

# Тенденции и перспективы развития топливных систем ДВС

(1997)

## 1. Системы питания дизелей

Общеизвестно важнейшее влияние на рабочий процесс, эффективные и экологические показатели дизелей параметров работы топливоподающей аппаратуры (ТПА). К ней предъявляется не менее двух десятков обязательных требований, несоблюдение которых не обеспечивает конкурентоспособность дизелей. В ограниченных рамках данной работы остановимся в основном на двух качествах ТПА, определяющих долговременные и важнейшие тенденции развития дизелестроения и производства ТПА. Характерно, что среди полутора десятков тенденций дизелестроения ведущие специалисты МАН, Мерседес-Бенц, Скания на 2 и 3 место поставили именно эти два качества ТПА: электронное регулирование топливоподачей, двигателем и интенсификация впрыскивания [1.1]. Специалисты фирмы Бош среди десяти методов обеспечения норм Евро-1...3 пять относят к ТПА и на первом месте те же ее свойства [1.2].

### Интенсификация впрыскивания.

Повышение давления впрыскивание - уникальный по универсальности способ воздействия на рабочий процесс дизеля, позволяющий одновременно улучшить все важные и противоречивые по методам достижения результата показатели дизеля: экономичность, мощность и максимальное давление цикла, жесткость сгорания; выбросы частиц, углеводородов и окислов азота.

В последние десять-двадцать лет интенсивность впрыскивания в дизелях всех типов существенно возросла. В первую очередь это относится к быстроходным, автомобильным дизелям. Если в период 1930... 1970 гг.

максимальное давление впрыска ( $P_{\text{в}}^{\text{max}}$ ) в них составляло 25... 45 МПа, и изменялось со временем мало, то в период 1975...1996 гг. во вновь разрабатываемых системах  $P_{\text{в}}^{\text{max}}$  поднялось до 70...120 МПа, а в некоторых системах до 150 МПа. Этот скачок, конечно был обязан энергетическому кризису 70-х годов и последующим стремлением снизить токсичность ОГ. В среднеоборотных дизелях рост  $P_{\text{в}}^{\text{max}}$  шел более равномерно и в начале 70-х привычным уровнем считался более высокий - 70...100 МПа. В настоящее время ведущие фирмы предлагают ТНВД с давлениями 150...160 МПа. В малооборотных дизелях картина менее выраженная - за двадцатилетие уровень  $P_{\text{в}}^{\text{max}}$  поднялся с 70...80 до 90...100 МПа, что объяснялось скорее стремлением использовать все более тяжелые топлива. Таким образом к 1996 г. уровень  $P_{\text{в}}^{\text{max}}$  для всех типов современных дизелей сблизились, хотя способы его обеспечения и конструктивные решения имеют отличия.

**ТПА среднеоборотных дизелей** наиболее представлена в табл.1.1. Трудностью подбора соответствующих данных является отсутствие в справочных данных давления впрыска, в последующих двух таблицах приведены исследовательские результаты, а не фирменные параметры.

Топливные насосы высокого давления (ТНВД) среднеоборотных дизелей приобрели архитектуру сверхжесткой компактной силовой конструкции PFRICV Bosch, L'Orange для дизелей Wartsila, MAN и B&W, Коломенский завод и др. Все шире используются ТНВД заодно с корпусом роликового толкателя [1.3]. Повышение  $P_{\text{в}}^{\text{max}}$  и стремление предотвратить подвпрыск привели к использованию реверсивных клапанов (направленных обратно нагнетательному). Нижняя часть плунжера смазывается из системы смазки дизеля, окна втулки и кромки плунжера симметричны, в корпусе антиэрозионные пробки напротив отсечных окон. Большинство фирм повышение  $P_{\text{в}}$  связывают с использованием моновтулок. При этом клапаны могут находиться в них или в головке насоса. Появились глухие моновтулки

(с закрытой наплунжерной полостью) - L'Orange, Wartsila, MAN и B&W, Коломенский завод. В этом случае усложняется обработка и появляется два пояса анкерных шпиль крепления втулки к корпусу и головки к втулке. Пока сосуществуют обе конструктивные схемы, но в отношении дальнейшего форсирования моновтулки видятся более перспективными. Наличие стыков тем не менее может не лимитировать форсирование ТНВД при оптимизации конструкции на этапе современных прочностных расчетов. Кроме отмеченных особенностей для новых насосов характерны увеличенный ход плунжера, повышение жесткости корпуса за счет увеличения толщин, ребер жесткости, упрощения формы и укорочения силовой схемы, увеличение всех размеров ролика, бочкообразности внешней поверхности ролика, увеличения диаметра кулачкового вала и начальной окружности.

Для предотвращения разрушения или перегрузок ТНВД при нештатном повышении давления (например при засорении сопловых отверстий) в ЦНИДИ предложены пружинные кольца, раскрывающие в этом случае стык между втулкой и корпусом клапана [1.4]. Хотя сегодня насосы унифицированного ряда ТН уже устаревают, так и не оказавшись в производстве, элементы самозащиты могут появиться и в будущем. Ряд ТНВД (MAN и B&W для ЧН40/54 и 58/64) снабжены рычажно-роликовым толкателем с осью качания на эксцентриковом валу для регулирования опережения впрыска. Известны двухплунжерные ТНВД. Они способны обеспечивать расширенный диапазон цикловых подач, но создаются для подачи двух различных топлив. Вряд ли можно ожидать расширения их производства, в будущем их заменят аккумуляторные системы с электроуправлением. Конструкции форсунок изменились значительно меньше, но проблемы жесткости и раскрытия стыков стали более чем актуальными. Наблюдается тенденция к миниатюризации форсунок по тепловоспринимающим поверхностям, все более популярны длиннокорпусные целые (а не составные) распылите-

ли. Если ранее в малооборотном дизеле МАН длина нагнетательного трубопровода достигала 9 м, то теперь трубопроводы выполняют короткими - почти как у быстроходных дизелей (обычно не более 1 м). Это повышает надежность пуска на тяжелом топливе, интенсифицирует и стабилизирует подачу.

Таблица 1.1. Максимальные давления впрыска  
среднеоборотных дизелей

| Дизель                        |          |                     | $P_B^{\max}$ , МПа |             |             |
|-------------------------------|----------|---------------------|--------------------|-------------|-------------|
| Фирма                         | Марка    | Размер              | 1980               | 1990        | 1996        |
| SEMT-Pielstick                | PC2-5    | ЧН40/46             | 94*                | 110         |             |
| SEMT-Pielstick                | PC4      | ЧН57/62             |                    | 120         |             |
| SEMT-Pielstick                | PC30     | ЧН42,5/60           |                    | 180         |             |
| Stork-Werkspoor               | TM410    | ЧН41/47             | 90                 | 110         |             |
| Deutz-MWM                     | BV16M540 | ЧН37/40             |                    | 90          |             |
| Deutz-MWM                     | TBD444   | ЧН23/32             |                    | 150         |             |
| Watsila,(ТПА L'Orange)        | VASA-22  | ЧН22/24             |                    | 120         |             |
| Watsila,(ТПА L'Orange)        | VASA-32  | разрезная<br>штулка |                    | 120         |             |
| Watsila,(ТПА L'Orange)        | VASA-32  | моновтулка          |                    | 150         |             |
| Watsila,(ТПА L'Orange)        | VASA-25  | ЧН25/30             |                    | 150         |             |
| Watsila,(ТПА L'Orange)        | VASA-46  | ЧН46/58             |                    | 200         | 200         |
|                               | ZV40/48  | ЧН40/48             |                    | 120         |             |
| Bergen,(ТПА L'Orange)         | B        | ЧН32/36             |                    | 140         |             |
| MAN и B&W1                    | L58/64   | ЧН58/64             |                    | 130         |             |
| MAN и B&W                     |          | ЧН40/54             |                    | 150         |             |
| GMT                           | A320     | ЧН32/36             |                    | 140         |             |
| Daihatsu                      | DK-32    | ЧН32/36             |                    | 150         |             |
| Mitsubishi                    | SU-2     | ЧН24/30             |                    | 150         |             |
| Sulzer                        | ZA40S    | ЧН40/48             |                    | 150         |             |
|                               | Г70      | 6ЧРН36/<br>45       | 65*                |             |             |
| Коломенский завод             | Д49      | ЧН26/26             | 80                 |             | до<br>170   |
| Коломенский завод             | Д42      | ЧН30/38             | 65                 | 120         |             |
| Среднеоборотные               |          |                     | 65-100             | 100-<br>180 | 120-<br>200 |
| Двухтактные крейц-<br>копфные |          |                     | 70-80              |             | 80-<br>100  |

ТНВД **малооборотных дизелей** по принципам работы и конструкции стали еще более похожи на ТНВД среднеоборотных ДВС. Ушли в прошлое аккумуляторные системы с механическим распределением, с газовым приводом, исчезают насосы с клапанным регулированием. Основной конструкцией стал ТНВД с золотниковым регулированием, как у других типов ДВС. Тонкостенные вставные втулки плун

жеров часто заменяются толстостенными моновтулками. Многие ТНВД снабжаются второй рейкой для управления углом опережения впрыска при использовании различных топлив. В целях охлаждения форсунки топливом между впрысками ТНВД ДКРН 80/160) не имеет нагнетательного клапана, а форсунка снабжена двумя иглами. Большинство же форсунок имеет масляное охлаждение. В целом ввиду больших трудностей частой модернизации и соответствия предъявляемым к ней требованиям, ТПА малооборотных дизелей довольно консервативна. Существенен и определенный базовый режим работы.

