

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

А.А. Обозов, к.т.н.

ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод»

(Продолжение. Начало в № 1 (231) 2008 г.)

Распознавание классов «слишком ранний (поздний) впрыск топлива» (классы ω_{21} , ω_{22})

На рис. 4 представлены импульсы давления топлива за ТНВД, соответствующие классам ω_1 , ω_{21} и ω_{22} . Момент впрыска можно определить по положению характерной точки $\{\alpha p_{f\text{откр}}, p_{f\text{откр}}\}$ на кривой впрыска.

Признак $\alpha p_{f\text{откр}}$ несет в себе информацию о моменте открытия топливной форсунки, т. е. о фактическом моменте начала поступления топлива в цилиндр двигателя. Следует сразу же оговориться, что этот параметр не определяет точно момент времени открытия форсунки, а только информативно связан с ним. По отношению к фактическому моменту открытия форсунки параметр $\alpha p_{f\text{откр}}$ запаздывает на период dt времени прохождения обратной волны давления от форсунки до топливного насоса (до точки, в которой установлен датчик давления топлива). Величина dt зависит от длины труб высокого давления, связывающих топливный насос с форсункой, и от физических свойств топлива (скорости распространения звуковой волны в топливе). На основе полученного статистического распределения признака $\alpha p_{f\text{откр}}$ возможно распознавание (с применением методов статистической теории распознавания образов — СТРО) классов ω_1 , ω_{21} и ω_{22} . Этот случай проиллюстрирован на рис. 5, где приведены полученные эмпирические условные функции распределения параметра $\alpha p_{f\text{откр}}$ классов ω_1 , ω_{21} и ω_{22} . Выборка

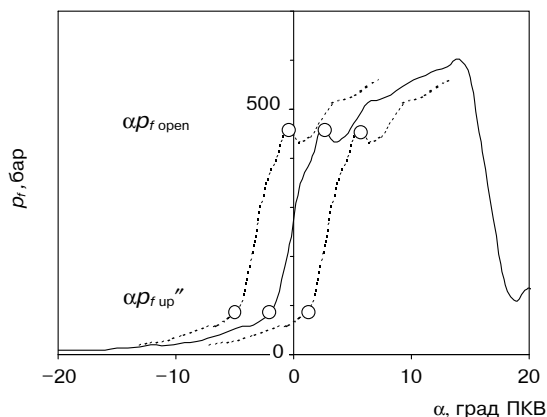


Рис. 4. Импульсы давления, соответствующие классам ω_1 , ω_{21} и ω_{22}

данных, соответствующих классам ω_{21} и ω_{22} , была получена за счет регулировок системы супер-ВТ. Для одномерного случая, если принять допущение о равенстве дисперсий признака для распознаваемых классов и равенстве априорных вероятностей появления классов, дискриминантная функция имеет вид

$$D_{ij}(x) = 2x - (\mu_i + \mu_j) = 0, \quad i \neq j,$$

где $D_{ij}(x)$ — дискриминантная функция от признака x ; μ_i и μ_j — математические ожидания признака классов ω_i , ω_j .

Решающее правило можно формально представить в другой форме. Для этого определяется пороговое значение признака x_0

$$x_0 = (\mu_i + \mu_j)/2,$$

и решающее правило принимает вид:

$$x \geq x_0 \Rightarrow x \in \omega_i;$$

$$x < x_0 \Rightarrow x \in \omega_j.$$

В результате обработки полученных экспериментальных данных были определены характеристики классов: $\mu(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_1) = -1,403$, $\mu(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_{21}) = -2,403$, $\mu(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_{22}) = -0,403$; $D(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_1) \approx D(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_{21}) \approx D(\alpha p_{f\text{откр}}/\omega_{22}) = 0,0598$ и рассчитаны пороговые величины параметра x для распознавания классов $\alpha p_{f\text{откр}}(\omega_{21}/\omega_1)_0 = -1,903$ и $\alpha p_{f\text{откр}}(\omega_{22}/\omega_1)_0 = 0,903$ (см. рис. 5) (размерность величин μ — град ПКВ, D — град² ПКВ).

