

УДК 629.331

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

И. А. Долгов, к. т. н. / А. В. Александров, к. т. н.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

ВВЕДЕНИЕ

В статье «Актуальность индицирования ДВС», опубликованной в № 5 за 2016 год, сообщалось, что наше подразделение ведёт работы по созданию комплекса для регистрации и обработки параметров работы ДВС. Так как процесс сгорания представляет особый интерес, в состав комплекса должны входить датчики для индицирования — их разработкой мы сейчас также занимаемся. При подготовке к изданию первой статьи высказывались пожелания подробнее рассказать об оборудовании, которое использовалось для получения материала, и его работе.

Комплекс разрабатывается в проблемной лаборатории транспортных двигателей кафедры теплотехники и автотракторных двигателей МАДИ. Он предназначен для регистрации и обработки сигналов от штатных датчиков и исполнительных органов автомобильного двигателя, а также от дополнительного устанавливаемых датчиков (датчиков давления, акселерометров и т. д.).

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА

В основе аппаратной части комплекса использован компьютер с процессором Intel Core i5, 8 Гб ОЗУ и ёмкостью жёстких дисков 2,2 Тб.

Регистрация сигналов осуществляется тремя модулями, каждый под управлением процессора STM 32F417 с ARM CORTEX M4, работающего на частоте 168 МГц.

Каждый модуль имеет по одной 2-, 7- и 8-канальной 12-разрядной мультиплексорной плате АЦП, работающей на частоте 1,4 МГц, и 22 цифровых входа, работающих на частоте до 20 кГц с разрешением до 0,1 мкс.

Есть возможность установки на каждый модуль четырёх управляющих ключей, работающих с разрешением до 10 мкс.

Связь модулей с компьютером осуществляется по сети Ethernet через встроенный коммутатор со скоростью 1 Гб/сек.

Питание комплекса осуществляется от бортовой сети автомобиля или от внешнего источника питания (12 вольт, 7 ампер).

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ КОМПЛЕКСА И ДАТЧИКА ДЛЯ ИНДИЦИРОВАНИЯ

Следует отметить, что это вторая, мобильная версия диагностического комплекса, которая в опытную эксплуатацию запущена только в 2016 году. Первая версия, разработанная в 2004 году, была стационарной — в слот PCI вставлялась плата АЦП L-Card 783.

Программная часть начала разрабатываться совместно с первой версией комплекса, она позволяет формировать различные алгоритмы обработки зарегистрированных массивов данных: фильтрацию, умножение, интегрирование, дифференцирование; возможна их совместная обработка: сложение, вычитание, умножение.

Также имеются широкие возможности визуализации — совместный вывод на экран данных, зарегистрированных в разное время и от различных объектов. При этом для удобства сравнения графики могут масштабироваться так, что совмещаются шкалы угловых отметок.

Комплекс разрабатывался с учётом специфики сигналов автомобильных ДВС, поэтому кроме визуализации имеются разные алгоритмы совместной обработки зарегистрированных данных.

В результате обработки сигнала датчика положения коленчатого вала (ПКВ) формируются шкала угловых отметок с шагом 6° ПКВ и график угловой скорости с тем же шагом.

При обработке сигналов первичной цепи катушек зажигания с учётом ранее полученной шкалы угловых отметок формируется график угла опережения зажигания (УОЗ). При обработке сигналов управления форсунками формируется график цикловой подачи топлива.

При обучении в МАДИ студенты нашей кафедры выполняют курсовой проект, в котором при заданных геометрических размерах (диаметре цилиндра, ходе поршня, длине шатуна), массах деталей (поршня, шатуна, момента инерции коленчатого вала с маховиком) и индикаторной диаграмме на номинальном режиме рассчитывают силы и моменты, действующие на коленчатый вал, индикаторную работу и индикаторный крутящий момент. Программа комплекса позволяет составлять выражения для расчёта всех этих величин, но самую большую сложность вызывает получение индикаторной диаграммы. Как измерить давление в цилиндре, не проводя доработки двигателя? Западные фирмы AVL и Kistler давно производят пьезоэлектрические датчики давления, совмещённые либо со свечами зажигания, либо со свечами накаливания, только цены на них не очень демократичные — порядка 3 500 евро за датчик плюс усилитель заряда, который обходится примерно в такую же сумму.

