

2. Увеличение реостатной мощности опытного дизеля наблюдается на всех режимах по тепловозной характеристике.

3. Уровень снижения реостатной мощности опытного дизеля после наработки 114676 моточасов такой же как у серийного дизеля после наработки 46512 моточасов.

Список литературы:

1. Шпаковский В.В. Поршни с корундовой поверхностью / В.В. Шпаковский // Технологии ремонта машин и

механизмов» «РЕМОНТ-98»: междунар. конф. – К.: Знание, 1998. – С.63-64. 2. Шпаковский В.В. Повышение ресурса цилиндро-поршневой группы тепловозного дизеля образованием корундового слоя на поверхности поршней / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, И.В. Парсаданов и др. // Локомотив информ. – 2007 – №1. – С. 28-30. 3. Шпаковский В.В. Оценка влияния корундового поверхностного слоя камеры сгорания поршня на ускорение предпламенной подготовки топлива / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, В.А. Пылёв, О.Ю. Линьков, В.В. Осейчук // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2007. – Вып.29 – С.115-121.

УДК 621.436.038

А.Н. Пойда, д-р техн. наук, Е.Ю. Зенкин, асп.

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ НА ОСНОВЕ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА В ГИДРОАККУМУЛЯТОРЕ

Характеристика проблемы и её связь с научно-практическими задачами

Широкое распространение на автомобильном транспорте получили дизели с микропроцессорными системами управления (МПСУ) топливоподачей. Замена механических внутрисистемных связей, присутствующих в традиционных гидромеханических системах топливоподачи, информационными связями, позволяет реализовать более гибкие законы управления, учесть большее количество влияющих факторов и получить при эксплуатации таких автомобилей более высокие экономические и экологические показатели.

Парк автомобилей с МПСУ, эксплуатируемых в Украине, включает модели выпуска от 1997 г до 2009 г, суммарный пробег их отличается в несколько раз, дизели и системы управления, в зависимости от стратегии управления и требований экологических норм, действовавших в момент их введения в эксплуатацию, оснащены различными наборами датчиков и исполнительных устройств.

В процессе эксплуатации состояние двигателей, датчиков и исполнительных устройств не остается неизменным и, соответственно, первоначально выбранные оптимальные значения управляющих воздействий не остаются таковыми или просто не воспроизводятся. В результате ухудшаются эффективные показатели дизелей и автомобилей.

Известно, что надежность машин в эксплуатации обеспечивается соответствующей системой тех-

нического обслуживания и ремонта (ТОР). Очевидно, что стабильность функционирования и эффективность эксплуатации дизелей определяется совершенством системы ТОР, составной частью которой является диагностика, способствующая своевременному выявлению и устранению неисправностей.

Общая проблема обеспечения стабильности функционирования дизелей в эксплуатации актуальна потому, что это связано с расходом энергоресурсов и загрязнением окружающей среды. Применительно к дизелям с аккумуляторными системами топливоподачи она обусловлена тем, что разработанные в Украине методы и технические средства диагностирования дизелей с традиционными гидромеханическими системами топливоподачи не применимы для дизелей с МПСУ, например, дизелей с аккумуляторными системами топливоподачи. Эти системы сложнее гидромеханических, значительно отличаются по устройству и характеру протекания процессов топливоподачи. Методы и технические средства диагностирования дизелей с аккумуляторными системами топливоподачи еще недостаточно отработаны. Встроенные системы бортовой диагностики (ЕОВД) не позволяют детально оценивать гидравлические процессы, протекающие в линиях топливных систем. Проверка топливных насосов высокого давления (ТНВД) и электрогидравлических форсунок (ЭГФ) на специальных стендах требует значительных затрат времени и, следовательно, длительного простоя автомобиля в ремонте.

В контексте общей проблемы, касающейся обеспечения стабильности функционирования дизелей в эксплуатации, важной научно-практической задачей является разработка методов оценки технического состояния элементов топливной аппаратуры (ТА) аккумуляторного типа непосредственно на дизеле.

