

УДК 629.3

## ПЕРСПЕКТИВНОЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ МОЩНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**А.Б. Богаевский, профессор, д.т.н., ХНАДУ**

***Аннотация.** Выполнено техническое обоснование перспективной модернизации системы управления подачей топлива в мощном транспортном дизеле в условиях эксплуатации. Основа модернизации – доработка штатного механического топливного насоса высокого давления регулирующим клапаном, который управляется электромагнитом. Появляется возможность ограниченного управления моментом начала подачи топлива в зависимости от частоты вращения и нагрузки. Регулирование осуществляется в пределах прямого хода приводного кулачка распределительного вала по сигналу от датчика верхней мертвой точки. Предполагаемые затраты сведены к минимуму, ожидаемая экономия топлива в эксплуатации составит до 10 %.*

***Ключевые слова:** регулирующий клапан, управляющий электромагнит, момент начала подачи топлива, мощный транспортный дизель, топливный насос высокого давления, система управления подачей топлива.*

## ПЕРСПЕКТИВНЕ УДОСКОНАЛЕННЯ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ПОТУЖНИХ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ

**О.Б. Богаєвський, професор, д.т.н., ХНАДУ**

***Анотація.** Виконано технічне обґрунтування перспективної модернізації системи управління подачею палива в потужного транспортного дизель – генератора в умовах експлуатації. Основа модернізації – доопрацювання штатного механічного паливного насоса високого тиску регулюючим клапаном, який управляється електромагнітом. З'являється можливість обмеженого управління моментом початку подачі палива в залежності від частоти обертання і навантаження. Регулювання здійснюється в межах прямого ходу приводного кулачка розподільчого вала за сигналом від датчика верхньої мертвої точки. Витрати на впровадження зведені до мінімуму, очікувана економія палива в експлуатації складе до 10 %.*

***Ключові слова :** регулюючий клапан, управляючий електромагніт, момент початку подачі палива, потужний транспортний дизель, паливний насос високого тиску, система управління подачею палива.*

## PERSPECTIVE IMPROVEMENT OF FUEL EQUIPMENT OF POWERFUL TRANSPORT OF DIESEL ENGINES

**A.B. Bogajevskiy, Professor, Doctor of Science**

***Annotation.** The technical substantiation of the perspective modernization of the management system Fuel supply in a powerful transport diesel under operating conditions. The basis of modernization is the completion of a regular high-pressure mechanical fuel pump with a control valve, which is controlled by an electromagnet. There is the possibility of limited control of the timing of the start of fuel delivery, depending on the speed and load. The adjustment is carried out within the forward travel of the camshaft camshaft by the signal from the top dead center sensor. The expected costs are minimized, the expected fuel economy in operation will be up to 10%.*

***Key words:** regulating valve, control electromagnet, starting point of fuel supply, powerful transport diesel, high-pressure fuel pump, fuel supply control system.*

### Актуальность

Развитие транспортного дизелестроения все в большей степени определяется постоянно ужесточаемыми законодательными нормами на дымность и токсичность отработавших газов и уровень шумности, требованиями максимальной экономии топлива. При этом повсеместно отмечается ухудшение качественных показателей дизельного топлива за счет расширения его фракционного состава и стремления фирм производителей повысить выход топлива из нефти, что создает дополнительные трудности [2]. Поэтому экономические и энергетические показатели дизелей, надежность, шумность работы и токсичность в значительной мере зависят от их топливных систем высокого давления [1].

Одним из направлений улучшения показателей транспортных дизелей является совершенствование процесса управления подачей топлива. Совершенствование процесса управления подачей топлива должно осуществляться с учетом ряда требований, а именно:

- увеличение давлений впрыскивания для повышения тонкости распыливания топлива и обеспечения оптимальной продолжительности впрыскивания;
- оптимизация характеристики впрыскивания (закона подачи топлива) в направлении обеспечения плавного начала впрыскивания и резкого окончания для снижения уровня шума;
- обеспечение оптимальной подачи топлива и момента начала впрыска на пусковых режимах и регулирование момента начала впрыскивания в функции нагрузки и частоты вращения;
- корректирование процесса топливоподачи в зависимости от изменения внешних условий и режима работы;
- повышение точности дозирования топлива;
- обеспечение стабильности параметров топливоподачи в условиях эксплуатации [2].