В ТПА **автотракторных дизелей** в настоящее время происходят наибольшие изменения. Трехкратное увеличение давления нагнетания привело к качественным изменениям в их конструкции (см.табл. 1.3). Можно сказать, что они становятся все более похожими на ТНВД среднеоборотных двигателей и в дальнейшем это сходство станет еще большим. Так все фирмы отказались от лючной конструкции корпусов ТНВД (серия А Bosch, заложенная в начале 30-х годов). Теперь и в будущем собранные насосные секции вставляются сверху и закрепляются на двух шпильках за их фланец. Первоначально такая конструкция была разработана ради повышения жесткости корпуса (корпус - глухой с обеих сторон, жесткий, с утолщенными верхним фланцем и монолитным нижним туннелем под кулачковый вал), но такое решение оказалось и более технологичной в производстве и эксплуатации. В России такие ТНВД используются на КамАЗ (ТПА

ЯЗДА), ГАЗ-4301 (ТПА ЯЗДА), на дизелях семейства ЯМЗ-840 и модификаций (ТПА ЯЗТА), готовятся для УАЗ, ЗМЗ, ЗиЛ, а в более отдаленной перспективе видится переход на такие ТНВД всеми производителями блочных насосов.

Претерпевает изменение сама **вставная секция**. От первых секций с обычной короткой втулкой (КамАЗ, 4МТНМ, Bosch “М”, ”Р3000”) для подач с  $P_{\text{в}}^{\text{max}}=40\text{...}70$  МПа наблюдается переход к удлиненным втулкам со сквозным отверстием под плунжер (серия “Компакт” ЯЗТА-ЯЗДА для ЯМЗ-840, ГАЗ-4301, УАЗ; Bosch “MW”, ”Р7100”, ”RP21”, ”PR-39”, Friedmann und Maier “P10” и др.). Усиливать пришлось почти все элементы ТНВД - даже рычаг регулирования (“рейку”), подпятник толкателя и т.д. Обязательно же усиливались кулачковый вал в отношении изгибной и крутильной жесткости, уже на 6-секционных ТНВД устанавливают промежуточную опору [1,5] (ранее при больших межцентровых расстояниях - только на 8...12 секционных).

До недавнего времени в ТНВД автотракторных дизелей использовались простейшие симметричные тангенциальные **кулачки**. Стремление повысить  $P_{\text{в}}$  привело к появлению вогнутых (весьма нетехнологичных) кулачков. В то же время в отличие от кулачков среднеоборотных дизелей они остаются еще очень простыми и обеспечивают лишь треугольный профиль скоростей. Это приводит к изменению характеристики впрыска и  $P_{\text{в}}$  в процессе регулировки опережения подачи и при регулировании опережения в системах с электронным управлением. Не вызывает сомнения, что в будущем для обеспечения идентичности подачи по цилиндрам и сохранения ее при смене режимов работы, проектирование кулачков в автотехнике будет более тщательное.

Для повышения  $P_{\text{в}}$  трубопроводы укорачивают до 0,2...0,3 м. В этом случае минимизируется влияние сжимаемости топлива, но и теряется эф-

фekt роста  $P_B$  от формирования волны. Целесообразность укорочения трубопровода растет по мере роста  $P_B$ , для старых систем это мероприятие неэффективно. По этим соображениям ведущие фирмы разрабатывают ТПА с индивидуальными ТНВД, как это делается на крупных дизелях. Так сделано в новом тяжелом грузовике 1996 г. -

Mercedes-Benz Actros. Подобные проработки делают в США, в Ярославле. Очевидно, что такая ТПА дороже и сложнее в компоновке, однако для малотоксичных дорогих дизелей с открытой КС будет все более обоснованной.

Темп расширения использования ТНВД распределительного типа (ТНВД РТ) немного снижается потому, что за рубежом они уже почти заняли свое место. Их относительное использование же продолжает расти и из-за расширения использования дизелей в легковых автомобилях и микроавтобусах. При этом созданы ТНВД РТ для дизелей с агрегатной мощностью 1100 кВт, числом цилиндров до 8, практически неограниченной быстротходности. Однако в ТНВД РТ в последнее время происходят заметные изменения. От схемы НД21 (Вильнюсского ЗТА) - American Bosch все производители отказались. Лишь в ФРГ (Bosch-VE и Kugelfischer) производятся насосы с одним плунжером, а также в Японии и Ю.Корее по лицензии Bosch. Сама же фирма Bosch считает перспективной схему роторного насоса, которую традиционно производили в США (Stanadyne, Roosa-Master) и Великобритании (Lucas).

Однако качества ТНВД РТ существенно изменились. Также резко возросли  $P_B^{\max}$ . В последних моделях в роторе находятся 4, а не 2 плунжера и при восьми обслуживаемых цилиндрах  $P_B^{\max}$  достигло 120 МПа (DS Stanadyne) [1.13]. Четыре плунжера используются в ТНВД DPA (Lucas) и самом новом насосе Bosch, который согласно рекламе на дизеле OPEL-ECOTec с непосредственным впрыском при  $n=4300$  мин-1 развивает

$P_{\text{в}}^{\text{max}}=150$  МПа. Напомним, что сделано на ТНВД РТ, которые традиционно во имя сохранения ресурса имели более низкие давления нагнетания. К сожалению, заводы России так и не освоили ТНВД РТ, а разработки ЦНИТА [1.15] сегодня уже морально устарели. Все новые ТНВД этого класса имеет электронное регулирование.

Более радикальное решение - **насос-форсунки** (Н-Ф). Из конструкций, которые считали устаревшими, Н-Ф за последние 10-15 лет превратились в перспективные. Явная нелюбовь отечественных специалистов к Н-Ф не находит обоснованных объяснений, отсюда и легенда об их устаревании. Действительная причина отказа от них - в недостаточной культуре производства и эксплуатации, опыте работы и отсутствии выпускаемого промышленностью испытательного оборудования. Все ведущие фирмы-производители кроме отечественных подготовили новые модели Н-Ф. Они выполняются на новом техническом уровне и обычно сопрягаются с элементами электронного управления. Механическая же часть Н-Ф становится не сложнее старых образцов. Наиболее популярная схема - простейший неповорачивающийся плунжер с приводом от распределительного вала. Плунжерная полость сообщена со стравливающим электроуправляемым клапаном, осуществляющим изменение величины и фазы подачи [1.14]. Даже снятая с производства Н-Ф АР-21 для ЯАЗ-206 развивала давления 135...196 МПа. Американские фирмы General Motors, Cummins, Stanadyne и не снимали Н-Ф с производства. Восстановление же их выпуска по мнению немецких специалистов [1.6] требует капиталовложений, поэтому они будут медленно входить в более широкое использование.

**Форсунки** также изменяют свой вид. Из тяжелых и громоздкой конструкции с инерционной иглой они превращаются в компактный, более дешевый и эффективный узел. Корпус вместо литья по выплавляемым моделям или штамповки изготавливают из прутка. Металлоемкость снижена, крепление осуществляется прижатием рычагом за верхний торец или бур-

ты. Уменьшен внутренний (паразитный) объем форсунки. В то же время увеличена жесткость и надежность прецизионных стыков. Отказываются от входных сетчатых фильтров во избежание их разрушения, но используются упрощенные щелевые. Распылители - только длиннокорпусные (кроме штифтовых). Американские распылители можно назвать свеждлинными: длина нижней части иглы (от конуса до цилиндрической поверхности) в 7...8 раз превышает длину этой прецизионной поверхности (Roosa-Master, Caterpillar) [1.7]. При этом центрирование по конусу оказывается достаточным для обеспечения работоспособности. Тенденция к уменьшению всех диаметральных размеров распылителя, в т.ч. диаметра иглы. До недавних пор он всегда равнялся 6 мм. Сегодня производятся иглы с диаметром 4 мм и даже 3,5 мм (“карандашная” форсунка Roosa-Master). В России ЯЗДА для игл 4 мм запрессовывает в распылитель втулку, АМЗ изготавливает его без усложнений. Простое и чрезвычайно эффективное решение в отношении герметичности и стабильности параметров форсунки по времени эксплуатации нашли на ЯЗДА в отношении шлифовки иглы с двумя сериями конусов и торцевым пояском между ними [1.8]. Все производители в целях уменьшения выбросов СН с ОГ минимизируют подыгольный объем до 0...1 мм<sup>2</sup> [1.2, 1.8]. Все производители новой продукции перешли на “бесштанговые” форсунки с целью ускорения посадки иглы и снижению выбросов СН, С. Однако попытки упростить возникшие сложности с регулировкой давления начала впрыскивания путем усложнения форсунки себя не оправдали [1.8]. Перспективными следует считать схемы с нижней пружиной и удлиненным регулировочным винтом, как это делают в некоторых судовых конструкциях или в “карандашные” форсунки.