Обзор публикаций и анализ нерешённых проблем

Устройство и работа топливной аппаратуры аккумуляторного типа, получившей название Common Rail (CR), подробно описано в работах [1, 2, 3].

Применительно к дизелям с гидромеханическими системами топливоподачи были разработаны методы [4] диагностирования ТА по диаграммам давления топлива, записанным с помощью датчика, установленного в штуцере форсунки. При диагностировании топливной аппаратуры по осциллограммам процесса впрыскивания выделяют характерные участки, по которым оценивают работу нагнетательного клапана, иглы распылителя и других элементов.

В Украине дизели с системами типа CR находятся в стадии разработки, а в России подготовлен к производству дизель ЯМЗ 650, но пока серийно не выпускается. Поэтому большинство публикаций в отечественных изданиях и в изданиях России посвящено разработке систем CR, а не диагностированию уже имеющихся в эксплуатации.

Исследования зарубежных авторов в этой области касаются лишь оценки колебаний давления с точки зрения их негативного влияния на работу форсунок и искажения процессов впрыскивания. Например, в работе [5], посвященной диагностированию современных дизелей, вообще отмечается невозможность получения какой либо полезной диагностической информации из сигнала датчика давления. В ряде работ, например [8, 9], указывается на необходимость установки дополнительных датчиков на трубопроводах форсунок и ТНВД, что требует разгерметизации системы и в принципе возможно только в исследовательских целях, но не при диагностировании транспортных средств в условиях АТП или СТО.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка методов оценки технического состояния элементов ТА типа CR непосредственно на дизеле по

сигналам штатного датчика давления, установленного в гидроаккумуляторе.

Задачи исследования:

- оценка информативности сигнала штатного датчика давления в части воспроизводимых им колебаний давления;
- экспериментальное определение амплитуды и формы колебаний давления в гидроаккумуляторе при исправных и неисправных элементах системы;
- установление взаимосвязей между колебаниями давления в гидроаккумуляторе топливной системы CR и техническим состоянием её элементов;

Решение задачи

Исходим из того, что основные узлы системы CR – ТНВД, ЭГФ, регулятор давления топлива (РДТ) и датчик давления подключены к гидроаккумулятору, а управляет процессом топливоподачи контроллер, устанавливая вполне определенную величину давления в аккумуляторе для каждого режима работы дизеля в соответствии с программой, записанной в его памяти. При этом исполнительным звеном выступает РДТ, а датчик давления является информационным элементом в цепи обратной связи контроллера. Следовательно, процессы, происходящие в аккумуляторе, взаимосвязаны, а датчик давления в определенной форме воспроизводит результат действия каждого узла, в том числе и реакцию контроллера на его сигнал. Этот факт необходимо учитывать при использовании сигнала датчика давления для диагностирования CR. Если записать сигнал штатного датчика давления как функцию времени и, например, сигнал датчика фазы как синхросигнал для определения периода рабочего цикла. Затем по аналогии с методом диагностирования ТА гидромеханических систем [4], на осциллограмме давления выделить участки, соответствующие срабатыванию плунжеров ТНВД, ЭГФ и РДТ, то можно оценить техническое состояние каждого из перечисленных узлов. При этом для оценки технического состояния узлов CR в ряде случаев весьма важно для сравнения иметь эталонную осциллограмму, записанную для аналогичной исправной системы.

Чувствительность штатного датчика давления и измерительной системы

По данным [2] датчик давления топлива со встроенным усилителем обеспечивает относительную приведенную погрешность $\pm 2\%$ и развивает на

выходе напряжение 4,5 В при максимальном давлении 150...160 МПа. Из этого следует, что абсолютная погрешность измерения давления составляет $\pm 3...3,2$ МПа. Чувствительность датчика составляет 28...30 мВ/МПа. При использовании цифрового осциллографа с разрядностью в 12 бит в дифференциальном включении чувствительность канала регистрации составляет 78,125 кПа/бит. Уровень собственных шумов аналого-цифрового преобразователя (АЦП), составляющего основу цифрового осциллографа, обычно оценивают в 2...3 единицы младшего разряда. Таким образом, можно рассчитывать на то, что после фильтрации шумов, порожденных в усилителе датчика и в АЦП, на осциллограмме вполне реально различать колебания давления в аккумуляторе амплитудой 300...500 кПа.

