

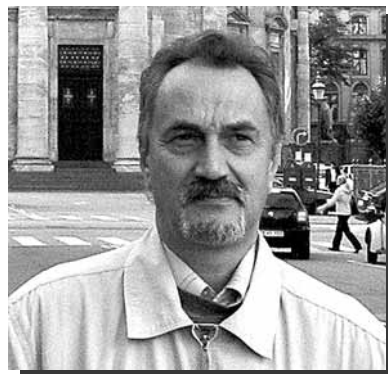
## АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК НА ХАРАКТЕРИСТИКЕ ТОПЛИВОПОДАЧИ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Обозов, к.т.н.;  
ЗАО УК «Брянский Машиностроительный Завод»

Функциональное техническое диагностирование систем судовых дизелей и, в частности, топливной аппаратуры вот уже на протяжении четверти века остается актуальной задачей, которую решают специалисты дизелестроительной отрасли. Однако до настоящего времени диагностирование технического состояния топливной аппаратуры не нашло широкого применения в практике эксплуатации дизелей. Данное обстоятельство можно объяснить сложностью комплекса решаемых задач, с которыми сталкиваются специалисты. Одной из таких задач является получение эталонного описания (математической модели) «поведения» топливной системы, соответствующего ее нормальному функционированию и функционированию с различными нарушениями.

В статье вниманию читателей предлагается фрагмент из совокупности задач, подлежащих решению, освещающий вопрос автоматизированного получения математического описания импульса давления топлива за ТНВД в ходе натуральных испытаний дизеля.

Импульс давления топлива  $P(\alpha)$ , создаваемый топливным насосом высокого давления (ТНВД), содержит в себе информацию о функциональных свойствах топливной аппаратуры (ТА) и о техническом состоянии ее элементов (плунжерной пары, всасывающего и перепускного клапанов, форсунок, труб высокого давления). На рис. 1 показаны импульсы давления топлива, зарегистрированные при помощи диагностической системы на различных нагрузочных режимах (по винтовой характеристике) судового малооборотного дизеля 6S50MC-C (конструкции фирмы MAN B&W Diesel A/S). Приведенные импульсы давления зарегистрированы при проведении стендовых испытаний отрегулированного двигателя и соответствуют новой исправной ТА. Естественно, что подобная информация может в дальнейшем использоваться для выявления неисправностей (нарушения регулировок) ТА, которые могут наблюдаться при эксплуатации двигателя. Запись импульса для регистрируемой измерительной системой диапазона  $-30 \dots +60$  град. ПКВ содержит более сотни точек  $\{\alpha_{ji}; P_{ji}\}$ , и это относится только к одиночному импульсу. В связи с этим возникает задача «сжатия» информа-



ции, т. е. получения более компактной формы описания импульса без потери полезной информации.

Анализ формы импульса топлива (или иными словами — характеристики топливоподачи) дизелей MAN B&W показывает, что ему присущи характерные точки, описав положение которых в координатах  $\alpha-P$  мы можем с определенной степенью точности идентифицировать сам импульс. Из рис. 1, 2 видно, что импульс давления топлива за ТНВД имеет семь характерных точек.  $\{\alpha P_{ji}; P_{ji}\} i = 1, \dots, 7$  и, соответственно, шесть характерных участков между этими точками.

Параметрами характерных точек, идентифицирующими процесс топливоподачи, являются: **амплитудные характеристики процесса:**

$P_{f\text{up}'}$  — давление, соответствующее моменту начала *плавного* повышения давления ( $P_{f\text{up}'} \approx 10-15$  бар);

$P_{f\text{up}''}$  — давление, соответствующее моменту начала *резкого* повышения давления ( $P_{f\text{up}''} \approx 60-80$  бар);

$P_{f\text{open}}$  — давление, соответствующее моменту открытия форсунки ( $P_{f\text{open}} \approx 440-460$  бар);

$P_{f\text{max}}$  — максимальное давление импульса;