Еще некоторые особенности форсунок. **Двухпружинные форсунки** широко рекламируются Bosch. Игла имеет два последовательных упора, выход на которые связан с последовательным сжатием сначала более слабой, потом сильной пружин. Такие форсунки обеспечивают ступенчатый

впрыск (более простую реализацию двухфазного) и обеспечивают меньший шум и выбросы  $\text{NO}_x$ . Анализ их работы показывает, что при привычных уровнях давлений начала впрыскивания заложенная идея не оправдывается - игла на тяговых режимах почти без остановки выходит на второй упор. Когда же эффект ощущается, то возникает и его продолжение - вместо быстрой посадки игла закрывается с промежуточными остановками. Система проявляет себя при непривычно высоких давлениях срабатывания: 40 и 70 МПа, а это связано с большими потерями напора в конусе. Целесообразность таких форсунок определится в будущем, сейчас же их Bosch ставит (или только рекламирует) для новейших дизелей легковых OPEL-ECOTEC и AUDI-A4 (1996 г.). Еще менее вероятно использование двухигольной форсунки, предлагаемые для газодизеля и для ЧН32/32 КЗ.

Стремление повысить давление впрыска на эксплуатационных режимах, улучшить скоростные характеристики, повысить стабильность подачи, упростить ТПА и пр. находит в начале внедрения в мире **форсунок с аккумулярованием утечек в надыгольной полости (ФАУ)**. Они хорошо исследованы отечественными учеными, Bosch, но не внедрялись. Все же начало их использования состоялось в Caterpillar 3406 В [1.9], в ТПА с ТНВД APS в 1976 г. тогда еще American Bosch ( $P_B^{\max} = 175$  МПа) [1.10], готовилось Motorpal [1.11], ЧТЗ, готовится ЗиЛ-АМЗ.

Однако известны и негативные результаты по этим системам и прекращение их разработок. Системы просты по конструкции, но сложны по процессу. Отсутствия опыта и даже понимания поведения ТПА приводила к авариям или потере ее эффективности. В МГТУ проводятся работы по ее изучению, выявлены ее особенности и возможности рационального использования. Надежду вселяет расширение использования расчетных методов исследований и уже состоявшееся использование в ТНВД реверсивных клапанов, гарантирующих безаварийность такой ТПА.

Для разделенных камер сгорания Stanadyne использует клапанно-штифтовую вихревую форсунку. Она проще, значительно дешевле и миниатюрнее штифтовой, не имеет слива [1.12]. В сочетании с мощным насосом DB-2 она обеспечивает стабильно высокие  $P_B$  на всех режимах.

Таблица 1.2. Максимальные давления впрыска  
в автотракторных дизелях.

| Дизель, ТПА |            |               | $P_B^{\max}$ , МПа |         |        |
|-------------|------------|---------------|--------------------|---------|--------|
| Марка       | Размер     | ТПА           | 1980               | 1990    | 1996   |
| М50-4       |            |               | 53                 |         |        |
| ЯМЗ-236     | Ч13/14     |               | 39                 | 46*     | до 55* |
| ЯМЗ238НБ    | ЧН13/14    |               | 39                 | 50*     | до 60* |
| ЯМЗ-840     | ЧН14/14    | Компакт-40    | 65                 | 85      | 110    |
| СМД-62      | Ч13/14     |               | 39                 |         |        |
| КамАЗ       | Ч12/12     |               |                    | 50      |        |
| Д240        | Ч11/12,5   | УТН5-УТНМТ    | 33                 | 45      |        |
| ЗД6         | Ч15/18     |               | 45                 |         |        |
| В58         | ЧН15/18    |               |                    | 75      |        |
| ЯАЗ-206     |            | АР-21         | 135-196            |         |        |
| Д160        | ЧН14,5/20, |               | 37                 |         |        |
| ZV40/48     | ЧН40/48    |               |                    | 120     |        |
| Д37-Д144    | Ч10,5/12   | УТН-5 (НД-21) | 35(42)             | 45-50   |        |
| ДМ-21       | ЧН21/21    |               | 90                 | 120     |        |
| УАЗ         |            | Компакт-24    |                    |         | 80     |
| ГАЗ-4301    | Ч10,5/12   | Компакт-32    |                    | 80      |        |
| Bosch       |            | А             | до 60              |         |        |
|             |            | MW            |                    | 85      |        |
|             |            | P3000         |                    | 80      |        |
|             |            | P5000         |                    | 90-100  |        |
|             |            | P7100         |                    | до110   |        |
|             |            | PP21          |                    | 115     |        |
|             |            | VE            |                    | (50-60) |        |
| Lucas       |            | Minimec       |                    | 70      |        |
| Lucas       |            | Maximec       |                    | 100     |        |
| Stanadyne   |            | DB-2          | 46-69              |         |        |
| Stanadyne   |            | DM-4          | 69                 |         |        |
| Stanadyne   |            | DS            |                    |         | 120    |
| Diesel-Kiki |            | PE            | 30-60              | 60-84   |        |

|                    |  |     |       |        |        |
|--------------------|--|-----|-------|--------|--------|
| Diesel-Kiki        |  | PFR |       | 40-55  |        |
| Автотракторная ТПА |  |     | 25-50 | 30-110 | 30-150 |

Ее традиционный недостаток - подтекание. Очевидно, что для дешевых негородских двигателей такая конструкция предпочтительна.

Как показали исследования Mercedes-Benz нагнетательные трубопроводы старого автомобильного европейского стандарта ( $\text{Æ}1,5 \times 6$  мм) при  $P_{\text{в}}^{\text{max}} = 100$  МПа работают не только нежестко, но на пределе выносливости и будут заменяться на более прочные.

### Электронное регулирование.

Замена механического регулирования электронным позволяет проводить глубокую оптимизацию параметров работы дизеля и таким образом значительно улучшать его потребительские качества. В качестве параметров управления дизелем со стороны ТПА обычно рассматривают цикловую подачу и опережение. В действительности возможно изменение давления и характеристики впрыска, даже сечения распыливающих сопел. Оптимальные значения этих параметров зависят большого числа факторов, учесть которые удастся только при отказе от механических, гидравлических и пневматических регуляторов.

Тем не менее эти регуляторы и в будущем будут использоваться как наиболее простые и отработанные решения. Их замены на электронные в развитых странах происходит в основном по требованиям токсичности ОГ. Электронное управление подразумевает сразу же не только управление топливоподачей, но всем двигателем. Реализация электронного управления видится по двум направлениям: более близкая - на базе традиционных ТНВД с кулачковым приводом (с необходимыми изменениями) и появившаяся ранее, но более дальняя по реализации перспектива - аккумулятор-

ные системы, в т.ч. с мультипликаторами давления. При высочайшем уровне автоматизации и управления судовой энергетической установкой введение электроники в ТПА не является столь необходимым. Поэтому после более чем двадцатилетней подготовки в области аккумуляторных систем применительно к крупным дизелям (считали, что дорогая система будет стоять на крупных дизелях), прорыв в промышленной реализации был сделан системами на базе традиционных ТНВД, хотя они и сулят меньшие возможности управления рабочим процессом. Электронное управление помогает решить одну из наиболее трудных проблем создания газодизеля, обеспечивая гибкое управление подачей обоих топлив и реализуя для улучшения полноты сгорания бедных гомогенных смесей смешанное количественное и качественное регулирование мощности, а также за счет повышения точности и гибкости управления экономию жидкого топлива [1.16]. Сводка по наиболее известным системам представлена в табл. 1.3.