Виды колебаний давления топлива в гидроаккумуляторе

По своему замыслу система CR – система статического давления. Но практически на каждом режиме работы дизеля в гидроаккумуляторе поддерживается лишь постоянное среднее давление, относительно которого происходит колебание давления ввиду динамических процессов, обусловленных работой ТНВД, ЭГФ и РДТ. Весьма важно идентифицировать результат воздействия каждого узла на общее давление в гидроаккумуляторе, измеренное датчиком.

Условно все волновые процессы, происходящие в гидроаккумуляторе, в зависимости от их интенсивности и продолжительности можно разделить на три группы.

1) Колебания давления в аккумуляторе, возникающие вследствие подачи топлива секциями ТНВД;

2) Колебания давления в аккумуляторе, возникающие при срабатывании форсунок;

3) Аномальные колебания и длительные отклонения среднего давления от нормы. Такие процессы могут возникать вследствие зависания иглы распылителя форсунки, подклинивания штока регулятора давления топлива, значительных утечек топлива в узлах системы, износа или поломки подкачивающего насоса.

Колебания давления в аккумуляторе, вызываемые работой ТНВД

Как известно при подаче топлива каждой плунжерной парой в гидроаккумулятор возникает импульс давления [5]. Величина этого импульса за-

висит от скорости нагнетания топлива, от перепада давлений в надплунжерной полости и гидроаккумуляторе, от величины утечек в сопряжении плунжер – гильза. Если принять, что первые два фактора одновременно одинаково изменяются для всех плунжерных пар ТНВД, то можно сделать заключение, что на установившемся режиме работы дизеля только неравномерность износа плунжерных пар будет влиять на амплитуду импульсов давления в аккумуляторе. Этот факт можно использовать для определения технического состояния ТНВД. С другой стороны, во время работы двигателя в гидроаккумуляторе возникают волновые процессы от срабатывания форсунок, которые накладываются на результирующее давление и затрудняют анализ колебаний давления. Однако как показали дополнительные эксперименты, несмотря на вышесказанное возможны два варианта довольно эффективного поиска неисправностей в ТНВД. Сигнал можно достаточно адекватно оценивать следующим образом - когда форсунки отключены, а значит, и их влияние отсутствует, двигатель прокручивается стартером (150...300 мин⁻¹). При этом вполне можно зафиксировать каждое отдельное срабатывание. Поскольку амплитуда колебаний зависит и от среднего давления в аккумуляторе, а её целью ставится определение разброса давлений по отдельным секциям, то путем принудительного задания скважности импульсов на регулятор давления можно отрегулировать наиболее четкую фиксацию осциллограммы.

На рис.1 представлены импульсы от срабатывания плунжерных пар ТНВД автомобиля Renault Master 2,5 TDCi, синхронизированные по сигналу датчика фазы.

Неравномерность износа плунжерных пар ТНВД можно оценить по амплитуде давления, создаваемого в аккумуляторе каждой секцией насоса. Весьма полезно воспользоваться воспроизведением процессов в относительных координатах, например в %, совместив диаграммы во времени. При этом можно видеть разницу в техническом состоянии каждой отдельной пары непосредственно в %. На рис.2 приведены совмещенные диаграммы импульсов давления в аккумуляторе от срабатывания плунжерных пар. Из рисунка видно, что разница между давлением, развиваемым первым и вторым плунжерами, составляет примерно 7%. Углы наклона передних фронтов импульсов давления к оси абсцисс характе-

ризуют величину утечек в зазорах прецизионных пар. Чем больше утечка, тем меньше угол наклона переднего фронта сигнала к оси абсцисс. Неисправности, возникающие в нагнетательных секциях ТНВД, можно разделить на две категории: увеличение зазоров в прецизионной паре, обусловленное износом плунжерных пар, и неисправности, вызванные поломкой клапанной группы.