$P_{f\text{close}}$  — давление, при котором происходит закрытие форсунки ( $\approx 300$  бар);

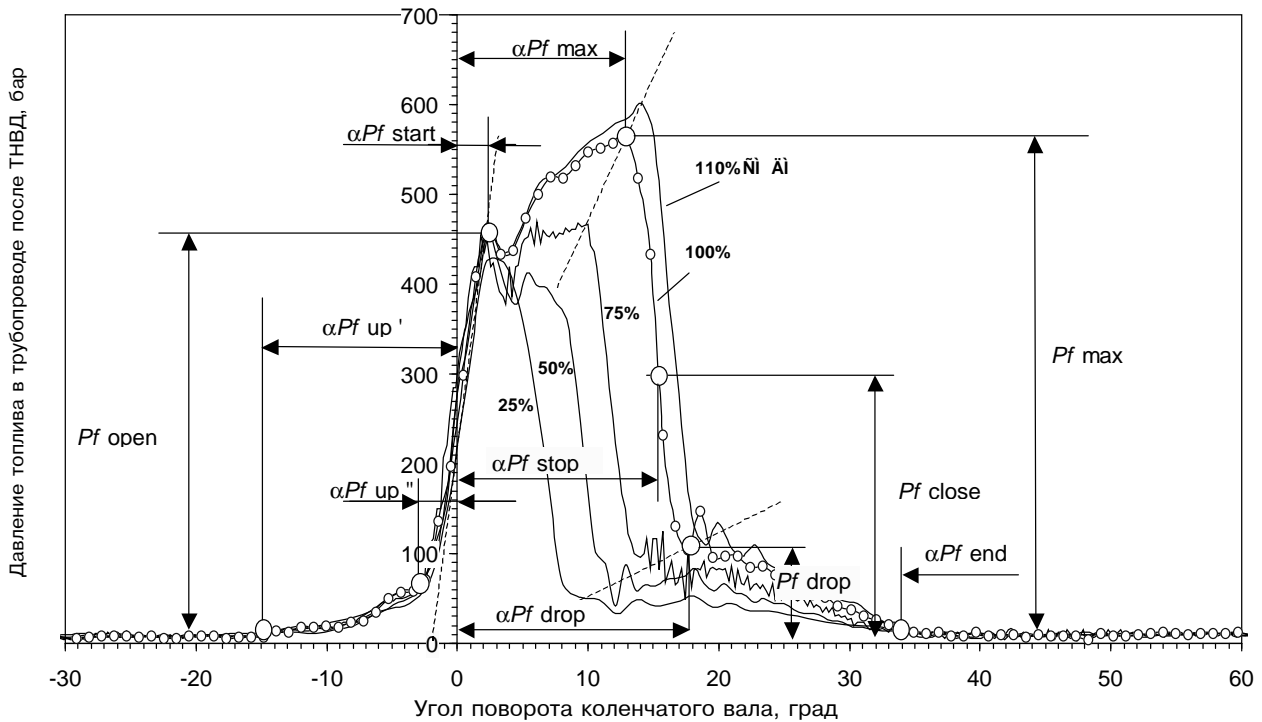
$P_{f\text{drop}}$  — давление окончания резкого падения давления топлива (на стадии завершения процесса топливоподачи; зависит от режимного фактора);

$P_{f\text{end}}$  — давление в момент окончания действия импульса (давление прокачки,  $P_{f\text{end}} \approx 8-10$  бар);

**фазовые характеристики процесса:**

$\alpha P_{f\text{up}'}$  — угол начала *плавного* повышения давления топлива ( $\alpha P_{f\text{up}'} \approx -15$  град ПКВ);

$\alpha P_{f\text{up}''}$  — угол начала *резкого* повышения давления топлива ( $\alpha P_{f\text{up}''} \approx -3$  град ПКВ);



**Рис. 1. Импульсы давления топлива за ТНВД судового малооборотного дизеля 6S50MC-C, соответствующие различным режимам нагружения:**