Реализация мероприятий в этом направлении в значительной степени определяется возможностями совершенствования конструкции и параметров отдельных элементов дизельной топливной аппаратуры и регулятора частоты вращения. Одним из таких мероприятий, продемонстрировавшим высокую эффективность и надежность в эксплуатации, является электронный регулятор типа СУДМ-01 отечественного производства, который был из-

готовлен серийно в 100 комплектов и установлен на различные тепловозные дизели (5Д49 тепловозов 2ТЭ116 и ТЭП70; 10Д100 тепловозов 2ТЭ10; К6S310DR тепловозов ЧМЭ 3). Эффективность электронного регулятора во многом обеспечивает многофункциональное программное обеспечение с оптимальными алгоритмами, за счет использования которого повышается эффективность работы тепловозного дизеля на всех рабочих режимах в эксплуатации.

В эксплуатируемых на тепловозах Украины дизелях применяются топливные системы высокого давления разделенного типа с механическим приводом плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД). В этих системах ТНВД и форсунки выполнены в виде отдельных агрегатов, соединенных трубопроводом высокого давления (ТВД). Их существенный недостаток – снижение давления впрыскивания и ухудшение качества распыливания топлива по мере уменьшения числа оборотов и нагрузки дизеля. Устранение этого недостатка – важная задача разработчиков топливных систем высокого давления для этих дизелей [1].

Также необходимо отметить, что в рамках различных модернизаций реально не было предложено ни одного мероприятия по устранению такого существенного конструктивного недостатка эксплуатируемых в настоящее время тепловозных дизелей, как отсутствие автоматического регулирования момента начала впрыскивания на пусковых режимах и регулирование момента начала впрыскивания в функции нагрузки и частоты вращения. Хотя общеизвестно, что основные показатели работы дизеля существенно зависят от угла опережения впрыска топлива. Упомянутый ранее электронный регулятор СУДМ-01 и аналогичные ему зарубежные изделия при своей работе воздействуют на ТНВД через штатную управляющую рейку и, следовательно, не решают проблему регулирования угла опережения впрыска. Подавляющее же число тепловозных дизелей в промышленном и железнодорожном транспорте имеют фиксированный угол опережения впрыска, который выбирается опытным путем из условия обеспечения номинальной (максимальной) мощности на максимальных разрешенных оборотах коленчатого вала.

Если учесть, что в процессе эксплуатации дизель тепловоза работает на максимальных оборотах и мощности не более 5 % времени, а остальное время дизель работает на частичных нагрузочных режимах или на холостом ходу при угле опережения впрыска, фиксированном для максимальных частоты вращения и нагрузки, то становится очевидным, что основное время эксплуатации дизель тепловоза работает не в оптимальных условиях. Таким образом, введение возможности регулирования момента начала впрыскивания (пусть даже в ограниченном диапазоне) позволит ощутимо повысить экономичность эксплуатации дизеля тепловоза, что при нынешних ценах на топливо является актуальной задачей.

**Целью настоящей работы является** обоснование подхода к модернизации системы управления подачей топлива мощного транспортного дизеля, находящего в эксплуатации с минимальными затратами.

### Основная часть работы

Для каждого режима работы двигателя должен быть угол опережения впрыска топлива, оптимальный для данной угловой скорости и данной нагрузки, и обеспечивающий при прочих равных условиях получение минимума удельного эффективного расхода топлива  $g_{e \text{ min}}$ . Однако выбор угла опережения впрыска не может определяться только одним условием – получением минимального расхода топлива.

Изменение угла опережения впрыска приводит к изменению не только эффективной мощности  $N_e$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , но и максимального значения давления сгорания  $p_z$ , скорости нарастания давления в цилиндре двигателя, т. е. жесткости его работы, и целого ряда других факторов, ограничивающих возможности выбора. Значения угла опережения впрыска экспериментально подбирают с учетом всех перечисленных выше (и возможных других) факторов.

Для транспортных дизелей, работающих в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, выбор угла опережения впрыска оказывается достаточно сложной задачей, так как оптимальное значение угла опережения впрыска зависит не только от наг-

зки и угловой скорости коленчатого вала, но и от типа камеры сгорания и сорта топлива.

В общем случае алгоритм выбора угла опережения впрыска выглядит следующим образом. При снижении нагрузки, т. е. по мере снижения цикловой подачи топлива, избыток воздуха в камере сгорания увеличивается, условия сгорания улучшаются, в связи с чем угол опережения впрыска по мере снижения нагрузки уменьшается. При увеличении угловой скорости коленчатого вала увеличивается интенсивность вихрей в камере сгорания, повышается скорость образования рабочей смеси, что снижает время задержки воспламенения. Однако при увеличении угловой скорости время от начала впрыска до верхней мертвой точки уменьшается быстрее, чем снижается время задержки воспламенения. В связи с этим угол опережения впрыска по мере увеличения угловой скорости коленчатого вала целесообразно увеличивать.