Оценка степени различимости классов может быть выполнена на основе экзаменационной выборки. Однако для этих целей можно использовать и исходную «обучающую» выборку, а интегральным показателем степени различимости классов может служить параметр, представляющий собой математическое ожидание апостериорной вероятности принадлежности признака x к своему классу ω_i : $M\{P(\omega_i/x)_{\omega_j}\}$, (ω_j — класс, по отношению к которому осуществляется распознавание (сопряженный класс); для случаев, когда априори известно о том, что $x \in \omega_i$ [2]). Разумеется, при $M\{P(\omega_i/x)_{\omega_j}\} \approx 0,5$ классы будут неразличимы (так как апостериорная вероятность принадлежности равна априорной вероятности). Чем больше величина $M\{P(\omega_i/x)_{\omega_j}\}$, тем классы лучше различимы. В предельном случае при $M\{P(\omega_i/x)_{\omega_j}\} \Rightarrow 1$ классы абсолютно различимы. Для одномерного случая

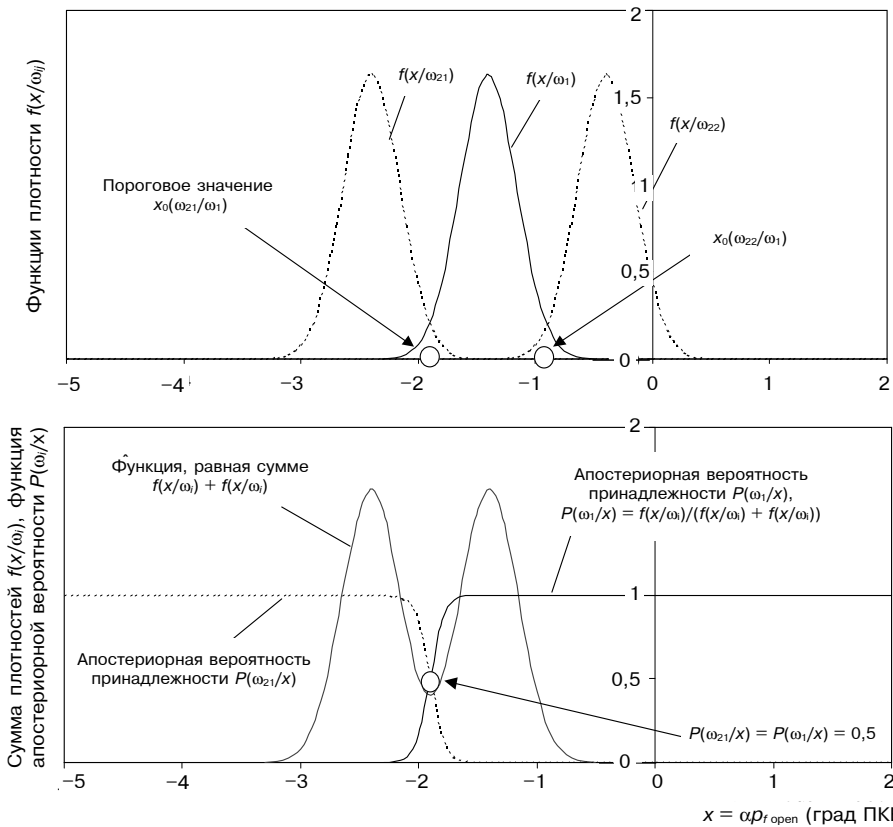


Рис. 5. Иллюстрация поиска порогового значения x_0 в соответствии с байесовской оценкой апостериорной вероятности принадлежности признака классификации

(при условии равенства априорных вероятностей появления классов и равенстве дисперсий признака) можно показать, что

$$P(\omega_1 / x)_{\omega_2} = \frac{1}{1 + \exp\left\{\frac{(\mu_2 - \mu_1)[2x - (\mu_2 + \mu_1)]}{2D}\right\}}$$

Это выражение удобно для выполнения расчетов. Для исследуемых классов ω_{21} и ω_{22} было получено: $M\{P(\omega_{21}/x)_{\omega_1}\} = 0,977$, $M\{P(\omega_{22}/x)_{\omega_1}\} = 0,981$, что подтверждает хорошую различимость классов. Графическая интерпретация процедуры поиска байесовской оценки апостериорной вероятности приведена на рис. 5.

Сделаем ряд дополнительных пояснений. Если ограничиться рассмотрением только одного признака $\alpha p_{f \text{ open}}$ и только на основе этого признака строить распознавание рассматриваемых неисправностей, то мы получим информацию о группе неисправностей, однако дифференцировать эти неисправности между собой не представится возможным. Кривую впрыска характеризует еще один параметр, содержащий информацию о фазовых характеристиках процесса — $\alpha p_{f \text{ up}}$. Данный признак содержит информацию о таком регулировочном параметре ТНВД, как «опережение топливного насоса δh_{on} (мм)», т. е. о фазовой настройке топливного насоса (следует иметь в виду, что на параметр δh_{on} также оказы-

вает влияние угол установки топливной кулачной шайбы привода насоса). Используя признак $\alpha p_{f \text{ up}}$, можно оценить угол ПКВ, при котором происходит перекрытие верхней отсечной кромкой плунжера отсечных отверстий плунжерной втулки (или, иными словами, — угол начала активного хода плунжера). Таким образом, добавление к вектору диагностических признаков (к вектору наблюдения) признака $\alpha p_{f \text{ up}}$, как представляется, позволит в общей группе неисправностей выявить такую неисправность, как нарушение регулировки «опережения топливного насоса». При такой постановке задача распознавания образов становится двумерной. На рис. 6 представлено поле рассеяния признаков $\alpha p_{f \text{ open}}$ и $\alpha p_{f \text{ up}}$ для классов ω_1 , ω_{21} и ω_{22} , построенное по результатам экспериментальных данных.

