

Научная статья
УДК 629.331

Мобильный диагностический комплекс для анализа работы ДВС

Антон Вячеславович Александров¹, Иван Алексеевич Долгов²,
Кирилл Михайлович Сидоров³

^{1,2,3}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

^{1,2,3}madilab@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются функциональные возможности мобильного диагностического комплекса – оборудования, позволяющего детально анализировать работу автомобильного двигателя на основании осциллограмм моторного жгута и сигналов дополнительных датчиков. Это оборудование дополняет возможности сканера или другого устройства, работающего с контроллером ЭСУД по цифровой линии связи. Удобство подключения, дружелюбный интерфейс и большое количество запрашиваемых параметров в большинстве случаев позволяет решать поставленные задачи исключительно при помощи оборудования, подключенного к диагностическому разъему автомобиля. Даже при проведении работ с представляемым диагностическим комплексом, когда возможностей сканера недостаточно, часть информации от автомобиля целесообразно получать по цифровой линии связи. Существенно расширяют возможности диагностического комплекса дополнительные датчики – давления в цилиндре, совмещенные со свечами зажигания или накаливания, и акселерометры. Программное обеспечение комплекса позволяет при совместной обработке сигнала штатного ДПКВ и индикаторных диаграмм рассчитывать индикаторный крутящий момент и индикаторную работу. В статье также приводятся примеры использования диагностического комплекса при выполнении углубленной диагностики и проведении исследовательских работ ДВС.

Ключевые слова: диагностический комплекс, индицирование, система сбора и обработки данных, осциллограммы линий моторного жгута, датчик-свеча.

Для цитирования: Александров А.В., Долгов И.А., Сидоров К.М. Мобильный диагностический комплекс для анализа работы ДВС // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 1 (43).

Original article

A mobile diagnostic system for analyzing the operation of internal combustion engines

Anton V. Aleksandrov¹, Ivan A. Dolgov², Kirill M. Sidorov³

^{1,2,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

^{1,2,3}madilab@mail.ru

Abstract. The article discusses the functionality of a mobile diagnostic complex, an equipment that allows detailed analysis of the operation of an automobile engine based on the oscillograms of the engine harness and signals from additional sensors. This equipment complements the capabilities of a scanner or other device that works with an ECM controller over a digital communication line. The convenience of connection, user-friendly interface and a large number of requested parameters in most cases allows you to solve tasks exclusively with the help of equipment connected to the diagnostic connector of the car. Even when working with the presented diagnostic complex, when the capabilities of the scanner are insufficient, it is advisable to receive some of the information from the car via a digital communication line. Additional pressure sensors in the cylinder, combined with spark plugs or incandescent lights, and accelerometers significantly expand the capabilities of the diagnostic complex. The software of the complex makes it possible to calculate the indicator torque and indicator operation when processing the signal of the standard DPKV and indicator diagrams together. The article also provides examples of the use of the diagnostic complex when performing in-depth diagnostics and conducting research work on internal combustion engines.

Keywords: diagnostic complex, indexing, data collection and processing system, oscillograms of motor harness lines, spark plug sensor.

For citation: Aleksandrov A.V., Dolgov I.A., Sidorov K.M. A mobile diagnostic system for analyzing the operation of internal combustion engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. No. 1 (43).

Введение

Современный автомобиль отличается большим количеством подсистем, отвечающих за реализацию различных функций – управление двигателем, коробкой передач, динамической стабилизацией, светом, климатом и т.д. Микроконтроллеры этих подсистем, объединены шинами

обмена данными, поэтому анализ их работы и диагностирование производится при помощи сканера, подключаемого к диагностическому разъему автомобиля. Таким образом оператор получает доступ практически ко всем данным, отражающих работу автомобиля. Но несмотря на подавляющую значимость информации, получаемой через диагностический разъем с помощью оборудования, которое можно назвать «оборудование высокого уровня» или «основное диагностическое оборудование», полностью отказаться от анализа сигналов в проводке автомобиля невозможно. Такой анализ выполняется при помощи «оборудования низкого уровня» - «дополнительного диагностического оборудования». Наиболее распространенным вариантом такого оборудования является осциллограф. Представляемый мобильный комплекс для анализа работы ДВС также является оборудованием низкого уровня, но значительно превосходящим по возможностям осциллограф.

Описание мобильного диагностического комплекса

Мобильный диагностический комплекс – далее МДК – для анализа работы ДВС разрабатывается в ПЛТД МАДИ с начала нулевых годов [1]. Его назначение – анализ работы различных электронных систем автомобиля и не только автомобиля, но, так как эта разработка велась группой двигателистов, то вопросы анализа работы и диагностирования ДВС раскрыты более полно. Мотивом для разработки МДК явилась необходимость диагностирования автомобилей с такими неисправностями системы управления двигателем, для которых недостаточно возможностей сканера и осциллографа. Сканер актуален для диагностирования прежде всего тех неисправностей, которые обнаруживает система самодиагностики. В современном автомобиле самодиагностика по математическим моделям контролирует взаимосвязанность показаний всех датчиков, и в случае их выхода за рамки модели генерируется код неисправности. Если неисправность не может быть обнаружена системой самодиагностики или самодиагностика не может определить причину возникновения неисправности, то необходима

углубленная диагностика с использованием дополнительного оборудования. В отличие от осциллографа, МДК не только визуализирует осциллограммы линий моторного жгута, но и формирует графики, которые являются результатом математической обработки зарегистрированных сигналов. Например, шкалу угловых отметок, графики частоты вращения и ускорения коленчатого вала, рассчитываемую МДК на основании сигнала ДПКВ, невозможно получить при помощи осциллографа.

