

Применение прецизионных хронометрических технологий для мониторинга отклонений в работе двигателей внутреннего сгорания

© Е.Т. Плаксина, А.Б. Сырицкий, А.С. Комшин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены основные методы диагностики двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Описан метод, основанный на измерении интервалов времени между фазами рабочего цикла механизма. Определен алгоритм реализации измерения интервалов времени от постановки задачи до доказательства работоспособности данного метода на ДВС. Показана реализация установки углового датчика на коленчатый вал экспериментального стендового двигателя ВАЗ 21126. Представлена основа для построения математической модели коленчатого вала и выявлены главные факторы, влияющие на его движение. Установлен критерий, согласно которому пропуск зажигания определяется наиболее точно. Полученные результаты могут быть использованы при разработке системы диагностики двигателей внутреннего сгорания, а также двигателей, работающих в экстремальных условиях, например, за полярным кругом, на судах и т. д.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, основные методы диагностики, измерение интервалов времени, фазохронометрия, пропуск зажигания, математическая модель, коленчатый вал ДВС*

Введение. Несмотря на развитие новых источников механической энергии (электрические, гибридные, на водороде), классические двигатели внутреннего сгорания (ДВС), такие как бензиновые, дизельные, на природном газе и др., остаются крайне востребованными, их продолжают использовать в составе судовых силовых установок, дизельных генераторов и насосных агрегатов. Зачастую подобные машины работают в суровых климатических и экстремальных условиях, в которых необходимо удовлетворять повышенным требованиям к надежности и контролепригодности технического состояния агрегатов для дальнейшего прогнозирования их остаточного ресурса, при планировании простоя и ремонта оборудования.

Цель данной работы заключается в разработке такой системы контроля, которая позволит не только измерять контролируемые параметры, но и диагностировать текущее техническое состояние узлов и агрегатов ДВС.

Обзор существующих методов. На сегодня разработано множество методов диагностики двигателей внутреннего сгорания (рис. 1). Суть любого метода диагностирования заключается в сравнении полученных результатов с уже имеющимися в базе данных показателями работы исправного двигателя. Недостатками такого анализа, изложенными в работе [1], являются:

- ограниченное количество неисправностей, представленных в базе данных;
- некорректность результатов, обусловленная влиянием показателей (параметров) работы системы двигателя друг на друга.



Рис. 1. Основные методы диагностики двигателя внутреннего сгорания

Рассмотрим основные методы диагностики ДВС [2]. Продолжительность срока службы двигателя зависит главным образом от исправной работы цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Как видно из данных, приведенных на рис. 2, ЦПГ ДВС представляет собой сложный объект диагностирования, причем ни один из диагностических параметров не позволяет однозначно установить неисправность конкретного узла.

Работоспособность ЦПГ в основном определяется величиной зазора между поршнем и гильзой; износом компрессионных и маслоъемных колец. Увеличение зазоров приводит к повышению расхода газов, прорывающихся в картер, а также к увеличению давления в картере. По этим параметрам оценивают техническое состояние объекта [3].

По мнению авторов статьи [4], преимуществами данного метода являются:

- универсальность, так как этим методом можно проводить проверку как двигателей с искровым зажиганием, так и дизельных двигателей;
- простота реализации, так как не требуется разбирать механизм;
- экономия времени при определении состояния деталей цилиндропоршневой группы;

– информация, полученная в результате применения данного метода, может послужить для подтверждения или опровержения гипотезы, построенной с использованием других методов диагностирования.