Мы попробовали сделать датчик-свечу самостоятельно. Начали с самого простого: взяли обычную свечу, надпилили её болгаркой, в распил впаяли латунную трубку, на конце трубы установили латунный корпус с датчиком давления. Такая конструкция с рядом оговорок позволяла индицировать двигатель на режиме холостого хода — при более высокой частоте вращения волновые процессы в газоотводной трубке очень сильно искали регистрируемую индикаторную диаграмму, а предел давления, измеряемого датчиками, составлял всего 10 бар. Для про-

ведения индицирования во всех режимах работы двигателя нужен был миниатюрный датчик давления, который можно расположить в одном адаптере со свечой зажигания. Найти такой датчик оказалось достаточно сложной задачей. В прайсе российской компании «Минисенс» имелись миниатюрные датчики давления с подходящими заявленными характеристиками, работающие на пьезорезистивном эффекте. Из трёх купленных у них работал только один, работал криво и всего полчаса.

Американская компания Optrend предлагает оптические датчики давления, которые позиционируются как предназначенные для индицирования. Принцип их работы заключается в том, что при деформации мембранны меняется преломление луча. Мы заказали один такой датчик, заплатив за него 1 000 долларов. Качество индикаторных диаграмм, получаемых при помощи этого датчика, оказалось очень низким. На рис. 1а видно, что сигнал датчика Optrend имеет очень высокий уровень шума, а рис. 1б иллюстрирует влияние температурного удара на индикаторную диаграмму. По-видимому, из-за нагрева в процессе сгорания жёсткость мембрани уменьшается, из-за этого линия расширения расположена значительно ниже линии сжатия. Индикаторные показатели — работа и крутящий момент, рассчитанные на основании показаний этого датчика, будут вычислены с большой ошибкой.

После тестирования датчика Optrend с неудовлетворительным результатом мы решили сделать