Для компенсации запаздывания впрыскивания и воспламенения топлива рядные топливные насосы дизелей небольшой мощности снабжены автоматическими муфтами опережения начала впрыскивания центробежного типа, которые обеспечивают опережение кулачкового вала насоса относительно коленчатого вала дизеля в пределах  $(10 \div 20)^\circ$  при повышении частоты вращения. Находят свое применение гидравлические механизмы опережения, встроенные в корпус насоса и изменяющие угол опережения начала впрыскивания в зависимости от давления топлива, создаваемого топливоподкачивающим насосом, т. е. в функции скоростного режима.

Однако, подобные системы для находящихся в эксплуатации серийных тепловозных дизелей с общепринятой системой подачи топлива, использующей отдельные насосы для каждого цилиндра, конструктивно не предусмотрены. Поэтому введение механизма опережения впрыскивания, по принципу действия напоминающего муфту центробежного типа, будет равносильно созданию новой конструкции дизеля. Такой подход к модернизации топливных систем эксплуатирующихся железнодорожных дизелей потребует, в соответствии с требованиями нормативных документов, значительных временных затрат на проведение полного цикла опытно-конструкторских работ и последующих многочисленных стендовых и эксплуатационных

испытаний для подтверждения ожидаемых в эксплуатации экономических показателей по снижению расхода топлива, надежности и экологии. В эти временные затраты необходимо включить также переработку методик технического обслуживания дизеля в эксплуатации с учетом модернизированной системы подачи топлива.

В то же время перспективным для модернизации управления подачей топлива тепловозных дизелей представляется использование идеи построения системы, получившей название система PPN (насос-трубопровод-форсунка от англ. pump-pipe-nozzle). Система PPN разрабатывалась с целью увеличения давлений впрыскивания для повышения тонкости распыливания. Предполагается, что дизель с этой системой имеет отдельное устройство по регулированию угла опережения впрыска.

По сравнению с общепринятой системой подачи топлива, использующей отдельные насосы, управление количеством топлива через управляющую рейку и винтовой паз было заменено управляемым электромагнитом, который практически может определять начало и конец фазы подачи [3]. Управляемый электромагнитом клапан конструктивно рас-

положен между форсункой и ТНВД. Плунжер насоса имеет форму правильного цилиндра без винтового паза для рейки. Положение отсечных кромок плунжера относительно наполнительных и отсечных отверстий втулки плунжера в рассматриваемой конструкции не регулируется. Параметром включения электромагнита клапана является давление топлива, которое определяется кулачковым валом. Выключение электромагнита клапана осуществляется через время, которое вычисляется системой автоматического регулирования частоты вращения. Таким образом обеспечивается изменение цикловой подачи и регулирование частоты вращения.

При прохождении тока управляемый электромагнит после достижения необходимого давления открывает клапан и топливо из пространства над плунжером подается на форсунку через ТВД. При отсутствии тока в электромагните клапан перекрывает путь топливу к форсунке, определяя, таким образом, количество подаваемого топлива. Предъявляются требования к форме приводящих насосы кулачков.

Принцип работы такой системы иллюстрируется рисунком 1.

