

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

СПбГПУ

С
А
Н
К
Т
-
П
Е
Т
Е
Р
Б
У
Р
Г



3-2(154) 2012

Наука и образование

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Одно из важнейших направлений совершенствования энергетических установок (ЭУ) на органическом топливе в начале XXI века — это повышение топливной эффективности, в том числе за счет большей напряженности рабочего процесса.

Значительная напряженность процессов генерации механической и тепловой энергии в установках характеризуется высокими частотами вращения роторов турбомашин, а также большими давлениями и температурами рабочего тела. Современные и вновь создаваемые энергетические установки открытого цикла способны генерировать в одном условном кубическом метре объема конструкции примерно

3–4 МВт мощности при температурах рабочего тела 1600 К и давлениях до 3 МПа и выше.

Как следствие этого, в элементах конструкции современных ЭУ наблюдаются большие напряжения, вызванные механическими и тепловыми нагрузками. Так, например, металл рабочих лопаток современных газовых турбин может работать до 100 тыс. часов при напряжениях примерно 100 МПа и температурах свыше 900 °С. Эти показатели всего несколько десятилетий тому назад конструкторам казались нереальными, так как подобные напряжения соответствовали пределу длительной прочности ($\tau = 100$ ч) существовавших тогда жаропрочных материалов при температурах металла не более 750 °С.

Понятно, что использование новых жаропрочных материалов и современных технологий в энергетических объектах привело к резкому повышению их стоимости. Начальная удельная стоимость вновь создаваемых стационарных энергетических объектов может достигать 100–300 долл./кВт.

Высокая стоимость создаваемых ЭУ и значительный риск тяжелых последствий от аварий потребовали разработки систем раннего обнаружения и предотвращения отказов оборудования. Актуальным становится создание интеллектуальных систем технического диагностирования, позволяющих, как минимум, решать задачу текущего контроля и распознавания технического состояния (ТС) ЭУ.

Известно, что системы автоматического управления (САУ) существующих энергетических установок на органическом топливе одновременно фиксируют до 50 и более параметров рабочего процесса. Для снижения информационной нагрузки на операторов в САУ применяется компьютерная обработка сигналов от датчиков, выделение наиболее информативных параметров и представление оператору сжатой информации, на основе которой можно принимать соответствующее решение.

Несмотря на постоянное совершенствование САУ, диагностирование ЭУ и оценка их технического состояния на основе анализа зарегистрированных параметров чаще всего возлагается на оператора. Опыт эксплуатации показал, что специалист может одновременно контролировать и качественно анализировать показания только нескольких (обычно не более 4–6) приборов и по результатам анализа принимать правильное решение. Понятно, что качество такого решения во многом зависит от квалификации оператора. Повысить достоверность получаемой информации о состоянии энергетических объектов призвана интеллектуальная диагностика.

Перспективные интеллектуальные системы диагностирования должны обязательно содержать процедуры распознавания ТС объектов и вырабатывать рекомендации по обеспечению их работоспособности (рис. 1).

Для распознавания состояния объектов наиболее эффективным считают использование нейросетевых технологий [7], но положительных результатов также можно добиться с помощью классических методов статистического анализа (МСА) многомерной эксплуатационной информации (этапы 1–4 на рис. 1) [1–3].

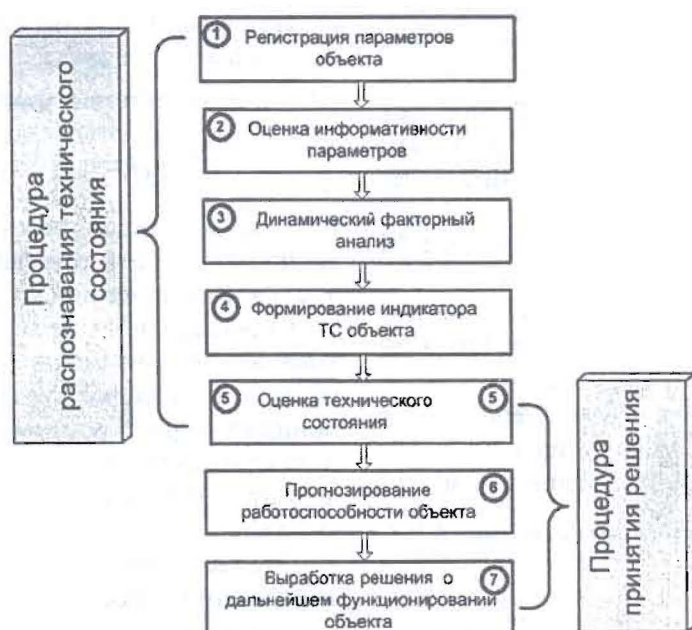


Рис. 1. Структура процедур интеллектуального диагностирования технических объектов