Покажем подробно процедуру поиска решающего правила распознавания и оценки степени различимости для классов ω_1 , ω_{21} (двумерный случай).

Исходными данными для расчета дискриминантных функций являются:

➤ вектор-столбец математических ожиданий признаков классов

$$\mu(x) = \begin{Bmatrix} \mu(\alpha p_{f \text{ open}}) \\ \mu(\alpha p_{f \text{ up}}) \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} -1,402 \\ -5,684 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_1} \Rightarrow \begin{Bmatrix} -2,403 \\ -6,684 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_{21}} ;$$

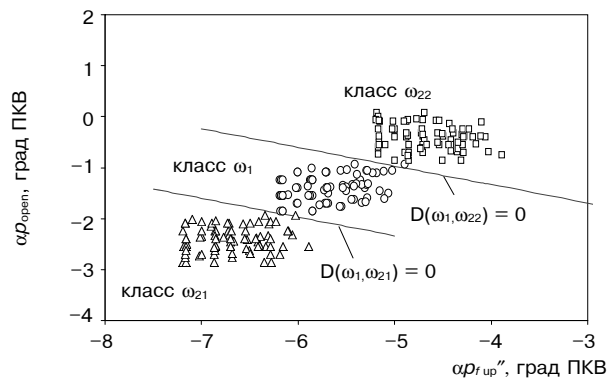


Рис. 6. Поле рассеяния признаков $\alpha p_{f \text{ open}}$ и $\alpha p_{f \text{ up}}$ и дискриминантные функции

➤ ковариационные матрицы

$$\Sigma_i(x) = \begin{Bmatrix} D(\alpha p_{f \text{ open}}) & \text{Cov}(\alpha p_{f \text{ open}}, \alpha p_{f \text{ up}^*}) \\ - & D(\alpha p_{f \text{ up}^*}) \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{Bmatrix} 0,05984 & 0,02703 \\ - & 0,11644 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{Bmatrix} 0,05864 & 0,03103 \\ - & 0,11755 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_{21}} ;$$

➤ обобщенная (средняя) ковариационная матрица (принята равной $\Sigma_{\omega_1}(x)$)

$$\Sigma(x) = \begin{Bmatrix} D(\alpha p_{f \text{ open}}) & \text{Cov}(\alpha p_{f \text{ open}}, \alpha p_{f \text{ up}^*}) \\ \text{Cov}(\alpha p_{f \text{ open}}, \alpha p_{f \text{ up}^*}) & D(\alpha p_{f \text{ up}^*}) \end{Bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{Bmatrix} 0,05984 & 0,02703 \\ - & 0,11644 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_1 + \omega_{21}} ;$$

➤ матрица обратная обобщенной ковариационной матрице

$$\Sigma^{-1}(x) = \begin{Bmatrix} 18,666 & -4,3336 \\ -4,3336 & 9,5937 \end{Bmatrix}.$$

По формуле Байеса определяется вектор-столбец коэффициентов при признаках дискриминантной функции (для распознавания классов ω_1, ω_{21})

$$A = \begin{Bmatrix} A_{\alpha p_{f \text{ open}}} \\ A_{\alpha p_{f \text{ up}^*}} \end{Bmatrix} = \Sigma^{-1}(x) \begin{Bmatrix} \mu_1(\alpha p_{f \text{ open}}) - \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ open}}) \\ \mu_1(\alpha p_{f \text{ up}^*}) - \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ up}^*}) \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} 18,6667 & -4,3336 \\ -4,3336 & 9,5937 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} -1,402 - (-2,403) \\ -5,684 - (-6,684) \end{Bmatrix} =$$

$$= \begin{Bmatrix} 14,333 \\ 5,260 \end{Bmatrix}$$

и свободный член дискриминантной функции

$$B = -\frac{1}{2} \{ \mu_1(\alpha p_{f \text{ open}}) + \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ open}}) \quad \mu_1(\alpha p_{f \text{ up}^*}) + \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ up}^*}) \} \times$$

$$\times \Sigma^{-1} \begin{Bmatrix} \mu_1(\alpha p_{f \text{ open}}) - \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ open}}) \\ \mu_1(\alpha p_{f \text{ up}^*}) - \mu_{21}(\alpha p_{f \text{ up}^*}) \end{Bmatrix} =$$

$$= -\frac{1}{2} \{ 1,402 + (-2,403) \quad -5,684 + (-6,684) \} \times$$

$$\times \begin{Bmatrix} 18,6667 & -4,3336 \\ -4,3336 & 9,5937 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} -1,402 & -(-2,403) \\ -5,684 & -(-6,684) \end{Bmatrix} = 59,80.$$

Окончательно дискриминантная функция примет вид $D(\omega_1, \omega_{21}) = 14,33 \alpha p_{f \text{ open}} + 5,260 \alpha p_{f \text{ up}^*} + 59,80$, а решающее правило $14,33 \alpha p_{f \text{ open}} + 5,260 \alpha p_{f \text{ up}^*} + 59,80 \geq (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1(\omega_{21})$.

