТД специального назначения.

Обладая громадным опытом и глубокими всесторонними знаниями в области двигателей внутреннего сгорания, В.И. Решетов создал на предприятии школу инженеров-исследователей и испытателей, успешно работающих на месте и во многих других ведущих предприятиях отрасли.

Ведущий конструктор Центрального конструкторского бюро предприятия Владимир Иванович Решетов является автором многочисленных изобретений, монографий и научных статей, в том числе и в журнале «Двигателестроение».

За большие творческие и производственные достижения в области конструкторской деятельности в 1987 г. В.И. Решетову присвоено почетное звание Заслуженного конструктора РСФСР.

*Коллектив ОАО «Барнаултрансмаш» и редакция журнала «Двигателестроение»  
поздравляют Владимира Ивановича с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и долголетия.*