Современные статистические методы позволяют не только одновременно обрабатывать всю совокупность регистрируемых параметров, но и выявлять отклонения рабочего процесса ЭУ от нормы на ранней стадии возникновения отказов. Применение таких методов, даже при существующих САУ, может повысить качество процесса управления и снизить риск отказов, связанных с недостатком информации и ошибками операторов.

Для демонстрации возможностей МСА при решении задачи интеллектуального диагностирования можно рассмотреть множество зарегистрированных параметров газотурбинного двигателя четвертого поколения ГТД 4РМ, используемого в газоперекачивающих агрегатах системы транспортировки газа по магистральным трубопроводам РФ (рис. 2).

В столбцах (см. рис. 2) матрицы находятся зарегистрированные параметры (выделено 13 из 49 параметров), которые приведены к стандартным условиям атмосферы в соответствии с общепринятой методикой. В строках размещены значения параметров из вахтенного журнала, зафиксированные с интервалом в 2 часа (360 записей).

Можно предположить, что первые N_0 архивных записей в журнале всегда соответствуют заведомо работоспособному состоянию объекта. Эти параметры могут быть зафиксированы, например, в период сдачи объекта заказчику или в период государственных испытаний. Этот блок параметров можно считать базовым (нулевым) информационным уровнем, который следует взять за основу при разработке алгоритма распознавания работоспособного состояния ГТД в процессе дальнейшей эксплуатации.

Для создания алгоритма распознавания технического состояния матрица базового блока параметров X размером $N_0 \times p$, например при $p = 13$ и $N_0 = 20$, преобразуется к безразмерному виду Y_{ij} и одновременно масштабируется в диапазоне $\pm 3\sigma$, где σ — стандартное отклонение параметров относительно математического ожидания $\bar{X}^{(j)}$:

$$Y_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \bar{X}^{(j)}}{\sigma_{X^{(j)}}}, i = \overline{1, N_0}; j = \overline{1, p}.$$

Произведение транспонированной матрицы Y на ее исходное значение дает ковариационную матрицу R размером $p \times p$:

$$R = \frac{Y^T Y}{N}. \quad (1)$$

Умножением матрицы собственных векторов на диагональную матрицу собственных чисел получаем матрицу ортогонального преобразования A размером $p \times p$:

$$A = U \Lambda, \quad (2)$$

где U — матрица собственных векторов ковариационной матрицы $R(1)$; Λ — диагональная матрица собственных чисел, содержащая на главной диагонали собственные числа матрицы R в порядке их убывания.

При умножении матрицы исходных параметров Y на матрицу A формируется ортогональный базис главных компонент — матрица F размером $N_0 \times p$

$$F = YA, \quad (3)$$

обладающий важными для распознавания технического состояния объекта свойствами [1, 4].

Одним из этих свойств является равенство обобщенной дисперсии совокупности результатов наблюдений (параметров объекта) и обобщенной дисперсии главных компонент [4]:

$$|R_{[p]}| = |D[\hat{F}]|. \quad (4)$$

При этом дисперсии главных компонент расположены по главной диагонали матрицы $|D[\hat{F}]|$ в соответствии с условием

$$\sigma^2[\hat{f}_1] \geq \sigma^2[\hat{f}_2] \geq \dots \geq \sigma^2[\hat{f}_p] \quad (5)$$

и дисперсия каждой главной компоненты численно равна соответствующему собственному числу ковариационной матрицы.

Собственные числа хорошо обусловленной ковариационной матрицы R обычно быстро убывают по абсолютной величине (известный принцип «горной осыпи»), и это означает, что в нескольких первых главных компонентах содержится большая часть обобщенной дисперсии (4).

Это дает основание использовать для анализа рабочего процесса только несколько первых главных компонент $F^{(j)}$ (обычно $j \leq 2-3$). Более точный отбор количества достаточных для дальнейшего анализа числа первых главных компонент выполняется по критерию β [4]:

$$\beta_j = \frac{\lambda_j}{Sp(R_{[p]})} = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^p \lambda_j},$$

где λ_j — j -е собственное число ковариационной матрицы. Чем больше β_j , тем значимее соответствующая главная компонента.