В основе аппаратной части комплекса использован модуль сбора данных L-Card E-502, подключаемый через интерфейс USB 2.0 к ПК (notebook). Модуль E-502 установлен в одном корпусе с платами согласования аналоговых и двухуровневых сигналов и блоком питания. Комплекс имеет 16 каналов для оцифровывания аналоговых сигналов, изменение напряжения которых целесообразно отслеживать во всем диапазоне их изменения и 16 каналов для регистрации сигналов, для которых информативны только моменты изменения уровня напряжения - высокий или низкий - и их продолжительность. МДК предназначен для регистрации параметров работы (сигналы ДПКВ и ДППВ, сигналы датчиков давления в цилиндрах, сигналы, управления катушками зажигания, топливными форсунками, клапанами управления VANOS и THVD, сигналы ДПДЗ, ДАД, ДМРВ и давления в топливной рампе) бензиновых и дизельных ДВС.

Программная часть комплекса, как уже отмечалось, разрабатывалась с учетом специфики сигналов автомобильных ДВС. Поэтому кроме визуализации, имеются различные алгоритмы совместной обработки зарегистрированных данных. В результате обработки сигнала датчика положения коленчатого вала формируется шкала угловых отметок с шагом 6° ПКВ и график угловой скорости с тем же шагом. При обработке сигналов первичной цепи катушек зажигания, с учетом ранее полученной шкалы угловых отметок, формируется график угла опережения зажигания (УОЗ). При обработке сигналов управления форсунками формируется график цикловой подачи топлива. Чтобы давление в цилиндре можно было

регистрировать без дополнительной доработки двигателя, датчики давления совмещают со свечами накаливания (рис. 1, а) или свечами зажигания (рис. 1, б). На миниатюрные датчики давления, используемые при углубленной диагностике, группой разработчиков МДК был получен патент на изобретение [2].



Рис. 1. Миниатюрный датчик давления, разработанный в МАДИ;
а – в корпусе свечи накаливания дизеля, б – в корпусе свечи зажигания

При проведении индицирования ДВС, для обработки индикаторных диаграмм на основании шкалы угловых отметок, имеющей шаг 6° , строится шкала угловых отметок с шагом $0,1^\circ$ ПКВ. Затем выполняется совмещение отметки ВМТ с максимумом давления в цилиндре в цикле без воспламенения. На основании этой шкалы рассчитываются дифференцируемые скорость и ускорение коленчатого вала. После этого формируется таблица, где каждому угловому промежутку $0,1^\circ$ ПКВ ставится в соответствие значения скорости, углового ускорения и давления. Используя в качестве констант геометрические размеры (диаметр цилиндра, ход поршня, длину шатуна) и массы деталей (масса поршня, масса шатуна, момент инерции коленчатого вала) комплекс позволяет составлять выражения для расчета сил и моментов, действующих на коленчатый вал, индикаторной работы и т.д. Критерием точности выполненных расчетов является сходимость расчета крутящего момента от газовых сил и ускорения

коленчатого вала. Все результаты расчетов представлены как графически, так и в виде таблицы.

Программное обеспечение комплекса позволяет формировать различные алгоритмы обработки зарегистрированных массивов данных – фильтрацию, умножение, интегрирование, дифференцирование, возможна их совместная обработка – сложение, вычитание, умножение. Также имеются широкие возможности по визуализации – совместный вывод на экран данных, зарегистрированных в различное время и от различных объектов. При этом для удобства сравнения графики могут масштабироваться так, что совмещаются шкалы угловых отметок.

Актуальность использования МДК при диагностике

С какими неисправностями, для диагностирования которых недостаточно сканера, приходится сталкиваться инженеру-диагносту в процессе работы? Например, в двигателе прослушивается какой-то стук, но даже опытный моторист иногда не может однозначно его локализовать и определить причину его возникновения. Программа самодиагностики большинства ДВС не имеет алгоритма диагностирования стуков. Помочь в локализации стука может информация о моменте его генерации и периодичности или других условий, связанных с его появлением. Сам стук может регистрироваться датчиком детонации или дополнительным акселерометром, установленным в точке, где этот стук лучше всего прослушивается. Для синхронизации стука с рабочими процессами требуется одновременно со стуком регистрировать сигнал ДПКВ и сигнал, позволяющий определить, когда в каком цилиндре протекает рабочий процесс (сигнал ДПРВ или сигнал зажигания в первом цилиндре). Таким образом удастся определить, например, неисправный гидравлический толкатель или дефекты моторной цепи.

Если есть предположение, что стук вызван детонационным протеканием рабочего процесса, или имеются предположения о других его нарушениях, то для анализа работы ДВС целесообразно использовать

датчики давления в цилиндре двигателя. При регистрации осциллограмм, одновременно регистрируя параметры, влияющие на протекание рабочего процесса – прежде всего управляющие импульсы катушек зажигания и топливных форсунок.

