

ВЫБОР ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Доктора техн. наук, профессора КУХАРЕНКО Г. М., РУКТЕШЕЛЬ О. С.,
канд. техн. наук ПУТЕЕВ Н. В.*

Белорусский национальный технический университет

Ключевыми направлениями совершенствования современных высокофорсированных дизелей являются повышение их экономических показателей и снижение токсичных компонентов в выбросах. Основное внимание уделяется топливopодающим системам (ТС).

Результатом деятельности научно-исследовательских центров и производителей явилось появление на рынке ТС с гибким программным управлением процессом топливopодачи.

В ходе развития ТС приобрели такие возможности, которые изменили представление о них как о системах, замкнутых в информационном поле собственно ДВС и человека. На современную ТС дизеля возложена задача управления впуском воздуха, процессами при выпуске, а также функции связи с другими системами мобильных машин и управления ими.

Появление новых ТС изменило не только возможности, но и резко усложнило их устройство, потребовало новых составляющих, современного уровня конструкции и исполнения комплектующих собственно двигателя и привело к их существенному удорожанию.

Предлагаемый информационно-аналитический материал предназначен для правильного выбора конструктивного исполнения (т. е. возможностей, а следовательно, и цены) ТС на основе предъявляемых к ДВС требований в его сегменте рынка – стационарных либо транспортных различного назначения.

Для удобства сравнения ТС разного уровня основные данные по ним сведены в табл. 1. Как видно из таблицы, появление новых возможностей ТС сопровождается включением в

их состав новых элементов. Но и под старым названием в новых ТС обнаруживается устройство более высокого уровня исполнения. Так, в таблице курсивом выделены узлы средней сложности, жирным шрифтом – высокой.

Топливopодачающие насосы с механическим приводом плунжерного типа применяются в системах НЗТА, ЯЗДА-ЯЗТА, роторно-пластинчатые – в насосах VE BOSCH. По опыту авторов, удовлетворительно работает только второй – с импульсными системами, обеспечивая режим клапанного заполнения надплунжерного пространства. Для аккумуляторных ТС необходим топливopодачающий насос с электроприводом.

Рядный и распределительный блоки собственно ТНВД – сложное, но освоенное изделие. Столбиковый насос импульсной системы более прост в силу отсутствия управляющих кромок на плунжере, но весьма требователен к выбору материалов и соблюдению технологии изготовления, поскольку его детали работают с высокими контактными давлениями.

Насос-форсунка является одним из наиболее перспективных решений для работы под электронным управлением, но и очень сложным узлом.

Насос для ТС Common Rail внешне прост, но развиваемые им давления приводят к высоким механическим нагрузкам в системе, чего в известной мере лишена аккумуляторная ТС с мультипликацией давления в форсунке. В общей здесь магистрали находится масло, поданное насосом под давлением, обычно не превышающем 20 МПа, топливо подается отдельным насосом к форсунке.