Факторные нагрузки параметров на главные компоненты (элементы столбцов матрицы A) свидетельствуют о степени влияния каждого отдельного параметра на объясненную дисперсию конкретной главной компоненты. Это позволяет выполнить селекцию зарегистрированных параметров объекта и использовать для дальнейшего анализа только те параметры, факторные нагрузки которых больше заранее определенного уровня $a_{кр}$ (см. этап 2 на рис. 1). Этот уровень назначает разработчик процедуры контроля технического состояния объекта на основе общих положений метода главных компонент (МГК). Обычно рекомендуется принимать нижний уровень факторных нагрузок на первую главную компоненту не менее 0,70, т. е. при отборе контролируемых параметров проверяют условие $a_{i1} \geq a_{кр} = 0,70$ [2–5].

Таким образом, если при анализе матрицы параметров Y размером $N_0 \times p$, принятой за базовую, рассчитанные факторные нагрузки на первую главную компоненту меньше $a_{кр}$, то в дальнейшем эти параметры не учитываются в диагностической модели.

Для первой главной компоненты можно вычислить относительную долю объясненной дисперсии, формируемой факторными нагрузками выделенной группы параметров объекта:

$$\overline{D}^{(1)} = \sigma^2 \left[F^{(1)} \right] = \frac{\sum_{i=1}^p a_{i,1}^2}{p}, \quad (6)$$

где p — количество выделенных для анализа параметров объекта*.

Процедура текущей оценки (мониторинг) технического состояния объекта (в данном случае ГТД 4РМ) на основе метода главных компонент содержит следующие этапы:

выделение базового массива параметров (матрица X_0) при соответствующем обосновании границ массива N_0, p ;

* Верхний индекс в выражении относительной дисперсии (6) в дальнейшем опускаем.

стандартизация параметров — создание матрицы Y_0 ;

получение ковариационной матрицы R_0 по формуле (1);

вычисление λ_j — собственных чисел этой ковариационной матрицы, создание диагональной матрицы собственных чисел Λ и затем матрицы собственных векторов U [2, 3];

вычисление ортогональной матрицы факторных нагрузок A_0 по зависимости (2), анализ которой позволит определить количество главных компонент, применяемых для параметрического диагностирования (по критерию β_j);

выделение из общего массива рассматриваемых признаков (параметров) только тех параметров, факторные нагрузки которых на первую главную компоненту удовлетворяют условию $a_{i1} \geq a_{кр}$;

вычисление $\overline{D}_0$ — относительной объясненной дисперсии факторных нагрузок (6) на первую главную компоненту для выделенной группы параметров, где нижний индекс означает дисперсию для базового (нулевого) массива данной группы параметров [4, 6].

На этом заканчивается формирование процедуры мониторинга ТС двигателя.

Следующим шагом является сам процесс оценки ТС, который заключается в последовательном вычислении матрицы факторных нагрузок A для очередного массива параметров Y_i , полученного в результате смещения границ исходного массива фиксированного размера на определенный шаг Δt (этапы 3, 4 на рис. 1). Следовательно, каждый следующий исследуемый массив параметров должен иметь матрицу Y_i со столбцами с $(1 + \Delta t)$ -го по $(N_0 + \Delta t)$ -й и строками с 1-й по p -ю исходного массива.

Схема формирования нового массива анализируемых параметров при $\Delta t = 2$ показана на рис. 2. Размер шага сканирования исходной матрицы параметров определяет пользователь, а количество шагов зависит от размера (числа строк) анализируемой матрицы параметров. При уменьшении шага Δt увеличивается время анализа и повышается его качество, а при увеличении снижается точность локализации состояния ТС.

