

## Литература

1. Стрельбицкий, В.Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины / В.Ф. Стрельбицкий. – М.: Машиностроение, 1978. – 135 с.
2. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в трех томах. Т. 2. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – 455 с.
3. Собрание сочинений / Нерло Нерли. – Изд. 1-е. – М.: Сельхозгиз, 1940. – Т. 4. – 233 с.

УДК 621.431.7

**В.Е. Тарасенко**  
*(УО «БГАТУ»,  
г. Минск, Республика Беларусь)*  
**А.А. Жешко**  
*(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)*

## **АНАЛИЗ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДИЗЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ**

### **Введение**

Топливоподающая аппаратура дизеля является определяющей при формировании выходных параметров и характеристик тракторного агрегата. Индикаторные и эффективные показатели дизеля определяются параметрами топливоподающей аппаратуры, а именно цикловой подачей, опережением и продолжительностью впрыска и законом подачи. Инерционность и низкое быстродействие механических средств регулирования частоты вращения у применяемых топливных насосов оказывают, особенно на переходных режимах, отрицательное воздействие на работу тракторных агрегатов, на их экономические показатели.

Разработчики топливной аппаратуры сегодня концентрируются на повышении экономичности дизелей при обеспечении параметров токсичности выхлопных газов в пределах установленных норм [1, 2, 3]. Кроме того, новые модели дизелей форсируются по мощности, снижается их вес, повышается надежность в эксплуатации. Вполне очевидно, что механические регуляторы с самыми совершенными дополнениями (ограничителями хода рейки с высотным корректором, по давлению, ограничителем пределов дымности выхлопных газов, датчиками фаз распределения и др.) не могут обеспечить управляемости, одновременного взаимодействия регулируемых функций и т. д. Механические системы становятся более сложными и поэтому менее надежными. Этим обусловлено появление электронно-управляемых систем топливоподачи с гидрозатворными и обычными форсунками, а также устройств оценки неравномерности подачи топлива [2].

Сегодня находят широкое применение электронные системы управления топливоподачей, у которых электронное управляющее устройство получает и обрабатывает параметры дизеля, например частоту вращения, скоростной режим, давление и температуру наддувочного воздуха, а также информацию о включенной передаче в трансмиссии, о положении педали управления подачей топлива и вырабатывает установочный сигнал, значение которого преобразуется исполнительным механизмом в требуемое значение подачи топлива по величине и началу впрыска. Количественные характеристики впрыска, начала топливоподачи могут изменяться в широких пределах в зависимости от частоты вращения и нагрузки. Отметим при этом, что насос-форсунка является одним из наиболее перспективных решений для работы под электронным управлением, поскольку не имеет энергетических потерь, связанных с протеканием топлива под высоким давлением по трубопроводам, но имеет достаточно сложную конструкцию.

## Основная часть

Особенностью импульсных топливных систем (ТС) с высоким давлением впрыска являются значительные пиковые нагрузки на валу привода. Этим обусловлено наличие упругой муфты, предохраняющей зубчатую передачу от разрушения [3].

Следует отметить, что программное управление при значительном количестве датчиков позволяет вводить в управление недоступное для механических систем число функций, и здесь все зависит от потребности в них. Быстродействие импульсных ТС позволяет согласовывать работу двигателя с другими системами, например с тормозной, – по сигналу от педали прекращать подачу топлива и использовать торможение двигателем, также прекращать подачу топлива при включенной передаче и полном отпуске педали газа.

Применение дозирующего клапана позволяет управлять началом и длительностью впрыска топлива. Чтобы реализовать эту возможность, импульсные системы требуют увеличенных ходов плунжеров и наличия на профиле кулачков участков постоянной скорости. Появление такого участка приводит к выходу ролика с тангенциальной на радиусную часть профиля кулака в период максимальных давлений впрыска, что дает высокие контактные напряжения. Чтобы обеспечить работоспособность, необходимо применять специальный профиль ролика, материалы и термообработку, а также качественную смазку. Также сам дозирующий клапан, в котором игла подвержена большим нагрузкам, в том числе кавитации, является дорогим и сложным для производства.

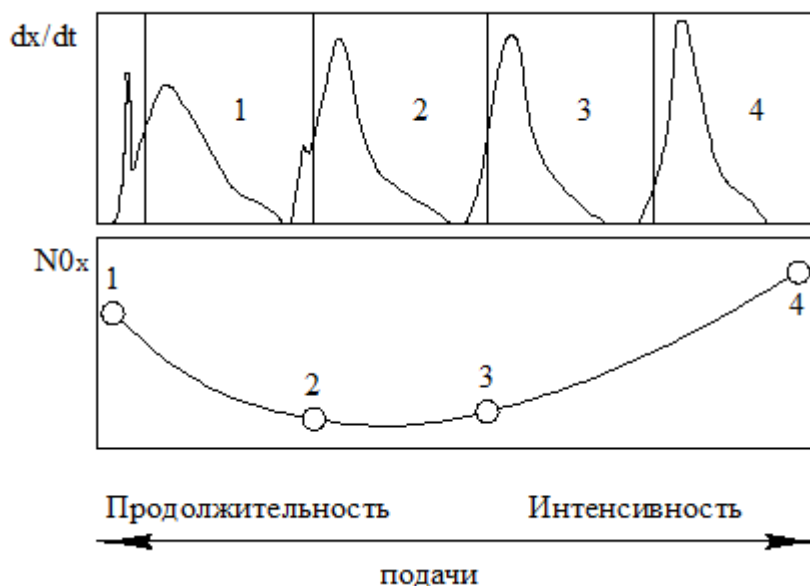
Параметры клапанного узла – диаметр, ход иглы, форма и размеры запирающего элемента, быстродействие при включении и выключении, должны быть тщательно подобраны и согласованы с другими составляющими ТС. Также клапан должен иметь устройства для гашения волн, возникающих при отсечке. В противном случае могут возникать эффект самопроизвольного включения форсунки при открытом клапане, а при отсечке с давлением 100 МПа и более – кавитационные разрушения иглы и других элементов.

Из всех импульсных ТС насос-форсунки имеют наибольшие перспективы и уже сегодня выпускаются для давлений впрыска свыше 200 МПа, обеспечивая высокую энергию впрыска, хорошее распыливание и управление подачей. Однако снижение времени подачи топлива должно идти до определенных пределов, иначе возрастают шум, динамические нагрузки, ухудшаются экологические показатели, что видно на рисунке 1 [4]. Необходимо отметить, что совершенствование ТС путем повышения давления впрыскивания, вероятно, близко к своему пределу, и именно по этой причине следует ожидать появления альтернативных систем. К тому же в развиваемом давлении импульсные системы зависимы от частоты вращения. Топливные системы, имеющие по клапану на каждой секции насоса (дросселирование подачи), на каждой форсунке (управление подачей) и теоретически успевающие управлять давлением, встречаются только в патентах.

В топливных системах с дозирующими клапанами впервые представилась возможность надежно получать впрыск предварительной и последующих доз топлива в малых объемах. Специалисты рекомендуют разбивать впрыск на 4–6 доз, добиваясь этим снижения шума, эмиссии  $\text{NO}_x$  и сажеобразования [5].

По исследованиям [6], первые две дозы топлива, называемые пилотными, служат, соответственно, для увеличения крутящего момента на низких частотах вращения и уменьшения эмиссии вредных веществ, а также обе – для уменьшения шума. За основным впрыском в цилиндр поступает доза топлива, управляющая содержанием  $\text{NO}_x$ . Следующая предназначена для управления при  $\lambda < 1$ . Последняя доза топлива предназначена не для сгорания в цилиндре, а для управления температурой в выхлопном тракте и периодического сжигания сажи в фильтре.

Отметим, что топливоподача в современном дизеле не является непрерывным во времени процессом, дифференциальная характеристика имеет разрывы, а интегральная – участки с нулевым значением производной. Подбор длительности этих участков и крутизны роста кривой подачи при ее возобновлении позволяет реализовать возможность влияния на характеристику выгорания [3].



**Рисунок 1. – Зависимость эмиссии окислов азота от интенсивности подачи**

Также современный двигатель внутреннего сгорания, работающий по циклу Дизеля, уже не является в чистом виде двигателем с внутренним смесеобразованием, поскольку для управления характеристикой выгорания топлива применяется его подмешивание к поступающему воздуху еще до цилиндра. Ограниченный экологическими требованиями, дизель имеет режимы, при которых не стремятся к выгоранию с полным отсутствием в выхлопных газах углеводородов. Более того, имеются режимы с впрыскиванием топлива на такте выпуска.

Ввиду крайне малого времени впрыска при частоте вращения  $2000 \text{ мин}^{-1}$  и скорости поршня около  $1,2-1,3 \text{ м/с}$ , успешно с задачей дробления впрыска на 3 и более доз могут справиться импульсные ТС с компоновкой электромагнитного или пьезоуправляемого дозирующего клапана на форсунке, на насос-форсунке, а также аккумуляторные системы [7]. Система 2-го поколения, например, способна организовывать до 5 отдельных впрыскиваний топлива в одном цикле, в том числе 2 «пилотных» [8]. Для аккумуляторных ТС необходим топливоподкачивающий насос с электроприводом.

Насос для ТС фирмы Common Rail внешне прост по конструкции, но развиваемые им давления приводят к высоким механическим нагрузкам в системе, чего лишена в известной мере аккумуляторная ТС с мультипликацией давления в форсунке. Здесь в общей магистрали находится масло, поданное насосом под давлением, обычно не превышающим  $20 \text{ МПа}$ , а топливо подается отдельным насосом к форсунке.

Фильтры для ТС, развивающих высокие давления, должны выполнять водоотделение.

Аккумуляторные системы в сравнении с импульсными легко реализуют еще одну дополнительную функцию – управление давлением впрыска. Данное преимущество особенно ценно при малой частоте вращения коленчатого вала двигателя. В аккумуляторных ТС на сегодня заключены наибольшие возможности по управлению впрыском. Реализовать принцип постепенного либо ступенчатого изменения цикловой подачи на режиме пуска способна лишь система Common Rail с электронным

управлением [8, 9]. Следуя запрограммированному алгоритму, система по истечении заданного промежутка времени с заданным приращением производит увеличение цикловой подачи до момента увеличения частоты вращения коленчатого вала.

Поскольку рынку требуются двигатели разного технического уровня, возникает вопрос выбора типа ТС. В работах более раннего периода, к примеру [10], предлагалось определять применимость ТС по рабочему объему цилиндров двигателей. Рекомендации давались для вновь проектируемых двигателей, исходя из перспективных требований по токсичности выхлопа.

Сегодня ситуация в целом по двигателям более сложна и требует одновременного совместного рассмотрения нескольких условий: назначение, новый или совершенствуемый выпускаемый, какого уровня нормы действуют при данном применении двигателя, ценовая ситуация по ТС.

Для вновь проектируемых двигателей, попадающих под действие самых жестких норм по токсичности выхлопа, представляется предпочтительным применение насос-форсунок с пьезоприводом дозирующего клапана. Возможности насос-форсунок, как и остальных современных ТС, обеспечивают широкое применение в двигателях различного рабочего объема и назначения. Аккумуляторные системы предпочтительны как для новых двигателей, так и при их глубокой модернизации [3].

Надо отметить, что обе наиболее прогрессивные системы либо их компоненты выпускаются лишь мировыми фирмами-лидерами по производству ТС – Delphi, Bosch, Siemens, Caterpillar, Cummins. К настоящему времени они прошли этапы исследований, постановки на производство, но спрос на них недостаточен. С повышением сбыта этих ТС для новых двигателей цены на системы станут вполне приемлемыми. К тому же выполнение перспективных экологических норм связано с серьезными изменениями не только в ТС, но и в самом двигателе, например вводится регулирование фаз впуска и выпуска, в выпускном тракте появляется устройство по контролю, детоксикации выхлопных газов и ликвидации сажи.

Импульсные ТС (насос + форсунка) приемлемы для модернизации без серьезных переделок двигателей под требования Tier-3.

Проходя этапы развития, ТС получили такие новые свойства и возможности, которые изменили представление о ТС как о системах, замкнутых в информационном поле собственно двигателя и человека. На современную ТС дизеля возлагаются задача управления впуском воздуха, процессами при выпуске, а также функции связи и управления другими системами мобильных машин.

Из вышеизложенного материала можно получить рекомендации о способах совершенствования топливных систем. Причем сразу следует отметить, что совершенствование систем с электронным управлением в основном идет путем реализации все новых функций в управлении, для систем с механическим управлением существенной остается оптимизация внутренних параметров для интенсификации подачи.

Поэтому для систем с электронным управлением, где набор реализуемых функций определяется требованиями потребителя, необходимо прежде всего определить обязательный набор компонентов, без которых будут наблюдаться существенные пробелы в управлении.

Актуальной является разработка ТС для глубокой модернизации существующей продукции моторостроения. Рациональной для рассмотрения является ТС, состоящая из единичных насосных секций с клапанами, форсунок, электронного управления в импульсном режиме.

Система включает в себя: бак для топлива, фильтры очистки топлива, топливоподкачивающий насос, топливопроводы низкого давления, индивидуальные ТНВД с дозирующим клапаном, имеющим электромагнитный или пьезопривод,

упругую муфту на валу привода ТНВД, топливопроводы высокого давления, форсунки, устройства аварийного останова.

Имеется набор датчиков – частоты вращения коленчатого вала, фазы, электронная педаль, подъема иглы, давления масла, давления наддува, температуры масла и охлаждающей жидкости. Управляющий работой ТС контроллер имеет силовые ключи. В управление заложены функции диагностики, все устройства соединены кабелями с разъемами.

Такой состав следует считать минимально необходимым. Это позволяет реализовать управление количеством подаваемого топлива, началом и окончанием его подачи, а также любой закон регулирования. Отслеживаются аварийные ситуации. Стоимость ТС будет минимальной.

Для более точного управления подачей необходимо дополнить ТС следующими компонентами: датчиками температур воздуха, топлива, отработавших газов в каждом выхлопном патрубке, датчиком массового расхода воздуха, датчиком давления топлива в питающей ТНВД магистрали. Также в состав устройств, работающих под управлением контроллера ТС, следует включить рециркуляцию отработавших газов, управление наддувом, температурой подаваемого воздуха и выхлопных газов, комплекс датчиков, катализаторов и нейтрализаторов в выпускном тракте.

С точки зрения управления внутренними параметрами двигателя внутреннего сгорания (ДВС) этого набора компонентов вполне достаточно для выполнения высоких экологических норм.

Следующим этапом развития ТС является согласование работы ДВС и мобильной машины в целом. Для чего мобильная машина, например, должна иметь устройства измерения параметров, свой контроллер и устройство связи с контроллером двигателя.

В этой комплектации будет достигаться наименьший эксплуатационный расход топлива и обеспечиваться высокое качество технологического процесса мобильной машины.

В принципе, три выделенных варианта подхода к комплектованию ТС применимы и к созданию других ТС с электронным управлением, с учетом их особенностей. Например, для ТС фирмы Common Rail уже в минимальном наборе обязательны датчики высокого давления и устройство предупреждения аварийного расхода.

Не следует размещать датчики частоты вращения на валу привода насосных секций, часто это предлагается при компоновке единичных насосов в общем корпусе. У дизелей с малыми цикловыми подачами, где возможно сохранение ременного привода, при смене режимов возникает существенная погрешность измерения угловой координаты, у мощных дизелей к этому же эффекту приводят крутильные колебания из-за больших пиковых нагрузок [3].

При модернизации двигателя без изменения блока или головки цилиндров возможна установка индивидуальных ТНВД в одном корпусе. При этом короче приводной вал и уменьшаются крутильные колебания, но увеличивается длина трубопроводов высокого давления.

В системе управления обязательно должна быть функция автодиагностики и блокировки ошибочных действий оператора.

Как отмечено ранее, важной задачей для последующей разработки является установление связи с управлением мобильной машиной. Возможны два варианта построения управления. Первый – когда управляющее воздействие строится на основании анализа сигналов типа «включено-выключено», например, об определенном положении органов управления или о достижении параметром заранее предусмотренного фиксированного значения. Такое воздействие реализуется достаточно просто.

Пример – выключение подачи при движении с включенной передачей и ненажатой педалью газа, переход на режим холостого хода при последующем нажатии

сцепления. Также несложно организовать реакцию ТС на достижение маслом двигателя определенной температуры и другие параметры, отслеживание большинства аварийных ситуаций.

Более сложно построить воздействие на ТС, анализируя влияние динамично изменяющихся параметров – частоты вращения колес, значений развиваемого двигателем крутящего момента. В этом случае появляется множество нерешенных проблем.

### **Заключение**

Наиболее гибкое и эффективное управление в настоящее время обеспечивается электронными контроллерами в составе с аккумуляторными системами топливоподачи, насос-форсунками и индивидуальными ТНВД, поскольку они представляют собой модуль-подсистему двигателя с четкой иерархией и достаточной информативностью во внутренних и внешних связях, хорошо поддающихся автоматизированному управлению. При этом они имеют достаточно отработанную механическую составляющую, гидравлические и электрические компоненты с хорошими перспективами по совершенствованию с помощью современных технологий.

Современные ТС с высокими давлениями впрыска при расчете параметров подачи требуют учета сжимаемости топлива, упругости элементов привода и собственно насоса высокого давления.

02.05.2016

### **Литература**

1. Галиуллин, Р.Р. Повышение эффективных показателей тракторных дизелей электронным управлением топливоподачи: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Р.Р. Галиуллин; ФГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет». – Санкт-Петербург – Пушкин, 2009. – 39 с.
2. Тер-Мкртчян, Г.Г. Современное состояние и перспективы развития топливной аппаратуры автотракторных дизелей / Г.Г. Тер-Мкртчян, М.В. Мазинг // Двигателестроение. – 2014. – № 1. – С. 30–35.
3. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.
4. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
5. Пинский, Ф.И. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания: учебное пособие / Ф.И. Пинский, Р.И. Давтян, Б.Я. Черняк. – М.: Легион-Автодата, 2001.
6. Мазинг, В.М. Требования к конструкции и параметрам топливной аппаратуры для перспективных автомобильных дизелей / В.М. Мазинг, В.В. Курманов, Г.В. Еремин // Автомобили и двигатели: сборник научных трудов / НАМИ. – 2003. – Вып. 231.
7. Направления НИОКР в области разработки двигателей для легковых и коммерческих автомобилей / Ф.К. Мозер [и др.] // Материалы фирмы AVL List GmbH, Грац. – Австрия, 2001.
8. Кухаренок, Г.М. Пусковые качества дизелей с аккумуляторной системой топливоподачи / Г.М. Кухаренок, А.Н. Марчук, А.Н. Петрученко. – Минск: БНТУ, 2012. – 173 с.
9. Марчук, А.Н. Обоснование параметров топливоподачи в аккумуляторных топливных системах для улучшения пусковых качеств дизелей: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / А.Н. Марчук. – Минск, 2011. – 177 с.
10. Тракторные дизели: справочник / Б.А. Взоров [и др.]; под общ. ред. Б.А. Взорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 535 с.