Если постепенное снижение подачи топлива секцией ТНВД трудно отслеживать на рабочих режимах из-за наложения волновых процессов, вызванных срабатыванием форсунок, то поломка клапанной группы приводит к полной неработоспособности секции ТНВД и, соответственно, отсутствию импульса давления этой секции. На рис. 3 представлены осциллограммы давления в аккумуляторе, записанные по сигналу штатного датчика давления для исправного и неисправного ТНВД Mercedes Vito 108 CDI 2,2 л. Как видно из графика, разница в амплитудах давления столь велика, что срабатывание форсунок совсем не оказывает никакого влияния на обнаружение данной неисправности. Видно также, что при неисправности клапанной группы во 2-ой секции ТНВД, амплитуда колебаний давления в режиме холостого хода возросла от 0,5...1 МПа (сигнал А) до 3МПа (сигнал Б).

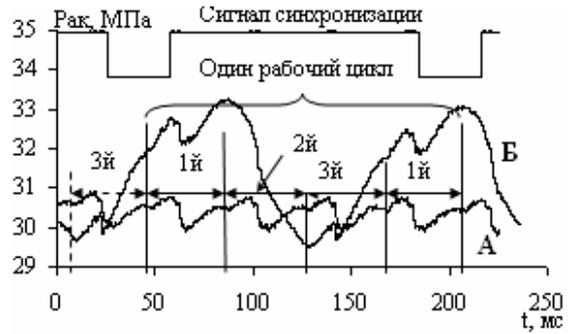


Рис.3. Импульсы давления при неисправности клапанной группы ТНВД

Колебания давления в аккумуляторе, вызванные срабатыванием ЭГФ

Одним из факторов, оказывающих негативное влияние на результаты анализа сигнала датчика давления с целью определить техническое состояние ЭГФ, является уровень помех. Амплитуды колебаний, вызываемых срабатыванием форсунок, малы и переменны в зависимости от режима работы дизеля. Применение цифровых осциллографов USBScopII и LCard-783 позволило по сигналу датчика давления зафиксировать на большинстве режимов срабатывание форсунок. Для работы ЭГФ требуется дополнительный (технологический) расход топлива. В тот момент, когда происходит впрыскивание, снижение давления зависит как от количества топлива, сбрасываемого в линии обратного слива форсунки и впрыскиваемого в цилиндр двигателя, так и от степени нарастания давления при нагнетании топлива в аккумулятор плунжерной парой. То есть, чем выше частота вращения и интенсивнее нагнетание, тем на меньшую величину снижается давление при той же длительности впрыскивания. Так как начало нагнетания топлива по углу поворота коленчатого вала двигателя не меняется, а угол опережения изменяется, то изменяется и давление впрыскивания. Это подтверждается формулой, по которой вычисляют цикловую подачу:

$$G_{mци} = \int_0^{\tau_{впр}} \mu f \cdot \sqrt{2\rho_m(P_a - P_y)} \cdot d\tau,$$

где $\tau_{впр}$ - продолжительность впрыскивания, μf - эффективное проходное сечение распылителя форсунки, ρ_m - плотность топлива, P_a - давление топлива в аккумуляторе, P_y - давление рабочего тела в цилиндре.

На рис. 4 приведены результаты экспериментального исследования локальных снижений давления топлива в аккумуляторе при срабатывании ЭГФ на различных режимах работы дизеля.