По результатам сканирования всего массива зафиксированных и предварительно выделенных для анализа параметров вычисляются от-

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	$n_{тк}$	$n_{ст\ расч}$	N, Mw	t_{41}	t_2	p_2	$\Delta t_{по тк}$	$\Delta t_{30 тк}$	$\Delta t_{оп ст}$	
1	14051	9960	3,60	535	337,0	1,30	13,6	24,9	29,9	$\Delta t = 2$
2	13985	9917	3,60	543	347,0	1,02	14,1	25,4	30,7	
3	14073	10010	3,60	535	340,0	1,03	13,7	26,1	30,4	
4	14082	10007	3,60	336	530,0	1,04	13,6	25,4	30,6	
5	14093	10005	3,60	528	335,0	1,04	13,5	24,3	30,5	
6	14085	9995	3,60	524	331,0	1,04	13,5	25,4	30,2	
7	14100	9997	3,60	526	334,0	1,05	13,6	25,4	30,3	
8	14063	9995	3,60	534	339,0	1,05	14,2	24,5	31,7	
9	14071	9936	3,60	534	343,9	1,03	14,1	25,6	30,9	
10	14017	9885	3,60	540	344,5	1,03	14,6	25,0	30,8	
11	13997	9860	3,60	542	345,6	1,02	13,8	23,9	30,1	
12	13985	9860	3,60	543	347,3	1,02	13,8	23,9	30,2	
13	13959	9897	3,60	545	348,1	1,02	14,8	25,3	31,3	
14	14052	9960	3,60	545	348,1	1,02	14,7	25,2	36,2	
15	14050	9970	3,50	544	349,0	1,02	14,7	25,0	31,6	
16	14093	10000	3,50	532	341,0	1,02	13,3	24,0	30,5	
17	14090	10015	3,50	535	344,0	1,05	13,8	25,2	31,1	
18	14097	10000	3,50	533	342,0	1,05	13,8	24,6	31,1	
19	14121	10000	3,50	529	338,0	1,05	13,3	24,3	30,6	
20	14119	10000	3,50	534	341,0	1,05	13,8	25,2	31,1	
21	14092	9994	3,60	538	346,0	1,05	13,4	24,3	30,7	
22	14064	9964	3,60	543	350,0	1,04	13,8	24,7	31,1	
23	14033	9943	3,60	543	350,0	1,03	14,1	24,2	31,1	

Рис. 2. Схема выделения и последовательного смещения на шаг $\Delta t = 2$ массива параметров с целью формирования вектора факторных нагрузок параметров на первую главную компоненту

носительные объясненные дисперсии факторных нагрузок параметров на первую главную компоненту $\bar{D}_i$, $i = 0, 1, \dots, (N - N_0)/\Delta t$ (см. этапы 4, 5 на рис. 1). Вектор значений относительных значений дисперсий содержит диагностическую информацию о техническом состоянии объекта.

Так, например, для двигателя ГТД 4РМ из матрицы эксплуатационных параметров по условию $a_{11} \geq a_{кр}$ выделено только $p = 9$ наиболее информативных. Для этой группы параметров по указанному выше алгоритму вычислены относительные значения объясненной дисперсии нагрузок параметров на первую главную компоненту во всем диапазоне измерения (рис. 3).

Как показано на рис. 3, на определенных этапах анализа состояния двигателя — примерно в точках № 80 и № 150 — выявлено резкое изменение относительной объясненной дисперсии (диагностический признак ТС).

Этот признак является индикатором технического состояния двигателя.

На рис. 3 видно, что при дальнейшей эксплуатации двигателя значение индикатора ТС снижается почти до исходного уровня. Это может

быть следствием управляющего воздействия оператора, проведения технического обслуживания (ТО) или изменения условий эксплуатации.

При выявлении факта изменения индикаторного сигнала ТС объекта следует выполнить детальный анализ тренда тех параметров, для которых уровни факторных нагрузок на первую главную компоненту отличаются от начальных значений при определенной наработке объекта (см. зоны I, II на рис.3). Это несложно сделать по вектору факторных нагрузок $A^{(i)}$. Для рассмотренного выше примера существенное изменение факторных нагрузок зафиксировано для трех параметров под номерами 3, 4, 5. Графики изменения этих параметров во всем диапазоне контроля ($j = 0, 1, \dots, N$) показаны на рис. 4.

Анализ показал, что выявленное изменение $\bar{D}_i$ может быть вызвано следующими причинами: ухудшением качества смазочного масла; перегрузкой двигателя при эксплуатации в тяжелых условиях; механическими повреждениями в подшипниках опор двигателя.