Можно показать, что для каждой реализации вектора наблюдения (многомерный случай), величину апостериорной вероятности принадлежности $x \in \omega_2$ (на «фоне» класса ω_1) можно определить по формуле

$$P(\omega_2 / x)_{\omega_1} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{1}{2}(C_2 - C_1)\right]},$$

где $C_1 = (x - \mu_1)' \Sigma^{-1}(x - \mu_1)$ и $C_2 = (x - \mu_2)' \Sigma^{-1}(x - \mu_2)^1$.

Аналогично определяется величина $P(\omega_1/x)_{\omega_2}$. Можно сказать, что на векторном пространстве диагностических параметров определена функция апостериорной вероятности принадлежности x к классам ω_1 и ω_2 , т. е. (применительно к нашему случаю) каждой точке на поле рассеяния (см. рис. 6) соответствуют определенные значения величин $P(\omega_1/x)_{\omega_{21}}$ и $P(\omega_1/x)_{\omega_{22}}$ ($P(\omega_{21}/x)_{\omega_1}$ и $P(\omega_{22}/x)_{\omega_1}$).

В таблице представлены результаты оценки степени различимости классов ω_1, ω_{21} (двумерный случай), полученные на основе обучающей выборки. Величина $M\{P(\omega_{21}/x)_{\omega_1}\} = 0,985$ свидетельствует о достаточно хорошей распознаваемости классов.

	Класс ω_1		$P(\omega_1/x)_{\omega_{21}}$	Класс ω_{21}		$P(\omega_{21}/x)_{\omega_1}$
	$\alpha p_{f \text{ open}}$	$\alpha p_{f \text{ up}^*}$		$\alpha p_{f \text{ open}}$	$\alpha p_{f \text{ up}^*}$	
1	-1,058	-5,029	0,999	-2,067	-7,005	0,998
2	-1,928	-5,189	0,999	-2,083	-6,302	0,965
3	-1,925	-4,893	0,999	-1,926	-6,029	0,380
4	-1,702	-5,726	0,994	-2,702	-6,189	0,999
5	-1,541	-6,005	0,994	-2,641	-5,893	0,999
...
80	-1,674	-5,302	0,999	-2,666	-6,499	0,999
			$M\{P(\omega_1/x)_{\omega_{21}}\}$			$M\{P(\omega_{21}/x)_{\omega_1}\}$
			0,984			0,985

Для классов ω_1, ω_{22} получены (см. рис. 6):

- дискриминантная функция $D(\omega_1, \omega_{22}) = -14,333 \alpha p_{f \text{ open}} - 5,2601 \alpha p_{f \text{ up}^*} - 40,21$;
- решающее правило $-14,333 \alpha p_{f \text{ open}} - 5,2601 \alpha p_{f \text{ up}^*} - 40,21 \geq (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1(\omega_{22})$;
- оценка $M\{P(\omega_{22}/x)_{\omega_1}\} = 0,981$.

Распознавание классов «слишком низкое (высокое) давление открытия форсунки» (классы ω_{31}, ω_{32})

Распознавание данных нарушений работы топливной аппаратуры (ТА) может быть выполнено на основе анализа диагностического признака $p_{f \text{ open}}$ (рис. 7), при этом задача решается в одномерной постановке и подробно в статье не описывается.

У современных судовых малооборотных дизелей MAN B&W топливные форсунки настраиваются на статическое давление открытия 350^{+25} бар. При такой регулировке обеспечивается, во-первых, — удовлетворительное распыливание топлива в камере сгорания и, во-вторых, — равномерное его распределение в объеме камеры сгорания. Понижение давления открытия

¹ В СТРО квадратичная форма от x вида $C(x) = (x - \mu)' \Sigma^{-1}(x - \mu)$ называется квадратом Махаланобиса и часто используется при решении задач распознавания образов.

