

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ И АЛГОРИТМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ¹

А.А. Обозов, к.т.н.

ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод»

При разработке алгоритмов диагностирования неисправностей судового малооборотного дизеля становится целесообразным использование методов многомерной статистики и статистической теории распознавания образов (СТРО). Такой подход к алгоритмизации систем диагностики становится, по мнению автора, особенно актуальным в наши дни, когда со стороны вычислительных систем практически сняты какие-либо ограничения, касающиеся объемов и скорости обработки информации. На конкретных примерах показана процедура построения алгоритма распознавания неисправностей топливной аппаратуры судового малооборотного дизеля с применением данной методологии.

Статистическая теория распознавания образов (СТРО) — научное направление технической кибернетики, занимающееся разработкой формальных (математических) методов распознавания объектов статистической природы. При этом в качестве распознаваемых объектов могут быть объекты самой различной физической природы. При решении задач диагностики такими объектами являются классы технического состояния. Хотя ранее уже вводился ряд понятий СТРО в прикладном аспекте задач технической диагностики [1, 2], целесообразно напомнить о некоторых ключевых его понятиях, которые лежат в основе этой теории [3, 4] и используются при решении задач диагностики.

✓ Классы технического состояния в векторном пространстве (при геометрической интерпретации) структурных параметров объекта диагностирования занимают определенные компактные области.

✓ Классы технического состояния, определенные в векторном пространстве структурных параметров, отображаются на векторное пространство диагностических параметров, в котором также занимают определенные компактные области.

¹ В этом номере журнала приводится начало статьи. Окончание статьи будет помещено в одном из последующих выпусков журнала.



✓ Классы технического состояния имеют статистическую природу и формально их положение в пространствах структурных и диагностических параметров описывается законами распределения плотностей вероятности вектора x .

✓ Располагая описанием статистических распределений классов в пространстве диагностических признаков, можно на основе методов СТРО строить решающие правила классификации, которые в том или ином смысле при проведении процедуры диагностирования дают оптимальные результаты.

В основе большинства методов СТРО лежит теорема Байеса, определяющая апостериорную вероятность принадлежности классифицируемого объекта (или вектора наблюдения, свойственного объекту) к тому или иному классу ω_i (классы определены в виде статистических распределений в пространстве наблюдений; при решении задач диагностики определяется апостериорная вероятность принадлежности вектора диагностических признаков к классам технического состояния).

Формула Байеса для определения апостериорной вероятности имеет вид

$$P(\omega_i / x) = \frac{P(\omega_i) f(x / \omega_i)}{f(x)}, \quad (1)$$

где $P(\omega_i)$ — априорная вероятность принадлежности вектора наблюдения x к классу ω_i ; $f(x / \omega_i)$ — условная плотность распределения вероятностей вектора x , соответствующая классу ω_i ; $f(x)$ —

взвешенная плотность распределения вероятностей вектора x по всем классам, $f(x) = \sum P(\omega_i) f(x/\omega_i)$, k равно числу распознаваемых классов.

В общем случае статистические законы, которым подчиняются распределения вектора x , могут иметь сложное описание, однако, как будет показано далее при исследовании статистических свойств классов технического состояния, во многих случаях их описание возможно законом нормального распределения. Тогда условная плотность распределения вектора записывается в виде

$$f(x / \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}k} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{1}{2} (x - \mu)^t \Sigma^{-1} (x - \mu) \right], \quad (2)$$

где k — размерность вектора наблюдения x ; μ — вектор математических ожиданий распределений признаков класса ω_i ; Σ — матрица ковариаций признаков (компонентов вектора x) класса ω_i ; $|\Sigma|$ — определитель ковариационной матрицы признаков класса ω_i ; t — символ транспонирования матрицы (вектора); $^{-1}$ — символ обращения матрицы.