Одной из наиболее распространенных неисправностей ДВС является регистрация пропусков воспламенения в каком-либо цилиндре. Чаще всего такое решение принимается системой самодиагностики на основании снижения угловой скорости коленчатого вала на участке рабочего хода в соответствующем цилиндре. При выполнении диагностики требуется выяснить причину регистрации таких пропусков, а иногда это бывает достаточно сложная задача. В ряде случаев для выяснения причин также приходится использовать датчики давления в цилиндрах двигателя сопоставляя протекание рабочего процесса и изменение угловой скорости коленчатого вала.

Краткий обзор задач, решаемых в ходе углубленной диагностики ДВС, дает представление об основных требованиях к используемой при этом аппаратуре – требуется регистрация большого количества каналов с возможностью их последующей совместной обработки. Электрические сигналы, циркулирующие в линиях моторного жгута, можно разделить на непрерывные, анализ которых является актуальным на протяжении всего регистрируемого интервала работы ДВС и дискретные, при анализе которых информативен только момент изменения уровня сигнала. Непрерывное оцифровывание напряжений на линиях моторного жгута требует больших ресурсов, поэтому дискретные сигналы – прежде всего различные управляющие ШИМ-сигналы – целесообразно регистрировать при помощи двухуровневых АЦП, это многократно сокращает объем получаемого при регистрации файла данных.

Обработка зарегистрированных сигналов в ПО комплекса

На основании совместной обработки зарегистрированных сигналов ДПКВ и ДПРВ (или другого фазирующего сигнала) строится шкала угловых

отметок, графики угловой скорости и углового ускорения коленчатого вала. Возможность анализа работы двигателя не только в функции времени, но и в функции угла поворота коленчатого вала принципиально отличают возможности МДК от осциллографа.

При обработке непрерывных сигналов выполняется их нормировка и перевод их из отсчетов АЦП в соответствующие физические величины – применительно к датчикам давления в цилиндрах – в бары. Для этих преобразований в программной среде комплекса используется опция «Алгоритмы». В ней, применяя различные, предоставляемые разработчиком комплекса, относящиеся к графикам операнды, например, сложить, вычесть, умножить, сгладить и т.д., пользователь для каждого конкретного случая составляет алгоритм обработки зарегистрированных сигналов. Такие алгоритмы можно объединять в макросы, сохранять и использовать повторно.

Для расчета крутящего момента от газовых сил и индикаторной работы цикла, помимо зарегистрированных индикаторных диаграмм требуется задать геометрические параметры двигателя – диаметр цилиндра, ход поршня и т.д. Это выполняется в опции «Расчет». В ней имеется возможность написания математических формул для расчета различных параметров работы ДВС как по отдельным цилиндрам, так и суммарно.

Данные, полученные в опции «Расчет», можно использовать в программном модуле «DataConvertor». В этом модуле данные, полученные в функции времени, анализируются в функции работы ДВС или движения автомобиля. Результат аппроксимации этих данных – полиномом – можно использовать в опции «Расчет» для нахождения других параметров.

Как уже отмечалось, при работе с автомобилем большой объем информации можно получать через диагностический разъем. Существенным недостатком этой информации является низкая частота обновления данных – они передаются с интервалом 50...70 м/с. Преимущество этих данных – то, что они поступают в нормированном виде. Давление, регистрируемое

штатными датчиками системы управления, имеет размерность бары, расход воздуха – кг/ч, температура – градусы. В случае одновременной регистрации такой информации с помощью МДК и через диагностический разъем, высокая скорость обновления данных сочетается с их нормированным представлением. Если высокая скорость обновления не требуется, программа МДК позволяет синхронизировать и использовать совместно в дальнейших расчетах данные, получаемые через диагностический разъем, с данными регистрации сигналов моторного жгута.

Наличие гибкого программного обеспечения и дополнительных датчиков – давления в цилиндрах, акселерометров – позволяет использовать МДК не только для диагностирования неисправных ДВС, но и в процессе обучения студентов, и при проведении различных научных исследований.

Примеры использования МДК

На рисунке 2 представлен МДК подключенный к автомобилю.



Рис. 2. подключение МДК к автомобилю

После проверки всех подключений – адекватности отображения сигналов от всех выбранных для регистрации линий моторного жгута и датчиков давления в цилиндрах – МДК устанавливается в салон автомобиля для выполнения тестовой поездки, предназначенной для проверки адекватности работы системы управления и реакции ДВС на эти управляющие воздействия [3]. На рисунке 3 представлен фрагмент работы двигателя, позволяющий проанализировать действия системы управления двигателем (СУ ДВС) в процессе переключения передачи.