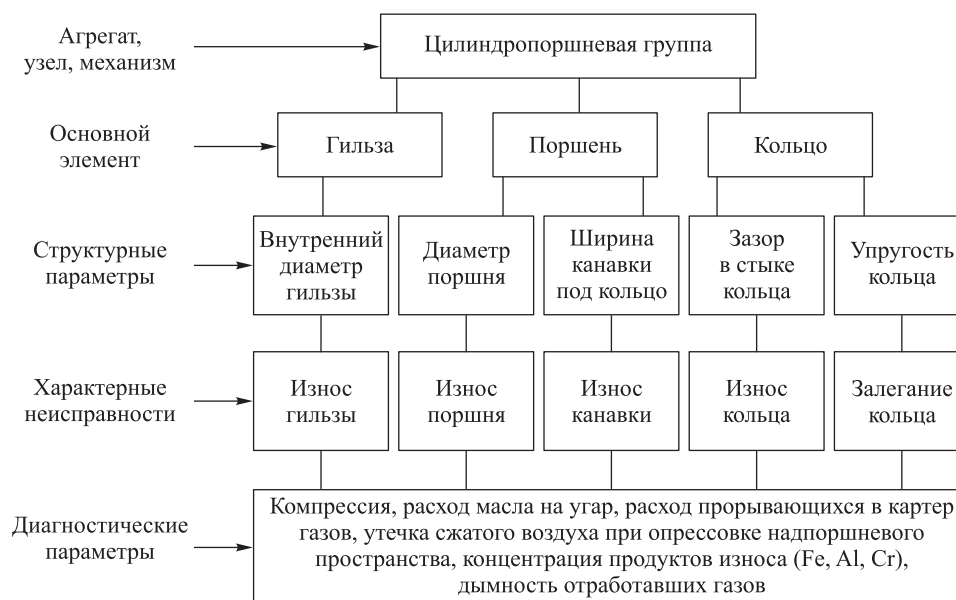


Рис. 2. Структурно-следственная схема цилиндропоршневой группы ДВС как объекта диагностирования

Недостатком этого метода является сложность оценки состояния двигателя при различных неисправностях в разных цилиндрах (например, износ гильзы и износ кольца одновременно) [5].

При длительной работе масла в двигателях, постоянных интенсивности очистки и расходе концентрация продуктов износа в масле стабилизируется и устанавливается на уровне, характерном для данных условий эксплуатации и конструктивных особенностей двигателя. Значительное повышение концентрации того или иного элемента в масле свидетельствует об интенсивном изнашивании деталей, в которых этот элемент присутствует. Например, по концентрации алюминия можно судить об износе поршней, по наличию хрома — об износе хромированных поршневых колец и т. д.

Для диагностирования более пригоден спектральный анализ, с помощью которого можно определить содержание многих металлических и неметаллических элементов, поступающих в масло при изнашивании двигателя [6]. Преимуществами метода являются:

- высокая чувствительность;
- быстрота проведения анализа;
- возможность ограничиваться чрезвычайно малыми количествами вещества для проведения анализа.

Однако методы диагностики по количеству прорвавшихся газов в картер, по компрессии, по концентрации продуктов износа, по величине зазора между поршнем и гильзой, по износу компрессионных и маслосъемных колец достаточно эффективны лишь при выявлении аварийных износов.

Существуют и испытательные стенды, которые используются в основном при проектировании и исследовании двигателей. В этом случае двигатель закрепляют в специальной раме, а нагрузка создается электроприводом. При использовании специальной головки блока цилиндров можно измерить давление внутри цилиндров и построить графическую зависимость от хода поршня (индикаторные диаграммы). Стенды позволяют определять с высокой точностью различные параметры работы ДВС в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала и нагрузок на двигатель. Но использовать такие устройства для диагностирования затруднительно ввиду необходимости демонтажа двигателя с места стационарной установки.

Методы, в случае применения которых предусматривается разборная диагностика агрегата автомобилей, имеют общие недостатки — остановка двигателя во время эксплуатации, а также частичное или полное извлечение силовой установки из общей системы. Использование группы таких методов не подходит главным образом для судовых и авиационных двигателей, где остановка во время работы просто невозможна.

В особую группу следует выделить тестеры двигателей. Эти устройства, в том числе и сканеры, позволяют получать и контролировать на мониторе основные параметры двигателя и системы управления, такие как обороты двигателя, время впрыска топлива, расход воздуха, угол опережения зажигания, состояние исполнительных механизмов и др. Преимущество диагностирования с применением таких устройств заключается в том, что сканер позволяет взглянуть на работу системы управления двигателем глазами самого блока управления, а также отнестись к возможности графического отображения параметров двигателя в виде графиков, изменяющихся во времени [7].

По мнению В.С. Гассельберга, А.В. Запорожца [8], наибольшей диагностической информацией обладает сигнал вибрации, а многие другие виды сигналов практически дублируют ту или иную информацию, содержащуюся в этом сигнале. Вибрации также вызывают образование структурного шума двигателя. Кроме того, было определено, что дефекты начинают развиваться в двигателе задолго до возникновения аварийных ситуаций и практически сразу оказывают влияние на вибрацию и шум этих узлов. Главной проблемой при обнаружении вызываемых таким образом изменений в сигнале вибрации является разделение их с теми изменениями, которые происходят

из-за флуктуации нагрузки, частоты вращения, температуры узлов и других параметров машины и внешних условий, в том числе и теми изменениями, которые могут возникать при отключении цилиндров двигателя. Эта проблема становится одной из первостепенных при решении задач диагностирования.

В самостоятельную группу выделяют методы, обеспечивающие проведение неразборного диагностирования двигателей. Однако ни один из этих методов не позволяет контролировать одновременно несколько параметров во время эксплуатации. При диагностировании необходимо устанавливать более одного датчика с подключением к общей системе для того, чтобы проанализировать полученную информацию и спрогнозировать появление неисправностей. В случае реализации этого решения потребуются большие затраты на установку и синхронизацию входящих в состав элементов, надежность будет мала, что существенно усложнит диагностику технического состояния ДВС.