**Электронное управление рядными и индивидуальными ТНВД** осуществляется введением второй рейки, управляющей опережением впрыска через третью прецизионную деталь - муфту на плунжере. Обе рейки перемещаются удерживающими электромагнитами, исполняющими команды электронного блока управления (ЭБУ). Как правило последний - на базе микропроцессора. При многих различиях система управления имеет много общего с системой управления бензинового двигателя (в практике даже размещается с необходимыми переделками для проведения экспериментальных работ). Элементная база, создание программ управления и т.п. выходят за рамки этого анализа и частично обсуждаются во втором разделе. Можно сказать только, что в созданных системах используются сигналы от датчиков педали управления, частоты вращения и угла поворота коленчатого или кулачкового валов, положения обеих реек ТНВД, температуры воздуха на впуске и охлаждающей жидкости, давления наддува, положения органа управления рециркуляцией, иногда подъема иглы форсунки, расхода топ-

лива, отдельно включения стартера, скорости и КПП автомобиля, агрегатов отбора мощности температуры топлива. Рейки ТНВД перемещаются сервомоторами [1.17] и по обратной связи контролируются датчиками перемещений. На первых системы Bosch также использовался электроклапан с гидроусилителем [1.18]. Позднее рейки стали перемещать специально созданными мощными удерживающими электромагнитными приводами [1.2, 1.6]. В соответствии с вычисленным расходом воздуха ограничивалось дымление дизеля, в том числе при подъеме на высоту, система снабжалась самодиагностикой, функциями защиты при неисправностях и сигнализацией водителю. Однако механическая часть, обеспечивающая изменение опережения приводила к синхронному искажению характеристик и показателей подачи. Попытка использовать эти деформации во благо рабочего процесса предприняты в [1.19]. Впервые двухречный ТНВД применили фирма Isuzu, также в Японии такую аппаратуру производит Toyota и Dzeeseru. Ведутся работы по созданию аналогичного ТНВД и в МГТУ [1.20].

Создано много промышленных и опытных систем с электронным управлением на базе **ТНВД распределительного типа**.

С использованием ТНВД роторного типа DB-2 Roosa-Master создана ТПА с замещением механического регулятора удерживающим электромагнитом [1.12]. Немало систем создано на базе одноплунжерного ТНВД VE (производства Bosch или Японии и Ю.Кореи). В них, как правило, также механический регулятор замещен на актюатор с электромагнитным приводом. Isuzu на базе того же ТНВД VE с 1982 г. выпускает системы и с электронным регулированием опережения [1.21].

Работы фирмы Stanadyne. Первые системы на базе насоса DB-2 аналогичны Bosch-VE (рычагом подачи управляет клапан) - [1.22]. Второе поколение - на базе специально созданного насоса PCF также с двумя плунжерами. Управление подачи осуществляется ограничением их хода (как в ТНВД Lucas-DPS). В свою очередь ограничительная вилка со скошенными кром-

ками передвигается по оси штоком, приводимым в действие через зубчатый хомут от сервомеханизма с электроуправлением [1.23]. Несколько проще регулируется опережение. В целом механическая часть системы регулирования сложная и не очень точная.

Наиболее эффективная схема управления использована на современном ТНВД DS Stanadyne [1.13, 1.24]. Система не только обеспечивает рекордные давления впрыскивания, но и простейшим способом - с использованием одного электромагнитного клапана слива на восемь цилиндров обеспечивает регулирование по команде микропроцессора величины и фазы подачи (схема "Fill-Spill"). При этом клапан легко размещается в ТНВД, а цикловая подача - не равная по цилиндрам. Управляемая неравномерность подачи по цилиндрам осуществляется с учетом доли мощности каждого из 8 цилиндров. Для этого анализируется неравномерность частоты вращения вала Насоса (поворот его измеряется с точностью 0,04 град). За 2 цикла цикловая подача успевает изменяться от 100% до 0. Электронный блок также управляет свечой накаливания и рециркуляцией ОГ. Широко известна система EPIC фирмы CAV-Lucas на базе роторного четырехплунжерного ТНВД DPA [1. 25...1.27]. Система снабжена тремя исполнительными электромагнитами. Первый как и в аналогичных системах управляет сервоприводом опережения. Второй дросселирует наполнение. Третий перемещает по оси ротор, за счет этого при взаимодействии с косыми плечами вилки приводного вала изменяется полный ход плунжеров. Применение сразу двух способов регулирования подачи - редкость, очевидно, это помогло конструкторам формировать пологие ("гиперболические") частичные тяговые характеристики  $g_{II}=f(n)$  механическими средствами и обеспечить индивидуальное регулирование каждого цилиндра на х.х.

Опережение регулируется с использованием обратной связи - форсунка первого цилиндра снабжается датчиком подъема иглы.

Для среднеоборотного дизеля с **индивидуальным ТНВД** электронное управление реализуется с помощью специального быстродействующего двухпозиционного золотникового устройства с электроприводом [1.28]. Управление подачей осуществляется выключением слива на линии нагнетания. Достоинством ТПА является использование традиционных элементов (без механического регулятора). Тот же принцип регулирования заложен и в ТПА с электроуправляемыми **насос-форсунками** [1.2, 1.14, 1.29]. В этом случае механическая часть Н-Ф с кулачковым приводом - простейшая, а начало и конец подачи определяется положением электроуправляемого клапана слива в линии нагнетания.

Второе направление в создании ТПА с электронным управлением - **аккумуляторные системы с электроуправляемыми форсунками** и насос-форсунками. Они имеют большие потенциальные возможности в оптимизации рабочего процесса, но более дорогие и потому менее распространенные, хотя и начали разрабатываться ранее. Простейшие схемы - управление давлением в надьгольном объеме через дроссель и электромагнитный клапан. По такой схеме работает Common-Rail Bosch [1.30]. По такой схеме ранее подготовлено немало образцов ТПА в КФ ВЗПИ [1.31]. Более совершенная, но также давно разработанная система не имеет потерь топлива “на управление”, т.к. снабжена двухсторонним электроуправляемым клапаном [1.32]. Подобные системы обеспечивают современный уровень давлений с большими трудностями (использование сложных насосов, многочисленная арматура под высокими давлениями, трудности создания разгруженного клапана), а потому, считается, менее перспективны [1.31].

Аккумуляторные системы с мультипликаторами давления (насос-форсунками) представлены ТПА фирмы ВКМ Inc. [1.33, 1.7]. Управление потоками топлива среднего давления в гидропривод осуществляется одним электроуправляемым золотником. Подобные схемы разработаны примени-

тельно к двухтактному судовому дизелю MAN, для промышленного трактора Komatsu. Исследование таких систем ведется в РФ в ЦНИТА, МАДИ, КФ ВЗПИ. Системы позволяют получать практически неограниченные давления, никогда не получаются простыми. Так для управления большими потоками в быстропротекающем процессе приходится использовать несколько каскадов управляющих друг другом золотников (см. UFIS [1.7]), имеются проблемы с затратами мощности, быстродействием, демпфированием ударов и др. Поэтому возможности внедрения таких систем следует сопоставлять с жесткой необходимостью их внедрения. Пока требуемые показатели дизелей удастся обеспечить более простыми системами непосредственного впрыскивания.

Таблица 1.3 ТПА с электроуправлением.

| ТПА непосредственного впрыска |                               |                              |                                |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Фирма, система                | Дизель<br>( $N_e$ в кВт), год | Насосный элемент (ТНВД)      | Исполнител. механизм           |
| Isuzu, IES                    | 6RA1-TC, $N_e=221$ , 1983     | Рядный                       | Линейный электромотор          |
| Isuzu, TEC-Diesel             | 4FBL, 1982                    | Распредел.-VE                | Удерживающ. электромагнит      |
| Detroit Diesel Alison, DDEC   | 92, 1985                      | Насос-форсун.                | Соленоид                       |
| American Bosch                | $N_e=112-300$ , 1983          | Рядный                       | Сервомотор                     |
| Bosch, EDC                    |                               | Рядный P7000, распределит VE | Удерживающ. электромагнит      |
| Toyota, ECD-1                 | 1982                          | Рядный                       | Гидропривод                    |
| Toyota, ECD-2                 | 1986                          | Рядный                       | Электроклапан                  |
| VEB Barkas-Werke              | 6VD12,5/12E-GRF               | Рядный                       | Соленоиды                      |
| Deimler Benz + Bosch, EDR     | OM-422LA (8V)                 | Рядный                       | Гидропривод, дублир. мех. рег. |
| Diesel Kiki Co.               | Усоверш. COYEC                | Роторный                     | Электро-клапаны                |
| Caterpillar Trac              | Автодизель 3406, 1987         | Рядный                       | Сервомеханизмы                 |
| B&R Electric Engineering      | $N_e=990$ , 1987              | Индивидуальные               | Электроклапан в ЛВД            |
| Stanadyne, Roosa-Master       | 1983                          | Роторный DB2                 | Электроклапан                  |

|                                  |   |                   |                              |
|----------------------------------|---|-------------------|------------------------------|
| Stanadyne+процессор Motorola     | 1985  | Роторный PCF      | Электроклапан+гидроприводы   |
| Stanadyne, Fill-Spill            | 1992  | Роторный DS       | Электроклапан                |
| Lucas, EPIC                      | Ford-Transit-Turbo;<br>Mercedes-C220,<br>1985 |                   | 3 удерживающ. электромагнита |
| Аккумуляторные топливные системы |   |                   |                              |
| Фирма, система                   | Дизель<br>(Ne в кВт)                          | Управляющий орган | Исполнител. механизм         |
| BKM, CRIDEC                      | Ne=17-2910                                    | Эл-форсунка       | Соленоид                     |
| Lucas-CAV                        |   | Эл-форсунка       | Пьезопривод                  |
| Bosch, Common Rail               |   | Эл-форсунка       | Электроклапан                |
| MAN+Bosch                        | 2-тактн.крейцкоп                              | Мультипликат.     | Электроклапан                |
| Komatsu ltd., KOMPICS            | Ne=500  | Мультипликат.     | Электроклапан, эл-золотник   |

## 2. Системы питания бензиновых двигателей

Учитывая объективные условия фракционирования наиболее популярного ныне минерального источника моторных топлив - нефти, - а также стремление повысить выход из нее топлив, широкое использование бензинов в транспортной энергетике вряд ли существенно уменьшится. Доминирующим минеральным источником топлив на Земле является уголь и твердые горючие ископаемые. Переработка их в жидкие моторные топлива освоена, хотя пока экономически нецелесообразна. При этом наиболее дешевые и простые способы переработки обеспечивают получение именно синтетического бензина, а не топлив, близких к дизельному.