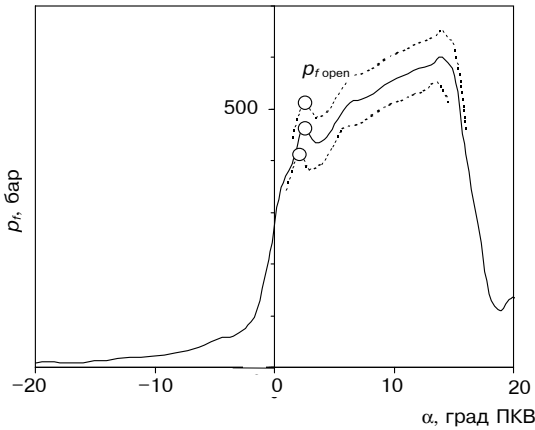


Рис. 7. Импульсы давления, соответствующие классам ω_1 , ω_{31} и ω_{32}

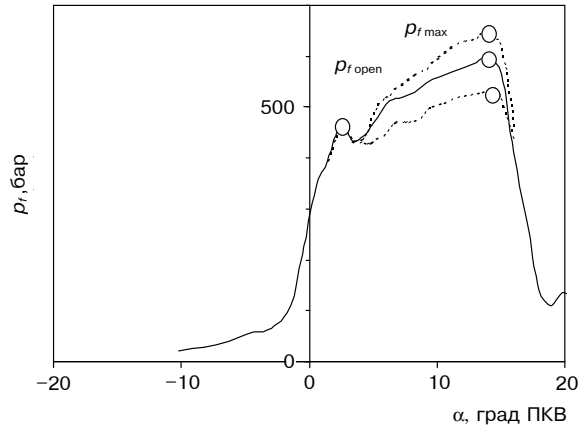


Рис. 8. Импульсы давления, соответствующие классам ω_1 , ω_{41} и ω_{42}

форсунки приводит к ухудшению распыливания топлива и его распределения и, как следствие, к ухудшению (затягиванию) процесса сгорания (что негативно сказывается на топливной экономичности, теплонапряженности и экологических показателях). Все это определяет необходимость контроля параметра $p_{f\text{open}}$. Динамическое давление открытия (давление, регистрируемое за ТНВД) отличается от статического давления на некоторую величину $\delta p_{f\text{open}}$, зависящую от физических свойств топлива, скоростного режима работы двигателя и конструкции (длины) труб высокого давления, соединяющих ТНВД с форсунками. Исследования показывают, что динамическое давление превышает статическое давление открытия форсунки на режимах работы двигателя, близких к номинальному на 50–70 бар ($\delta p_{f\text{open}} = 50\text{--}70$ бар). Для получения выборки данных, соответствующих классам ω_{31} , ω_{32} , выполнялась регулировка усилия затяжки иглы топливной форсунки. В результате обработки полученных экспериментальных данных были определены характеристики классов:

$$\begin{aligned} \mu(p_{f\text{open}}/\omega_1) &= 435,2 \text{ бар}, \mu(p_{f\text{open}}/\omega_{31}) = 385 \text{ бар}, \\ \mu(p_{f\text{open}}/\omega_{32}) &= 485 \text{ бар}; \\ D(p_{f\text{open}}/\omega_1) &\approx D(p_{f\text{open}}/\omega_{31}) \approx D(p_{f\text{open}}/\omega_{32}) = 167,0 \text{ бар}^2 \\ (S &= 12,92 \text{ бар}) \end{aligned}$$

и рассчитаны пороговые величины параметра x для распознавания классов:

$$p_{f\text{open}}(\omega_{31}/\omega_1)_0 = 410 \text{ бар и } p_{f\text{open}}(\omega_{32}/\omega_1)_0 = 460 \text{ бар.}$$

Решающие правила имеют вид:

$$p_{f\text{open}} \geq (<) 410 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_{31})$$

и
$$p_{f\text{open}} \geq (<) 460 \Rightarrow x \in \omega_{32} (x \in \omega_1).$$

Анализ различимости классов показал на их хорошую различимость:

$$M\{P(\omega_{31}/x)\omega_1\} \approx M\{P(\omega_{32}/x)\omega_1\} \approx 0,980.$$

Распознавание классов «слишком низкое (высокое) давление впрыскивания топлива» (классы ω_{41} ω_{42})

Распознавание данных нарушений работы ТА может быть выполнено на основе анализа диа-

гностических признаков $p_{f\text{open}}$, $p_{f\text{max}}$ (рис. 8). В этом случае пространство диагностических признаков двумерное.

Контролируя параметр $p_{f\text{max}}$, можно диагностировать несколько первопричин, вызывающих его понижение (или повышение). В эксплуатации обычно наблюдается понижение $p_{f\text{max}}$, которое вызывается появлением протечек топлива из надплунжерного пространства (неплотность всасывающего клапана ТНВД, увеличенный зазор между плунжером и плунжерной втулкой, плохая подгонка труб высокого давления, и т. п.). К понижению уровня $p_{f\text{max}}$ может приводить использование топлива с чрезмерно низкой вязкостью.