В настоящее время не существует универсального и прецизионного метода диагностики. Поэтому для дальнейшей работы была поставлена цель разработать такой метод, который применялся бы как при разработке и испытаниях новых решений (например, применение лазерных свечей зажигания) или новых моделей двигателей, так и при эксплуатации ДВС в разных условиях.

Измерение интервалов времени. В данной работе предлагается использовать прецизионный хронометрический метод, в основе которого лежит непрерывное измерение интервалов времени, соответствующих повороту коленчатого вала на определенный угол или на фазу рабочего цикла. Для реализации этого метода необходимо на коленчатый вал ДВС установить устройство, регистрирующее изменение угла поворота вращения вала. Таким устройством может быть измерительный диск (лимб), на поверхность которого нанесены метки и установлен датчик, фиксирующий прохождение каждой метки. По этому методу, используемому в проводимом исследовании, работают угловые энкодеры, например компании СКБ ИС. Можно также использовать диск с зубцами и индукционный преобразователь; диск с магнитными метками и датчик Холла; измерительный диск с отверстиями и фотоэлектрический датчик.

Далее следует разделить полный рабочий цикл механизма на равные фазы разбиения, соответствующие частоте нанесения меток. После чего измеряются интервалы времени $\delta t_1 \dots \delta t_i$, соответствующие повороту коленчатого вала двигателя на угол $\Delta\phi$, ограничивающий фазу разбиения рабочего цикла. Теоретическое представление о данном соответствии показано на рис. 3, где прямая линия соответствует равномерному вращению («идеальная работа

механизма»), кривая — вращению реального механизма. После математической обработки формируется хронограмма (рис. 4), представляющая собой зависимость длительности интервала времени от номера n_i фазы разбиения рабочего цикла.

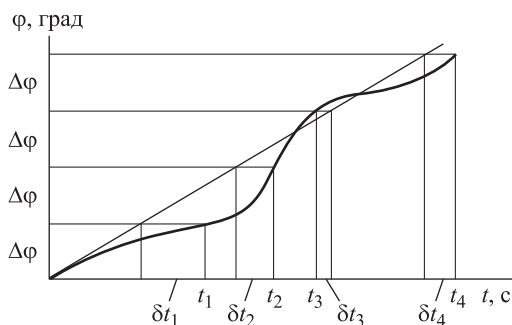


Рис. 3. Зависимость длительностей интервалов времени от угла поворота коленчатого вала