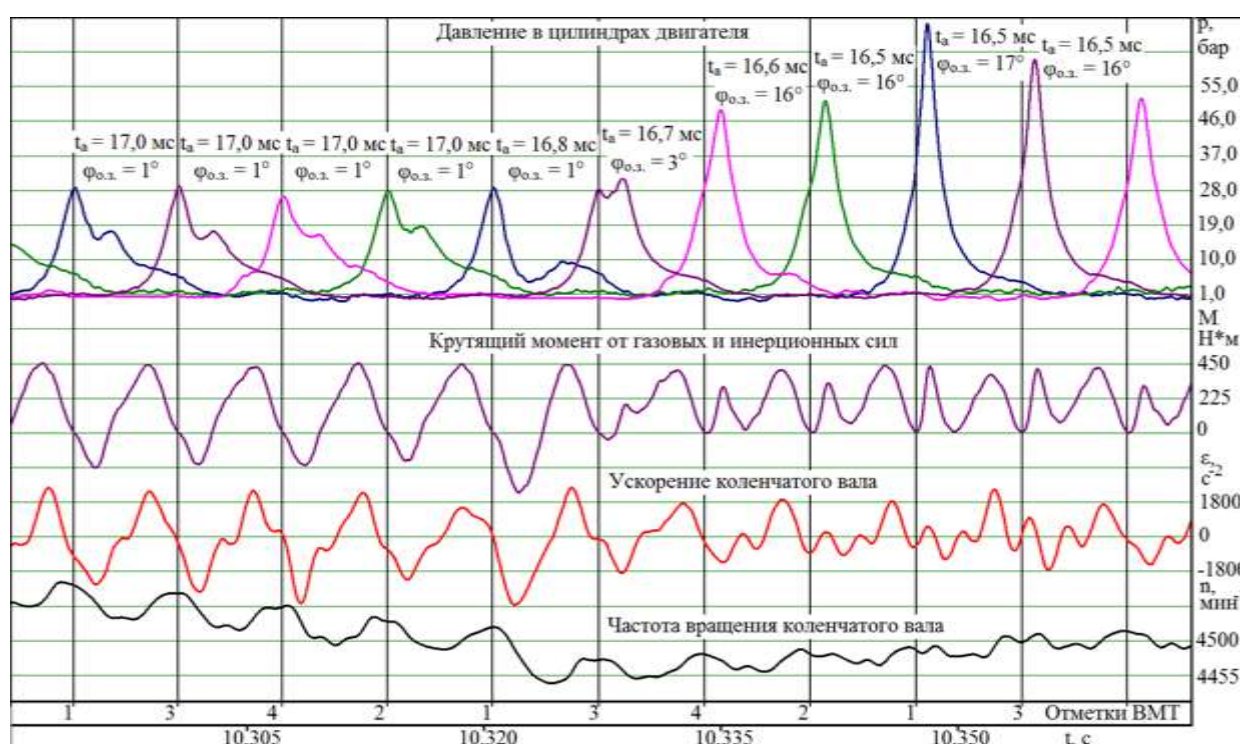


Рис. 3. Действия СУ ДВС при переключении передачи АКП

При переключении на повышенную передачу частота вращения коленчатого вала, а, следовательно, и кинетическая энергия связанных с ним деталей, уменьшается, и происходит это за счет ее передачи через АКП на колеса автомобиля. Чтобы избежать чрезмерных нагрузок в АКП, СУ ДВС снижает генерируемый крутящий момент, в данном случае, за счет уменьшения УОЗ. Как только процесс переключения завершился, УОЗ возвращается к оптимальному значению и генерируемый двигателем

крутящий момент возрастает. На основании рассчитанного замедления коленчатого вала, а также известного, или определенного экспериментально момента инерции вращающихся деталей можно определить дополнительный крутящий момент, передающийся на АКП при переключении передачи. Регистрация процесса переключения передач позволяет проверить адекватность работы контроллеров ЭСУД и АКП.

На рисунке 4 представлены индикаторные диаграммы дизельного двигателя BMW N57, зарегистрированные в 3 и 4 цилиндрах при выполнении тестовой поездки. Поводом для регистрации индикаторных диаграмм (далее ИД) послужила жесткая работа дизеля, наблюдаемая на низкой частоте вращения – до 1300 мин^{-1} и малой нагрузке – до 30%. На этом режиме отчетливо прослушивался звон, вызванный жестким протеканием рабочего процесса в одном цилиндре. Для выяснения, в каком цилиндре это происходит, была выполнена тестовая поездка с акселерометром, закрепленным на блоке цилиндров. По результатам этой поездки выяснилось, что при рабочем процессе в 4 цилиндре сигнал акселерометра имеет значительно большую амплитуду, чем в других цилиндрах. После этого в 4 и 3 цилиндры были установлены датчики давления и выполнена еще одна тестовая поездка. При этом также регистрировались управляющие импульсы топливных форсунок. На основании сопоставления ИД в 4 цилиндре с ИД в 3 (на рисунке они совмещены, это демонстрирует одну из возможностей ПО МДК по работе с зарегистрированными сигналами) выяснилось, что период задержки воспламенения в 4 цилиндре на несколько градусов больше, чем в 3. В сочетании с большей основной цикловой подачей топлива, которую формирует ЭБУ для обеспечения одинаковой эффективности работы всех цилиндров, это приводит к резкому росту давления с последующим характерным звоном. Причиной такого протекания рабочего процесса являлась малая продолжительность пилотных впрыскиваний в 4 цилиндре из-за коррекций, набранных ЭБУ при работе автомобиля с другим двигателем (перед обращением на СТО двигатель в автомобиле был заменен). После

обнуления значений коррекций топливоподачи работа двигателя нормализовалась.