СМДМ— спецификационная максимальная длительная мощность

$\alpha P_{f\text{ start}}$  — угол начала топливоподачи ( $\alpha P_{f\text{ start}} \approx +2,0 \dots +3,0$  град ПКВ);

$\alpha P_{f\text{ max}}$  — угол, соответствующий максимальному давлению;

$\alpha P_{f\text{ stop}}$  — угол окончания топливоподачи (угол закрытия форсунки);

$\alpha P_{f\text{ dur}}$  — продолжительность фазы впрыска ( $\alpha P_{f\text{ dur}} = \alpha P_{f\text{ stop}} - \alpha P_{f\text{ start}}$ );

$\alpha P_{f\text{ drop}}$  — угол, соответствующий моменту окончания резкого падения давления;

$\alpha P_{f\text{ end}}$  — угол, при котором давление за ТНВД сравнивается с давлением прокачки—наполнения ТНВД (угол окончания импульса давления).

Параметры  $\alpha P_{f\text{ max}}$ ,  $\alpha P_{f\text{ stop}}$ ,  $\alpha P_{f\text{ dur}}$ ,  $\alpha P_{f\text{ drop}}$ ,  $\alpha P_{f\text{ end}}$  изменяются в зависимости от нагрузочного режима дизеля.

**динамические характеристики процесса:**

$dP_f/d\alpha$  — скорость нарастания давления импульса в момент, предшествующий открытию форсунки ( $dP_f/d\alpha \approx 90-100$  бар/град ПКВ).

Как видно из рис. 1, регулирование подаваемой в цилиндр порции топлива осуществляется по концу подачи (угол опережения подачи топлива на всех режимах остается почти неизменным, впрыскивание топлива начинается после ВМТ).

После идентификации параметров характерных точек процесса топливоподачи исследуемый процесс можно аппроксимировать кусочно-линейными функциями (рис. 2). При визуальном рассмотрении характеристики топливоподачи

(рис. 2) не представляет труда идентифицировать положение характерных точек (точки 1–7). Однако дело обстоит иначе, если такую идентификацию требуется произвести автоматически при помощи компьютера. Для этого в компьютер необходимо заложить алгоритм нахождения характерных точек на характеристике топливоподачи. Ниже приводится описание такого алгоритма. Поиск (вычисление положений) точек 1–7 выполняется в определенной последовательности за семь шагов.

**Шаг 1** — нахождение параметров точки 1 (рис. 2) (начало плавного повышения давления).

На участке  $-30 \dots -20$  град вычисляется средний уровень (математическое ожидание) функции изменения давления  $M[P(\alpha)]$ , дисперсия параметра относительно среднего  $D[P(\alpha)]$  и стандартное отклонение от среднего  $S[P(\alpha)]$  (в рассматриваемом примере:  $M[P(\alpha)] = 8,13$  бар;  $D[P(\alpha)] = 1,29$  бар<sup>2</sup> и  $S = \sqrt{D[P(\alpha)]} = 1,13$  бар). Далее последовательно рассматриваются точки, начиная от  $\alpha = -30$  град ПКВ в направлении увеличения угла (по направлению к ВМТ). Очевидно, что за точку начала повышения давления можно принять первую точку, для которой отклонение от среднего превысит, так называемый трехсигмовый интервал (т. е. для такой точки должно выполняться условие:  $P(\alpha_i) - M[P(\alpha)] > 3S$ ). Рис. 3 иллюстрирует процесс поиска характерной точки 1.