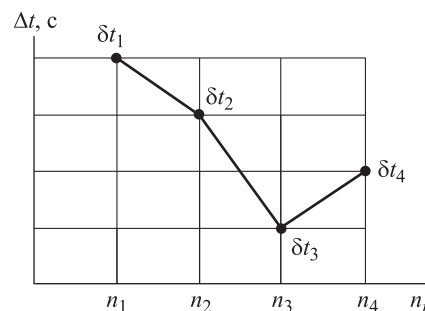


Рис. 4. Схема формирования хронограммы

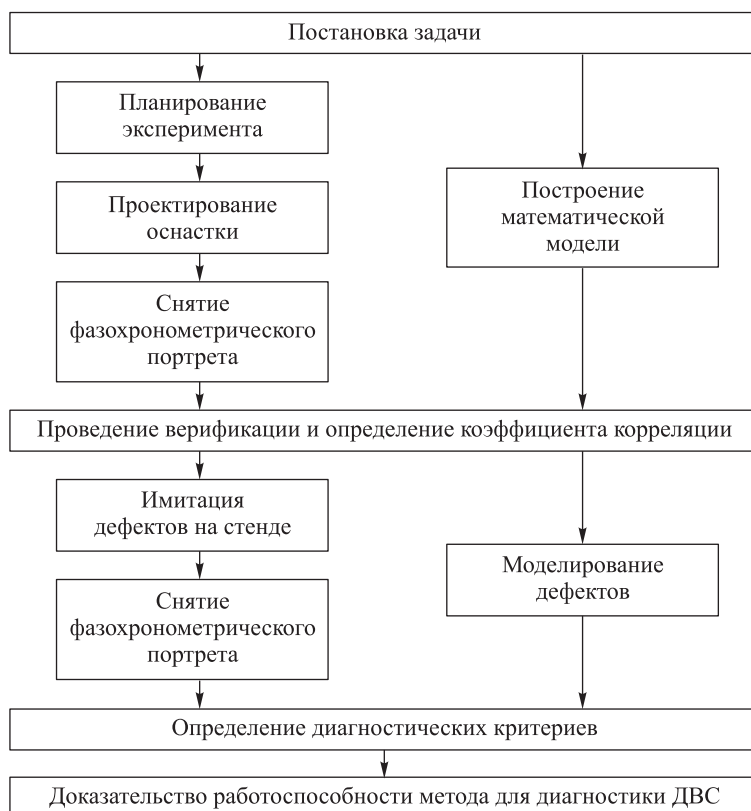


Рис. 5. Алгоритм реализации фазохронометрического метода на ДВС

Предлагаемый подход отличается точностью получения измерительной информации, высокой помехозащищенностью и невысокой стоимостью. Система измерения служит не для измерения амплитуды сигнала, как в виброакустическом методе, а для регистрации углового положения коленчатого вала в определенный момент времени. При этом амплитудные шумы не влияют на точность хронометрического метода. От амплитудных методов, используемых в настоящее время в машиностроении, рассматриваемый метод кардинально отличается в первую очередь точностью получения измерительной информации: частоту и время можно измерять с наивысшей точностью. Именно поэтому фазохронометрические системы характеризуются относительной погрешностью измерения порядка $10^{-2} \dots 10^{-4} \%$. При диагностике с помощью данного метода получают информацию в режиме реального времени, что позволяет обнаружить проблему в работе двигателя на ранней стадии [9, 10].

Для реализации фазохронометрического метода на двигателе внутреннего сгорания необходимо следовать алгоритму, представленному на рис. 5.

Методика эксперимента. Следующим этапом работы является проведение экспериментальных исследований на стендовом двигателе внутреннего сгорания ВАЗ 21126. Стенд включает в себя двигатель и нагрузку (гидравлический тормоз), которая создает момент сопротивления качению и имитирует колеса автомобиля.

В качестве средства измерения предлагаем взять инкрементный угловой энкодер ЛИР-158А 5-го класса точности дискретизацией 5000 меток, так как эта модель обладает наибольшей максимальной скоростью вращения коленчатого вала (10 000 об/мин) и малой массой (0,23 кг), что очень важно для обеспечения жесткости конструкции и возможности монтажа на объект измерения [11].

На этапе первичных исследований используется уже существующая аппаратура, рассчитанная под 5000 меток. После получения первых экспериментальных результатов необходимо провести анализ спектра хронограммы вращения для определения верхней границы частоты значимых колебаний в хронограмме и дальнейшей корректировки числа меток датчика. Без экспериментальных данных нельзя произвольно уменьшить ширину спектра, сокращая число меток, поскольку в результате это может привести к потере информации о высокочастотных составляющих, связанных, например, с подшипниковыми узлами.

Для выполнения измерений угла поворота коленчатого вала при вращении на него необходимо установить датчик 2, соединяемый с валом ДВС с помощью муфты ЛИР-801 3 и переходника 6, который в свою очередь соединяет муфту и фланец двигателя 7 (рис. 6). Для обеспечения жесткости конструкции необходимо соединить

пластину 5 и корпус двигателя 1 с помощью пальца 4. В приведенной конструкции корпус двигателя, палец, пластина и датчик неподвижны относительно корпуса двигателя.

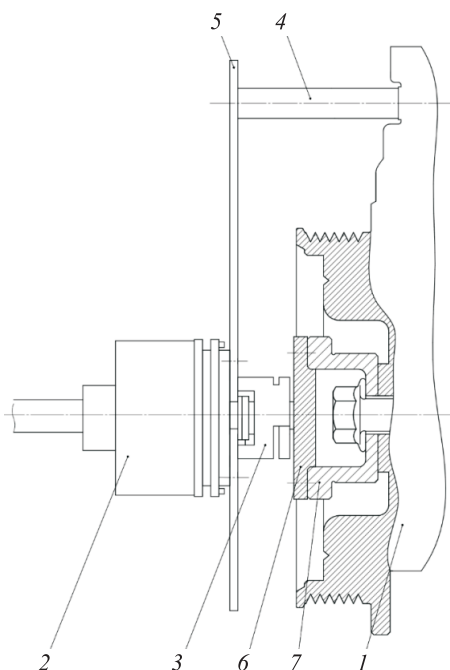


Рис. 6. Схема конструкции оснастки:

1 — корпус двигателя; 2 — энкодер ЛИР-158А; 3 — муфта ЛИР-801;
4 — палец; 5 — пластина; 6 — переходник; 7 — фланец

Вал двигателя, фланец, переходник, муфта и вал энкодера совершают вращательное движение, совпадающее с движением коленчатого вала.