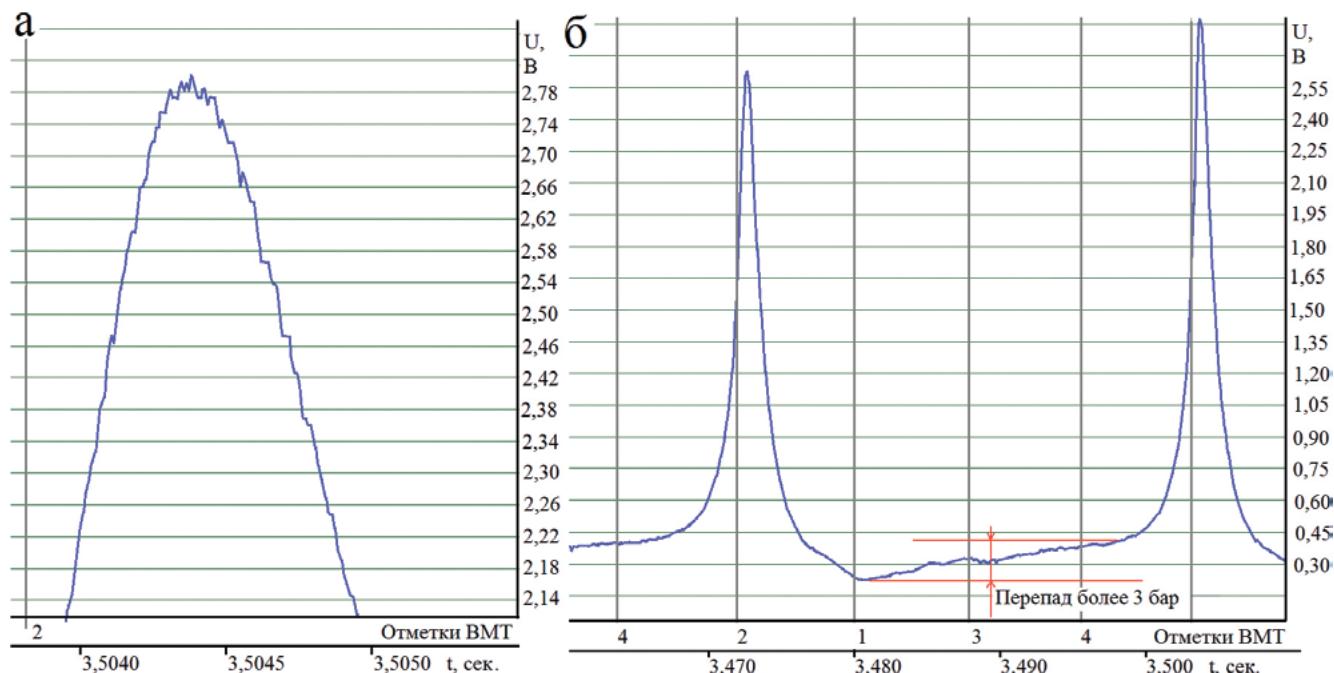


Рисунок 1. Сигнал датчика Optrend, установленного в двигателе BMW M43



Рисунок 2. Фотография и схема опытного образца датчика-свечи, разработанного в ПЛТД МАДИ

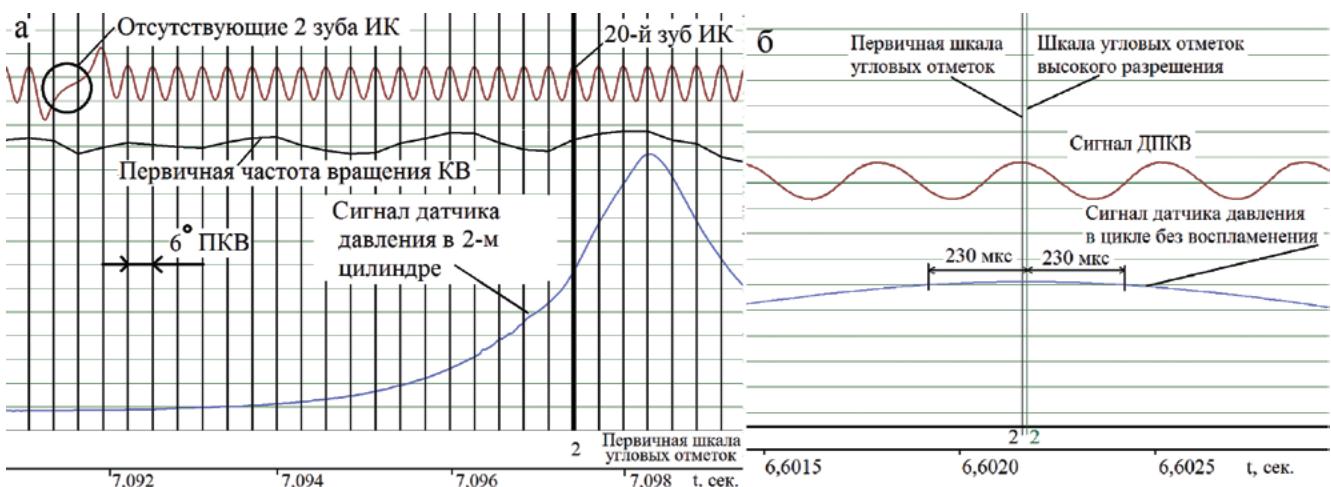


Рисунок 3. Построение первичной шкалы угловых отметок (а) и коррекция в соответствии с давлением в цилиндре положения ВМТ (б)

свой датчик давления. За основу было принято компоновочное решение фирмы AVL — датчик-свеча, который был приобретён нашей кафедрой ещё в 2005 году. И Kistler, и AVL делают датчики для индицирования, работающие на пьезоэффекте. В датчике находится пьезоэлемент (один или несколько), и при приложении к нему усилия от давления газов генерируется заряд. Пьезоэлементы, используемые в датчиках, должны обладать хорошей линейностью, стабильностью и устойчивостью к температурному воздействию. Существует много различных материалов, обладающих пьезоэффектом, но общая тенденция такова, что чем выше чувствительность материала, тем хуже линейность и стабильность. Самым стабильным пьезоэлементом является природный кварц, но у него и самая низкая чувствительность. В качестве пьезоэлемента для своих датчиков мы решили использовать синтетический материал — лантан-галлиевый tantalat. Его кристаллы имеют чувствительность в три раза большую, чем природный кварц, и лишь незначительно уступают ему в линейности. Пьезоэлементы из этого материала выпускаются компанией ОАО «Фомос-материалс». При ис-

пользовании одного пьезоэлемента диаметром 3 мм и толщиной 0,625 мм чувствительность датчика получается порядка 3 пК/бар.