Таким образом, в этом случае для классификации объекта достаточно располагать:

- априорной вероятностью появления объекта (априорной вероятностью появления того или иного класса технического состояния);

- статистическим описанием плотности распределения каждого класса в пространстве наблюдений (в пространстве диагностических признаков): μ — вектор математических ожиданий распределений признаков класса ω_i , $i = 1, 2, \dots, N$; Σ — матрица ковариаций признаков (компонентов вектора x) класса ω_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Подставляя в (2) реализацию вектора x , можно вычислить значения плотностей $f(x/\omega_i)$. Не представляет труда по формуле (1) определить апостериорную вероятность принадлежности вектора наблюдения. Следует отметить, что процедура определения апостериорной вероятности принадлежности является ключевой, на основе которой строятся правила классификации СТРО: согласно оценке максимальной апостериорной вероятности принадлежности, на основе минимальной цены ошибочных решений, по пороговому уровню ошибки первого (второго или первого плюс второго) рода, на основе правила максимального правдоподобия, последовательные методы Вальда и пр.

В основу алгоритмизации процедуры диагностирования было положено так называемое правило максимального правдоподобия (более подробно изложено в [1, 2]), пороговое условие которого предполагает равными апостериорные

вероятности принадлежности (т. е. $P(\omega_i/x) = P(\omega_j/x)$, $i \neq j$, рассматривается задача дихотомии). На основе правила максимального правдоподобия можно построить дискриминантную функцию и решающее правило вида

$$x^t \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)^t \times \times \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) > (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_2). \quad (3)$$

Дискриминантная функция (левая часть неравенства) представляет собой линейную комбинацию компонент вектора наблюдения (вектора диагностических признаков). Следует отметить, что для упрощения математического аппарата было принято допущение о близости (равенстве) ковариационных матриц распознаваемых классов ω_1 и ω_2 и равенстве априорных вероятностей (т. е. $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$ и $P(\omega_1) = P(\omega_2) = 0,5$).

Сделаем еще ряд пояснений. В пространстве диагностических признаков существует только один эталонный класс нормального технического состояния объекта и множество классов, имеющих те или иные нарушения. Классы с нарушениями технического состояния могут непосредственно граничить с эталонным классом нормального состояния объекта. Назовем их граничными классами. Граничные классы состояний, в зависимости от их положения по отношению к классу нормального состояния объекта, подразделяются на оппозитные и смежные классы. К первым относятся такие классы, которые лежат по обе стороны от эталонного класса нормального состояния объекта; ко вторым — такие классы неисправностей, которые граничат друг с другом. К особому типу классов технического состояния относятся классы «удаленных» неисправностей, т. е. такие, которые не граничат с классом нормального состояния. Понятия эталонного класса нормального состояния объекта, граничных классов, оппозитных классов и классов удаленных неисправностей иллюстрирует рис. 1 (показан двумерный случай).

Так как особенностью судового дизеля является его способность работать на многих режимах (режимы могут лежать на винтовой, нагрузочной или комбинаторной характеристиках), то отсюда вытекает требование учета этого фактора при распознавании классов неисправностей. Это достигается, говоря формальным языком СТРО, объединением пространства диагностических признаков и пространства режимных параметров. Именно в таком объединенном пространстве должна определяться локализация распознаваемых классов технического состояния судового дизеля, и для такого пространства должен осуществляться поиск дискриминантных функций.

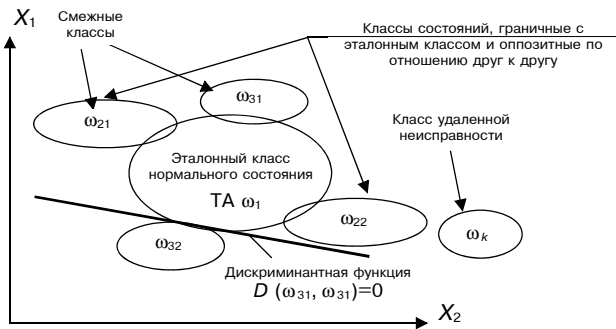


Рис. 1. Схематическое изображение распознаваемых классов в пространстве признаков (показана дискриминантная функция $D(\omega_1, \omega_{32}) = 0$, которая служит для распознавания классов ω_1 и ω_{32})

Однако можно упростить задачу и «привязаться» к конкретному режиму работы двигателя (например, к режиму 100 %-ной номинальной мощности). В этом случае выборочные статистики распознаваемых классов должны быть получены строго на назначенном режиме. В последующем при проведении процедуры распознавания объект диагностики (судовой дизель) опять должен выводиться строго на установленный режим (на котором ранее были получены статистики классов).

Покажем применение рассмотренной выше методологии, основанной на СТРО, на примере распознавания нарушений работы топливной аппаратуры (ТА) малооборотного дизеля. Непосредственно в качестве объекта, несущего информацию о нарушениях в ТА, выберем импульс давления, образующийся после топливного насоса высокого давления и имеющий параметры, рассмотренные в работе [5].

Исходный (полный) вектор диагностических признаков, описывающий процесс топливоподачи имеет вид:

$$x = \{ p_{f \text{ up}'}, \alpha p_{f \text{ up}'}, p_{f \text{ up}''}, \alpha p_{f \text{ up}''}, p_{f \text{ open}}, \alpha p_{f \text{ open}}, p_{f \text{ max}}, \alpha p_{f \text{ max}}, p_{f \text{ close}}, \alpha p_{f \text{ close}}, p_{f \text{ drop}}, \alpha p_{f \text{ drop}}, p_{f \text{ end}}, \alpha p_{f \text{ end}}, (dp_f/d\alpha)_{\text{max}} \}$$

т. е. он включает в себя описание семи характерных точек импульса топливоподачи и плюс параметр динамичности нарастания давления (рис. 2).

Поставим перед собой задачу научиться распознавать классы

наиболее характерных отклонений в регулировке ТА дизеля (десять классов, граничных с эталонным классом и являющихся оппозитными по отношению друг к другу $\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{62}$ (см. ниже)). Для распознавания классов из исходного вектора диагностических признаков x выберем информативное подмножество его компонент (по возможности минимальное), обеспечивающее распознавание заданных отклонений. Такой вновь образованный вектор обозначим x' .

Расознаваемые классы отклонений регулировок ТА	Диагностические признаки	Режимный фактор
1. Эталонный класс нормального состояния ТА ω_1	—	—
2. Слишком ранний впрыск топлива ω_{21} Слишком поздний впрыск топлива ω_{22}	$\alpha p_{f \text{ up}}''$ $\alpha p_{f \text{ open}}$	Index
3. Слишком низкое давление открытия форсунки ω_{31} Слишком высокое давление открытия форсунки ω_{32}	$p_{f \text{ open}}$	Index
4. Слишком низкое давление впрыска ω_{41} Слишком высокое давление впрыска ω_{42}	$p_{f \text{ open}}$ $p_{f \text{ max}}$	Index
5. Слишком большая продолжительность впрыска ω_{51} (или $\alpha p_{f \text{ dur}}$) Слишком малая продолжительность впрыска ω_{52}	$\alpha p_{f \text{ open}},$ $\alpha p_{f \text{ close}}$	Index
6. Слишком медленное нарастание давления ω_{61} Слишком быстрое нарастание давление ω_{62}	$(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$	Index

где $\alpha p_{f \text{ up}}''$ — угол начала резкого повышения давления; $\alpha p_{f \text{ open}}$ — угол начала топливоподачи; $p_{f \text{ open}}$ — давление, соответствующее моменту открытия форсунки; $p_{f \text{ max}}$ — максимальное давление импульса; Index — индекс рейки топливного насоса высокого давления (режимный фактор). Для распознавания классов ω_{51}, ω_{52} в вектор x' дополнительно введен признак $\alpha p_{f \text{ dur}}$, являющийся комплексом, образованным от «пер-

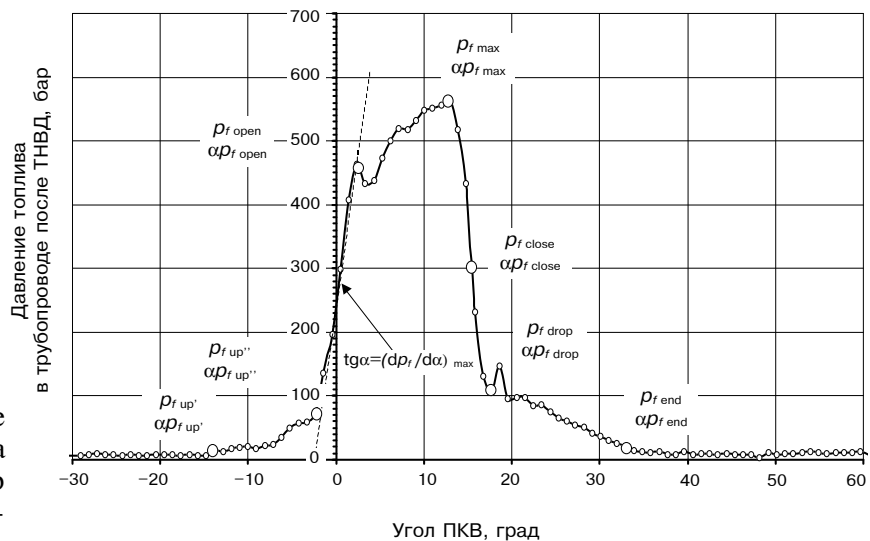


Рис. 2. Импульс давления топлива за ТНВД судового малооборотного дизеля 6S50MC-C (режим СМДМ — спецификационной максимальной мощности)

вичных» диагностических признаков; $\alpha p_{f \text{ dur}} = (\alpha p_{f \text{ stop}} - \alpha p_{f \text{ start}})$; $(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$ — скорость нарастания давления в момент, предшествующий открытию форсунки (равна тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей, например, методом наименьших квадратов участок импульса в диапазоне давлений 100–350 бар на фазе предварения впрыскивания топлива).

Следует отметить, что перечисленные выше нарушения в функционировании ТА дизеля могут предполагать дальнейшее углубление диагноза, т. е. раскрытие первопричин этих нарушений. Например, такая неисправность, как «слишком медленное нарастание давления» (класс ω_{61} , распознаваемый на основе диагностического параметра $(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$) может быть вызвана увеличенным износом плунжерной пары или нарушением герметичности всасывающего клапана топливного насоса или, что также возможно, — чрезмерно низкой вязкостью топлива. Однако в данной статье не ставится задача показать построение процедуры, обладающей максимальной глубиной диагноза.

Как уже отмечалось, для решения задачи диагностики в такой постановке необходимо получить статистическое описание классов на основе статистической выборки. Такая выборка данных была получена в процессе проведения стендовых испытаний судового малооборотного дизеля MAN B&W 6S50MC-C (номинальной мощностью 8340 кВт при 117 об/мин). Статистики

распознаваемых классов неисправностей были получены на нескольких режимах винтовой характеристики работы дизеля.

Итак, выбранный вектор диагностических признаков x' , являющийся подмножеством x , и служащий для распознавания обозначенной группы классов отклонений регулировок ТА имеет вид

$$x' = \{\alpha p_{f \text{ up}}, p_{f \text{ open}}, \alpha p_{f \text{ open}}, p_{f \text{ max}}, \alpha p_{f \text{ max}}, \alpha p_{f \text{ close}}, \alpha p_{f \text{ dur}}, (dp_f / d\alpha)_{\text{max}}\}.$$

После обработки данных стендовых испытаний дизеля для эталонного класса ω_1 получены:

➤ вектор математических ожиданий диагностических признаков:

$$\mu(x') = \begin{Bmatrix} \alpha p_{f \text{ up}} & p_{f \text{ open}} & \alpha p_{f \text{ open}} & p_{f \text{ max}} & \alpha p_{f \text{ max}} \\ -5,684 & 435,2 & -1,402 & 566,7 & 11,71 \\ \alpha p_{f \text{ close}} & \alpha p_{f \text{ dur}} & (dp_f / d\alpha)_{\text{max}} \\ 15,84 & 17,24 & 78,27 \end{Bmatrix};$$

➤ вектор стандартных отклонений диагностических признаков:

$$S(x') = \begin{Bmatrix} \alpha p_{f \text{ up}} & p_{f \text{ open}} & \alpha p_{f \text{ open}} & p_{f \text{ max}} & \alpha p_{f \text{ max}} \\ 0,3412 & 12,92 & 0,2446 & 6,616 & 1,606 \\ \alpha p_{f \text{ close}} & \alpha p_{f \text{ dur}} & (dp_f / d\alpha)_{\text{max}} \\ 0,966 & 2,257 & 5,01 \end{Bmatrix};$$

➤ матрица коэффициентов корреляции диагностических признаков $R(x')$ (табл. 1);

➤ матрица ковариаций диагностических признаков $\Sigma(x')$ (табл. 2).

Таблица 1

Матрица коэффициентов корреляции диагностических признаков $R(x')$

	$\alpha p_{f \text{ up}}$	$p_{f \text{ open}}$	$\alpha p_{f \text{ open}}$	$p_{f \text{ max}}$	$\alpha p_{f \text{ max}}$	$\alpha p_{f \text{ close}}$	$\alpha p_{f \text{ dur}}$	$(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$
$\alpha p_{f \text{ up}}$	1	-0,029	0,323	-0,047	-0,521	-0,811	-0,813	0,917
$p_{f \text{ open}}$	—	1	0,841	-0,207	-0,421	-0,088	-0,274	-0,131
$\alpha p_{f \text{ open}}$	—	—	1	-0,178	0,1604	-0,277	-0,483	0,083
$p_{f \text{ max}}$	—	—	—	1	0,125	-0,069	-0,021	0,005
$\alpha p_{f \text{ max}}$	—	—	—	—	1	0,515	0,432	-0,553
$\alpha p_{f \text{ close}}$	—	—	—	—	—	1	0,975	-0,889
$\alpha p_{f \text{ dur}}$	—	—	—	—	—	—	1	-0,829
$(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$	—	—	—	—	—	—	—	1

Таблица 2

Матрица ковариаций диагностических признаков $\Sigma(x')$

	$\alpha p_{f \text{ up}}$	$p_{f \text{ open}}$	$\alpha p_{f \text{ open}}$	$p_{f \text{ max}}$	$\alpha p_{f \text{ max}}$	$\alpha p_{f \text{ close}}$	$\alpha p_{f \text{ dur}}$	$(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$
$\alpha p_{f \text{ up}}$	0,1164	-0,1311	0,027	-0,1071	-0,2860	-0,2674	-0,2944	1,559
$p_{f \text{ open}}$	—	167,0	2,661	-17,75	8,759	-1,106	-3,766	-8,450
$\alpha p_{f \text{ open}}$	—	—	0,0598	-0,2881	0,0630	-0,065	-0,1257	0,1021
$p_{f \text{ max}}$	—	—	—	43,77	1,336	-0,4416	-0,1534	0,1828
$\alpha p_{f \text{ max}}$	—	—	—	—	2,580	0,7993	0,7362	-4,426
$\alpha p_{f \text{ close}}$	—	—	—	—	—	0,9333	0,9989	-4,278
$\alpha p_{f \text{ dur}}$	—	—	—	—	—	—	1,124	-4,380
$(dp_f / d\alpha)_{\text{max}}$	—	—	—	—	—	—	—	25,11

Примечание. Вектор дисперсий диагностических признаков образует главную диагональ ковариационной матрицы. Статистики приведены для режима работы дизеля 100 % СМДМ.

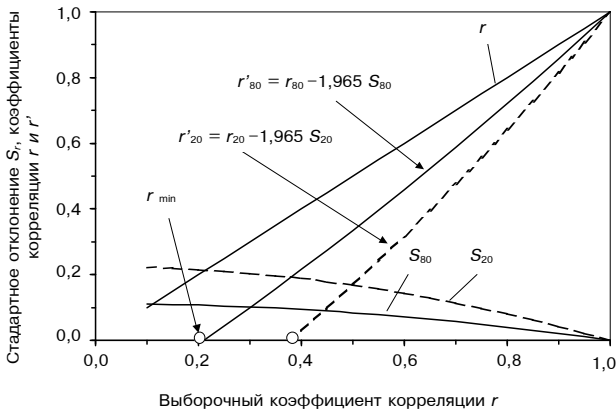


Рис. 3. К пояснению вопроса определения значимости выборочного коэффициента корреляции

При проведении испытаний дизеля на каждом режиме объем выборки составлял 80 последовательных циклов подачи топлива. Пороговое значение значимости для коэффициентов корреляции r для выборки такой размерности составляет 0,22 (гипотеза $r = 0$ отклоняется, если $|r| > 0,22$; мера надежности $1 - \alpha = 0,95$). Пороговое значение для коэффициента корреляции искалось исходя из предпосылки, что для выборок достаточно большого объема величина r распределена асимптотически нормально по закону $N(x, r, \sigma_r)$. Стандартное отклонение для r вычисляется по формуле [6]: $\sigma_r \approx S_r = (1 - r^2)/\sqrt{n}$.

Следует отметить, что стандартное отклонение для величины r является функцией двух аргументов — объема выборки и величины выборочного коэффициента корреляции. Искомый пороговый уровень r_{\min} также зависит от объема выборки, и, кроме того, зависит от степени достоверности ($1 - \alpha$), выбираемой для проверки гипотезы $r = 0$. На рис. 3 дана графическая иллюстрация поиска порогового уровня r_{\min} для выборок размерностью 80 (для примера — размерностью 20). Как видно, с уменьшением размера выборки уровень r_{\min} увеличивается (для $n = 20$ $r_{\min} = 0,38$).

Анализ матрицы $R(x')$ показывает, что между компонентами x' в основном наблюдается «незначимая» корреляция (коэффициенты таких компонент выделены курсивом). Однако отдельные компоненты достаточно сильно коррелированы, и их выявленная взаимосвязь объяснима с физической точки зрения (коэффициенты таких компонент выделены жирным шрифтом).

Из теории СТРО известно, что наличием корреляционных связей между признаками не следует пренебрегать, так как учет их позволяет строить более эффективные алгоритмы распознавания.

Далее рассмотрим построение алгоритмов распознавания заданных выше классов характерных отклонений в регулировки ТА дизеля на основе методологии СТРО.

(Продолжение в следующем номере)

Литература

1. Левин М.И., Обозов А.А. Применение методов статистической теории распознавания образов при синтезе алгоритмов диагностирования малооборотных дизелей // Двигателестроение. — 1986. — № 5. — С. 15–18, 24.
2. Левин М.И., Обозов А.А. Автоматическая безразборная диагностика дизелей. Информационные аспекты. Применение метода «обучения» при решении задач диагностирования судового малооборотного дизеля // Двигателестроение. — 1986. — № 9. — С. 41–46.
3. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 500 с.
4. Биргер И.А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение. 1978. — 240 с.
5. Обозов А.А. Эталонные характеристики процесса топливоподачи судовых малооборотных дизелей производства БМЗ для использования в системах технического диагностирования. Статистический подход // Судостроение. — 2007. — № 3. — С. 32–36.
6. Бронштейн Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — 13-е изд., исправленное. — М.: Наука, 1986. — 544 с.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ
Ориентировочные тарифы на 1 полугодие 2008 г.
Постоянным клиентам скидки до 10 %

Первая страница обложки	Полноцветная	22000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	18000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	20000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	18000 руб.
	Черно-белая	16000 руб.