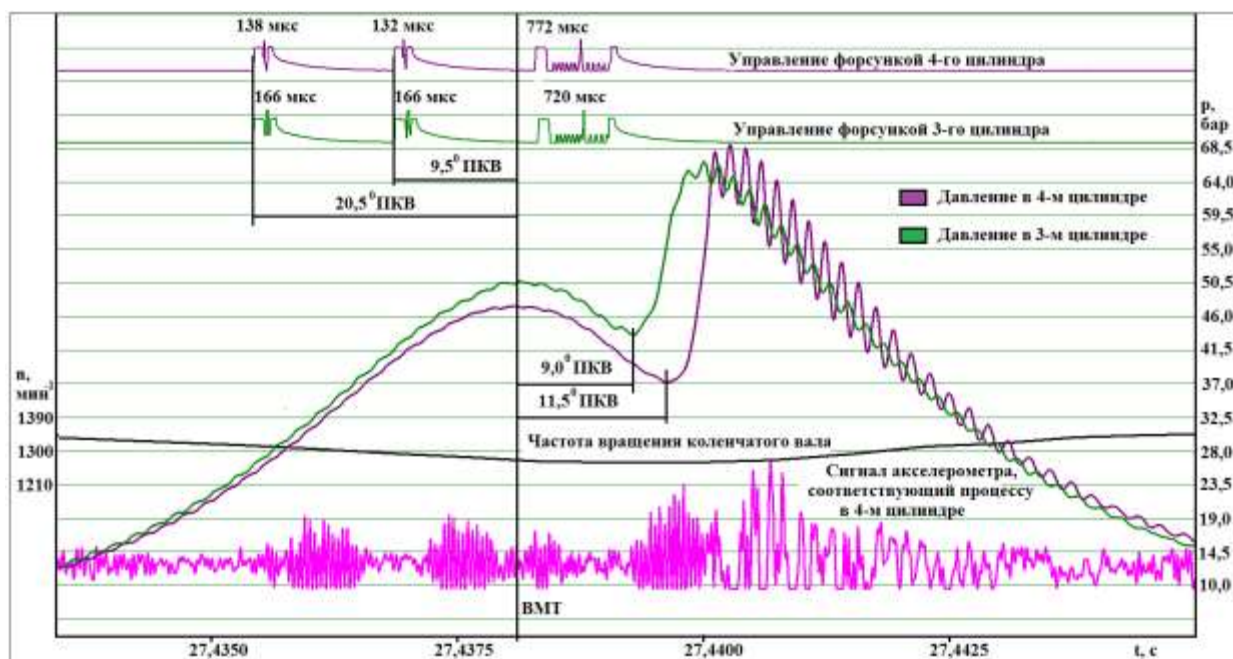


Рис. 4. Сопоставление ИД в 4 и 3 цилиндрах двигателя BMW N57

На рисунке 5 представлены ИД, зарегистрированные во 2 и 5 цилиндрах 6-цилиндрового двигателя BMW M54.

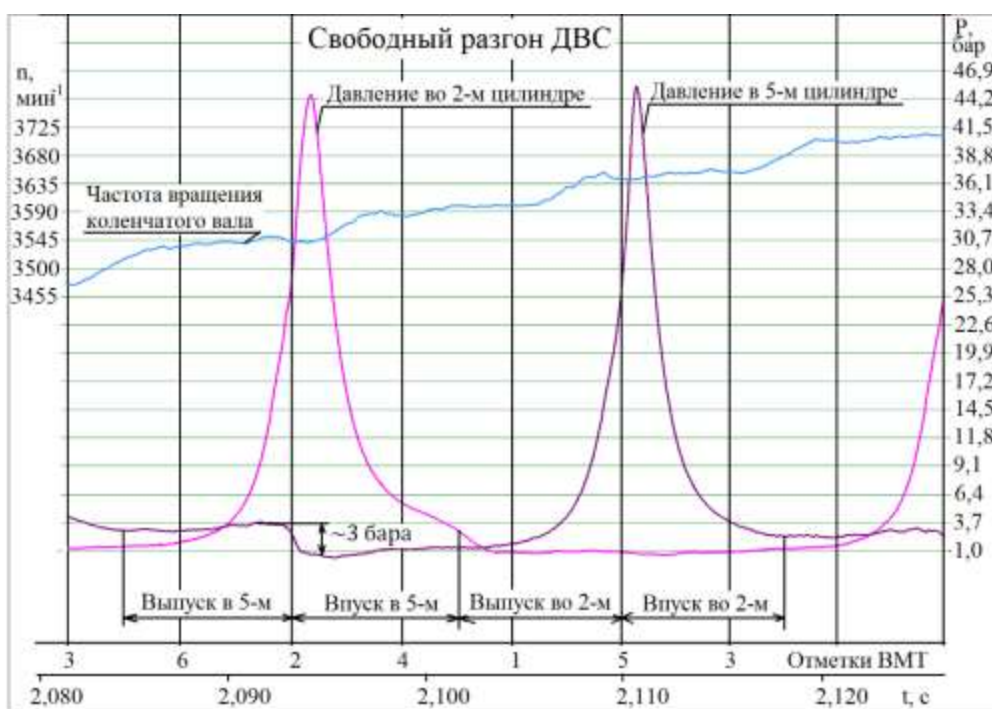


Рис. 5. Нарушение выпуска в 5 цилиндре, вызванное нарушением проходимости каталитического нейтрализатора

Поводом для регистрации ИД послужили пропуски воспламенения в 4, 5 и 6 цилиндрах при работе двигателя с высокой нагрузкой и частотой вращения. При анализе ИД во 2 цилиндре видно, что падение давления после рабочего хода соответствует открытию выпускных клапанов. В 5 цилиндре после рабочего хода давление остается на уровне 2,5...3,0 бара и снижается только при открытии впускных клапанов. Это объясняется нарушением проходимости каталитического нейтрализатора, что и было подтверждено при его замене.