Пьезоэлектрический датчик является датчиком усилия, вся цепь деталей, передающих усилие от давления газов на пьезоэлемент, должна обладать минимальной податливостью. Это принципиально отличает пьезоэлектрические датчики от тензометрических, оптических, индуктивных или ёмкостных, где сигнал датчика пропорционален деформации мембранны. По этой же причине пьезоэлектрические датчики обладают высокой собственной частотой механических колебаний, то есть пригодны для анализа высокочастотных колебаний газов и жидкостей.

На рис. 2а представлены датчик-свеча фирмы AVL и наша опытная разработка, на рис. 2б — конструкция нашего датчика.

Датчик давления собирается в одном корпусе со свечой зажигания. Коаксиальный провод пропускается через корпус, на него надевается корундовая втулка, к центральной жиле припаивается верхний электрод, пьезоэлемент фиксируется на нём при помощи фторопластового кольца. Затем перечислен-

ные детали помещаются в корпус (затягиваются за кабель) и поджимаются резьбовой втулкой с приваренной пружинной мемброй. Усилие предварительного сжатия пьезоэлемента составляет порядка 200 ньютонов и контролируется через усилитель заряда, к которому подключён датчик при сборке. После достижения заданного усилия предварительного сжатия в корпус, уплотняемая высокотемпературным герметиком, закручивается резьбовая втулка с приваренной герметичным швом газовой мембраной, к которой высокотемпературным припоем припаян толкатель. Перед сборкой места касания толкателя и нижнего электрода облучиваются свинцовым припоем, температура плавления которого — около 300 °C. Момент касания толкателя и нижнего электрода контролируется по сигналу усилителя заряда, резьбовая втулка после касания докручивается на 5–10 градусов. Далее датчик нагревают до температуры плавления свинцового припоя. Момент его плавления определяется по исчезновению усилия от деформации газовой мембранны. Затем втулку с газовой мембраной доворачивают до касания стали толкателя со сталью электрода. После охлаждения и высыхания герметика датчик готов к работе.

К такой конструкции и технологии сборки мы пришли не сразу, были различные варианты, они проверялись и улучшались — описать все не представляется возможным.

Пайка деталей, передающих усилие от давления газов на пьезоэлемент, обеспечивает, с одной стороны, неразрывность кинематической цепи, а с другой — ненапряжённое состояние газовой мембранны. Если неразрывность кинематической цепи обеспечивается за счёт деформации газовой мембранны, то при работе датчика на пьезоэлемент действует усилие пружинной мембранны, газовой мембранны и газов. При нагреве от сгорающих газов жёсткость газовой мембранны уменьшится, и в результате датчик на линии расширения будет показывать меньшее давление, чем на линии сжатия, что и видно на примере датчика Optrend. Отсутствие деформации газовой мембранны без замыкания кинематической цепи передачи усилия от давления газов приведёт к плохой линейности. При малом давлении газов за счёт микрозазоров чувствительность датчика будет меньше, чем при большом, когда зазоры будут выбраны.

ТЕСТИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ И ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Вначале датчики тестировали на гидравлическом стенде: гидропресс подавал масло в рампу, в которой устанавливались тестируемые датчики и образцовый — имеющийся у нас датчик AVL. Но такое