После первичного преобразователя (ПП) сигнал поступает в аналоговую часть, где происходит фильтрация входного сигнала и оцифровка для дальнейшей передачи в блок обработки измерительной информации на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) [12, 13]. В блоке обработки измерительной информации с помощью кварцевого генератора измеряется время между изменениями состояния аналогового компаратора. Далее измеренные интервалы обрабатываются по специальному алгоритму, и в результате формируется критерий оценки состояния ДВС (рис. 7).

Погрешность ($4,01 \cdot 10^{-8}$ с) данного измерительного канала была рассчитана при разработке системы мониторинга износа инструмента при точении. Следует отметить, что отличительной особенностью при работе с ДВС является наличие дополнительной погрешности

от вибраций и изменения температуры. Датчик ЛИР-158А допускает вибрационное ускорение (от 55 до 2000 Гц) не более 100 м/с^2 ; интервал рабочих температур датчика $-40...+100 \text{ }^\circ\text{C}$.

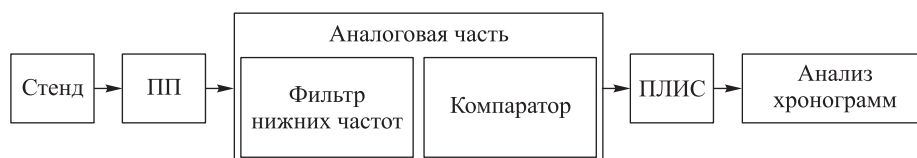


Рис. 7. Схема измерительного канала

Анализ существующих математических моделей. Для реализации рассматриваемого метода необходимо построить математическую модель объекта, в нашем случае — динамическую модель двигателя внутреннего сгорания. Она разрабатывается на базе общепринятых элементов теории машин и механизмов с дальнейшим переводом выходных данных модели из зависимости угла поворота от времени в зависимость длительности интервала времени от номера фазы (рис. 8).

Угол поворота звена *I* совпадает с углом поворота коленчатого вала, что позволяет перейти к закону вращения коленчатого вала и к интервалам времени, разбив весь цикл на 5000 фаз оборота (на рис. 8 значения 0; 1250; 2500; 3750; 5000 соответствуют номеру фазы оборота при достижении кривошипом соответствующего положения).

Следует также учитывать, что вращение коленчатого вала зависит от работы всех четырех цилиндров. Модель должна учитывать моменты и силы, действующие со стороны всех поршней механизма [14].

Далее необходимо доказать, что данная модель является адекватной, и провести верификацию, т. е. установить соответствие между экспериментальной хронограммой вращения и выходной хронограммой, полученной с помощью математической модели.

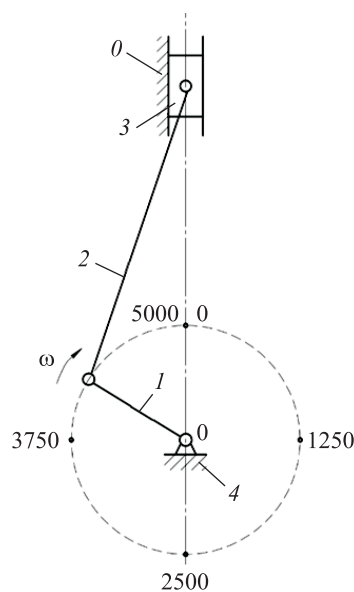


Рис. 8. Кинематическая модель вращения коленчатого вала:
 0 — цилиндр; 1 — кривошип; 2 — шатун; 3 — поршень; 4 — опора кривошипа

После верификации математической модели движения коленчатого вала следующим этапом является моделирование различных дефектов и имитация их на экспериментальном стенде. Например, в качестве моделируемого дефекта может выступать пропуск зажигания в одном из цилиндров ДВС, что можно симитировать отключением одного из цилиндров двигателя (например, третьего) с фиксацией соответствующей хронограммы вращения. Математическое моделирование подобного дефекта не представляет сложности и реализуется внесением соответствующих изменений в модель.

Определение оптимального критерия наличия пропусков зажигания в работе ДВС. В дальнейших исследованиях на экспериментальном стенде проанализируем и рассчитаем оптимальный критерий, согласно которому пропуск зажигания будет определяться с наибольшей точностью. Для обнаружения дефекта исследуем амплитудные значения углового ускорения коленчатого вала. За основу примем диаграмму исправно работающего двигателя (рис. 9).