Вероятность последнего незначительна, так как одновременное нарушение работоспособ-

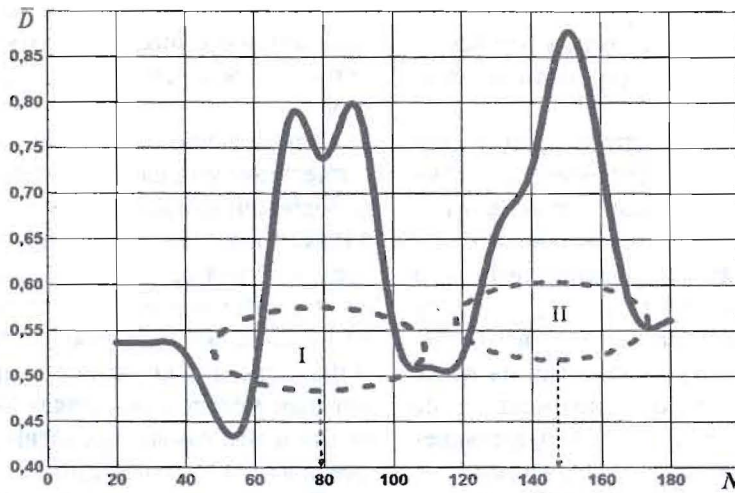


Рис. 3. Значения относительной объясненной дисперсии нагрузок параметров ($p = 9$) на первую главную компоненту:
I, II — зоны отклонения ТС объекта от нормы

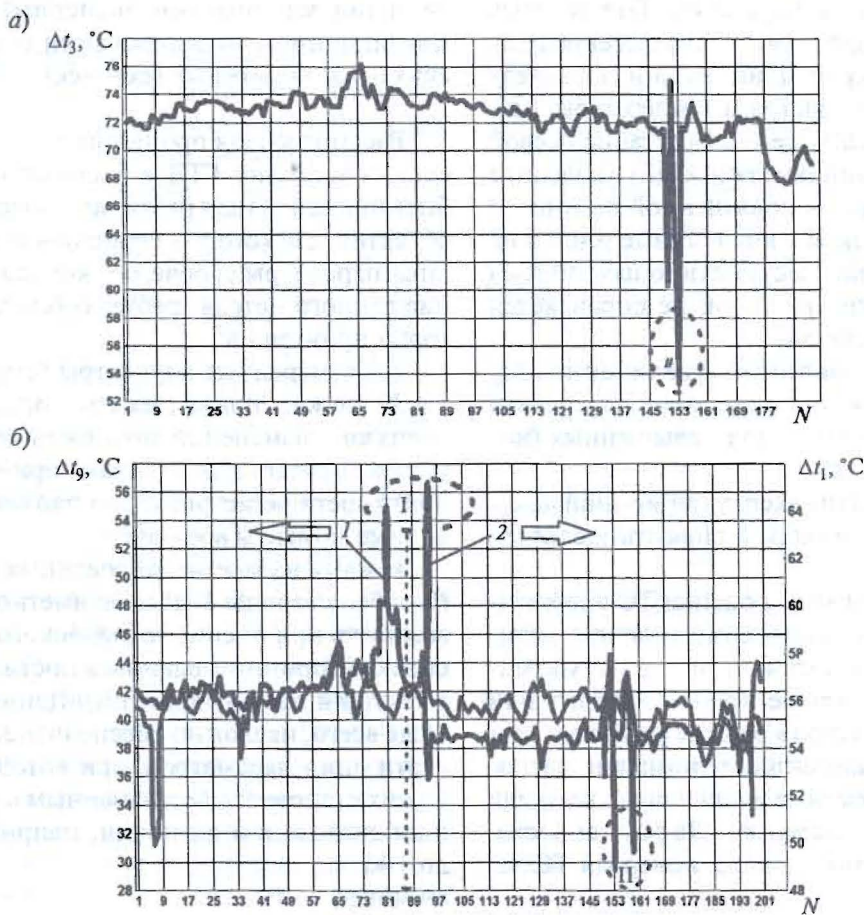


Рис. 4. Изменение параметров ГТД 4РМ с увеличением наработки:

а — приращение температуры смазочного масла в подшипнике передней опоры турбокомпрессора (ТК); б — приращение температуры смазочного масла в подшипнике силовой турбины (2) и в подшипнике задней опоры ТК (1)

ности всех подшипников опор ГТД — событие чрезвычайно редкое. Поэтому, вероятнее всего, причинами являются одна из двух (или обе сразу) первых.

