

щей процедурой. Разработанные математические модели позволяют трансформировать общее число частиц продуктов износа  $j$ -го типа  $N^j(t)$  в массовую концентрацию  $C^j$   $j$ -ого химического элемента в работающем моторном масле. При этом, как показано в работах [3, 4], для расчета этих величин необходимо учитывать фрактальный характер размерной параметризации для частиц изнашивания. Фрактальная формализация распространяется на форму частиц износа и их размерное распределение. В общем случае для всей совокупности частиц износа выражение имеет вид [3, 4]:

$$n_i \approx dN/d\lambda \approx D_p / \lambda^{D_p+1}$$

где  $N$  – общее число частиц износа;  $D_p$  – фрактальная размерность диаметрального распределения частиц износа;  $\lambda$  – приведенный диаметр частицы износа.

Численные решения самосогласованная система кинетических уравнений (1) на  $N^j(t)$ , описывающих динамику общего числа продуктов износа  $j$ -го типа позволяют получить научно-обоснованные нормы порогового значения массовой концентрации продуктов износа дизельных двигателей, с учетом особенностей их систем очистки, конструкции, уровня форсировки. Тем самым достигается высокая устойчивость достоверности диагностирования технического состояния дизельных двигателей от возмущающих эксплуатационных факторов.

#### Литература:

1. Надежкин А.В., Безвербный А.В. Имитационная диагностическая модель кинетики накопления в системе смазки судового дизеля частиц продуктов износа // Транспортное дело, 2006.– №7.– С.100-105
2. Кича Г.П., А.В. Надежкин, Б.Н. Перминов. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивания основных деталей ДВС // Транспортное дело, 2004. – № 2. – С. 51–53.
3. Дроздов Ю.Н. Нелинейная динамика изнашивания и частицы износа // Вестник машиностроения, 2003.– №10.– С. 34-40
4. Ким В.А., Кургачев Р.В. Фрактальная параметризация процесса изнашивания // Трение и износ, 2002.– Т.23, №5.– С. 471-476.

### МЕТОДОЛОГИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ (СТРО) ПРИ АЛГОРИТМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЕЙ

**А.А.Обозов,** (ЗАО УК «Брянский машиностроительный завод», БГТУ)

Ранее уже вводился ряд понятий СТРО в прикладном аспекте задач технической диагностики [1,2], однако автор считает целесообразным кратко напомнить о некоторых ключевых понятиях СТРО, которые лежат в основе этой теории [3, 4] и могут быть успешно использованы при решении задач технической диагностики дизелей:

- Классы технического состояния *в векторном пространстве структурных параметров* объекта диагностирования (при геометрической интерпретации) 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.

- Классы технического состояния имеют статистическую природу и формально их положение в пространствах структурных и диагностических параметров описывается законами распределения плотностей вероятности векторов, соответственно, структурных и диагностических параметров.

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

В основе большинства методов СТРО лежит *Теорема Байеса*, определяющая апостериорную (после опытную) вероятность принадлежности классифицируемого объекта (или вектора наблюдения, свойственного объекту) к тому или иному классу  $\omega_i$  (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  $\omega_i$ ;  $f(x/\omega_i)$  – условная плотность распределения вероятностей вектора  $x$ , соответствующая классу  $\omega_i$ ;  $f(x)$  – взвешенная плотность распределения вероятностей вектора  $x$  по всем классам ( $f(x) = \sum_{i=1}^N P(\omega_i) f(x / \omega_i)$ ,  $N$  – равно числу распознаваемых классов).

В общем случае статистические законы, которым подчиняются распределения вектора  $x$ , могут иметь сложное описание, однако при исследовании статистических свойств классов технического состояния во многих случаях их описание подчиняется закону нормального распределения. Тогда описание условной плотности распределения вектора  $x$  можно представить в виде:

$$f(x / \omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}k} |\Sigma_i|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (x - \mu_i)' \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i) \right] \quad (2)$$

где  $k$  – размерность вектора наблюдения  $x$ ;  $\mu_i$  – вектор математических ожиданий распределений признаков класса  $\omega_i$ ;  $\Sigma_i$  – матрица ковариаций признаков (компонентов вектора  $x$ ) класса  $\omega_i$ ;  $|\Sigma_i|$  – определитель ковариационной матрицы признаков класса  $\omega_i$ ;  $t$  – символ транспонирования матрицы (вектора);  $^{-1}$  – символ обращения матрицы.

Таким образом, для классификации объекта достаточно располагать:

- априорной (до опытной) 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), т.е. –  $\mu$  – вектором математических ожиданий распределений признаков классов  $\omega_i$  ( $i=1,2,\dots, N$ ) и  $\Sigma$  – матрицей ковариаций признаков (компонентов вектора  $x$ ) классов  $\omega_i$ , ( $i=1,2,\dots, N$ ).