На рисунке 6 приведен фрагмент работы ДВС при переходе от режима ПХХ к полной нагрузке. Часть графиков – результат обработки осциллограмм моторного жгута, часть формируют данные, полученные через диагностический разъем по цифровой шине от контроллера ЭСУД. Это пример совмещения данных, полученных различным способом, что иллюстрирует возможности ПО МДК по импорту сторонних данных.

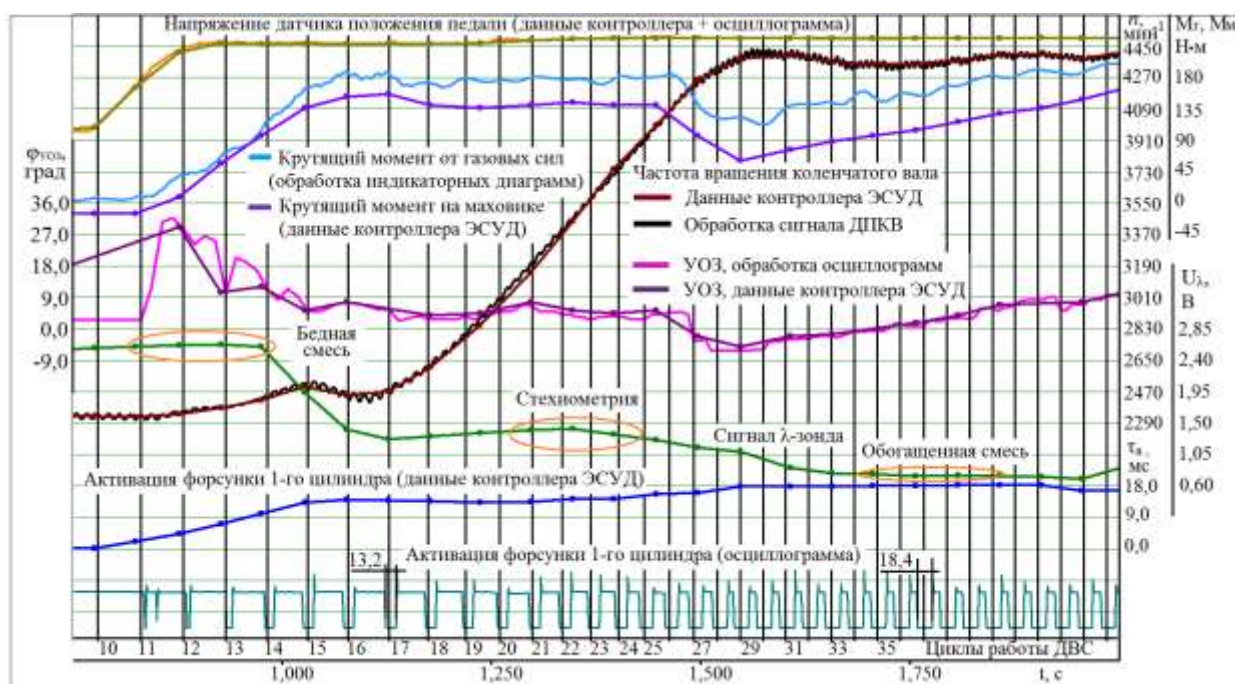


Рис. 6. Иллюстрация совмещения данных, полученных различными способами

На следующих рисунках представлен результат работы программного модуля «DataConvert» при исследовании зависимости момента сил

сопротивления ДВС от частоты вращения и нагрузки. Большой объем (более 40 000 циклов) экспериментальных данных, зарегистрированных в функции времени преобразован в функцию режима работы и аппроксимируется полиномом третьей степени [4]. Сопоставление экспериментальных данных и результата расчета с помощью полинома при различных значениях работы газовых сил представлено на рисунке 7. На рисунке 8 представлено сопоставление изменения кинетической энергии подвижных деталей двигателя в процессе свободного разгона с интегральной работой, момент сил сопротивления в которой рассчитывался с использованием полинома с коэффициентами, ранее определенными на основании статистических данных.

Сходимость результатов, полученных при обработке индикаторных диаграмм, и динамики коленчатого вала позволяет значительно повысить достоверность индицирования. Это особенно актуально при индицировании ДВС в составе транспортного средства, а не на моторном стенде, когда индикаторный крутящий момент двигателя можно определить методом отключения цилиндров [5, 6].