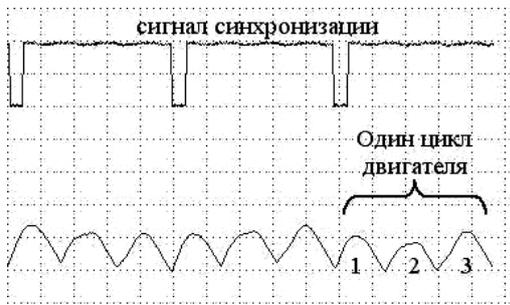


Рис.1. Импульсы давления при прокрутке двигателя стартером

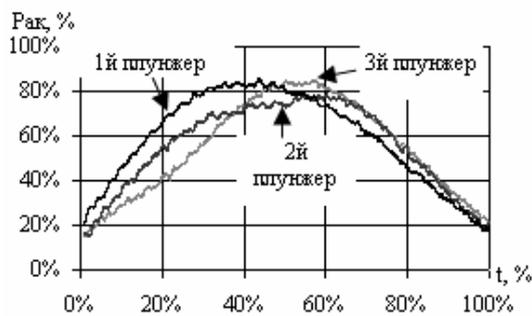


Рис.2. Наложение импульсов давления от срабатывания плунжерных пар

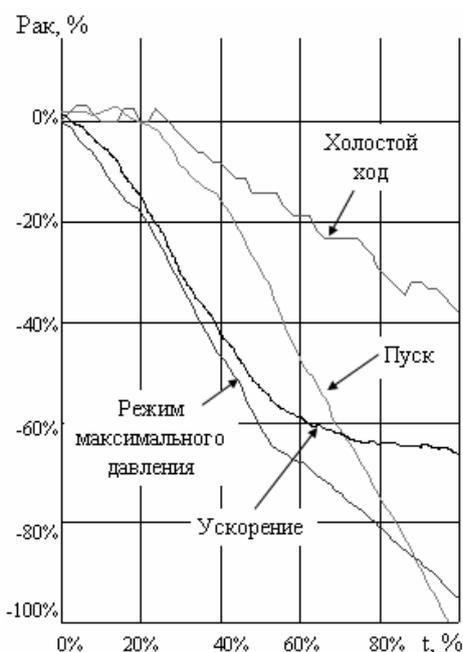


Рис. 4. Локальные снижения давления топлива в аккумуляторе при срабатывании ЭГФ на различных режимах работы дизеля

Приведенная формула учитывает лишь количество топлива, подаваемое форсункой в цилиндр. Но в системе CR существует ещё и технологический расход [6, 7], необходимый для работы ЭГФ. Поэтому результирующие колебания давления, вызванные срабатыванием форсунок, целесообразно использовать в качестве диагностического параметра для сравнительного анализа технического состояния форсунок между собой.

В ходе эксперимента было подтверждено, что при увеличении длительности впрыскивания амплитуда колебания давления (рис. 5) возрастает на 1...3 МПа.

Как видно из графиков рис.5 амплитуда колебаний давления при малых длительностях (400...600 мкс) изменяется пропорционально изменению длительности впрыскивания примерно в 2...2,5 раза. При длительности открытия форсунки 1000...1300 мкс изменение амплитуды не превышает 30%. Этим подтверждается, что при росте давления в топливном аккумуляторе амплитуды колебаний при впрыскивании начинают увеличиваться, поскольку возрастает скорость истечения топлива через форсунки.

Колебания давления в аккумуляторе, вызываемые работой РДТ

В отличие от колебаний давления топлива вызываемых ТНВД и форсунками, которые присутствуют на всех режимах и при возникновении неполадки лишь изменяют форму и амплитуду, колебания давления топлива при работе исправного РДТ должны отсутствовать. При возникновении подклинивания силы магнитного поля в катушке электромагнита регулятора становится уже не достаточно для задания необходимого уровня давления. МПСУ, изменяя скважность сигнала, увеличивает среднюю силу тока, протекающего в обмотке электромагнита. Когда сила электромагнита превосходит силу сопротивления движению, созданную в результате подклинивания якоря, он срывается, резко открывая отверстие слива, давление резко снижается. Контроллер уменьшает избыточную силу тока, пытаясь стабилизировать давление, как правило, якорь при этом снова попадает в зону подклинивания и процесс повторяется. Возникают автоколебания (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что амплитуда колебаний может достигать 5-6 МПа, а продолжительность одной волны такова, что за её период происходит около 10 срабатываний насосных секций, то есть примерно 2-3 рабочих цикла двигателя.