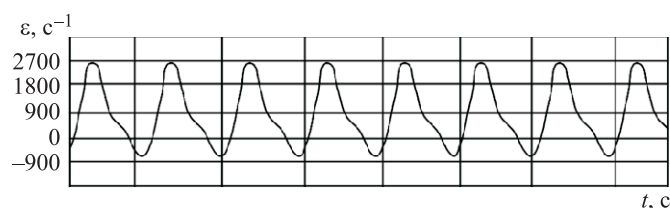


Рис. 9. Диаграмма углового ускорения коленчатого вала

Кривая на рис. 9 имеет синусоидальный периодический характер, поэтому в качестве ее математической интерпретации можно использовать функцию синуса. В теоретической кривой вместо углового ускорения коленчатого вала примем условные единицы от +1 до -1. Математическая модель диаграммы углового ускорения коленчатого вала ДВС представлена на рис. 10.

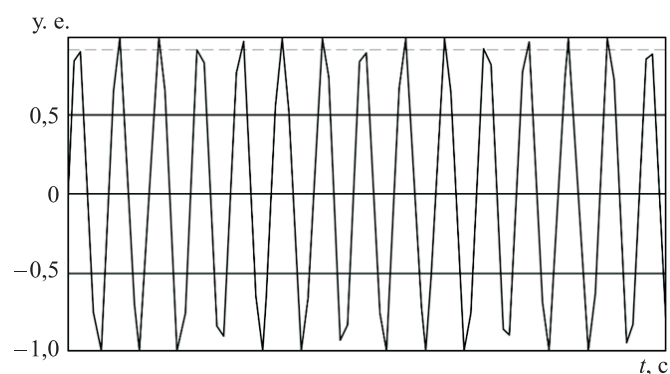


Рис. 10. Модель диаграммы углового ускорения коленчатого вала без дефекта

Затем был смоделирован пропуск зажигания в одном из цилиндров (рис. 11). Амплитудные значения углового ускорения коленчатого вала на определенных пиках должны снижаться, так как зажигание в одном из цилиндров отсутствует.

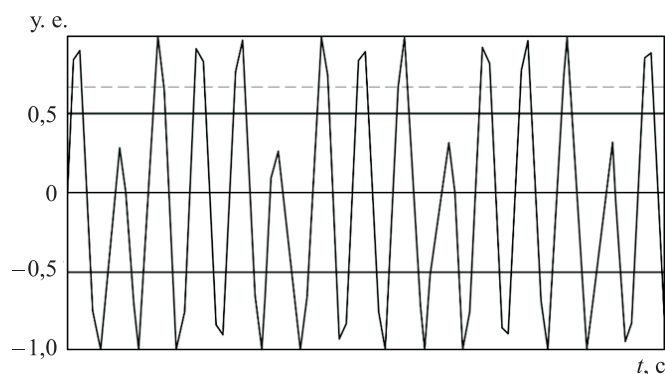


Рис. 11. Модель диаграммы углового ускорения коленчатого вала с дефектом

Для сравнения диаграмм, приведенных на рис. 10 и 11, определим основные критерии отклонения амплитудных значений. Для применения стандартных методов обработки данных проверим принадлежность результатов измерений нормальному закону распределения по ГОСТ Р 8.736–2011.

Считают, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|x_i - \bar{x}|$ превысили значение, вычисляемое как произведение $z_{p/2} \cdot S$, где $z_{p/2}$ — верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа; S — среднее квадратическое отклонение. При числе измерений $n = 16$ принимаем $m = 1$. По результатам расчета ни одна из разностей не превысила соответствующей величины $z_{p/2} \cdot S$. Следовательно, результаты измерений принадлежат нормальному закону распределения.

Для сравнения кривых углового ускорения коленчатого вала оценим измеряемые величины по основным критериям:

среднее арифметическое значение результатов измерения

$$\bar{x}_{\text{без дефекта}} = 0,9198;$$

$$\bar{x}_{\text{с дефектом}} = 0,7631;$$

среднее квадратическое отклонение S группы

$$S_{\text{без дефекта}} = 0,0558;$$

$$S_{\text{с дефектом}} = 0,3445.$$

Процентное отношение СКО диаграмм характеристик коленчатого вала с дефектом и без дефекта в 7 раз выше, чем процентное отношение математического ожидания. Следовательно, среднее квадратическое отклонение является более информативным параметром.

Заключение. В рассмотренной работе предложено применять фазохронометрический метод для диагностики ДВС, так как по сравнению с существующими этот метод имеет наибольшую точность, надежность и средство измерения связано с двигателем напрямую, т. е. выполняются прямые измерения, а не косвенные, что снижает погрешность. Техническая реализация предложенного метода проведена на испытательном стенде, выявлен критерий, при котором пропуск зажигания определяется наиболее точно, что позволяет в будущем ввести данный критерий в программу диагностирования в автоматическом режиме.