На уровень $p_{f\text{max}}$ также влияют начальные условия процесса впрыскивания — уровень $p_{f\text{open}}$. Изменение уровня $p_{f\text{open}}$ приводит и к некоторому изменению $p_{f\text{max}}$. В связи с этим анализ признака $p_{f\text{max}}$, как представляется, следует выполнять совместно с признаком $p_{f\text{open}}$.

Увеличение $p_{f\text{max}}$ происходит гораздо реже и наиболее вероятной причиной этому служит высокая вязкость топлива (недостаточный подогрев) или закоксовывание сопловых отверстий распылителя форсунки. К повышению $p_{f\text{max}}$ может привести слишком высокое усилие затяжки запирающей пружины форсунки (наблюдается редко). Отметим, что рассмотренный параметр $p_{f\text{max}}$ является «интегральным» параметром, так как содержит информацию о состоянии ТНВД, труб высокого давления, усилия затяжки форсуночной пружины и состоянии сопловых отверстий распылителя. Однако дифференцировать эти состояния данный параметр (рассматриваемый в единственном числе) не может.

При проведении стендовых испытаний дизеля была получена выборка данных класса ω_{41} (при неизменном $p_{f\text{open}}$) посредством искусственного создания протечек топлива в месте установки датчика давления. $p_{f\text{max}}$ было понижено приблизительно на 25 бар по сравнению с эталонным

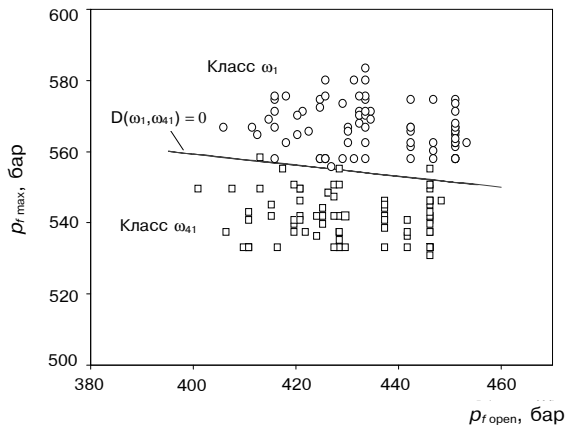


Рис. 9. Поле рассеяния признаков $p_{f\text{опен}}$ и $p_{f\text{макс}}$ и дискриминантная функция для классов ω_1 , ω_{41}

классом ω_1 . На рис. 9 представлено поле рассеяния признаков $p_{f\text{опен}}$ и $p_{f\text{макс}}$ для классов ω_1 и ω_{41} , построенное по результатам экспериментальных данных.

Были получены:

— вектор-столбец математических ожиданий признаков классов

$$\mu(x) = \begin{Bmatrix} \mu(p_{f\text{опен}}) \\ \mu(p_{f\text{макс}}) \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} 435,2 \\ 566,7 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_1} \Rightarrow \begin{Bmatrix} 430,2 \\ 541,7 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_{41}} ;$$

— обобщенная (средняя) ковариационная матрица (принята равной $\Sigma_{\omega_1}(x)$)

$$\Sigma(x) = \begin{Bmatrix} D(p_{f\text{опен}}) & \text{Cov}(p_{f\text{опен}}, p_{f\text{макс}}) \\ \text{Cov}(p_{f\text{макс}}, p_{f\text{опен}}) & D(p_{f\text{макс}}) \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} 167,0 & -17,75 \\ - & 43,77 \end{Bmatrix}_{\text{класс } \omega_1 + \omega_{41}} ;$$

— обратная матрица

$$\Sigma^{-1}(x) = \begin{Bmatrix} 0,0062574 & 0,0025377 \\ 0,0025377 & 0,0238737 \end{Bmatrix}.$$

По формуле Байеса определены вектор-столбец A коэффициентов при признаках дискриминантной функции и свободный член B дискриминантной функции. Окончательно получено:

— дискриминантная функция

$$D(\omega_1, \omega_{41}) = 0,09473p_{f\text{опен}} + 0,60953p_{f\text{макс}} - 378,79;$$

— решающее правило

$$0,09473p_{f\text{опен}} + 0,60953p_{f\text{макс}} - 378,79 \geq (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1(\omega_{41})$$

и оценка $M\{P(\omega_{41}/x)_{\omega_1}\} \approx 0,98$.
Описание процедуры построения решающего правила для распознавания классов ω_1 и ω_{42} не приводится, так как выполняется аналогично.