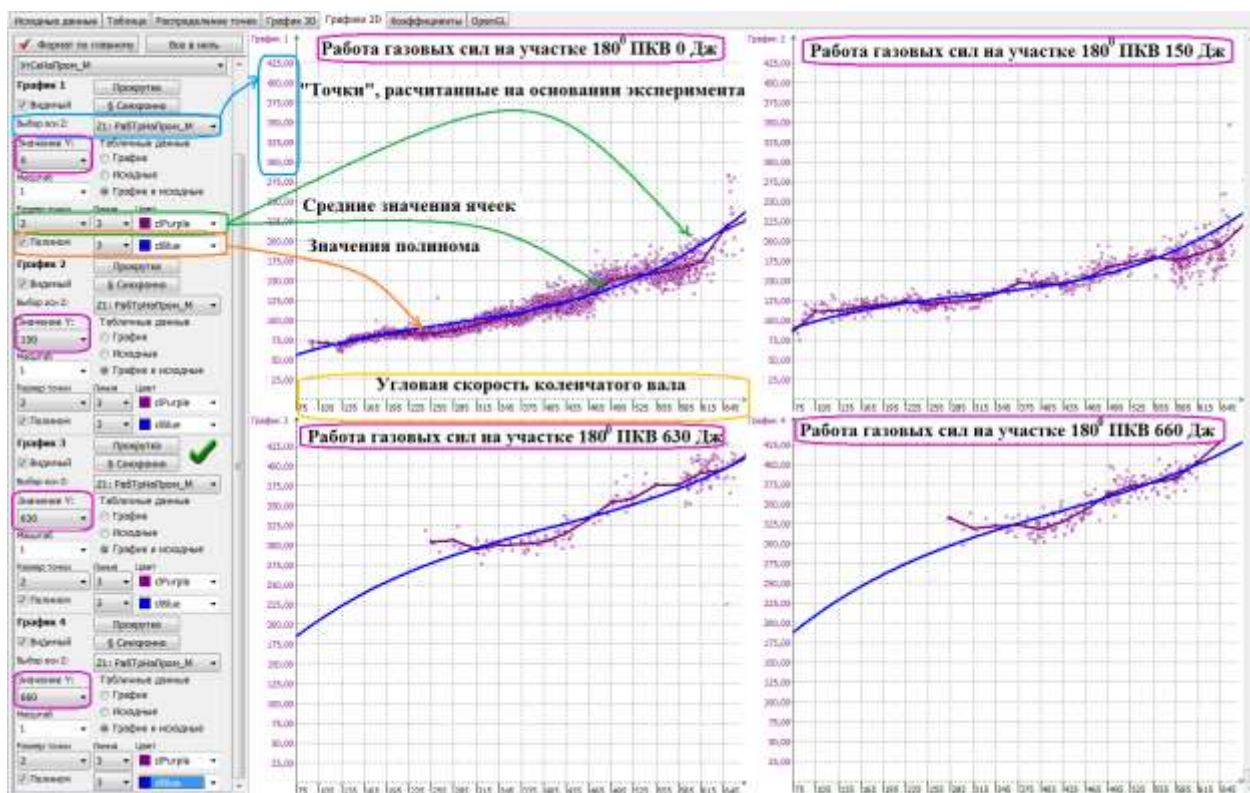


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных данных расчетом, выполненном при помощи полинома

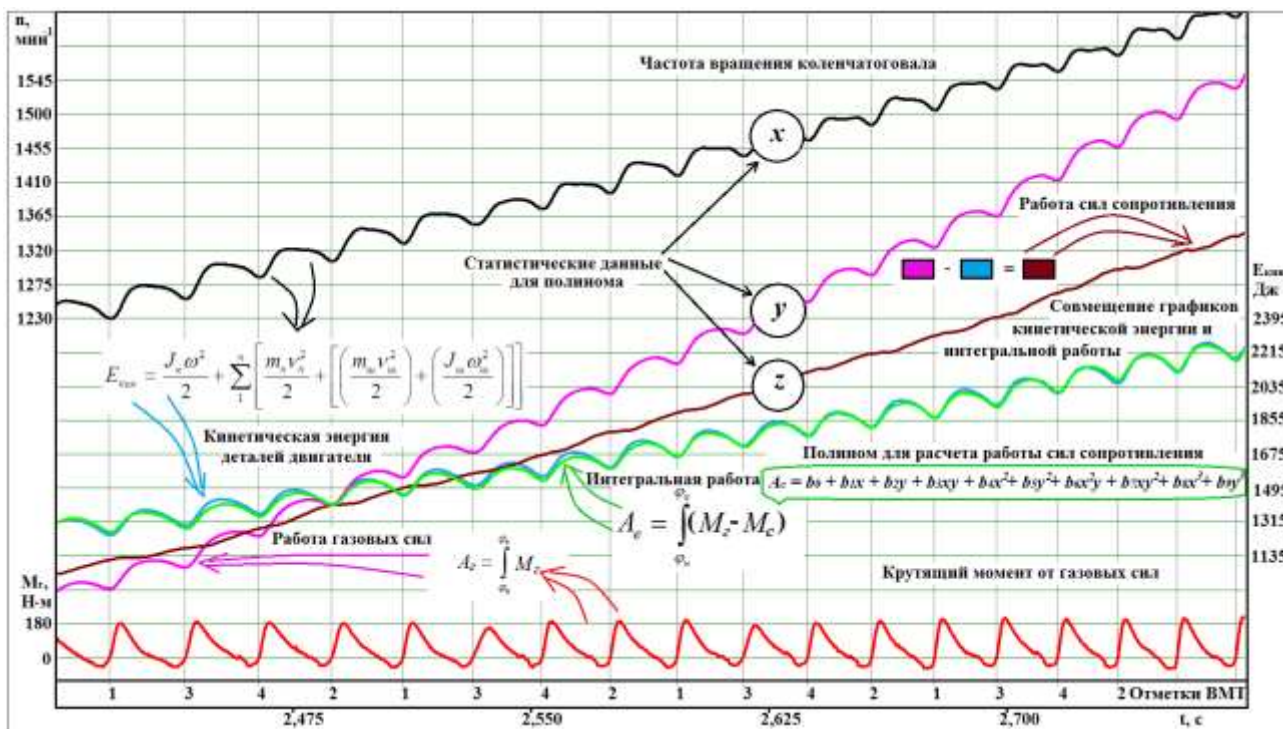


Рис. 8. Сопоставление изменения кинетической энергии подвижных деталей ДВС с интегральной работой, рассчитанной с учетом статистических данных

Выводы

Разрабатываемый в МАДИ мобильный диагностический комплекс обладает широким функционалом. Одним из главных достоинств этого комплекса является возможность анализировать зарегистрированные сигналы не только в функции времени, но и в функции угла поворота коленчатого вала. При использовании совместно с комплексом датчиков давления можно получить информацию о протекании рабочего процесса в цилиндрах двигателя, причем делается это в процессе движения автомобиля. Аналогичные системы сбора и обработки данных, поставляемые такими известными брендами, как Bosch, AVL, Kistler имеют при схожем функционале стоимость, как минимум на порядок более высокую, чем МДК. Этот комплекс может быть востребован в трех основных областях:

- диагностирование сложных неисправностей автомобиля, для которых недостаточно возможностей штатной диагностики;
- проведение лабораторных и практических работ для студентов, повышение квалификации преподавателей специальностей, связанных с двигателями внутреннего сгорания и электрооборудованием автомобиля;
- выполнение научных и исследовательских работ, связанных с изучением различных аспектов работы ДВС и системы управления.

В областях, где требуется сбор и обработка большого количества экспериментальных данных, этот комплекс также может быть востребован.

Чтобы повысить функциональные возможности МДК следует осциллограммы линий моторного жгута и информацию от ЭБУ, получаемую через диагностический разъем, регистрировать синхронно, под управлением ПО комплекса. Сейчас наши специалисты работают над решением этой задачи.

Список источников

1. Долгов, И. А. Мобильный комплекс для регистрации и обработки параметров работы автомобильного двигателя / И. А. Долгов, А. В. Александров // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 2(103). – С. 11-17. – EDN YQFRLV.
2. Долгов, И. А. Актуальность индицирования ДВС / И. А. Долгов, А. В. Александров // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 5(100). – С. 19-23. – EDN YRKCCJ.
3. Александров, А. В. Индицирование двигателя на переходных режимах / А. В. Александров, Т. В. Морозкин // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса : Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 31 января 2019 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2019. – С. 270-282. – EDN QEVTGF.
4. Морозкин, Т.В. Исследование корреляции крутящего момента от газовых сил и динамики вращения коленчатого вала на различных режимах работы ДВС: специальность: 13.04.03: дис. ... магистра / Морозкин Т.В.; МАДИ. – Москва, 2020. – 81 с.
5. Александров, А.В. Повышение достоверности данных, полученных при индицировании ДВС. Часть 1 / А.В. Александров, И.А. Долгов // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – № 3(110). – С. 30-35.
6. Александров, А.В. Повышение достоверности данных, полученных при индицировании ДВС. Часть 2 / А.В. Александров, И.А. Долгов // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – № 5(112). – С. 40-42.

References

1. Alkexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2017, no 2 (103), pp. 11-17.
2. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2016, no.№ 5(100), pp. 19-23.
3. Alexandrov A.V., Morozkin T.V. 8-e Lukaninskie chtenija. Problemy i perspektivy razvitija avtotransportnogo kompleksa. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Moscow, 2019, pp. 270-282.
4. Morozkin T.V. *Issledovanie korrelyacii krutjashhego momenta ot gazovyh sil i dinamiki vrashhenija kolenchatogo vala na razlichnyh rezhimah raboty DVS* (Investigation of the correlation of torque from gas forces and the dynamics of rotation of the crankshaft in various operating modes of the internal combustion engine), Master's thesis, Moscow, MADI, 2020, 81 p.

5. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Journal of Automotive Engineers*, Moscow, 2018, no. 3(110), pp. 30-35.

6. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Journal of Automotive Engineers*, Moscow, 2018, no. 5(112), pp. 40-42.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Александров Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Долгов Иван Алексеевич, канд. техн. наук, инженер, МАДИ.

Сидоров Кирилл Михайлович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Aleksandrov Anton V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Dolgov Ivan A., Candidate of Sciences (Technical), engineer, MADI.

Sidorov Kirill M., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025; одобрена после рецензирования 11.02.2025; принята к публикации 19.03.2025.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 11.02.2025; accepted for publication 19.03.2025.