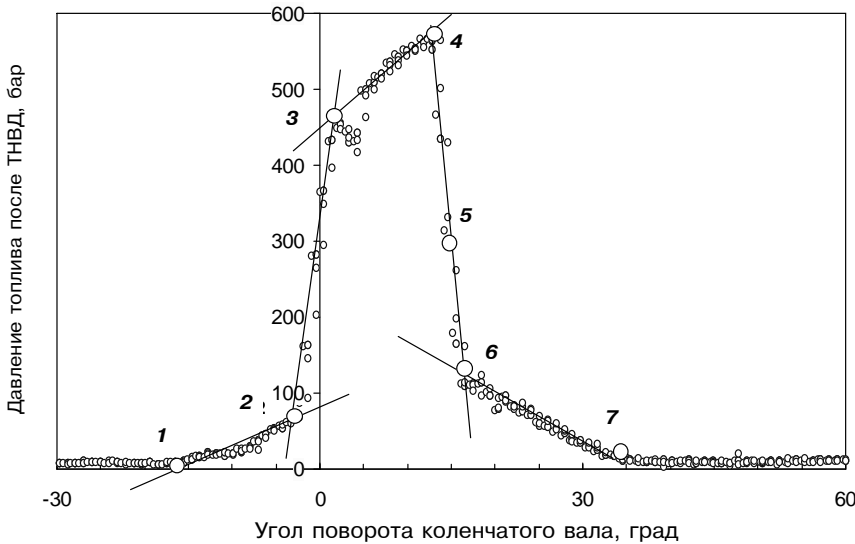


Рис. 2. Аппроксимация импульса давления топлива за ТНВД кусочно-линейными функциями:

1–7 — характерные точки процесса топливоподачи

**Шаг 2** — процедура нахождения точки 7 (см. рис. 2) (окончание импульса) подобна процедуре предыдущего шага. Среднее функции изменения давления  $M[P(\alpha)]$ , дисперсия параметра относительно среднего  $D[P(\alpha)]$  и стандартное отклонение от среднего  $S$  вычисляются для участка 50–60 град ПКВ. Направление поиска задается от угла  $\alpha = +60$  град ПКВ в сторону уменьшения угла (в направлении к ВМТ). Аналогично, за характерную точку 7 принимается такая первая попавшаяся точка, для которой разность  $P(\alpha_i) - M[P(\alpha)] > 3S$ . В связи с простотой алгоритма иллюстрация его не приводится.

**Шаг 3** — нахождение параметров точки 4  $\{\alpha P_{max}; P_{max}\}$ . Алгоритм поиска точки 4 (см. рис. 2) предельно прост: уровни давлений всех точек (в области от -30 до +60 град ПКВ) сравниваются между собой и выбирается та из точек, которой соответствует максимальный уровень давления.

**Шаг 4** — нахождение параметров точки 2 (см. рис. 2)  $\{\alpha P_{f\ end}; P_{f\ end}\}$  (начало резкого нарастания давления). Нахождение точки 2 сопряжено с определенными трудностями. Алгоритмы ее нахождения могут быть разными и поэтому предлагаемый в статье алгоритм не претендует на оптимальность. Точка 2 расположена на пересечении характерных фаз импульса: фазы плавного повышения давления и фазы резкого повышения давления. Ранее, в результате выполнения шага 1, были получены параметры точки 1. Найдем дополнительную «опорную точку», лежащую на участке фазы быстрого повышения давления (приблизительно в центре данного участка). Формально примем в качестве «опорной» первую точку  $\{\alpha P_{fi}; P_{fi}\}$ , для которой

выполняется условие  $P_{fi} > 300$  бар. Поиск «опорной точки» осуществляется в направлении от -30 град ПКВ к ВМТ. Уровень давления 300 бар выбран исходя из того, что окончание фазы резкого повышения давления происходит при давлениях, превышающих 300 бар (статическое давление открытия новых форсунок составляет  $350^{+30}$  бар) и мы всегда имеем возможность зарегистрировать «опорную точку» даже для неисправной ТА. Предположим, что точка 2 уже найдена. Соединим прямыми точку 2 с точкой 1 и найденной «опорной точкой». Полученные прямые аппроксимируют рассматриваемые фазы характеристики