Следующий шаг — сравнение полученных экспериментальных данных с математической моделью, т. е. проведение верификации. Поскольку датчик соединен с коленчатым валом двигателя не напрямую, а с помощью муфт, может возникать методическая погрешность измерения. В случае расхождения результатов математического моделирования и эксперимента в пределах этой погрешности считаем, что верификация пройдена и модель является адекватной. На основе этой модели можно смоделировать различные дефекты, такие как пропуск зажигания в цилиндре, растяжение цепи газораспределительного механизма и прочие.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
№ 0705-2020-0046 в сфере научной деятельности.*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чувинова В.В., Тепляков Е.А. Анализ современных методов диагностики двигателя внутреннего сгорания. *Материалы Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации»*. Омск, Издательство СибАДИ, 2016, с. 729–733.
- [2] Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. *Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов*. Москва, Издательство ЮУрГУ, 2005, 403 с.
- [3] Yan H., Yi X., Mu H.N., Wen Y., Peng H., Yang Y. Misfire detection on internal combustion engine based on fluctuation of exhaust gas temperature. *2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICPHM.2018.8448820
- [4] Просвилов Ю.Е., Басов С.А. Надежность работы и методы диагностики цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания. *Вестник РГУПС*, 2010, № 2, с. 40–45.
- [5] Аталиков А.Н. Анализ методов диагностирования ЦПГ для оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания. *Международный студенческий научный вестник*, 2017, № 4, с. 471–475.

- [6] Srata L., Farres S., Fethi F. Engine oil authentication using near infrared spectroscopy and chemometrics methods. *Vibrational spectroscopy*, 2019, no. 100, pp. 99–106.
- [7] Galiullin L.A., Valiev R.A. Developing a technical diagnostic systems for internal combustion engines. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, no. 641, pp. 797–805.
- [8] Гассельберг В.С., Запорожец А.В. Диагностика двигателей внутреннего сгорания по виброакустическим параметрам. *Вестник АГТУ*, 2007, № 2 (37), с. 72–74.
- [9] Kiselev M.I., Pronyakin V.I. A Phase method of investigating cyclic machines and mechanisms based on a chronometric approach. *Measurement Techniques*, 2001, vol. 44 (9), pp. 898–902.
- [10] Kiselev M.I., Pronyakin V.I., Komshin A.S., Korsunov O.N., Nemichev M.U., Multifactorial mathematical models of the functioning of gas-turbine aviation engines in a phase-chronometric representation. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54 (9), pp. 1081–1090.
- [11] ЛИР-158А инкрементный угловой энкодер. *СКБ ИС*. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158a> (дата обращения: 05.02.21).
- [12] Болдасов Д.Д., Лазарев Н.Ю., Сырицкий А.Б. Измерительный блок фазохронометрической системы мониторинга процесса токарной обработки. *Приборы*, 2015, № 10, с. 6–9.
- [13] Сырицкий А.Б., Потапов К.Г., Лазарев Н.Ю., Болдасов Д.Д., Комшин А.С. Апробация фазохронометрической системы мониторинга токарной обработки в промышленных условиях. *Станкоинструмент*, 2019, № 4, с. 74–79.
- [14] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и машин: курс лекций*. Москва, Юрайт, 2010, 351 с.
- [15] Причины пропуска зажигания в цилиндрах. *Автожурнал КарлЛазарт*. URL: <https://carlasart.ru/elektrooborudovanie/prichiny-propuska-zazhiganiya-v-tsilindrah.html> (дата обращения: 15.11.20).
- [16] Бабошин А.А., Малышев В.С. Разработка методики комплексного диагностирования двигателей и устройства для оценки технического состояния поршневой части ДВС. *Вестник МГТУ*, 2010, № 4/2, с. 925–930.
- [17] Нечаев В.В., Головкин К.В., Тарасенко А.А., Носков С.В. Результаты исследования метода диагностирования цилиндропоршневой группы двигателя. *Инженерный вестник Дона*, 2018, № 3, с. 1–14.

Статья поступила в редакцию 09.09.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Плаксина Е.Т., Сырицкий А.Б., Комшин А.С. Применение прецизионных хронометрических технологий для мониторинга отклонений в работе двигателей внутреннего сгорания. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-11-2126>



Плаксина Екатерина Тимофеевна — студент второго курса магистратуры кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: фазохронометрические измерительных технологий, диагностика ДВС. e-mail: Plaksina941@mail.ru



Сырицкий Антони Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы в области нанометрологии, а также фазохронометрических измерительных технологий. Автор более 50 научных работ.
e-mail: syritsky@yandex.ru



Комшин Александр Сергеевич — д-р техн. наук, доцент кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы в области фазохронометрических измерительных технологий. Автор более 50 научных работ. e-mail: komshin_as@mail.ru

Application of precision chronometric technologies for monitoring deviations in the internal combustion engine operation