Распознавание классов «слишком большая (малая) продолжительность впрыскивания топлива» (классы ω_{51} , ω_{52})

Распознавание данных нарушений работы ТА (рис. 10) может быть выполнено на основе анализа диагностических признаков $\alpha p_{f\text{close}}$ и $\alpha p_{f\text{open}}$ (двумерный случай) или в одномерной постановке с использованием признака $\alpha p_{f\text{dur}}$ ($\alpha p_{f\text{dur}} =$

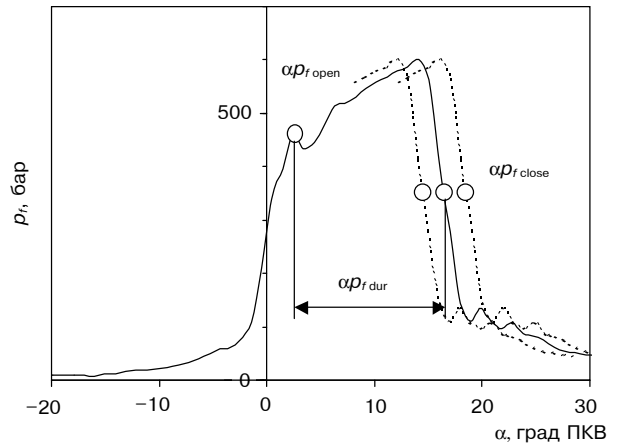


Рис. 10. Импульсы давления, соответствующие классам ω_1 , ω_{51} и ω_{52}

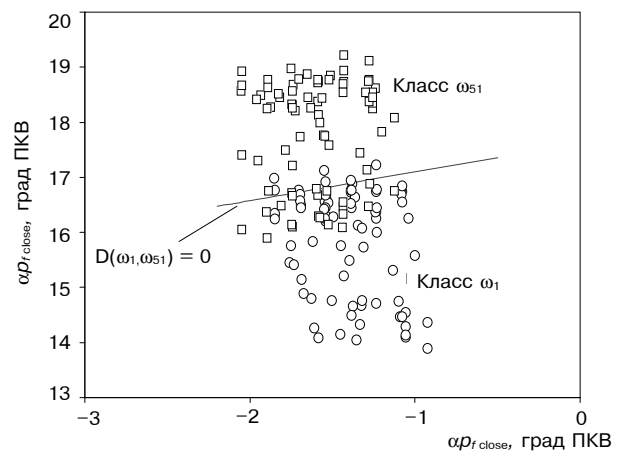


Рис. 11. Поле рассеяния признаков $\alpha p_{f\text{опен}}$ и $\alpha p_{f\text{макс}}$ и дискриминантная функция для классов ω_1 , ω_{51}

$= \alpha p_{f\text{close}} - \alpha p_{f\text{open}}$). Рассмотрим двумерный случай. В статье рассмотрим только распознавание класса ω_{51} . Класс ω_{51} был получен изменением индекса подачи топлива ТНВД (индекс был изменен на 2 мм), что соответствовало увеличению продолжительности впрыскивания топлива приблизительно на 2 град ПКВ. В результате обработки экспериментальных данных была получена дискриминантная функция, разделяющая классы (рис. 11), и решающее правило, приведенные ниже:

$$D(\omega_1, \omega_{51}) = 1,07682\alpha p_{f\text{опен}} - 2,0675\alpha p_{f\text{макс}} + 36,426; \\ 1,07682\alpha p_{f\text{опен}} - 2,0675\alpha p_{f\text{макс}} + 36,426 \geq (<) 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow x \in \omega_1(\omega_{51})$$

Классы удовлетворительно распознаются.

Распознавание классов «слишком медленное (быстрое) нарастание давления» (классы ω_{61} , ω_{62})

Распознавание данных нарушений работы ТА может быть выполнено на основе анализа диагностического признака $(dp_{fj}/d\alpha)_{\text{макс}}$, являющегося комплексом от параметров $\alpha p_{f\text{up}}$, $p_{f\text{up}}$, $\alpha p_{f\text{open}}$, $p_{f\text{open}}$. Параметр $(dp_{fj}/d\alpha)_{\text{макс}}$ представляет собой тангенс угла наклона переднего фронта импульса давления (рис. 12) и может быть определен по формуле $(dp_{fj}/d\alpha)_{\text{макс}} = (p_{f\text{open}} - p_{f\text{up}}) / (\alpha p_{f\text{open}} - \alpha p_{f\text{up}})$.