Зависимости на рис. 4 подтверждают выявленное ранее по критерию $\bar{D}$ отклонение ТС двигателя от нормы. Действительно, в указанном диапазоне контроля наблюдалось заметное изменение величины подогрева смазочного масла в подшипниках опор двигателя: $\Delta t_m = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$, где $t_{\text{вых}}$ — температура смазочного масла на выходе из подшипника, $t_{\text{вх}}$ — температура масла на входе в подшипник. Величина Δt_m обычно имеет четкие ограничения по верхнему пределу. Его превышение вызывает серьезную аварию двигателей.

При проверке качества смазочного масла заметные изменения основных показателей не выявлены. Это позволяет утверждать, что причиной изменения указанных параметров рабочего процесса стала эксплуатация ГТД в тяжелых условиях, что вызвало повышенную осевую и радиальную нагрузку подшипников и, как следствие, увеличение подогрева температуры смазочного масла. Чаще всего возрастание осевой нагрузки на подшипники происходит в холодное время года, когда при повышенной плотности воздуха резко увеличиваются осевые усилия на роторы турбомашин, а существующая система компенсации таких нагрузок не справляется с поставленной задачей.

Возможной причиной увеличения Δt_m (зона I на рис. 4) может быть также длительная эксплуатация двигателя при повышенных (номинальных) режимах.

Детальный анализ эксплуатационной документации подтвердил справедливость последней гипотезы.

Предложенный метод оценки ТС энергетических объектов на основе созданного статистического индикатора состояния позволяет уверенно распознавать явные тренды одного или нескольких параметров в режиме реального времени. Как показано выше, однозначно распознаются скачкообразные изменения одного или сразу нескольких параметров. Но главное достоинство предлагаемого метода контроля ТС за-

ключается в том, что появляется возможность выявления предпосылок к отказам при незначительных отклонениях регистрируемых параметров.

Как правило, при возникновении дефектов в отдельном узле сложного технического объекта одновременно изменяются значения нескольких параметров (давление и температура рабочих сред, частота вращения, параметры вибрации и т. п.). Эти изменения могут быть настолько незначительными, что даже не фиксируются САУ. Однако анализ комплекса параметров предложенным методом позволяет выявить эти отклонения и тем самым предотвратить развитие дефекта в отказ или в аварию.

Работоспособность предложенного метода оценки ТС объектов энергетики на основе комплексного анализа эксплуатационной информации дополнительно подтверждена многочисленными машинными экспериментами при имитационном моделировании параметрических отказов сложных технических систем.

Рассмотренная процедура оценки технического состояния ГТД в эксплуатации может быть применена для различных энергетических объектов, для которых периодически фиксируются параметры рабочего процесса. Применение данного метода требует соблюдения некоторых принципов:

все измеренные параметры (строки матрицы X) должны принадлежать к определенному диапазону изменений мощности объекта. Это условие в литературе называют принципом равноважности регистрируемых параметров в различные моменты времени;

каждый из зарегистрированных параметров (столбец матрицы X) должен иметь одинаковую важность при оценке технического состояния объекта (принцип равноважности признаков в текущий момент времени). Данное условие, чаще всего, несложно обеспечить за счет стандартизации параметров, при которой каждый из них становится безразмерным с определенным диапазоном вариации, например от -3σ до $+3\sigma$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халафян, А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных [Текст] / А.А. Халафян. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2008. — 512 с.

2. Дуброва, Т.А. Статистические методы прогнозирования [Текст]: Учебное пособие для вузов / Т.А. Дуброва. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003.

3. Айвазян, С.А. Классификация многомерных наблюдений [Текст] / С.А. Айвазян, З.И. Бежаева, О.А. Староверов.— М.: Статистика. 1974.

4. Дубров, А.М. Многомерные статистические методы [Текст]: Учебник / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин.— М.: Финансы и статистика, 2003.

5. Турбович, И.Т. Опознавание образов [Текст] / И.Т. Турбович, В.Г. Гитис, В.К. Маслов.— М.: Наука, 1971.

6. Сошникова, Л.А. Многомерный статистический анализ в экономике [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Л.А. Сошникова, В.Н. Тамашевич, М. Шебер / Под ред. проф. В.Н. Тамашевича.— М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999.

7. Нейронные сети. STATISTICA Neural networks: Методология и технология современного анализа данных [Текст] / Под ред. В.П. Боровикова.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Горячая линия— Телеком, 2008.