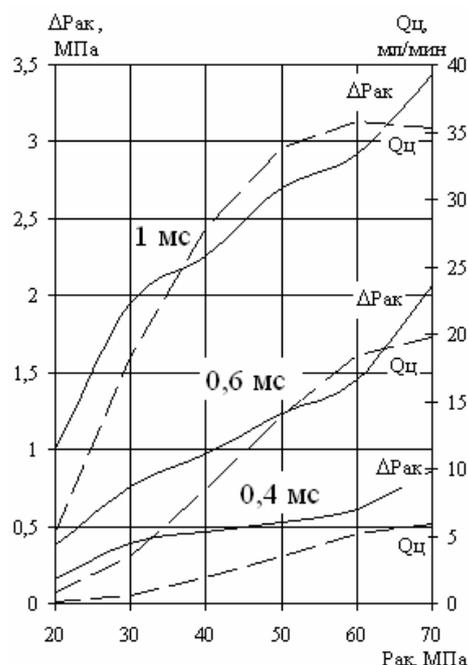


Рис.5. Изменение цикловой подачи и колебаний давления при различных давлениях и длительностях управляющего сигнала

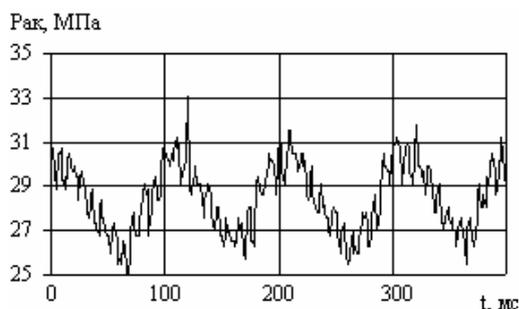


Рис.6. Колебания давления, вызванные неисправностью РДТ

Косвенная оценка состояния ТА по скажности управляющего сигнала РДТ

Для повышения надежности транспортного средства в эксплуатации система управления при возникновении неисправностей способна вводить коррекцию топливоподачи таким образом, что требуемое значение давления топлива в аккумуляторе будет поддерживаться на уровне, необходимом для данного режима [1,2,5,6,9]. В большинстве систем обратная связь по давлению топлива включается лишь после выхода двигателя на режим холостого хода и далее на рабочие режимы. При этом скажность управляющих воздействий на РДТ имеет нелинейную зависимость от частоты вращения колен-

чатого вала двигателя. В нижнем диапазоне частоты вращения оно меньше, а по мере роста частоты вращения влияние скажности управляющего сигнала становится большим [2, 5]. В ходе эксперимента моделировалась неисправность одной плунжерной секции ТНВД на двигателе OM611.980, что в отсутствие коррекции привело бы к снижению производительности насоса и уменьшению давления на некоторых режимах. Но контроллер скомпенсировал неполадку путем увеличения длительности управляющего импульса регулятора давления и соответственно расход топлива через РДТ на слив. Как видно из рис.7 система управления двигателем увеличила скажность управляющего импульса до 65% для неисправного ТНВД, в то время, как в исправном варианте в этот момент времени эта же величина составила 32%, причем максимумы для сигнала с исправного и неисправного ТНВД не совпадают и максимум для исправного варианта составил 40%. При этом максимум давления в 119..120 МПа был достигнут в обоих случаях. Вдобавок к этому двухстадийное нарастание давления было заменено одностадийным, что привело к достижению максимума давления в неисправной системе даже раньше, чем в исправной.