Традиционно бензиновые двигатели снабжались эжекционными и впрыскивающими **карбюраторами**. Как принято сегодня, будем называть последние системами впрыска. Проследим динамику замены эжекционных карбюраторов **системами впрыска**. В 1977 г. доля систем впрыска на бензиновых двигателях составляла: в ФРГ - 16,2%, в Западной Европе в целом

- 6,5%, Японии - 9,2%, в США -0,7%. В 70-е годы эти показатели росли примерно на 25% за год. В 1987 г. в ФРГ с системами впрыска уже производилось 54%, по Европе - 31%. В 1990 соответственно 85% и 40%. Однако до 80-90-х годов они не применялись в Италии, Испании, Восточной Европе, Корее и др. странах. Сегодня почти все вновь ставящиеся на производство модели автомобилей оснащаются системами впрыска. В США массовый переход на них произошел в течение 10 лет. В ФРГ, Японии, США карбюраторные двигатели практически сняты с производства.

По сравнению с карбюраторами системы впрыска во впускной трубопровод обеспечивают следующие **достоинства** двигателей:

- без каталитического нейтрализатора на двигателе-прототипе - повышение мощности на 3...7% и экономичности на 8...18%;
- резко сократить выбросы токсичных компонентов с ОГ, особенно при использовании трехкомпонентного нейтрализатора и электронным управлением топливоподачей и зажиганием;
- повысить надежность пуска
- уменьшить частоту холостого хода или выбросы CO с ОГ на х.х.
- более полно оптимизировать работу двигателя в поле частот и нагрузок, температуры двигателя и воздуха, давления атмосферы и наддува, в условиях разгоны и торможения и т.д.

Применение систем впрыска предполагает изменение конструктивных и режимных показателей двигателя, а за счет этого дополнительное улучшение характеристик двигателя: повышение степени сжатия, быстротходности, уменьшение подогрева на впуске и т.п.

Вопросы совершенствования **карбюраторной техники** имеют множество важных аспектов, их использование, очевидно, останется оправданным и в будущем на некоторых ДВС, в первую очередь малых и простейших. Использование микропроцессорного управления в карбюраторах для снижения токсичности ОГ (карбюраторы фирмы Zenit, Pirburg2EE фирмы

Bosch, АКСТЕК ВАЗ и др.) видится как решение временное и, очевидно, бесперспективное. Таким образом здесь вопросы применения карбюраторов не будем рассматривать. В таблице 2.1 приведена сводка применяемости систем впрыска на популярных автомобилях мира.

Примененные в последние 20-25 лет (табл. 1.4) на автотранспорте системы впрыска можно схематично охарактеризовать следующим образом.

**Системы с плунжерными насосами** (Мерседес-Бенц-220SE фирмы Bosch [2.1], Kugelfischer [2.3]) были построены на базе дизельных ТНВД с механическим регулированием по открытию дроссельной заслонки. Обладают многими достоинствами, пока не присущими современным системам (высокое качество распыливания, надежность холодного и горячего пуска, простота и надежность). Ныне почти производятся и бесперспективны в отношении стоимости.

Системы **непрерывного впрыскивания** с пневмомеханическим управлением [2.2]. Представлены ранними американскими системами и популярной К-Jetronic, KE-Jetronic фирмы Bosch. В первых имелся диффузор, разрежение которого через диафрагменный исполнительный механизм управляло регулирующим давлением впрыска клапаном. В К-Jetronic регулирующей золотник управляется механическим расходомером. Такая ТПА ранее была самой надежной и дешевой, не имеет электроники. Вместе с тем по своим возможностям она эквивалентна обычным современным карбюраторам, но дороже их. Ныне с производства сняты. Система имеет неремонтопригодные агрегаты, а для условий развитого сервиса потеряла спрос из-за низкого уровня оптимизации рабочего процесса и неудовлетворительных характеристик ДВС по токсичности ОГ. Создание механических систем сегодня выглядит малоперспективным: для простейших двигателей проще выполнить карбюратор, а для автомобилей и самолетов системы с элек-

тронным управлением при сопоставимой стоимости обеспечивают более эффективную работу двигателя.

Все сегодня разрабатываемые и ставящиеся на производство системы имеют **электронное управление**. Считая их совершенствование ближайшей перспективой двигателестроения, целесообразно выделить ряд технических решений. Так сегодня одновременно производятся системы центрального и распределенного впрыска.

**Центральный (одноточечный) впрыск.** Отличается одной форсункой над дроссельной заслонкой. По возможностям и стоимости рассматривается как простейшая реализация системы впрыска, хотя ввиду более позднего времени создания по совершенству опережает многие известные системы распределенного впрыска. Представлен системами Mono-Jetronic (Bosch), Opel-Multec, Fenics-3B (Siemens), General Motors, Toyota Motor Corp., ТПА ВАЗ заднеприводных автомобилей и др. Создавались как решающая альтернатива карбюраторам в целях скорейшей их замены. В большинстве их для простоты вообще отсутствует расходомер воздуха, его значение оценивается микропроцессором по сигнал от датчиков положения дроссельной заслонки, частоты вращения, температуры воздуха, давления во впускном трубопроводе. Системы вбирают в себя особенности, а следовательно и свойства карбюраторов и распределенного впрыска. Так им отчасти присуща болезнь карбюраторов - неравномерность распределения топлива по цилиндрам. Уменьшить ее удастся многократным впрыском, короткими почти идентичными патрубками, нагревателем под агрегатом впрыска, однокамерностью и проходом топлива по обе стороны от заслонки. Редуцирование топлива за форсункой, т.е. ее промывкой и охлаждением обеспечивается стабильность подачи. Наличие одной форсунки повышает надежность, простоту диагностики и, конечно, меньшую стоимость. Такая ТПА оправдана в будущем для малоцилиндровых двигателей (до 4-х).

Альтернативная система **распределенного (многоточечного) впрыска** - наиболее многочисленный и исторически более традиционный для автомобилей тип ТПА. Число форсунок равно числу цилиндров. Ввиду того, что подавать топливо, как оказалось, нужно не столько во время впуска, сколько в “глухой” канал и в целях упрощения системы управления, осталось мало систем с индивидуальным впрыском по времени. Перспективным считаются системы группового впрыска, для выравнивания условий по цилиндрам - многоразового впрыска. Такая ТПА обеспечивает максимальную равномерность топливоподачи по цилиндрам, минимальное пленкообразование, улучшенные динамические и пусковые качества ДВС. Форсунки наиболее простые и дешевые. Однако топливный аккумулятор (рампа) представляет собой акустическую систему, что при недостаточном опыте проектирования или в условиях затрудненной компоновки двигателя может приводить к неидентичности подачи по цилиндрам, по частотам и нагрузкам (особенно при больших частотах, малых подачах и длинном двигателе). Для автомобильных и авиационных бензиновых двигателей такая ТПА рассматривается как наиболее вероятная в ближайшие 10-20 лет. Сейчас в Западной Европе большее распространение традиционно имеют системы распределенного впрыска, в США - более дешевые и взаимозаменяемые с карбюратором - центрального впрыска.

Электронное управление на автотранспорте появилось раньше механического (1967 г., D-Jetronic для автомобиля BMW 732i). В ней, также как и в первых американских системах (1977 г., Bendix для автомобиля Кадиллак) отсутствовал расходомер. В системах 70 - начала 80-х годов доминировали электронные блоки с аналоговой элементной базой (D-Jetronic, L-Jetronic, Lucas-L-Jetronic, Rover-PGM-FI, Nissan-EFI, Mitsubishi ECI, Bendix). Это упрощало систему управления, но ухудшало их точность, возможность перенастройки и усложнения программы управления.