© E.T. Plaksina, A.B. Syritsky, A.S. Komshin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers the main methods of internal combustion engine diagnostics. A method based on measuring the time intervals between the phases of the working cycle of the mechanism is described. An algorithm for measuring the time intervals from the formulation of the problem to the proof of the efficiency of this method on an internal combustion engine has been determined. The installation of the angle sensor on the crankshaft of the experimental bench engine VAZ 21126 is shown. The basis for the construction of a mathematical model of the crankshaft is presented and the main factors influencing its movement are identified. A criterion has been established according to which the misfire is determined most accurately. The results obtained can be used for developing diagnostic systems for internal combustion engines, as well as engines operating in extreme conditions, for example, beyond the Arctic Circle, on ships, etc.

Keywords: *internal combustion engine, main diagnostic methods, measurement of time intervals, phase timing, misfire, mathematical model, internal combustion engine crankshaft*

The work was performed within the framework of the state assignment No. 0705-2020-0046 in the field of research activity.

REFERENCES

- [1] Chuvikova V.V., Teplyakov E.A. Analiz sovremennykh metodov diagnostiki dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Analysis of modern diagnostic methods for an internal combustion engine]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Arkhitekturno-stroitelnyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, novatsii»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Architectural Construction and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations”]. Omsk, Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobilno-dorozhnyy universitet Publ., 2016, pp. 729–733.
- [2] Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klementyev V.V. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovaniye i raschot protsessov* [Internal combustion engines: process theory, modeling and calculation]. Moscow, Yuzhno-Uralskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2005, 403 p.
- [3] Hong-Mei Yan, Hui-Na Mu, Hou Peng. Misfire Detection on Internal Combustion Engine Based on Fluctuation of Exhaust Gas Temperature. *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 2018. DOI: 10.1109/ICPHM.2018.8448820
- [4] Prosvirov Yu.E., Basov S.A. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya — Vestnik of Rostov State Transport University*, 2010, no. 2, pp. 40–45.
- [5] Atalikov A.N. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik — International student scientific bulletin*, 2017, no. 4, pp. 471–475.
- [6] Srata L., Farres S., Fethi F. *Vibrational spectroscopy*, 2019, no. 100, pp. 99–106.

- [7] Galiullin L.A., Valiev R.A. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, no. 641, pp. 797–805.
- [8] Gasselberg V.S., Zaporozhets A.V. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2007, no. 2 (37), pp. 72–74.
- [9] Kiselev M.I., Pronyakin V.I. *Measurement Techniques*, 2001, vol. 44 (9), pp. 898–902.
- [10] Kiselev M.I., Pronyakin V.I., Komshin A.S., Korsunov O.N., Nemichev M.U. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54 (9), pp. 1081–1090.
- [11] *LIR-158A inkrementnyy uglovoy enkoder* [LIR-158A incremental angle encoder]. Spetsialnoye Konstruktorskoe Buro Izmeritelnykh Sistem (SKB IS) [Special design bureau of measuring systems (SDB MS)]. Available at: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158a> (accessed February 5, 2021).
- [12] Boldasov D.D., Lazarev N.Yu., Syritskiy A.B. *Pribory — Instruments*, 2015, no. 10, pp. 6–9.
- [13] Syritskiy A.B., Potapov K.G., Lazarev N.Yu., Boldasov D.D., Komshin A.S. *Stankoinstrument (Machine tool)*, 2019, no. 4, pp. 74–79.
- [14] Timofeyev G.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin: kurs lektsiy* [Theory of mechanisms and machines. Course of lectures]. Moscow, Yurayt Publ., 2010, 351 p.
- [15] Prichiny propuska zazhiganiya v tsilindrakh [Causes of misfire in cylinders]. *Za rulem. Elektronnyy zhurnal* (Behind the wheel. Electronic magazine). Available at: <https://carlasart.ru/elektrooborudovanie/prichiny-propuska-zazhiganiya-v-tsilindrakh.html>. (accessed November 15, 2020).
- [16] Baboshin A.A., Malyshev V.S. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Vestnik of MSTU*, 2010, vol. 13, no. 4, pp. 925–930.
- [17] Nechayev V.V., Golovko K.V., Tarasenko A.A., Noskov S.V. *Inzhenerny vestnik Dona — Engineering Journal of Don*, 2018, no. 3, pp. 1–14.

Plaksina E.T., graduate student, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: phase-chronometric measuring technologies, ICE diagnostics. e-mail: Plaksina941@mail.ru

Syritskiy A.B., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: nanometrology, phase-chronometric measuring technologies. e-mail: syritsky@yandex.ru

Komshin A.S., Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: nanometrology, phase-chronometric measuring technologies. e-mail: komshin_as@mail.ru