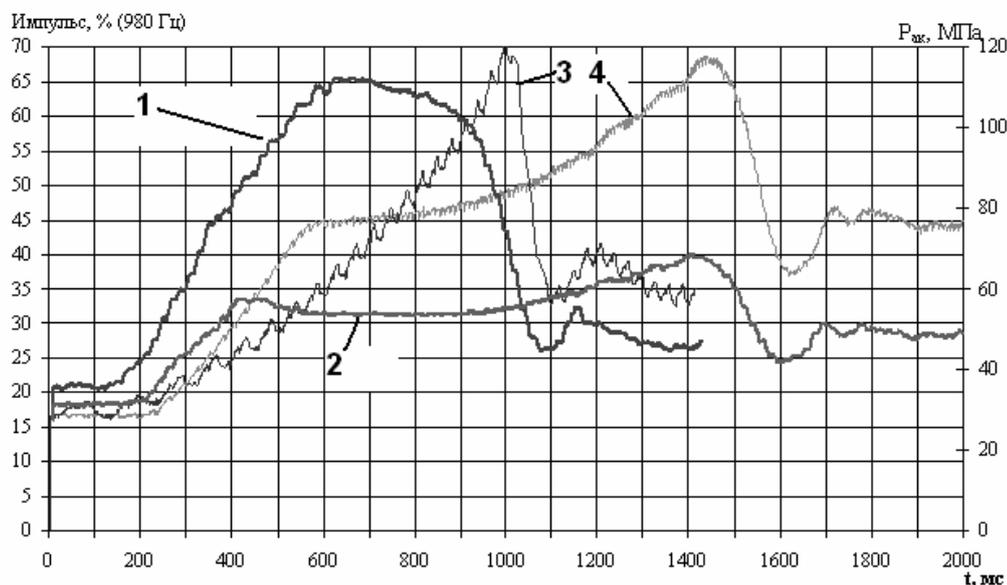


Рис.7. Осциллограммы давления топлива и сигнала управления РДТ при свободном ускорении двигателя MB Vito108CDI: скажность (1) управляющих импульсов и давление (3) в аккумуляторе при исправном ТНВД; скажность (2) и давление (4) при неисправном ТНВД

Оценка состояния ТА по скорости нарастания давления при пуске двигателя

Среднее значение давления топлива в аккумуляторе также может использоваться как диагностический параметр, хотя обратная связь по давлению не способствует этому, особенно на установившихся

режимах. Поэтому измерения необходимо производить, например, при пуске двигателя, когда обратная связь отключена. При этом, вместо среднего значения давления можно применять скорость нарастания давления (МПа/с) или угол наклона α усредняющей прямой к оси времени в переходном режиме, харак-

теризующие его динамику изменения. На рис.8 представлены кривые роста давления при пуске двигателя автомобиля Mercedes Vito. Разница в углах наклона усредненных линий давления для ТНВД с одной неработающей секцией (линия Б) и эталонной (линия А) составила 25%, что является достаточным для обнаружения неисправности.

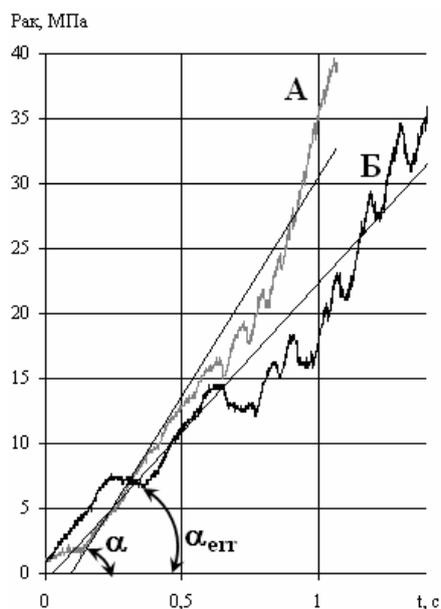


Рис.8. Нарастание давления при запуске Mercedes Vito 108 CDI

Выводы

1. Подтверждено положение о том, что штатный датчик давления, установленный в топливной системе CR, обладает достаточной чувствительностью и быстродействием для воспроизведения волновых процессов в гидроаккумуляторе. Сигнал этого датчика содержит информацию, достаточную для анализа технического состояния ТНВД, ЭГФ и РДТ. При этом колебания давления, вызванные работой перечисленных узлов, могут использоваться:

- для ТНВД в абсолютных или относительных величинах на любом режиме работы двигателя; – для РДТ наличие колебаний однозначно свидетельствует о его неисправности;

- для форсунок колебания давлений на установившемся режиме целесообразно использовать в качестве диагностического параметра для сравнительного анализа технического состояния форсунок между собой.