топливоподачи (между точками 1, 2 и «опорной точкой»). Можно предположить, что сумма квадратов отклонений всех зарегистрированных точек от образованных прямых будет минимальна, если точка 2 найдена корректно. Иными словами, необходимо провести обследование всех точек в рассматриваемом интервале (точка 1 — «опорная точка») и найти такую точку  $i$ , для которой выполнялось бы условие:  $D_i1(2) \rightarrow \min$ , где  $D_i1(2)$  — математические ожидания квадратов отклонений точек на исследуемых интервалах от аппроксимирующих прямых (т. е. дисперсии вычисляются по формуле  $D_i1(2) = [\sum(y_i(2) - y_j)^2] / (N - 1)$ ,  $y_i(2)$  — аппроксимирующие линейные функции на участках;  $j = 0 \dots N$ ,  $N$  — общее количество точек на участках. Суммирование при нахождении дисперсий производится по всем точкам. Приведенные выше рассуждения проиллюстрированы на рис. 4, а, где также показан пунктиром процесс поиска точки 2. Алгоритм

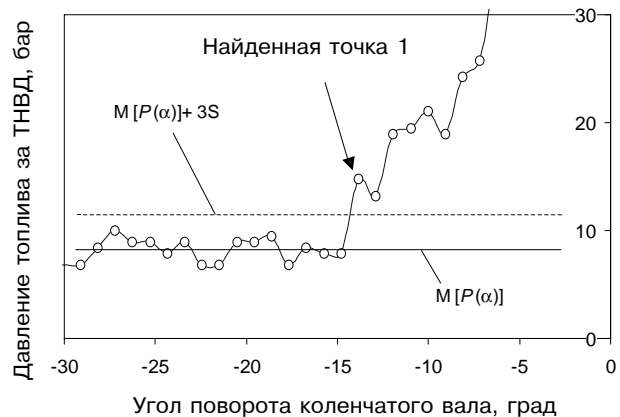


Рис. 3. Иллюстрация к алгоритму поиска точки 1

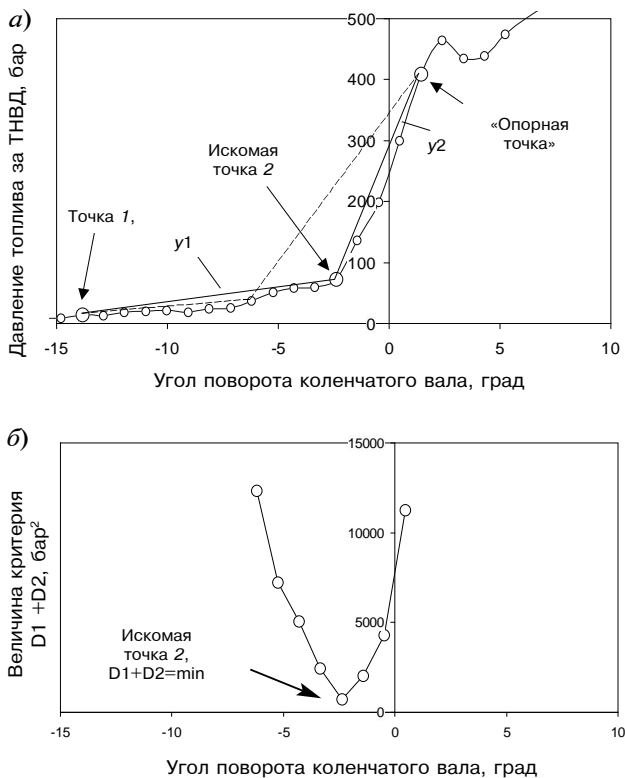


Рис. 4. Иллюстрация к алгоритму поиска точки 2

можно еще несколько улучшить. Дело в том, что протяженность интервала от точки 1 до искомой точки 2 (и соответственно количество точек на данном интервале) больше протяженности интервала от точки 2 до «опорной точки». Это будет приводить к тому, что при поиске минимального уровня суммы  $D_i1(2)$  первому участку (так как он будет иметь больший «вес») будет соответствовать более качественная аппроксимация линейной функцией  $y_1$ , второй же участок будет аппроксимироваться функцией  $y_2$  более грубо. Чтобы добиться одинаковой по качеству аппроксимации рассматриваемых участков следует видоизменить условие (формальный признак) нахождения точки 2. Таким условием может быть:  $(D_i1 + D_i2) \rightarrow \min$ , где, соответственно,  $D_i1 = [\sum(y_1 - y_j)^2] / (M_1 - 1)$ ,  $M_1$  — общее количество точек на 1-ом исследуемом участке и  $D_i2 = [\sum(y_2 - y_j)^2] / (N_2 - 1)$ ,  $N_2$  — общее количество точек на 2-ом исследуемом участке. Следует еще раз отметить, что в процессе поиска точки 2 производится обследование всех точек интервала от точки 1 до «опорной точки» и в связи с этим параметры функций  $y_1(2)$  и величины  $M_1(2)$  в процессе обследования непрерывно изменяются. На рис. 4, б представлено изменение функции  $(D_i1 + D_i2)$  по углу поворота коленчатого вала и конечный результат поиска характерной точки 2.