Таблица 1

**Состав топливных систем и возможности
в управлении топливоподачей**

	С механическим управлением топливоподачей	С электронно-механическим управлением	С электронным управлением, импульсные с клапаном		Аккумуляторные	
			Насос и форсунка	Насос-форсунки	Common Rail	С мультипликацией
Состав	Насос топливо-подкач.	Насос топливо-подкач.	Насос топливоподкач.	Насос топливо-подкач.	Насос топливо-подкач.	Насос предварительн. масляный
	Насосный блок рядный или распределительн.	Насосный блок рядный или распределительн.	Насосы столбиковые	Насос-форсунки	Насос топл. высокого давления	Насос масл. среднего давления и топливный
	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр масла, фильтр топл.
	—	—	—	—	Гидроаккумулятор	
	—	—	—	—	Высокого давления топливный	Среднего давления масляный
	—	—	—	—	Предохранительный клапан	
	—	—	—	—	Охладитель топлива	—
	Топливо-проводы	Топливо-проводы	Топливо-проводы	—	Топливо-проводы CR	Топливо и маслопроводы
	Форсунки 1- и 2-пружинные	Форсунки 1- и 2-пружинные	Форсунки 1- и 2-пружинные	Насос-форсунки	Форсунки CR	Форсунки с мультипликатором
	Регулятор механический с дополнительными устройствами	—	—	—	—	—
	Муфта опережения впрыска	Муфта опережения впрыска	—	—	—	—
	—	Актуатор	—	—	—	—
	—	—	Упругая муфта в приводе насоса		—	—
	Рычаг останова, электроклапан	Рычаг останова, электроклапан	Останов дозирующим клапаном или на впуске в насос			
	—	—	—	—	Аварийный ограничитель подачи через форсунки	—
	—	—	Электроклапаны дозирующие			
	—	—	на насосе	на форсунке	на насос-форсунке	на форсунке
	—	—	с магнитным приводом			
	—	—	с пьезоп приводом			
	—	—	—	—	Электроклапан управления давлением в аккумуляторе	
	—	—	Контроллер			
	—	—	Управление рециркуляцией			
	—	—	Датчики:			
	—	—	частоты вращения двигателя			
	—	—	тактности			
	—	—	электронная педаль			
	—	—	подъема иглы			
	—	—	Давления:			
	—	—	наддува			
	—	—	масла			

	С механическим управлением топливopодачей	С электронно-механическим управлением	С электронным управлением, импульсные с клапаном		Аккумуляторные	
			Насос и форсунка	Насос-форсунки	Common Rail	С мультипликацией
	–	–	–	–	топлива	масла и топлива
		–	Комплекс по контролю выхлопного тракта			
			Температуры:			
			масла в двигателе			
			топлива			
			охл. состава			
			воздуха			
		–	выхлопных газов в каждом патрубке			
			Массового расхода воздуха			
			Устройства диагностики			
			Программное обеспечение Силовые ключи			
			CAN			
			Кабели с разъемами AMP			
Обеспечивает	Регулирование по объему цикловой подачи, угла опережения впрыска	Регулирование по объему цикловой подачи, угла опережения впрыска, связь с управлением мобильной машины	Высокое давление впрыска, предвпрыск, регулирование начала и длительности впрыска, связь с управлением, диагностикой и сервисом мобильной машины	Высокое давление впрыска, несколько впрысков, регулирование начала и длительности, связь с управлением, диагностикой и сервисом мобильной машины	Высокое регулируемое давление впрыска, несколько впрысков, регулирование начала и длительности, связь с управлением, диагностикой и сервисом мобильной машины	Высокое регулируемое давление впрыска, несколько впрысков, регулирование начала и длительности, меньшая мех. нагруженность насоса, связь с управлением, диагностикой и сервисом мобильной машины

Фильтры ТС, работающих с высокими давлениями, предназначены для водоотделения.

Самые дорогие топливопроводы у ТС Common Rail, в наимыгоднейшем положении – ТС с насос-форсунками, поскольку не имеют энергетических потерь, связанных с протеканием топлива под высоким давлением по трубопроводам.

Новые требования к ТС весьма существенно преобразили форсунки. Для ТС с механическим и электромеханическим управлением форсунки стали двухпружинными и получили распылители типа Р, что позволило уменьшить шум и выполнять требования по Евро-2, а у ТС насос + форсунка при компоновке дозирующего клапана на насосе и работающего под электронным управлением – Евро-3. Однако форсунка с дозирующим клапаном у импульсной

ТС, насос-форсунка, форсунка Common Rail и особенно у аккумуляторной ТС форсунка с мультипликацией – это весьма сложные и дорогие узлы.

ТС без индивидуального электронного управления по секциям могут содержать муфту опережения впрыска. По наблюдениям практики эксплуатации, этот узел в механическом и гидравлическом исполнении удовлетворительно работает у рядных и распределительных насосов BOSCH, LUCAS.

Стремление производителей расширить возможности механического управления подачей привели к тому, что регулятор превратился в сложный, дорогостоящий и ненадежный узел, но не обеспечивающий требуемого уровня управления подачей топлива.