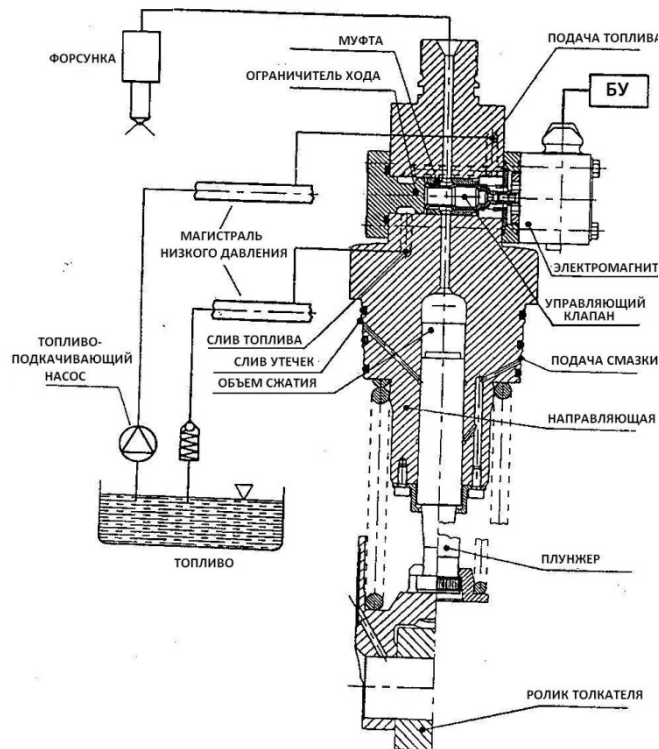


Рис. 1. – Принцип работы системы PPN

Модернизация такой системой мощных транспортных дизелей в условиях эксплуатации требует создавать принципиально новые ТНВД, новый приводной кулачковый вал и соответственно проводить длительные опытно – конструкторские работы и многочисленные испытания (о чем упоминалось выше). В то же время необходимо отметить, что система типа PPN допускает ограниченное регулирование момента начала впрыска топлива в пределах прямого хода приводного кулачка распределительного вала. Распределительный вал механически связан с коленчатым валом дизеля, а значит каждый приводной кулачок ТНВД имеет фиксированный геометрический угол по отношению к ВМТ соответствующего цилиндра. В случае использования для модернизации идеи работы системы типа PPN, данный угол может с помощью электрического управления клапаном уменьшаться в зависимости от частоты вращения и величины нагрузки. Для электрического управления необходимо установить на модернизируемом дизеле датчик ВМТ. Регулирование момента начала впрыска в пределах прямого хода приводного кулачка необходимо производить по сигналу с датчика ВМТ.

Модернизировать в этом случае необходимо лишь верхнюю часть корпуса ТНВД, в которую встраивается клапан, управляемый электромагнитом. Конструкция форсунки, плунжера, ТВД остаются без изменений, что немаловажно при серийном внедрении предлагаемого мероприятия. Для обеспечения максимального диапазона регулирования подачи топлива и момента начала впрыска необходимо управляющую рейку установить в положение максимальной подачи топлива.

Экспериментальный образец усовершенствованной системы с доработанным механическим ТНВД и микроконтроллерным управлением прошел испытания на стенде ГП «Завод им. В.А. Малышева» для одноцилиндровой секции мощного дизель – генератора железнодорожного назначения. Испытания продемонстрировали способность системы регулировать момент начала подачи топлива в функции нагрузки и частоты вращения в пределах прямого хода приводного кулачка.

Разработанные конструктивные элементы для доработки корпусных деталей ТНВД, управляющего электромагнита позволяют

выполнять все работы на мощностях украинских предприятий (в частности харьковских), что существенно повлияет на итоговую цену системы в случае ее внедрения в эксплуатацию. Модернизацию дизеля предлагаемой системой можно будет выполнить в период какого-нибудь текущего планового ремонта, т.е. не выводя дизель (а соответственно и транспортное средство) из эксплуатации. По предварительным оценкам экономическая эффективность от экономии топлива составит до 10 %. Для сравнения – экономическая эффективность от внедрения электронного регулятора составляет (5÷6) % [4].

### Выводы

Таким образом, предложен перспективный подход к усовершенствованию системы управления подачей топлива мощного дизель – генератора транспортного назначения. Особенностью предлагаемых решений является возможность внедрения их без вывода дизеля из эксплуатации, минимальные доработки отдельных элементов существующей топливной системы и существенная ожидаемая эксплуатационная экономия топлива.

### Литература

1. Р.В. Казачков. Проектирование топливных систем высокого давления: учебное пособие.- Харьков: ХГПУ, 1994.- 308 с.
2. В.К. Горбаченко, В.В. Курманов, М.В. Мазинг. Электронные системы управления подачей топлива в дизелях: обзорная информация.- М.: ЦНИИТЭИавтопром, 1989. – 52 с.
3. Система управления для систем электронно-управляемой подачи топлива PPN – PNU – CR. Версия MVC 01 – 10/20: руководство MV 99 002-rus / 04-03. - HEINZMANN GmbH, Schönau (Schwarzwald) Germany, 2003. – 55 с.
4. А.Б. Богаевский. Оценка возможности снижения расхода топлива дизель – генератора маневрового тепловоза за счет совершенствования управления/ А.Б. Богаевский, А.Н. Борисенко, М.С. Войтенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. - № 1. – С. 105 - 109.

Рецензент: О.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 10 мая 2017 р.