Поколение систем с **микропроцессорным управлением** сменило аналоговые блоки на рубеже 1985...1991 гг. Такая замена усложнила ТПА, на первых порах сделала ее дороже. Потребовался интерфейс для аналого-цифрового преобразования сигналов датчиков. Поскольку время и стоимость создания систем впрыска и тем более управления двигателем еще велики, делать это заново для каждой модификации двигателя (автомобиля) неперспективно. Замена микропроцессора с вложенной программой (“чипа”) позволит в будущем быстрее заменять модели, еще более удешевить системы впрыска, производить одно и то же транспортное средство с разными потребительскими качествами (замена чипа позволяет без каких-либо изменений в двигателе корректировать его внешнюю характеристику и т.п.), в большей мере оптимизировать процесс и снизить эксплуатационные расходы. Так в KE-Jetronic для Daimler-Benz в 1986 г. введена возможность двух разъемов электронного блока управления KAT/RUF для работы соответственно при  $\alpha=1$  и 1,1...1,2 (без нейтрализатора). Аналогично поступает Toyota Motor Corp. Необходимость такого альтернативного решения стоит ныне перед ВАЗом при отправке автомобилей на внешний или внутренний рынок (во втором случае система не имеет угольного абсорбера, нейтрализатора и систем их обслуживания). Ныне отечественная промышленность производит автомобили ГАЗ с двигателем ЗМЗ-406, ВАЗ заднеприводные центрального впрыска и переднеприводные - распределенного.

Современное направление в производстве систем впрыска - комплексное **управление топливоподачей и зажиганием**. По аналогии с такими системами Bosch, многие из них названы Motronic (см.табл.2.1). К комбинированным системам также относятся Digifant, Bosch-L-Motronic, LE-Motronic, Ford CFE/EEC, Magnetti-Marelli MM8P, Nissan ECCS MPI, Renix-Electronic, обе системы ВАЗ и др.). В программ Bosch такие системы появились в 1979 г., в 1988 г. они составляли уже 25% систем с электроуправлением, в 1990 - почти две трети. Вполне обосновано использовать

уже собранную о работе двигателя информацию для полной оптимизации рабочего процесса. Ввиду различных уровней выходных сигналов блок управления зажиганием целесообразно выполнять отдельно от центрального процессора. При этом прерыватель-распределитель выглядит анахронизмом, а катушки зажигания выполняют индивидуальными на каждую свечу или одну на две свечи. Из-за этого или из-за расположения датчика угла поворота на коленчатом валу свечи выдают две искры за цикл, т.е. интенсивнее изнашиваются. Ныне современной ТПА может называться только выполненной по схеме Motronic. В целях более полной оптимизации процесса в таких системах используется контроль по детонации.

Совмещение топливоподачи и зажигания - лишь первый шаг в комплексной оптимизации двигателем. Все перспективные современные разработки направлены на создание систем **управление двигателем** или автомобилем, включающим кроме того функции управления регулятором рециркуляции ОГ, давлением наддува, фазами газораспределения, длиной впускных патрубков, количеством работающих впускных каналов и вихреобразованием. В будущем число изменяемых конструктивных и режимных параметров двигателя будет расти, увеличится число каналов взаимодействия с системами транспортного средства.

Системы впрыска состоят из значительного числа **элементов**. Ведется непрерывное их совершенствование, хотя некоторые из них довольно консервативны (форсунки и насосы Bosch используются в своих и чужих системах более 20 лет). Совершенствование форсунок идет по пути уменьшения стоимости, повышения стабильности, надежности. Форсунка Alfa фирмы United Technologies имеет только одну поверхность для шлифования - запорный конус под шариковый клапан[2.5]. Форсунка требует тонкость фильтрации бензина 40 мкм, ее ресурс - 160 тыс. км. Те же характеристики имеет форсунка Bendix DEKA<sub>tm</sub>. Большинство вновь создаваемых форсу-

нок, включая отечественные последних двух лет, имеют взаимозаменяемость с Bosch, но дешевле и надежнее их. Для центрального впрыска оказалась удачной форсунки с полусферическим клапаном на диафрагме вихревого типа[2.6]. Системы впрыска в трубопровод - почти единственный случай в ДВС, когда ввиду малости давлений и допустимости по форме струи оправдано и перспективно применять вихревые форсунки. При всей консервативности конструкций коловратных насосов с электроприводом наметились новые тенденции: вместо слива как способа стабилизации давления использован аккумулятор с периодической подкачкой. Мощность насоса уменьшена с 50...120 Вт до 5...10 Вт, что по утверждениям фирмы может обеспечить экономию топлива на 0,2 л/100км [2.7]. Аналогичные требования - надежности и дешевизны - стремятся обеспечить сегодня при конструировании датчиков. Перспективное направление - создание датчиков с цифровым сигналом, не требующих аналого-цифровых преобразователей. Наиболее сложной задачей является создание датчика расхода воздуха. Его применение обеспечивает повышение точности дозирования. Механические расходомеры инерционны, виброактивны, громоздки, дороги. Их производила только фирма Bosch. Основная альтернатива - электротермоанемометр. Уменьшение диаметра проволоки ниже 50 мкм оказалось невозможным по надежности. Применяется дублирование проволочек. Схема постоянной температуры более надежна, но более дорога. Пока применяется в основном схема постоянного тока. Для достоверных измерений необходимо предусматривать хотя бы инерционный датчик температуры. Вызывает удивление упорный отказ двигателистов от использования пленочных электротермоанемометров, применяемых при исследованиях жидкостных и запыленных потоков.

Сравнивая системы впрыска с карбюраторами 20 лет назад, отмечали в качестве недостатков первых их высокую стоимость, низкую надежность и затруднения в обслуживании. Эти недостатки были временные. Удешев-

ление систем впрыска произошло с расширением объемов производства, развитием электроники и их совершенствованием. Для облегчения обслуживания и своевременного ремонта интенсивно расширяются функции **самодиагностики**. С течением времени электронный блок управления превращается в бортовой компьютер с функциями микропроцессора, интерфейса, устройствами ввода-вывода, памятью. Он непрерывно диагностирует систему по датчикам и исполнительным устройствам. Факт отклонения сигнала от тестового сообщается водителю или, чаще, просто запоминается. Уже сегодня современные системы можно продиагностировать не только дорогостоящим мотор-тестером, но даже в полевых условиях с помощью лампы “Check-engine”. Системы не имеют каких-либо регулировочных узлов для работы с ключами и отверткой. Система выдает миганием лампы код неисправностей, ремонт в идеале сводится к замене нужных узлов. Во многих системах диагностика еще достаточно несовершенна: в МоноMotronic заднеприводных автомобилей ВАЗ информация стирается при обесточивании блока управления, всего предусмотрено 17 неисправностей, что явно недостаточно. Тем не менее подобные возможности - новый шаг в автомобилестроении.

Другое важное направление в повышении надежности - работа над **компенсаторными функциями систем**. Эти функции целесообразно совмещать с самодиагностикой. Реализованы два пути решения задачи. При выходе сигнала датчика из нормированного диапазона для обеспечения работоспособности системы принимается его наперед заданное осредненное значение. Однако это возможно не для всех элементов. Нельзя такой подход применить к сигналу расходомера воздуха. В таком случае используется дублирование или замещение сигнала основного способа работы на оцениваемый из обработки по заданной программе сигналов других датчиков. В этом случае их число является избыточным над необходимым.

Все сказанное выше относилось к системам впрыска во впускной трубопровод, однако многое относится и к непосредственному впрыску в цилиндр. **Непосредственный впрыск** исследовался и применялся давно, однако на современном техническом уровне и с опытом создания более популярных систем сулит большие возможности. Это относится и к эффективным и к экологическим качествам ДВС. Так в результате глубокого расслоения заряда удается работать на сверхбедных смесях и за счет этого иметь малую суммарную токсичность, высокую степень сжатия, сочетание принципов качественного и количественного регулирования. Примером современной реализации непосредственного впрыскивания на четырехтактном автомобильном двигателе служит разработка Mitsubishi Motor Corp. для автомобилей Gallant и Eterna выпуска 1997 г. За основу взята дизельная система с электронным регулированием величины и фазы топливоподачи. Так на высоких нагрузках впрыск осуществляют при всасывании, на малых - в конце сжатия. Степень сжатия 12, максимальный  $\alpha=2,7$ , экономия топлива на холостом ходу 40%, при скорости 40 км/час - 25% [2.8]. Недостатком такого двигателя является его высокая стоимость. Вместе с тем для немецкой мини-мототехники разработана система впрыска по существу по той же схеме [2.9]. Это вселяет надежду, что подобная ТПА, создаваемая целенаправленно, может быть и не столь дорога. В целом же прямой перенос дизельной аппаратуры в бензиновый двигатель вряд ли перспективен.