**Шаг 5** — нахождение параметров точки 3 (начало подачи топлива в цилиндр) осуществляется

способом, подобным используемому на шаге 4 (см. рис. 4). В качестве «опорных точек» в этом случае принимаются точки 2 и 4. Поиск точки 3 осуществляется методом уже рассмотренного «скользящего» обследования всех точек, попавших в интервал между точками 2 и 4. Критерием точки 2 является выполнение условия  $(D_i1 + D_i2) = \min$ .

Следует сделать одно замечание. Импульс давления топлива за ТНВД (рис. 1) имеет два максимума. Первый из них соответствует точке начала подачи топлива (точка 3) и второй соответствует точке абсолютного максимального давления топлива (точка 4) (см. рис. 2). Такая характерная форма импульса сохраняется в диапазоне нагрузочных режимов от 75 до 110 % номинальной мощности дизеля. Поэтому для указанного диапазона мощности идентификация точки 3 может быть значительно упрощена (ищется первый экстремум характеристики импульса, признаком которого является изменения знака производной функции при прохождении через экстремальное значение). При нагрузочных режимах менее 75 % характерная точка абсолютного максимума давления топлива формально перестает быть таковой. По мере снижения нагрузки максимальное давление падает и настает момент, когда давление, соответствующее точке начала подачи топлива (точка 3) становится максимальным давлением импульса. На режимах 25- и 50 %-ной нагрузки двигателя (см. рис. 1) отчетливо видно, что точке 3 соответствует максимальное давление импульса.

**Шаг 6** — алгоритм нахождения параметров точки 6 (окончание резкого падения давления) проиллюстрирован на рис. 5. Он подобен алгоритмам, используемым при поиске точек 2 и 3 (шаг 4 и шаг 5). Направление поиска точки 6 осуществляется от точки 7 к точке 4.

**Шаг 7** — нахождение параметров точки 5 (окончание подачи топлива в цилиндр).

Алгоритм поиска точки 5 очень простой. На участке между уже найденными точками 4 и 6 определяются две точки, наиболее близко расположенные к уровню давления 300 бар, причем одна из них (обозначим ее т. 5') должна быть расположена выше уровня 300 бар, а другая (обозначим ее т. 5'') должна быть расположена ниже уровня 300 бар. Тогда угол поворота коленчатого вала дизеля, соответствующий точке 5 ( $\alpha P_{f \text{ stop}}$ ), можно получить простым интерполированием:

$$\alpha P_{f \text{ stop}} = \frac{\alpha_{T.5''} - \alpha_{T.5'}}{P_{T.5'} - P_{T.5''}} (P_{T.5'} - 300) + \alpha_{T.5'}$$

Окончательной вычислительной операцией является определение продолжительности фазы впрыскивания топлива:  $\alpha P_{f \text{ dur}} = \alpha P_{f \text{ stop}} - \alpha P_{f \text{ start}}$ .