2. Выдвинуто и подтверждено положение о возможности выявления неисправностей в CR по реакции контроллера в цепи обратной связи регулятора давления топлива со стороны блока управления.

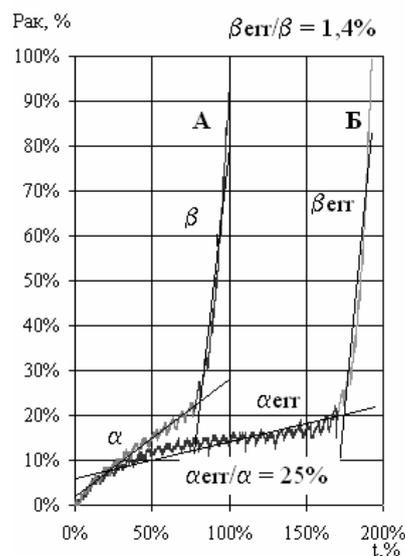


Рис.9. Нарастание давления при запуске Fiat Ducato 2,8 JTD

3. Техническое состояние ТНВД и линии низкого давления может дополнительно оцениваться по скорости нарастания давления топлива в гидроаккумуляторе при пуске дизеля.

Список литературы:

1. Грехов Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: [учебник для вузов] / Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. – М.: Легион – Автодата, 2005. – 344 с.
2. Губертус Гюнтер. Диагностика дизельных двигателей. Серия «автомеханик»./ Губертус Гюнтер.; пер.с нем. – М.: ЗАО «КЖИ За рулём», 2004. – 176 с.
3. Зенкин Е.Ю. Диагностирование неисправностей топливной аппаратуры системы Common Rail путём измерения расхода топлива в линиях слива / Е.Ю. Зенкин // Автомобильный транспорт. – 2005. – №17. – С. 52–54.
4. Пойда А.Н. Определение эксплуатационных показателей дизельной топливной аппаратуры по балансу расходов / А.Н. Пойда, А.Н. Врублевский, Е.Ю. Зенкин // Автомобильный транспорт. – 2009. – №23. – С. 135–139.
5. Грудский Ю.Г. Системы управления дизельными двигателями Bosch. Узлы и агрегаты / Ю.Г.Грудский, А.Г.Иванов: пер. с нем. // За рулём. – 2004. – 478 с. – (Первое русское издание).
6. Системы управления дизельными двигателями. Том 5. Модели выпуска 1996 – 2000гг / – М.: «Легион – Автодата», 1999г. – 640с.
7. Ahlin Kristina. Modeling of pressure waves in the Common Rail Diesel Injection System / Kristina Ahlin // Examensarbete utfört i Fordonssystem vid Tekniska Högskolan i Linköping av Reg nr: LiTH – ISY – EX – 3081 Linköping, Desember 11, 2000.
8. Baumann Julian Einspritzmengenkorrektur in Common – Rail – Systemen mit Hilfe magnetoelastischer Drucksensoren. Dissertation Ph.D., Universität Karlsruhe (TH) Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2006 Universitätsverlag Karlsruhe c/o Universitätsbibliothek StraÙe am Forum 2 D – 76131 Karlsruhe
9. BOSCH Esi[tronic] 2008 v8.1.2.1 [Электронный ресурс] : 2 электроннооптических диска (DVD – Rom); 12см – Системные требования: Pentium IV / 2 ГГц ОЗУ: 512 Мб, место на жестком диске 20 Гб, DVD 12x, Дисплей: 17" 1024x768, Windows XP Professional Service Pack 2.