тестирование не учитывало температурные удары, возникающие при сгорании топлива. Чтобы тестирование было корректным, испытуемый датчик нужно располагать в одном цилиндре с образцовым. Некоторые двигатели изготавливаются по схеме Twin Spark, но в нашем распоряжении такого двигателя не было, поэтому решили реализовать эту схему на двигателе автомобиля «Ока». Во втором цилиндре штатное свечное отверстие заварили и сформировали два новых, благо конструкция головки блока цилиндров это позволяла. Ещё одним преимуществом такого решения является то, что нагружочный режим для цилиндра с Twin Spark реализуется на месте, без движения, за счёт отключения первого цилиндра. На одном цилиндре при полном дросселе двигатель «Оки» разгоняется до 5 500 мин⁻¹. Для того чтобы привязать индикаторную диаграмму к положению коленчатого вала, на шкив были установлены инкрементное колесо «60-2» и индукционный ДПКВ. Для грубого определения, какому зубу инкрементного колеса соответствует ВМТ, достаточно установить двигатель в соответствующее положение и посмотреть, какой зуб колеса находится напротив датчика. Более точное определение того, какому участку сигнала ДПКВ соответствует ВМТ, производится при регистрации индикаторной диаграммы в цикле без воспламенения. На рис. 3а представлен зарегистрированный сигнал датчика давления при воспламенении ТВС и сигнал индукционного ДПКВ и результат его первичной обработки — определение вершины каждого зуба. Таким образом получается первичная шкала угловых отметок с шагом 6° ПКВ. Величина, обратная времени, за которое инкрементное колесо повернётся на эти 6°, является средней угловой скоростью коленчатого вала на этом участке, то есть первичной частотой вращения. Этот график представляет собой ломаную линию, и получить на основании него ускорение коленчатого вала невозможно. При проведении индицирования ДВС для обработки индикаторных диаграмм на основании шкалы угловых отметок, имеющей шаг 6°, строится виртуальная шкала угловых отметок с шагом 0,1° ПКВ. Затем (рис. 3б) выполняется совмещение отметки ВМТ с максимумом давления в цилиндре в цикле без воспламенения. На основании этой шкалы рассчитываются дифференцируемые скорость и ускорение коленчатого вала.

При работе с многоцилиндровым двигателем следует учесть, что из-за неточности механической обработки коленчатого вала ВМТ в различных цилиндрах двигателя могут регистрироваться с некоторыми угловыми отклонениями, поэтому процедуру корректировки ВМТ нужно проводить для каждого цилиндра.

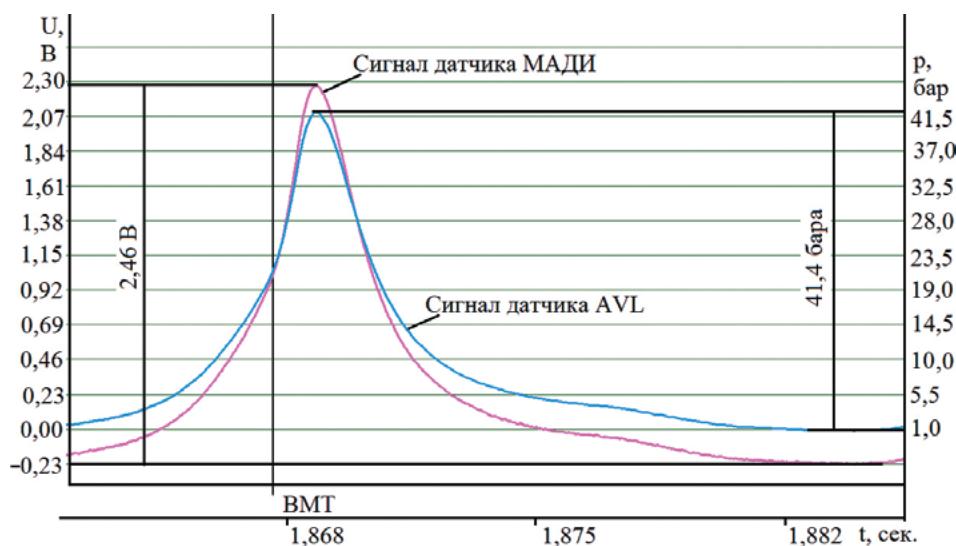


Рисунок 4. Индикаторные диаграммы от датчиков МАДИ и AVL

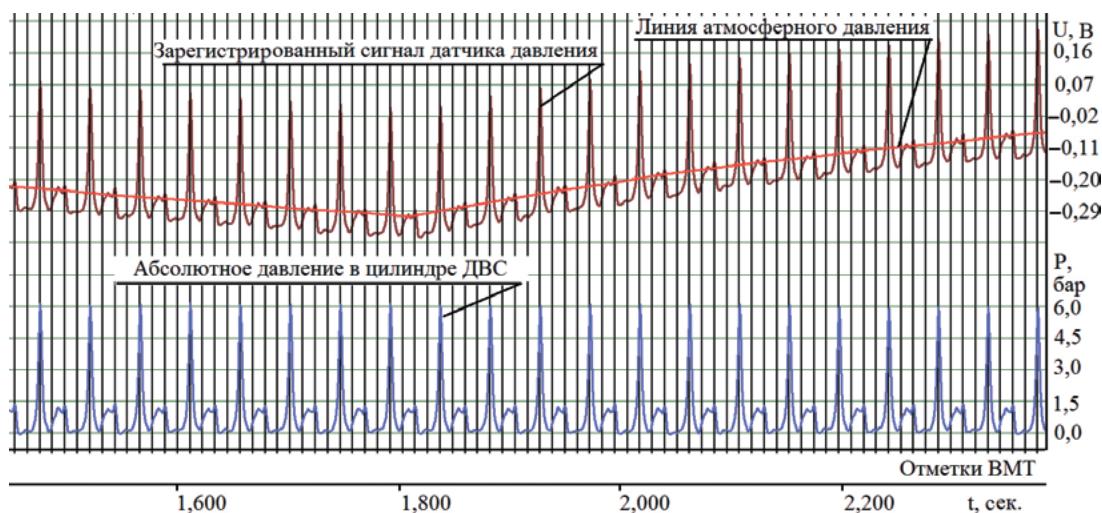


Рисунок 5. Иллюстрация нормирования сигнала датчика давления



Рисунок 6. Графики давления в процессе газообмена двигателя ВАЗ-2112: н — 3 200; ДЗ — 100 %

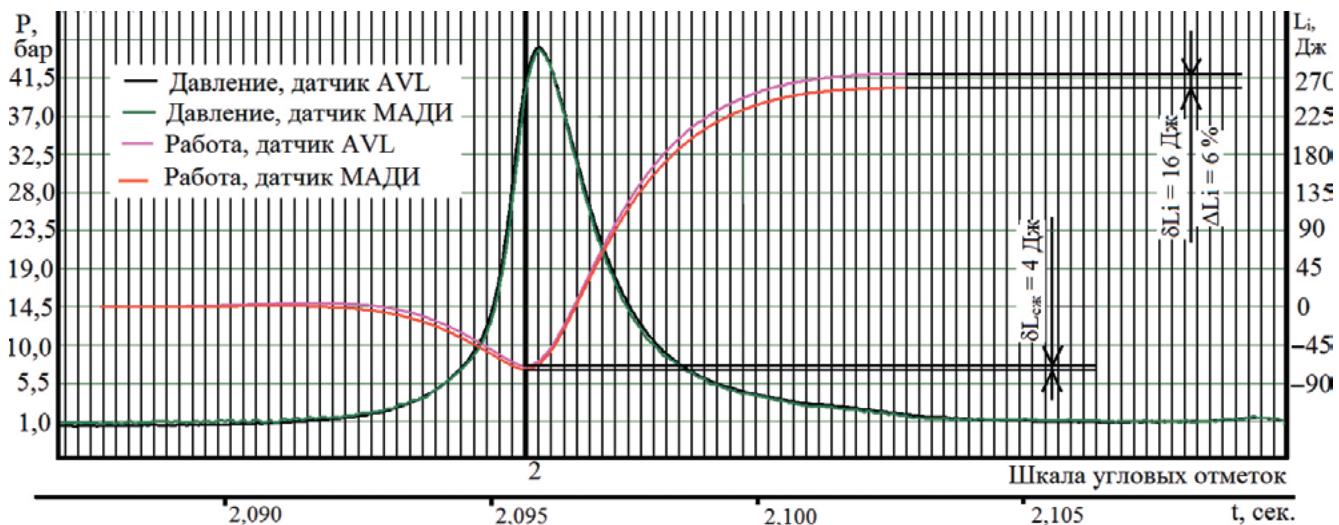


Рисунок 7. Давление и индикаторная работа, рассчитанные на основании сигналов датчиков AVL и МАДИ

На самом деле максимум давления в цилиндре в цикле без воспламенения регистрируется за $0,1\text{--}0,2^\circ$ ПКВ до достижения поршнем ВМТ. Это объясняется тем, что температура рабочего тела (газов) в окрестности ВМТ выше температуры стенок камеры сгорания, следовательно, теплota от рабочего тела в процессе сжатия отводится. То есть температура, а следовательно и давление, за 1° ПКВ до ВМТ выше, чем через 1° ПКВ после ВМТ. Пока этот факт в программе обработки данных никак не учитывается.