Двухтактные двигатели почти исчезли из мирового автопарка, хотя и обеспечивают большие литровые и массовые мощности. Причинами этого являются худшая экономичность и как это ни странно худшие габаритные показатели подкапотного пространства. Если второй недостаток будет устранен, то возвращение их на автомобиль будет полностью зависеть от совершенства рабочего процесса. Многолетние усилия **Orbital Engine Company** (Австралия) увенчались в этом направлении успехом - двигатель по экономическим и экологическим показателям не уступает четырехтакт-

ным [2.10]. Фирма использовала непосредственный впрыск с помощью ТПА с электронным управлением. Время срабатывания форсунки доведено до 1,4 мс, напор на форсунке 0,1 МПа. Фирма много времени уделила отработке системы **пневмораспыливания**. Кроме нее пневмораспыливание прорабатывают в Японии [2.11], СНГ [2.34]. В последней работе скрещивающиеся потоки воздуха помогают раздробить топливную струю. Впрыск же эмульсии вместо однофазного топлива позволяет достичь также распыливания при многократно меньших давлениях. Подобные работы велись и в МГТУ. При всей привлекательности и реальности пневмовпрыска следует учесть, что он широко использовался в дизелях начала века, но так и не стал конкурентоспособным по простоте конструкции. Думается все же, что для двухтактного двигателя с воздухонагнетателем (т.е. без специального топливного компрессора), может быть применен. В этом случае остаются проблемы раннего впрыска и малых напоров на соплах.

Альтернативная система непосредственного впрыска - с **газовым приводом** [2.12]. AVL-List также взяли апробированное на ранних этапах дизелестроения техническое решение - использование для привода плунжера энергию сжатых газов “своего” цилиндра. Полный переход на качественное регулирование привел к отказу от дроссельной заслонки. Прогнозируется 35%-ая экономия топлива на двухтактном двигателе, но возможно использование и на 4-тактном. Однако перспективы использования этого метода хотя и заманчивы: связаны с преодолением старых “болезней”: ненадежности и закоксовывания клапанов и жиклеров привода, ограничения быстроходности, потери индикаторной работы.

Другая схема - с насосом, **золотниковым пульсатором**, электроуправляемым клапаном, и дизельной “карандашной” форсункой [2.13]. С учетом наличия в двигателе трех полостей камеры сгорания и трех форсунок, система выглядит переусложненной. Разработана система для двухтактного мотоциклетного двигателя в более простой реализации: насос,

электроуправляемый клапан, форсунка [2.14]. Думается, что право называться перспективной в отношении разумной простоты имеет именно такая ТПА. Повышение ее эксплуатационных свойств будет проведено за счет доводки элементов ТПА - это возможно уже сегодня при использовании опыта создания электроуправляемых бензиновых и дизельных систем топливоподачи.

Созданная в Харькове система впрыска [2.28-2.29] отличается от чисто дизельной тем, что ТНВД не имеет прецизионной плунжерной пары, а использует **эластичные уплотнения**. Действительно такой насос как раз приспособлен для нагнетания топлива под умеренными давлениями. Подобные насосные и объемноприводные элементы хорошо освоены в промышленной гидравлике и относительно недороги. Их использование - один из наиболее вероятных способов создания давления в простейших аккумуляторных системах с электроуправлением. Однако данная реализация вызывает сомнения: насос сложен, громоздок, имеет прецизионную пару “клапан-корпус” и испытывает ударные нагрузки. По существу его конкурентоспособность вряд ли большая, чем традиционного дизельного ТНВД.

В МГТУ проведены поисковые работы в области создания упрощенных систем впрыска с электроуправлением и непосредственным **силовым электроприводом насосного элемента**. Такие системы имеют либо электродинамический привод, либо пьезоэлектрический. Выявлены свойства таких систем. Обе системы наилучшим образом сочетаются с условиями подачи малых доз топлива под невысоким давлением. Вместе с тем неразделенная система с электродинамическим приводом

плунжера на модельной установке с размером индуктора  $h=4$  мм,  $d=36$  мм обеспечила совершение работы 2 Дж в течение 100 мкс. Математическое моделирование процесса позволило оценить возможные параметры впрыска: при  $n=5000$  об/мин,  $g_{ц}=11$  мг,  $d_{пл}=6$  мм, максимальное давление впрыска 68 МПа, среднее давление -41 МПа, продолжительность подачи 26 град.

Таким образом ТПА может с запасом обеспечивать питание бензинового двигателя.

Альтернативной топливной системой применимость которой расчетно-теоретически обосновано в МГТУ для непосредственного впрыскивания - система, включающая низконапорный насос непрерывного действия, прокачивающий топливо по жесткому трубопроводу, к конце которого установлены беспрецизионная закрытая форсунка и электроуправляемый гидравлически разгруженный двусторонний клапан или золотник. Впрыскивание топлива осуществляется от возникновения **гидравлического удара** при закрытии клапана. Результаты подтвердили возможность обеспечения достаточных энергетических показателей работы системы, в частности давлений впрыскивания до 15-20 МПа. Анализ технических, производственно-экономических качеств системы применительно к поставленной задаче также показал ее перспективность.

В [2.15...2.43] содержится информация о системах непосредственного впрыскивания (в основном - для двухтактных бензиновых двигателей).

Наконец самый важный вопрос создания любых систем впрыскивания - подготовка **программы управления**, которая и будет реализована микропроцессором. Как и в дизелях, это один из самых долгих и дорогих этапов работ. Он требует большого числа специально спланированных моторных испытаний данной модели двигателя. В будущем значимость этого этапа будет еще более увеличиваться в структуре всех работ ввиду расширения функций и параметров систем управления. Число необходимых для создания программы управления опытов в прямой постановке задачи при использовании нелинейных моделей со взаимодействиями без учета дублирования опытов при числе параметров "n" можно оценить:  $N = 2^n + 2n + 1$ . Всеяют надежды только использование высокопроизводительного оборудования с автоматизацией эксперимента и обработкой данных и с другой

стороны - повышение адекватности математических моделей рабочих процессов.

### Литература

- 1.1 Григорьев М.А., Ванин В.К. Какими будут дизели. - Автомобильная промышленность, 1994, N5, с.10-13.
- 1.2 Системы впрыскивания топлива фирмы Бош для экологически совместимых дизельных двигателей.- Роберт Бош ГмбХ, Штургарт, Производственный отдел К5 (Материалы фирмы), 1992.-47 с.
- 1.3 Агеев Б.С. Особенности конструкции и параметров топливовпрыскивающей аппаратуры современных среднеоборотных дизелей. - Двигателестроение, 1988, N10, с.48-51.
- 1.4 Агеев Б.С., Масловатый Ю.З. Топливный насос высококого давления с самозащитой от перегрузок . - Двигателестроение, 1987, N6, с.19-21.
- 1.5 Schawartz R. High-pressure injection pumps with electronic control for heavy-duty diesel engines.-SAE Techn.Paper Ser.,1985, N 850170.- p.13.
- 1.6 Schulz Bob Bosch fuel injection systems for emissions sensitive diesels. - Diesel Progr. N. Amer., 1988, 54, N5, p.39-40.
- 1.7 Файнлеб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. Справочник. - Л.: Машиностроение, 1990.- 352 с.
- 1.8 Гундоров В., Истомин А., Кирияк Н. Конструктивные изменения в топливной аппаратуре дизелей КамАЗ-740. - Автомоб. транспорт, 1990, N 8, с.34-37.
- 1.9 Cannor D.H., Stapf R.A. Truck engine. - SAE Techn.Paper Ser.,1983, N 831201.- 14 p.
- 1.10 Voss J.R., Vanderpoel R.E. The shuttle distributor for a diesel fuel injection pump. - SAE Techn.Paper Ser.,1977, N 770083.- 7 p.

- 1.11 Indra Jaromir Leckollose Einspritzventil für schnelllaufende Dieselmotoren. - MTZ. Motortechnische Zeitschrift, 1985, 46, N6, s.215-217.
- 1.12 Deterre D. Equipements pour moteurs diesel. - Tract. et mach. agr., 1983, N808, s.58-60.
- 1.13 Electronisches Dieselkraftstoff-Einspritzsystem der neunten Generation von Stanadyne Automotive.- MTZ. Motortechnische Zeitschrift, 1991, 52, N10, s.518-519.
- 1.14 Egger Klaus Mechanik der Hochdruckeinspritzung von Pumpedusensystemen. - MTZ. Motortechnische Zeitschrift, 1988, 49, N2, s.53-57.
- 1.15 Свиридов Ю.Б. Топливные насосы распределительного типа для тракторных и комбайновых дизелей. - Двигателестроение, 1987, N1, с.8-14.
- 1.16 Мазинг М.В. Дизель, газодизель и электроника.- Автомобильная промышленность, 1994, N 9, с.7-9.
- 1.17 Moncelle Michael Caterpillar 3406 PEEC (programmable electronic engine control). - SAE Techn.Paper Ser.,1985, N 850173.- p.1-15.
- 1.18 Mishke A. Electronisches Diesel-Regelung EDR für Nutzfahrzeugmotoren.-MTZ.Motortechnische Zeitschrift, 1983, 44, N10, s.378-380.
- 1.19 Herzog Peter Möglichkeiten der Optimierung von Motor.- MTZ. Motortechnische Zeitschrift, 1986, 47, N12, s.525-529.
- 1.20 Кузнецов А.Г., Марков В.А., Трифионов В.Л. и др. Система регулирования угла опережения впрыскивания топлива. - Автомобильная промышленность, 1994, N9, с.9-11.
- 1.21 Kihara Ryoji The performance advantages of electronic control diesel engine for passenger cars.- SAE Techn. Paper Ser.,1983, N 830528.- p.86-99.
- 1.22 La regulation electronique de L'injection diesel et son integration au vehicule automobile.- Ingen. automob., 1987, 55, N10, 57-59.

- 1.23 Maynard A. A new electronically controlled injection pump for diesels.- SAE Techn. Paper Ser.,1985, N 850169.- 13 p.
  - 1.24 Dieselpump mit superschnellem Ventil.-AMZ, 1992, 80, N9, s.232-233.
  - 1.25 Glikin P.E. An electronic fuel injection system for diesel engines. - SAE Techn. Paper Ser.,1985, N 850453.- 9 p.
  - 1.26 Лакин П. Фирма Лукас. Электронные системы впрыска топлива.- Автомобильная промышленность, 1994, N9, с.38-39.
  - 1.27 Das EPIC-System von Lucas.- KFZ, 1995, 38, N11, s.506-507.
  - 1.28 Roeker Gert G. Mikroprozessorgesteuert ist besser. Schweizer Maschinenmarkt, 1987, 87, N26, 82-83, 85,87.
  - 1.29 Blakemore Tim Diesel Milestone.- Commer. Mot., 1985, 162, N 4135, p. 30-31.
  - 1.30 Ein Supplement der ATZ und MTZ - Folge 9.-MTZ.Motortechnische Zeitschrift, 1996, 57, N1, 8 s.
  - 1.31 Пинский Ф.И. Схемы электроуправляемых топливных систем.- Автомобильная промышленность, 1994, N9, с.12-14.
  - 1.32 Robert le Merer Adaptation de L'injection electronique aux moteurs diesel.- CIMAC, 9e congres international des machines a combustion Stockholm, 1971, A31, 1-19.
  - 1.33 Weseloh W. EEC-IV full authority diesel fuel injection control. - SAE Techn.Paper Ser.,1986, N 861098.- 6 p.
- 
- 2.1 Аппаратура впрыска легкого топлива автомобильных двигателей Под общ.ред. Ю.И.Будыко.- 2-е изд.-Л.:Машиностроение, 1982-144 с.
  - 2.2 Спинов А.Р. Системы впрыска бензиновых двигателей.-М.: Машиностроение, 1995. - 112 с.
  - 2.3 Росс Твег Системы впрыска бензина.- М.: Изд-во "За рулем", 1996. - 144 с.

- 2.4 Системы впрыска топлива LE3-Jetronic, LH-Jetronic, Digifant, Motronic, ч.4.- С-Петербург “Геза-Ком”, 1992. - 83 с.
- 2.5 Taxon M., Giesecking J. The United Technologies Alpha series fuel injector -high performance at a reduse cost. - SAE Techn. Paper Ser., 1985, N 851656.- 5 p.
- 2.6 Knapp Heinrich A new low pressure single point gasoline injection system. - SAE Techn. Paper Ser., 1985, N 850293.- p.36-43.
- 2.7 Bedarfsorientiertes System zur Kraftstoffversorgung. - KFZ - Betr., 1996, 86, N25-25, с.6.
- 2.8 Direct injection engine. - Techno Japan, 1995, 28, N8, p.85.
- 2.9 MTZ. Motortechnische Zeitschrift. - 1996, 57, N1, s.41-44.
- 2.10 Leighton S.R., Ahern S.R. The orbital combustion process for future small two-stroke engines. - New-Generat. Two-Stroke Engine Future?: Proc. Intern.Semin. Rueil Malmason, Nov.29-30, 1993, Paris, p.195-206
- 2.11 Okamoto Yoshio Форсунка с пневмораспыливанием топлива. - Transactions Japan Society of Mechanical Eng.”B”, 1996, 62, N595, p.1234-1239.
- 2.12 Schichladekonzept DMI von AVL. - Autotechnik, 1994, 43, N3, s.12.
- 2.13 Helse Frederick M. A quantum fuel injection system for the digital engine.- SAE Techn. Paper Ser. 1984, N 840446.- p.65-73.
- 2.14 Engler G., Bujack Ch. Konzept einer Kraftsto ffeinspritzeanlage fur Mottorader mit Zweitakt-Ottomotoren. - Kraftfahrzeugtechnik, 1985, 35, N7, s.201-203.
- 2.15 Landfahrer Klaus Thrermodynamic analysis and optimization of two-stroke gasoline engines.- SAE Techn.Paper Ser., 1989, N 890415.- p.1-13.
- 2.16 Ealey Lance Two-stroke revolution brews in the land down under.- Automot.Ind., 1986, 166, N 7.-p.28-29.
- 2.17 Fenton John Focus on petrol injection and carburation.-

- Automot. Ing., 1986, 11, N 6.-с.10-12.
- 2.18 Tsukada Mitsuhiko Исследование рабочих показателей двухтактных двигателей с искровым зажиганием. -Trans. Soc. Autom. Eng. Jap., 1991, 22, N 3, с. 3-8.
- 2.19 Stanadyne automotive: in system d'injection d'avant garde pour le modele futuriste VW Futura.- Ing. automob.-1990.- 654.-с.55-56.
- 2.20 Влияние схем питания на показатели двухтактного ДВС с искровым зажиганием, работающем на метаноле.- Trans. Jap. Soc. Autom. Eng. B., 1991, 57, N 539, с.2442-2448.
- 2.21 Yamaguchi Jack Novel two-stroke engine concept employs poppet valves and supercharger.- Automot. Eng., 1989, 97, N 8. p. 68-69.
- 2.22 Zweitaktchancen aus amerikanischer Sicht. - Automot. Rev., 1990, 85, N 22. - s.45.
- 2.23 Заявка Японии 6487835 МКИ F 02 с 7/00, F 02 b 23/10.- 29.09.87.
- 2.24 Перспективы создания двухтактных бензиновых двигателей с расслоением заряда для переносных мотопил. - Мищенко Н.И. и др., Горл. фил. Донецк. политех. ин-та.- Горловка, 1990.- 19 с. Депон. в УкрНИИНТИ 04.06.90, N 956-Ук90.
- 2.25 Benzin-Direkteinspritzung.- Automob. Rev., 1989, 84, N 37.- s.43.
- 2.26 Заявка ФРГ 3836048 МКИ F 02 m 41/06, 22.10.88.
- 2.27 Misumi Masanori An experimental study of a low-pressure direct-injection stratified-charge engine concept.- SAE Techn. Paper Ser. 1990, N 900653.- p.145-156.
- 2.28 Молчанов П.Н., Владимирский А.И., Бобровский В.А. Система впрыскивания бензина. - Двигателестроение, 1990, N 3.- с. 21-23.
- 2.29 Владимирский А.И. Исследование топливоподающей аппаратуры для двигателя с впрыском бензина и факельным зажиганием.- Автореф.канд.дисс., БПИ, 1980. -20 с.

- 2.30 Патент США 5078107 МКИ F 02 m 45/02, 1990.
- 2.31 Заявка ФРГ 3907766 МКИ F 02 m 45/02, 1989.
- 2.32 Huang Huei-Huay Study of small two-stroke engine with lowpressure eur-assisted direct-injection system.- SAE Techn. Paper Ser. 1991, N 912350.- p.1-9.
- 2.34 Мотлохов А.В. Экспериментальные исследования пневматической системы топливоподачи.- Харьк.политех.ин-т, Харьков, 1986.- 12 с.-Депон. в УкрНИИИТИ 10.11.86, N 2531-Ук).
- 2.35 Заявка ФРГ 3920089 МКИ F 02 b 23/08, 1989.
- 2.36 Патент США 5069189 МКИ F 02 m 68/08, 1990.
- 2.37 Патент Австралии 612022 МКИ F 02 d 07/02, 1989.
- 2.38 Kuntsher Volkmar, Singer Andreas Mixture Injection application for avoiding charge exchange losses in two- stroke cycle engines.-Wiss. Beitr. / Ingenieurhochsch., Zwickau, 1989, 15, N 2.- s.12-17.
- 2.39 Патент ФРГ 294537 МКИ F 02 b 27/00, 17.05.90.
- 2.40 Заявка Франции 2662214 МКИ F 02 m 67/02, 1990.
- 2.41 Заявка Франции 2668546 МКИ F 02 m 67/02, 1990.
- 2.42 Klimmer E. Direkteinspritzung in neuer Qualitat.- KFZ, 1990, , N 33, N 4.- s. 160-165.
- 2.43 Nuti Marco A variable timing electronically controlled high presuure injection system for 2T S.I. engines.- SAE Techn. Paper Ser. 1990, N 900799.- p.1-15.