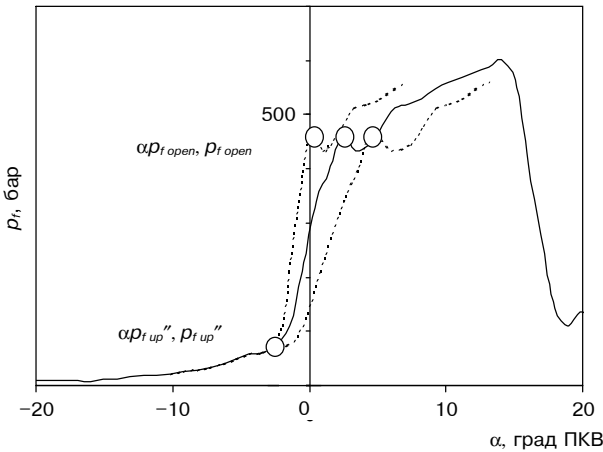


Рис. 12. Импульсы давления, соответствующие классам ω_1 , ω_{61} и ω_{62}

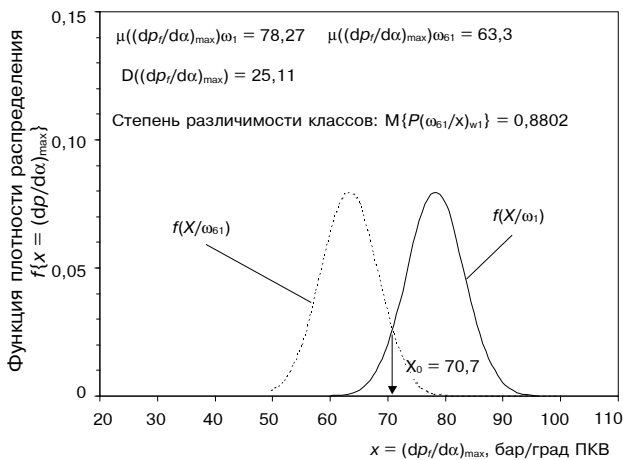


Рис. 13. Результаты дискриминантного анализа классов ω_1 и ω_{61}

Особенностью параметра $(dp_f/d\alpha)_{\max}$ является то, что он несет информацию о протекании процесса на фазе, когда еще не происходит впрыскивания топлива в цилиндр и форсунка находится в закрытом состоянии. Данный параметр «интегрально» информативен о состоянии многих элементов ТА (плунжерной пары и всасывающего клапана ТНВД, труб высокого давления, перепускного клапана форсунки). При этом следует отметить, что такие факторы, как состояние отверстий распылителя форсунки или усилие затяжки форсуночной пружины не оказывают влияния на параметр $(dp_f/d\alpha)_{\max}$, т. е. данный параметр обладает избирательным свойством и поэтому особенно ценен. Результаты дискриминантного анализа классов ω_1 и ω_{61} приведены на рис. 13.

Решающее правило имеет вид

$$(dp_f/d\alpha)_{\max} \geq (<) 70,7 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_{61}).$$

Решающее правило при появлении класса ω_{61} будет давать правильное решение в среднем в 88-ми случаях из ста.

Класс ω_{62} может распознаваться аналогично, поэтому описание процедуры построения ре-

шающего правила не приводится (к тому же класс ω_{62} редко встречается в эксплуатации и является в основном признаком чрезмерно высокой вязкости применяемого топлива).

В заключение отметим, что в статье рассмотрена процедура диагностирования нарушений в работе ТА, «отнесенная» к одному нагрузочному режиму работы двигателя — режиму номинальной мощности. На режиме номинальной мощности были получены выборочные статистики, обработанные методами СТРО. В результате были найдены дискриминантные функции. Использование полученных решающих правил на основе данных функций позволяет осуществлять диагностику нарушений ТА двигателя, но только на режиме номинальной мощности. Как уже отмечалось ранее, избежать данного недостатка можно посредством расширения пространства диагностических признаков за счет добавления режимного(ных) фактора(ов). В этом случае выборка данных должна быть получена на нескольких режимах, а вектор признаков должен быть увеличен на компоненту режимного фактора (например, добавляется параметр — индекс ТНВД). Естественно, в этом случае вариация признаков изменится как в количественном, так и в качественном отношении. Она будет отличаться от полученной ранее, так как теперь будет обуславливаться как вероятностными воздействиями, которые наблюдались при работе на фиксированном режиме, так и воздействием, вызванным вариацией режимов работы двигателя.

Выводы

➤ В результате выполненных исследований разработан подход к алгоритмизации систем технической диагностики судовых малооборотных дизелей, базирующийся на методологии СТРО.

➤ Проведено исследование функционирования ТА судового малооборотного дизеля (исследовался импульс давления топлива, создаваемый после ТНВД) с использованием методологий многомерной статистики и СТРО. Получено статистическое описание классов различных технических состояний ТА (нарушений регулировок ТА).

➤ На основании эмпирического материала построены алгоритмы диагностирования нарушений в работе ТА, дающие в определенном смысле оптимальные решения и, кроме того, представляющие вероятностную оценку диагноза (по теореме Байеса).

Исследования проведены на материале, полученном автором при стендовых испытаниях судового малооборотного дизеля 6S50MC-C (MAN B&W), производимом по лицензии ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод».