

*Источник: Кулешов А.С., Грехов Л.В. Расчетное формирование оптимальных законов управления дизелями на традиционных и альтернативных топливах // Безопасность в техно-сфере. – 2007, №5. – С. 30-32.*

Кулешов А.С., Грехов Л.В.

**Расчетное формирование оптимальных законов управления для программ  
электронных систем управления дизелями на традиционных и альтерна-  
тивных топливах**

На территории Европы прекращается производство топливной аппаратуры транспортных дизелей без электронного управления. Это обусловлено не только возможностями улучшения показателей дизелей в широком поле рабочих режимов, но жесткой необходимостью: переход к нормам выбросов вредных веществ уровня Евро-IV, вступающих в силу с 2005 оказывается невозможным без использования электронного управления.

Путь к созданию наиболее дорогостоящего компонента систем управления – программы оптимального управления лежит через проведение обширных испытаний данного дизеля в многопараметрическом поле действующих факторов. Эта экспериментальная работа требует специального дорогостоящего оборудования (в том числе для анализа отработавших газов) и по оценкам ведущих зарубежных специалистов может занимать до трех лет непрерывной работы.

Предлагаемый нами альтернативный путь подхода к проблеме – формирование базовой программы управления с использованием результатов компьютерной оптимизации рабочих процессов, экспериментальное уточнение (калибровка) по сокращенной программе. Другой путь – полная замена или еще большее сокращение объема экспериментальной работы за счет применения самообучающихся систем управления. Однако, этот подход применительно к дизе-

лям на сегодня не проработан и является скорее пожеланием, чем реальным предложением.

В данной статье излагается методика компьютерной оптимизации рабочего процесса для создания простейшей программы управления. Она излагается на примере задачи управления топливной системой Common-Rail для дизеля типа ЗМЗ-514.8. Работа проведена МГТУ им. Н.Э.Баумана для нужд и при финансовой поддержке ОАО НИКТИД (г.Владимир). Работа также использована для нужд проектирования ТНВД системы Common-Rail, т.к. позволяет получить поле рациональных давлений нагнетания по режимам работы дизеля.

Метод получения полей оптимальных параметров – математическое моделирование рабочего процесса – базировалось на использовании программного комплекса Дизель-РК, разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана под руководством к.т.н. Кулешова А.С.

Оптимизация параметров управления велась в поле частот и нагрузок дизеля для ограниченного числа точек. Это увязывалось со стремлением точнее обеспечить эффективную работу дизеля вблизи важнейших контрольных точек поля для лучшего удовлетворения нормативов ЕЭК ООН, но и с стремлением учета их весовой доли в суммарных выбросах. Принималось во внимание, что не все параметры рабочего процесса могут регулироваться по режимам дизеля и необходимо найти их компромиссные значения, обеспечивающие минимум суммарных выбросов. К таким параметрам относятся, например, число, диаметр и углы ориентации сопловых отверстий, расположение распылителя, форма камеры сгорания, степень сжатия и др.

Предварительно в ряде опорных точек поля режимов рассчитывался рабочий процесс и результаты сравнивались с известными экспериментальными данными, полученными при испытании дизеля-прототипа. В качестве такого был взят базовый дизель с механическим ТНВД типа VE Bosch, т.е. модели ЗМЗ-514.3 (4ЧН8,7/9,4). Сравнение по показателям эффективного удельного

расхода топлива, максимального давления в цилиндре, расхода воздуха, выбросов частиц (дымности) позволило идентифицировать математическую модель с учетом естественных ошибок моделирования, дефицита и неточности исходных данных, индивидуальных особенностей испытанного дизеля и др.

Использовались характеристики однофазного впрыскивания, обеспечиваемые топливными системами Common-Rail. Они рассчитывались для каждого режима с использованием программного комплекса Впрыск разработки МГТУ им. Н.Э.Баумана. Для работы были выбраны 9 опорных точек (отмечены кружками на рис. 3,4). В каждой выделенной точке поля режимов рабочий процесс оптимизировался по минимуму целевой функции  $S_e$ :

$$S_e = C_{Pm} \cdot \frac{P_m^{\text{действ}}}{P_m^{\text{норм}}} + C_{NOx} \cdot \frac{NO_x^{\text{действ}}}{NO_x^{\text{норм}}},$$

где:  $P_m^{\text{действ}}$ ,  $NO_x^{\text{действ}}$  – удельные выбросы твердых частиц и окислов азота, полученные в результате расчетов;

$P_m^{\text{норм}}$ ,  $NO_x^{\text{норм}}$  – нормируемые удельные выбросы (например, для норм Евро-II соответственно 0,15 и 7 г/кВт·ч);

$C_{Pm}$ ,  $C_{NOx}$  – эмпирические коэффициенты, полученные при идентификации математической модели для данного типа двигателя.

Согласно нашей концепции, физический смысл критерия  $S_e$ , заключается в удалении полученной расчетной точки на поле с координатами выбросов “ $NO_x$  - частицы” от точки максимально разрешенных нормами выбросов. Чем меньше  $S_e$ , тем ближе наш результат к допустимому (рис. 1). Более того, критерий  $S_e$  может принимать отрицательные значения. Это означает, что мы уже находимся внутри допустимого нормами прямоугольника и тем выше экологические показатели дизеля.

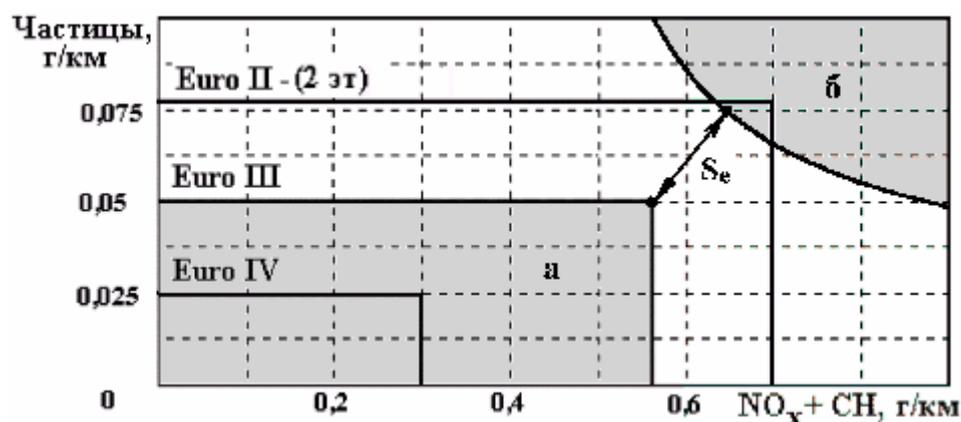


Рис. 1. Выбросы быстроходными дизелями твердых частиц и газообразных вредных веществ: а – допускаемое нормами поле, б – поле действительных выбросов дизеля,  $Se$  – критерий оптимизации.

В качестве примера анализа результатов оптимизации приводится рис. 2. Производилась оптимизация рабочего процесса дизеля в каждой из девяти выбранных точек по продолжительности ( $\phi_i$ ) и углу опережения впрыскивания ( $\theta_i$ ). В качестве ограничений принималось максимальное давление в цилиндре  $P_{\max} < 13$  МПа и максимальное давление впрыскивания  $P_{inj} < 165$  МПа. Варьированием  $\phi_i$  и  $\theta_i$  добивались минимума  $Se$  на каждом режиме. Для удобства выбора оптимума на расчетное поле наносились изолинии удельного эффективного расхода топлива ( $SFC$ ) и  $P_{inj}$  и конечно же, целевой функции  $Se$ .

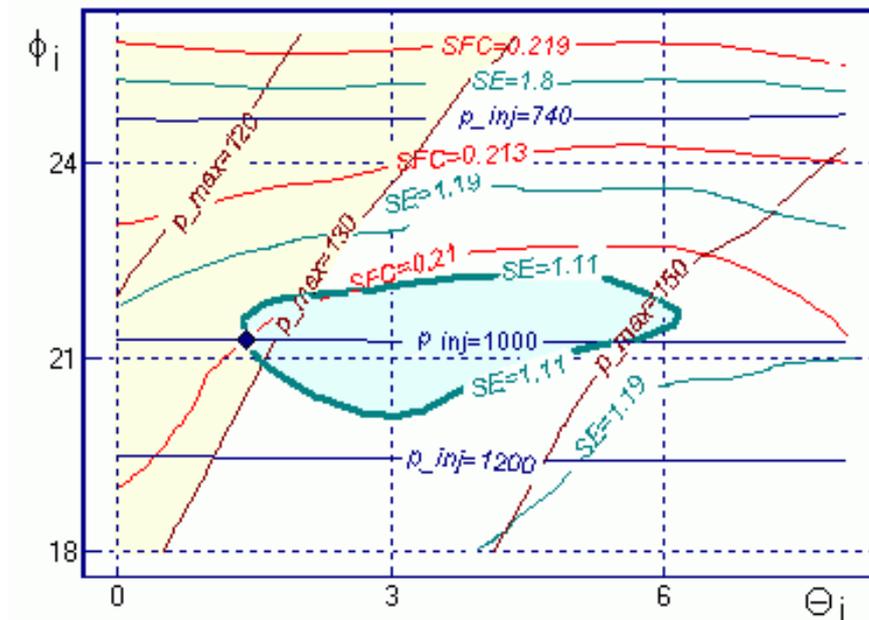
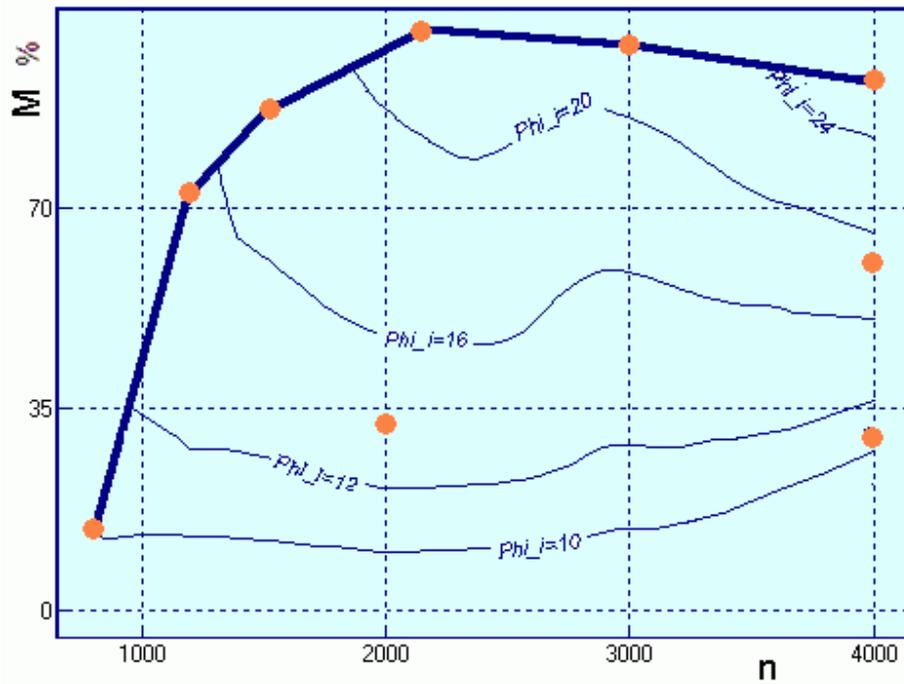


Рис. 2. Результаты расчета рабочего процесса дизеля 3МЗ-514 на режиме максимального крутящего момента ( $n=2200 \text{ мин}^{-1}$ ) в координатах оптимизируемых параметров: продолжительности и опережения впрыскивания

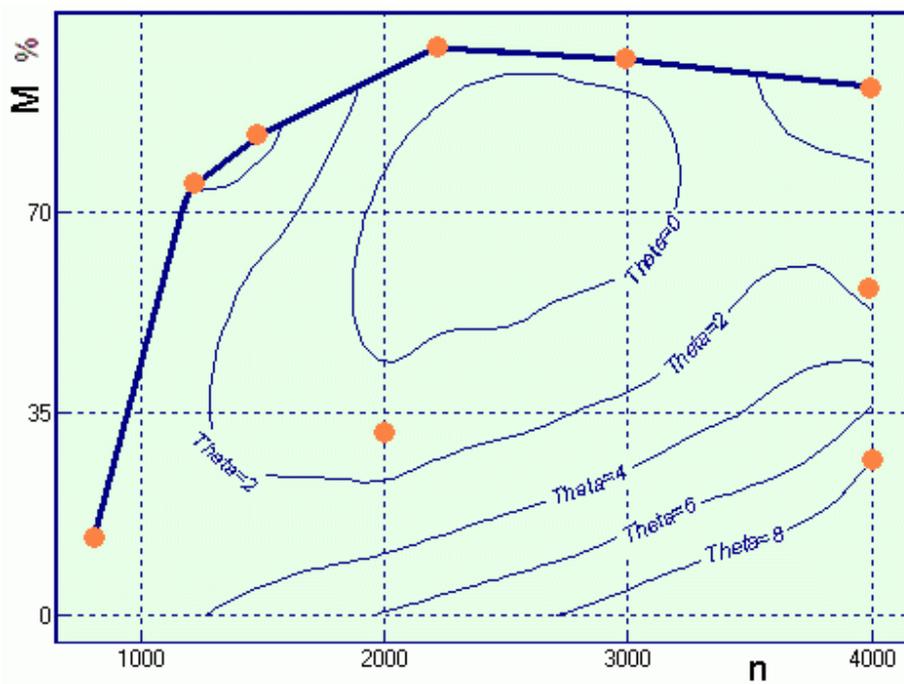
На каждом режиме ситуация была специфична. Например, на рис.2 оптимумом считаем левую область зоны  $Se \leq 1,11$  по соображениям ограничения  $P_{max} \leq 13 \text{ МПа}$ , ее нижнюю часть с минимумом  $SFC \leq 0,21 \text{ г/кВт.ч}$ . Ограничений по  $P_{inj}$  не имелось. Приходилось принимать и более трудные решения. Так на номинальном режиме минимума  $Se$  не позволяли достигнуть ограничения и по  $P_{max}$  и по  $P_{inj}$  (рис. 3). В зоне минимальной частоты и нагрузки пришлось еще более ухудшить экономичность дизеля. Пока отбор рабочих точек производится “вручную”. Однако, с накоплением опыта, возможно создание алгоритма автоматизированного выбора рабочих точек (на рис. 2 и 3 они выделены ромбом).

По результатам расчета в выбранных точках, с использованием интерполяции, были построены поля оптимальных параметров в рабочем диапазоне режимов дизеля (рис. 3). Данные этого рис. непосредственно использовались при





**a**



**б**

Рис. 4. Результаты оптимизации для продолжительности (а) и опережения впрыскивания (б) в поле частоты ( $n$ ) и нагрузки ( $M$ ) дизеля ( $P_{inj}$ ).

Полученные результаты позволяют сформировать программы оптимального управления топливоподачей. В данном случае они были получены для достижения минимума загрязнения воздуха. При постановке других целей, например, достижения наилучшей экономичности, результаты будут другими. Однако и те и другие цели могут обеспечиваться на одном объекте при смене программ управления.

#### Заключение

Для практической работы потребуется обработать более 12...14 точек, но затраты времени даже трудно сравнивать с затратами на натурные испытания. Приведенные результаты отражают работу на установившихся режимах. Формирование программ управления переходными режимами – отдельная тема разговора. Работа допускает автоматизацию, в этом случае заменить ее не может никакая методика решения задачи. Применимость результатов обусловлена апробацией и достоверностью математической модели, эксплуатируемой и совершенствуемой на протяжении 20 лет. Полученные результаты использованы также для нужд проектирования ТНВД.