Подставляя в (2) реализацию вектора  $x$  можно вычислить значения плотностей  $f(x/\omega_i)$  и далее не представляет труда по формуле Байеса (1) определить апостериорную вероятность принадлежности вектора наблюдения. Следует особо от-

метить, что процедура определения апостериорной вероятности принадлежности является ключевой, на основе которой строится целый ряд правил классификации СТРО. В основу алгоритмизации процедуры диагностирования дизельного двигателя автором было выбрано, так называемое, *правило максимального правдоподобия* (более подробное описание правила можно найти 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 строится *дискриминантная функция* вида

$$x' \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)' \sum^{-1} (\mu_1 - \mu_2) > (<) 0 \Rightarrow x \in \omega_1 (x \in \omega_2), \quad (3)$$

представляющая собой линейную комбинацию компонент вектора наблюдения (вектора диагностических признаков). Следует отметить, что автором для упрощения математического аппарата было принято допущение о близости (равенстве) ковариационных матриц распознаваемых классов  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (т.е.  $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$ ).

В пространстве диагностических признаков (или объединенном пространстве, о котором шла речь выше) 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 такие классы – *граничными* классами. Граничные классы состояний, в зависимости от их положения по отношению к классу нормального состояния объекта можно подразделить на *оппозитные*, а по отношению друг к другу - на *смежные* классы. К оппозитным классам, относятся такие классы, которые лежат по обе стороны от эталонного класса нормального состояния объекта. К смежным классам относятся такие классы неисправностей, которые граничат друг с другом. К особому типу классов технического состояния относятся классы *удалённых* неисправностей, т.е. такие классы, 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).

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:

$$x = \{ P_{f up}, \alpha P_{f up}, P_{f up}''', \alpha P_{f up}''', P_{f open}, \alpha P_{f start}, P_{f max}, \alpha P_{f max}, P_{f close}, \alpha P_{f stop}, P_{f drop}, \alpha P_{f drop}, P_{f end}, \alpha P_{f end}, dP_f / d\alpha \},$$

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

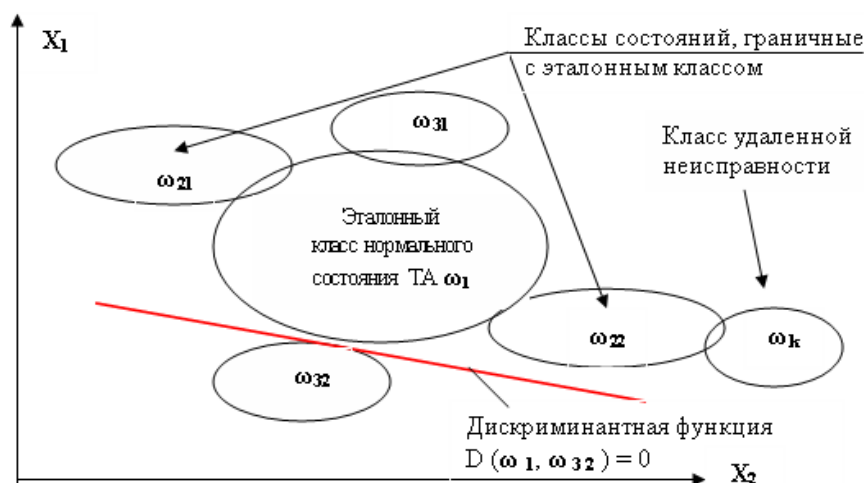


Рис. 1. Схематическое изображение распознаваемых классов в пространстве признаков (в качестве примера показана дискриминантная функция  $D(\omega_1, \omega_{32})=0$ , которая служит для распознавания классов  $\omega_1$  и  $\omega_{32}$ )

Поставим перед собой задачу научиться распознавать классы наиболее характерных отклонений в регулировке ТА дизеля (десять классов  $\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{62}$ , граничных с эталонным классом и являющихся оппозитными по отношению друг к другу /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  $x'$ .

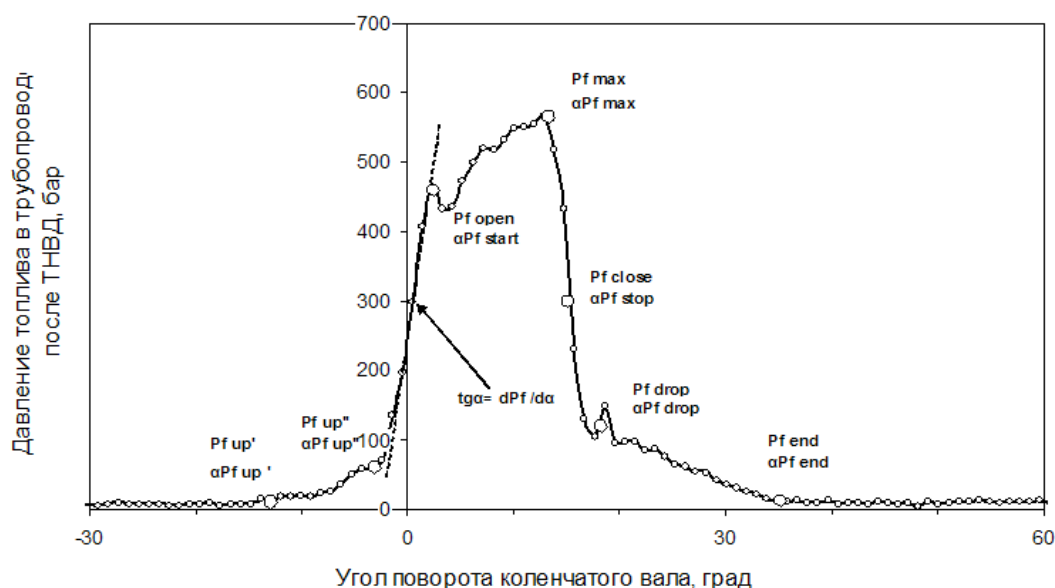


Рис.2. Импульс давления топлива за ТНВД судового малооборотного дизеля 6S50MC-C, (режим СМДМ- спецификационной максимальной длительной мощности)

|   | Расознаваемые классы отклонений<br>состояния (регулировок) ТА                                                       | Диагностические<br>технические при-<br>знаки (вект. $x'$ ) | Режимный<br>фактор |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1 | Эталонный класс нормального состояния ТА $\omega_1$                                                                 |                                                            |                    |
| 2 | Слишком ранний впрыск топлива $\omega_{21}$<br>Слишком поздний впрыск топлива $\omega_{22}$                         | $\{aP_f \text{ up}', aP_f \text{ start}\}$                 | $\{\text{Index}\}$ |
| 3 | Слишком высокое давление открытия форсунки $\omega_{31}$<br>Слишком низкое давление открытия форсунки $\omega_{32}$ | $\{P_f \text{ open}\}$                                     | $\{\text{Index}\}$ |
| 4 | Слишком низкое давление впрыска $\omega_{41}$<br>Слишком высокое давление впрыска $\omega_{42}$                     | $\{P_f \text{ open}, P_f \text{ max}\}$                    | $\{\text{Index}\}$ |

|   |                                                                                                                  |                                |                    |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 5 | Слишком большая продолжительность впрыска $\omega_{51}$<br>Слишком малая продолжительность впрыска $\omega_{52}$ | $\{\alpha P_{f \text{ dur}}\}$ | $\{\text{Index}\}$ |
| 6 | Слишком быстрое нарастание давления $\omega_{61}$<br>Слишком медленное нарастание давление $\omega_{62}$         | $\{dP_f/da\}$                  | $\{\text{Index}\}$ |

где:  $\alpha P_{f \text{ up}}$  - угол начала быстрого нарастания давления;  $\alpha P_{f \text{ start}}$  - угол начала впрыскивания топлива;  $P_{f \text{ open}}$  - давление, соответствующее моменту открытия форсунки;  $P_{f \text{ max}}$  – максимальное давление импульса,  $\alpha P_{f \text{ dur}}$  – продолжительность фазы впрыскивания; Для распознавания классов  $\omega_{51}$ ,  $\omega_{52}$ ,  $\omega_{61}$  и  $\omega_{62}$  в вектор  $x'$  введен признаки  $\alpha P_{f \text{ dur}}$ , являющийся комплексом, образованным от «первичных» диагностических признаков;  $\alpha P_{f \text{ dur}} = (\alpha P_{f \text{ stop}} - \alpha P_{f \text{ start}})$ ;  $dP_f/da$  – скорость нарастания давления в момент, предшествующий открытию форсунки (равна тангенсу угла наклона прямой, аппроксимирующей по МНК участок импульса в диапазоне давлений 100 – 350 бар на фазе предварения впрыскивания топлива); **Index** – индекс рейки топливного насоса высокого давления (режимный фактор)

Как уже отмечалось ранее, 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 производства ЗАО УК «БМЗ». Статистики распознаваемых классов неисправностей были получены на нескольких режимах винтовой характеристики работы дизеля.

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

$$x' = \{ \alpha P_{f \text{ up}}, P_{f \text{ open}}, \alpha P_{f \text{ start}}, P_{f \text{ max}}, \alpha P_{f \text{ max}}, \alpha P_{f \text{ stop}}, \alpha P_{f \text{ dur}}, dP_f/da \}.$$

После обработки данных стендовых испытаний были получены: вектор математических ожиданий диагностических признаков  $\mu(x')$ , матрица коэффициентов корреляции диагностических признаков  $R(x')$  и матрица ковариаций диагностических признаков  $D(x')$

Анализ матрицы  $R(x')$  показал, что между некоторыми компонентами  $x'$ , наблюдается «значимая» корреляция. Учет корреляционных связей между диагностическими признаками (компонентами  $x'$ ) позволяет строить более эффективные алгоритмы распознавания.

Полученные в соответствии с (3) дискриминантные функции были взяты автором в качестве основы для алгоритма распознавания отклонений технического состояния ТА судового дизеля (распознавания классов  $\omega_{21}$ ,  $\omega_{22}$ , ...,  $\omega_{62}$ ). Алгоритм диагностирования отклонений в работе ТА судового двигателя на основе применения методологии СТРО оказался достаточно эффективным.

### Литература:

1. М.И.Левин, А.А.Обозов. Применение методов статистической теории распознавания образов при синтезе алгоритмов диагностирования малооборотных дизелей // Двигателестроение. 1986. № 5. С.15-18, 24
2. М.И.Левин, А.А.Обозов. Автоматическая безразборная диагностика дизелей. Информационные аспекты. Применение метода «обучения» при решении задач диагностирования судового малооборотного дизеля // Двигателестроение. 1986. №9. С. 41-46
- 3.Т.Андерон. Введение в многомерный статистический анализ. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва. 1963. 500с.

4. И.А.Биргер. Техническая диагностика.// М.: «Машиностроение». 1978. - 240 с.

5. А.А.Обозов. Алгоритм нахождения характерных точек на характеристике топливоподачи судового дизеля // Двигателестроение. 2006. №4(226). С.35-39.

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СЭУ**

**Покусаев М.Н., Юницкий В.А.**

(ФГОУ ВПО «Астраханский Государственный Технический Университет»)

Современное измерительное оборудование, это прежде всего точные, быстро устанавливаемые датчики и не дорогие измерительные системы, состоящие из минимум соединяемых блоков, позволяющие упростить техническое обслуживание контролируемого объекта. На судах развертывание такой системы, с минимальным количеством быстро устанавливаемых блоков, при минимальной стоимости, есть именно то, что требуется в данный момент российскому флоту. Основой всех измерительных систем, так называемым корнем, является измерительный преобразователь или проще говоря датчик. Именно с него начинают поступать данные измерения, от части именно от него зависит эффективность работы всей измерительной системы в целом. В море, на судах, необходимость в надежных датчиках, в надежности передачи данных с них вот от чего следует отталкиваться при проектировании измерительных систем в экстремальных условиях.

Опыт торсиографирования большого числа судов с использованием современного оборудования в испытательном центре «Marine Technology Service» Астраханского Государственного Технического Университета показал в необходимости применение именно беспроводных датчиков для применения в измерительных системах на судах, из за простоты их установки и обслуживания.

В следствии этого была поставлена цель в разработки беспроводного датчика для системы контроля крутильных колебаний на судах, превосходящего по своим характеристикам обычные датчики и тем самым снизить затраты на саму измерительную систему в целом (рис.1).

Сейчас на рынке измерительного оборудования существует ряд беспроводных датчиков, но датчики просто не адаптированы к объекту исследования и к самой среде измерения в целом. Тем более нет беспроводных датчиков устанавливаемых непосредственно на сам объект исследования – на валопровод ДВС.

Основой датчика является микроконтроллер, содержащий в себе функции Bluetooth интерфейса, инструментальный усилитель для тензомоста, радиомодуль и антенный усилитель. Помимо этого датчик содержит в себе литиево-ионную батарею. Деформация снимаемая с вала, тензомостом преобразуется в электрический сигнал, который усиливается дифференциальным усилителем 1 и нормируется усилителем 2 до нужного значения, фильтруется фильтром 3 и передается на АЦП микроконтроллера, кодируется, составляется нужный протокол передачи. Далее цифровой сигнал поступает в радиомодуль, после усиливается усилителем 4 и передается на компьютер.

Для данного вида беспроводного датчика был выбран Bluetooth интерфейс, как готовая сеть для передачи данных измерения. Спецификация Bluetooth описывает пакетный способ передачи информации с временным мультиплексированием [2]. Радиообмен происходит в полосе частот 2400-2483,5 МГц ISM-диапазона.