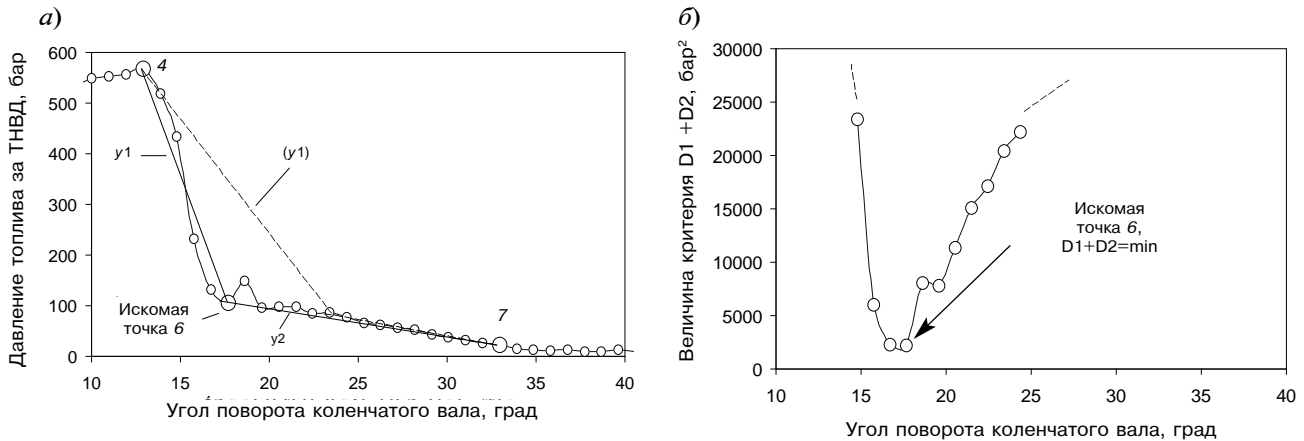


Рис. 5. Иллюстрация к алгоритму поиска точки 6

**Выводы**

Разработан алгоритм поиска характерных точек характеристики процесса топливоподачи судового малооборотного дизеля 6S50MC-C (MAN B&W). Проверка алгоритма показала достаточно высокую его надежность. Алгоритм был заложен в систему технической диагностики ТА судового дизеля. Это позволило в автоматическом режиме формировать эталонные

характеристики процесса топливоподачи дизеля для последующего осуществления процедуры диагностирования ТА.

Можно предположить, что предлагаемый в статье алгоритм также может быть применим с небольшими изменениями для решения задач диагностики ТА других типов малооборотных дизелей.

**ЮБИЛЕЙ!**



*Александр  
Николаевич  
Гоцу  
70 лет*

*24 ноября 2006 г. исполнилось 70 лет со дня рождения Александру Николаевичу Гоцу, заслуженному машиностроителю РФ, доктору технических наук, профессору кафедры ДВС Владимирского государственного университета*

В отрасль двигателестроения А.Н. Гоц пришел в 1979 году уже сложившимся специалистом, прошедшим научную школу в области сопротивления материалов, динамики и прочности машин. В Научно-исследовательском институте комбайновых и тракторных двигателей он основал, а в последствии и возглавил научное направление ускоренных испытаний, надежности и перспективных исследований конструкции двигателей.

С 1993 г. доктор технических наук, профессор А.Н. Гоц работает на кафедре ДВС Владимирского университета, где продолжает научные исследования, внедряет новые учебные дисциплины и принимает активное участие в формировании нового поколения инженеров-механиков.

Более 290 научных публикаций, 52 авторских свидетельств и патентов на изобретение — таков творческий потенциал, с которым А.Н. Гоц встречает свой юбилей.

*Коллеги по факультету автомобильного транспорта ВГУ тепло поздравляют юбиляра и желают ему доброго здоровья и дальнейших творческих успехов.*