Переходными от ТС с механическим управ-

лением к электронным являются ТС с актуаторным (электромагнитным) приводом дозирующего органа ТНВД. Актуатор выполняется с поворотным или линейным перемещением в соответствии с требованиями быстродействия и точности.

Особенностью импульсных ТС с высокими давлениями впрыска являются значительные пиковые нагрузки на валу привода. Этим обусловлено наличие упругой муфты, предохраняющей зубчатую передачу от разрушения.

Далее в таблице обозначены компоненты для ТС с электронным управлением. Невозможно указать все их, мы назвали наиболее типичные. Большинство из них – освоённая продукция. Не представляет особой сложности и контроллер. Более серьёзная проблема – силовые ключи, особенно при использовании дозирующих клапанов с электромагнитным приводом иглы. Сам дозирующий клапан, в котором игла подвержена большим нагрузкам, в том числе кавитации, является дорогостоящим и сложным для серийного производства. Высокая стоимость и электрических кабелей со специальными разъёмами.

Создание программного обеспечения современных ТС – весьма серьёзная задача, особенно учитывая необходимую связь с управлением не только ДВС – от трансмиссии до кондиционеров. Но не менее сложно и дорого провести калибровку конкретного двигателя. Обязательным условием является наличие шины CAN.

ТС с механическим управлением позволяют развить давление до 120 МПа. Насосы можно форсировать и до давлений порядка 180 МПа, но это лишено смысла, так как существенно возрастает стоимость, возникают проблемы с ресурсом, но главное – эти системы не способны выполнить нормативы по выбросам выше требований Евро-2 без революционных прорывов, а для Евро-2 достаточно давлений до 120 МПа, для Евро-1 – до 80 МПа. Основным недостатком ТС с механическим управлением – осреднённое, т. е. без учёта индивидуальных особенностей тракта насос – форсунка – цилиндр, регулирование всего двух параметров: количества топлива и в лучшем случае угла опережения впрыска. Преимущество данных ТС – их самая низкая цена на рынке ТС.

Появление ТС, сохранивших отсечные кромки у плунжеров насосов, но сменившие

механический регулятор на актуаторный привод рейки или дозатора, – естественный шаг производителей. Данные ТС характеризует повышенное быстродействие, точность, возможность учёта большего количества параметров, но сохраняет те же недостатки – осреднённое регулирование двух параметров, при этом цена ТС значительно возрастает. Но эта ТС впервые предоставила реализуемую возможность оптимизировать работу мобильной машины в целом, например управлять буксованием колес.

Нецелесообразность применения ТС с актуатором на мобильной машине можно выявить в сравнении с ТС, где дозирующие электроклапаны установлены на каждой секции насоса, а форсунки сохранены традиционные, например двухпружинные.

Стоимости этих систем практически одинаковы, поскольку почти одинаков набор компонентов, требуются одинаковые изменения на двигателе, а появление дозирующих клапанов компенсируется упрощением плунжеров и втулок насоса.

Эксперименты, проведенные авторами, выявили, что основное улучшение работы двигателя происходит при индивидуальных настройках тракта насос – форсунка – цилиндр. Уменьшается шум, возрастают мощностно-экономические параметры ДВС, снижается выброс вредных веществ, а при форсировке давлений впрыска до 150...180 МПа такие ТС выполняют Евро-3. Поэтому данный режим настройки обязателен для каждого конкретного ДВС, критерием для оптимизации которого можно избрать температуру выхлопных газов в выхлопном патрубке каждого цилиндра.

ТС с актуатором не выполняет данных оптимизирующих настроек, ситуация с давлением впрыска та же, что и у ТС с механическим регулированием, поэтому ее новое применение на мобильных машинах неоправданно.

Использование дозирующего клапана позволяет управлять началом и длительностью впрыска топлива. Для того чтобы реализовать эту возможность, импульсным системам необходимы увеличенные ходы плунжеров и наличие 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. Для обеспечения ра-

ботоспособности необходимо применять специальный профиль ролика, материалы и термообработку, а также качественную смазку.

Из всех импульсных ТС насос-форсунки наиболее перспективны и уже сегодня выпускаются для давлений впрыска свыше 200 МПа, обеспечивая высокую энергию впрыска, хорошее распыление и управление подачей. Совершенствование ТС путем повышения давления впрыска, видимо, близко к своему пределу, и именно по этой причине следует ожидать появления систем, использующих альтернативный путь.

Топливные системы с дозирующими клапанами позволили впервые надежно получать впрыск предварительной дозы топлива в малых объемах. Специалисты рекомендуют разбивать впрыск на 4...6 доз, добиваясь этим снижения шума, эмиссии NO_x и сажеобразования [1, 2]. По нашему мнению, ввиду крайне малого времени впрыска (при 2000 об/мин – около 1,2–1,3 мс) успешно с этой задачей могут справиться импульсные ТС с компоновкой пьезоуправляемого дозирующего клапана на форсунке, на насос-форсунке, а также аккумуляторные системы.

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 ДВС.

Высоки цены аккумуляторных ТС не только в связи с их сложностью и новизной, но и по причине большого количества исполняемых функций.

Выбор вида ТС не прост, и этому вопросу посвящено много работ. Так, в [3] предложено применять ТС исходя из рабочего объема цилиндров двигателей. Рекомендации давались для вновь проектируемых автомобильных двигателей с учетом требований по соблюдению норм токсичности выхлопа.

Считаем, что для проектируемых двигателей, подпадающих под действие жестких норм токсичности выхлопа, предпочтительно применение насос-форсунок с пьезоприводом дозирующего клапана.

Аккумуляторные системы предпочтительны как для новых двигателей, так и при глубокой модернизации двигателя.

Обе наиболее прогрессивные системы либо их компоненты выпускаются мировыми лиде-

рами по производству ТС – DELPHI, BOSCH, SIEMENS, CATERPILLAR, LUCAS, CUMMINS. К настоящему моменту они прошли этапы исследований, постановки на производство и малого начального спроса. С повышением сбыта этих ТС на новых двигателях цены на системы вполне приемлемы, и маловероятно, что появится конкурентоспособное предложение от других разработчиков. Соответствие этих ТС нормам Евро-4, Евро-5 связано с серьезными изменениями в двигателе, например введением регулирования фаз впуска и выпуска, а в выпускном тракте – солидного набора устройств по контролю, детоксикации выхлопных газов и ликвидации сажи.

Импульсные ТС насос + форсунка хорошо подходят для модернизации двигателей согласно требованиям Евро-3, поскольку при внешней закупке индивидуальных насосов с электронно-управляемым дозирующим клапаном значительно расширяется круг производителей, способных доукомплектовать ТС и предложить ее на рынок. На рынке присутствует практически единственное предложение фирмы HEINZMANN, выпускающей качественные системы управления для всех без исключения типов ТС.

Поэтому хорошее предложение для рынка дизель-генераторов дизелей специального назначения и работающих на газе получается при соединении возможностей производителей традиционной ТС с предлагаемой фирмой HEINZMANN актуаторной системой управления.

Модернизированные ТС с механическим управлением подачей, по-видимому, оставят за собой рынок стационарных и специальных ДВС, где не распространяется действие невыполнимых для них правил по токсичности.

Таким образом, каждому виду ТС находится свой сегмент рынка, а значит, остается актуальность вопроса совершенствования ТС разного уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы управления дизельными двигателями / Пер. с нем. – М.: ЗАО «КЖИ "За рулем"», 2004. – 480 с.
2. Janiszewski T., Mavrantzas S. Elektroniczne układy wtryskowe silników wysokopreżnych. – Warszawa, 2001. – P. 130.
3. Мазинг В. М., Курманов В. В., Еремин Г. В. Требования к конструкции и параметрам топливной аппаратуры для перспективных автомобильных дизелей // Автомобили и двигатели: Сб. науч. тр. / НАМИ. – 2003. – Вып. 231. – С. 191–195.