Для того чтобы на основании зарегистрированной индикаторной диаграммы рассчитать крутящий момент от газовых сил и индикаторную работу, нужно определить чувствительность и линейность датчика.

На рис. 4 в близком масштабе представлены индикаторные диаграммы, полученные от двух датчиков — AVL и МАДИ, которые установлены во втором цилиндре двигателя автомобиля «Ока».

Датчик-свеча фирмы AVL, который принимался за эталон, имеет чувствительность $15,6 \text{ пКл/бар}$. Зная передаточную функцию измерительного канала АЦП, по зарегистрированной индикаторной диаграмме образцового датчика можно точно определить изменение давления в цилиндре. В данном случае разность давлений между P_z и минимальным давлением выпуска составила $41,4 \text{ бара}$. Измеренное АЦП напряжение от датчика МАДИ между соответствующими точками диаграммы составило $2,46 \text{ В}$. Это значит, что усилитель заряда сгенерировал напряжение $2,46 \text{ В} / 0,6 = 4,1 \text{ В}$ ($0,6$ — передаточный коэффициент от усилителя заряда AVL к АЦП). Настройки канала усилителя заряда, к которому подключён датчик МАДИ: 15 пКл/бар , 2 бар/В . Значит, заряд, сгенерированный датчиком, равен $4,1 \text{ В} \times 2 \text{ бар/В} \times 15 \text{ пКл/бар} = 123 \text{ пКл}$. Соответ-

ственно, чувствительность датчика МАДИ составляет $123 \text{ пКл} / 41,4 \text{ бара} \approx 3,0 \text{ пКл/бар}$.

Следующий вопрос, на который нужно ответить: как оценить линейность датчика МАДИ? Можно в размерности давления вывести диаграммы на экран и совместить точки, по которым рассчитывалась чувствительность. При этом диаграммы в целом хорошо совмещаются, но наблюдается некоторое расхождение. Мы предложили оценить это расхождение, рассчитав на основании каждой диаграммы индикаторную работу. Для этого нужно произвести некоторые подготовительные действия. Следует учитывать, что нулевая линия пьезоэлектрических датчиков очень нестабильна и, несмотря на то что низкочастотная составляющая диаграмм фильтруется аппаратно — усилителем заряда, зарегистрированные диаграммы имеют значимую низкочастотную составляющую. На рис. 5 представлен фрагмент регистрации давления в цилиндре двигателя в режиме прокрутки. Считаем, что давление в процессе выпуска на участке 30° ПКВ после НМТ и 30° ПКВ до ВМТ близко к атмосферному. Если соединить эти участки линией, а затем вычесть эти значения из каждой точки индикаторной диаграммы, то ноль сигнала датчика будет соответствовать атмосферному давлению. Затем с учётом чувствительности датчика и передаточного отношения измерительного канала рассчитывается давление в цилиндре ДВС.

Для более точного позиционирования зарегистрированной индикаторной диаграммы следует иметь сигналы датчиков давления во впускном и выпускном коллекторах. На рис. 6 представлены графики давления в процессе газообмена двигателя ВАЗ-2112. На значительном участке выпуска давление в цилиндре практически совпадает с давлением

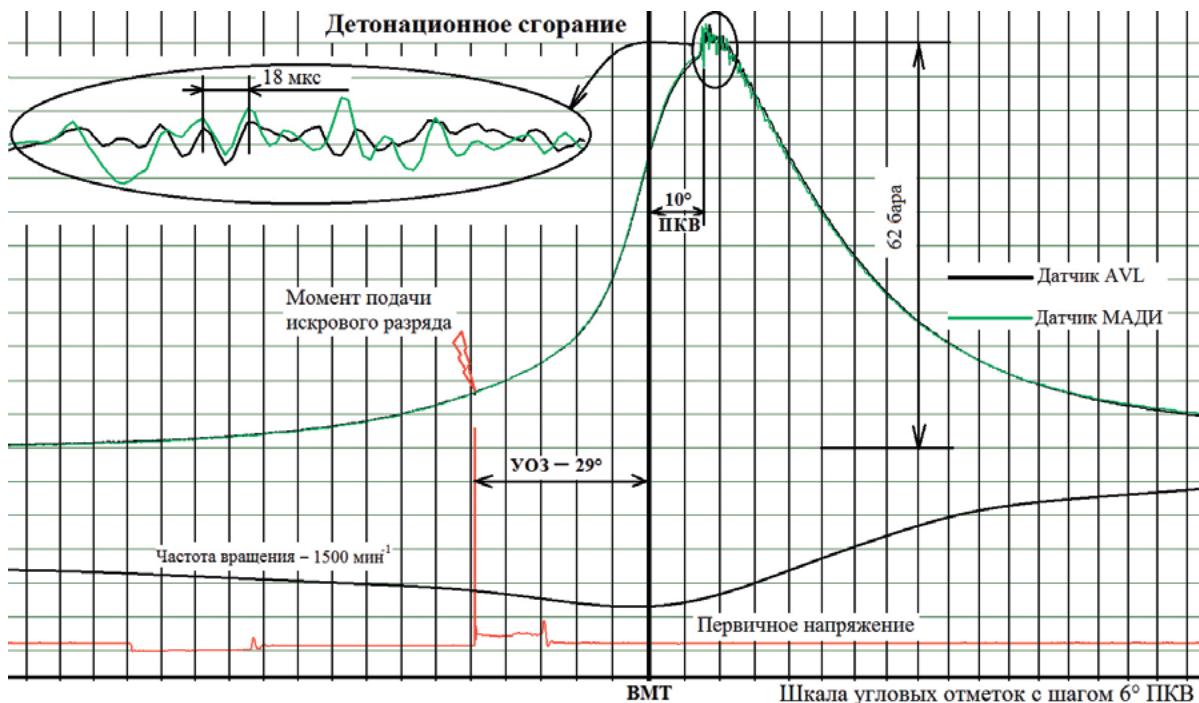


Рисунок 8. Цикл с детонационным сгоранием

за выпускными клапанами, а на впуске — с давлением перед впускными.

Теперь, когда скорректировано положение ВМТ и рассчитаны абсолютные значения давления, можно перейти к созданию табличных каналов, то есть каждому угловому промежутку $0,1^\circ$ ПКВ виртуальной шкалы угловых отметок нужно поставить в соответствие осреднённое значение давления на этом промежутке. Если известны геометрические параметры КШМ: диаметр цилиндра, ход поршня, отношение радиуса кривошипа к длине шатуна, то можно составить выражения для нахождения крутящего момента от газовых сил и расчёта индикаторной работы. На рис. 7 приведены результаты расчёта давления и индикаторной работы на основании сигналов обоих датчиков. Кривые давления практически совпадают, а вот индикаторная работа, являющаяся интегральной характеристикой, показывает некоторые отличия.

Рис. 8 иллюстрирует хорошие динамические характеристики разрабатываемых датчиков на примере регистрации цикла с детонационным сгоранием. Несовпадение высокочастотных колебаний объясняется тем, что при такой частоте колебаний длина волны меньше расстояния между датчиками.

ВЫВОДЫ

Результаты тестирования нескольких опытных образцов датчиков давления внушают определённый оптимизм: после работы датчиков в автомобильном двигателе в качестве свечей зажигания при пробеге до 100 километров их характеристики практически не изменились. Требует доработки текущая компоновка датчика. Когда чувствительный элемент размещён в общем корпусе со свечой зажигания, он испытывает на себе влияние вытяжки резьбы при установке датчика в цилиндр, а также влияние давления газов на корпус. В ближайшем будущем в конструкцию датчиков планируется внести некоторые изменения.

Оценить качество индикаторных диаграмм можно, сопоставив крутящий момент от газовых сил (M_g) и эффективный крутящий момент (M_k) двигателя, установленного на моторном стенде.

Вообще, критерием точности выполненных измерений и расчётов является сходимость расчёта крутящего момента от газовых сил и ускорения коленчатого вала или индикаторной работы и изменения кинетической энергии подвижных деталей ДВС. Если при этом с коленчатого вала снимается полезная нагрузка — автомобиль находится в движении, то задача становится ещё более сложной и интересной.

Дальнейшие результаты тестирования датчиков для индицирования, разрабатываемых в МАДИ, будут приведены в следующих выпусках журнала.