КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

УДК 004. 519

Ю.В. КУК, Е.И. ЛАВРИКОВА

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

J. Kuk, H. Lavrikova

SPECTRAL METHOD OF RECOGNITION OF DYNAMIC SYSTEMS CONDITIONS

The methods of recognition of states of dynamic systems are considered. It is supposed, that characteristics of dynamic systems in a random way change in time and are described by some non-stationary time series. Spectral expansion of non-stationary random process in Fourier series is applied. In procedure of recognition of states of system as initial attributes set of the random variables received from the description of features of spectrograms is used.

Рассмотрены методы распознавания состояний динамических систем, характеристики которых случайным образом изменяются во времени и описываются некоторыми нестационарными временными рядами. Применяется спектральное разложение нестационарного случайного процесса в ряд Фурье. В процедуре распознавания состояний системы в качестве исходных признаков используется совокупность случайных величин, полученных из описания особенностей спектрограмм.

В работе рассматриваются сложные многопараметрические динамические системы, функционирование которых определяется множеством параметров, которые по своей природе могут принимать случайные значения [1–2]. Случайные процессы, описывающие значения этих параметров, определяют состояния изучаемых систем. Как правило, эти процессы являются нестационарными. Решения по управлению системой принимаются в зависимости от текущего ее состояния, которое считается неизвестным. Поэтому задача состоит в том, чтобы по измеренным в дискретные моменты времени значениям параметров определить состояние изучаемой системы, в частности определить критическое состояние, которое ведет к ее разрушению. Для решения этой задачи использовались спектрограммы получаемых временных рядов. Под спектрограммой временного ряда понимается зависимость величины амплитуды гармоники от ее частоты в разложении этого временного ряда в ряд Фурье. В работе использовалась разновидность спектрограммы – периодограмма, выражающая зависимость суммы квадратов амплитуд синусоидальной и косинусоидальной гармоник от частоты гармоники в разложении в ряд Фурье временного ряда. Получив спектрограммы временных рядов, в качестве исходных признаков для определения состояния динамической системы брались характерные особенности этих спектрограмм. Такими особенностями являются значимые амплитуды гармоник и соответствующие им частоты. Под словом «значимые амплитуды» понимаются амплитуды, которые превысили некоторый заданный порог. Величина порога выбирается такой, чтобы амплитуды гармоник «белого шума», присутствующего во временном ряде, остались лежать ниже этого порога. Величины значимых амплитуд гармоник спектрограммы являются случайными величинами, которые берутся в качестве исходных признаков для определения состояния динамической системы. Таким образом, при решении задачи распознавания мы переходим от временных рядов к совокупности случайных величин – случайному вектору. Для определенности назовем этот вектор *исходным вектором признаков*. В зависимости от состояния исследуемой динамической системы математическое ожидание исходного вектора признаков будет различным. Наблюдаемые его значения, полученные на основании замеров временных рядов в различные интервалы времени, образуют вектора в евклидовом пространстве, которые случайным образом в нем будут расположены. Осуществив предварительные эксперименты при заранее известных состояниях динамической системы, можно получить некоторые группы векторов, которые будут соответствовать этим состояниям. Выборочные средние векторов каждой из этих групп являются оценками математического ожидания исходного вектора для состояния, которое соответствует данной группе экспериментов. Наиболее простая процедура распознавания основана на нахождении евклидовых расстояний между исходным вектором признаков для неизвестного состояния динамической системы и выборочными средними векторов групп. Выбирается группа, к которой это расстояние оказывается наименьшим и принимается решение, что неизвестное состояние системы является состоянием, которое соответствует выбранной группе векторов. Для получения максимальной вероятности правильности распознавания состояния динамической системы, в работе предлагается процедура, которая оптимизирует данную методику. Перейдем к строгой постановке задачи. Пусть имеется некоторый динамический объект, который может находиться в одном из L состояний. Информация о состоянии объекта считывается M датчиками в дискретные моменты времени $t=1,2,3,\ldots$. На выходе каждого из датчиков замеряются амплитуды сигналов, характеризующие состояния соответствующего участка исследуемой динамической системы и являющиеся значениями временного ряда. Задача состоит в том, чтобы по показаниям датчиков определить состояние динамической системы, имея в своем распоряжении предварительные экспериментальные данные показаний датчиков при разных состояниях динамической системы. Для решения этой задачи поступим следующим образом. Экспериментальные данные временного ряда для i-го датчика и l-го состояния динамической системы обозначим $y^{(i,l)}(t)$, $i=1,\ldots,M$, $l=1,\ldots,L$, $t=1,2,3,\ldots$. Из этих временных рядов сформируем векторный временной ряд $Y^{(l)}(t)=(y^{(1,l)}(t),y^{(2,l)}(t),\ldots,y^{(M,l)}(t))$. Векторный временной ряд $Y^{(l)}(t)$, содержащий S замеров, разделим на Z равных временных отрезков, содержащих $m=S/Z$ замеров. Эти информационные отрезки будем рассматривать как некоторые первичные объекты. Выделим признаки, с помощью которых будем описывать полученные объекты. Обозначим $s_k^{(l)}$ k-й первичный объект, сформированный из k-го отрезка векторного временного ряда $Y^{(l)}(t)$. Он состоит из отдельных отрезков временных рядов $y^{(i,l)}(t)$, $i=1,\ldots,M$, наблюдаемых на выходах всех датчиков. Рассмотрим общий случай, когда наблюдаемые отрезки временных рядов представляют собой нестационарные процессы. Для нахождения признаков первичных объектов поступим таким образом. Разложим каждый отрезок временного ряда $y^{(i,l)}(t)$ в ряд Фурье:

$$y^{(i,l)}(t) = a_0 + \sum_j [a_j \cos(f_j t) + b_j \sin(f_j t)],$$

где $j=1,\ldots,J$, $l=1,\ldots,L$.

Числа f_j называются частотами, а величины $p_j = (a_j^2 + b_j^2)*(J/2)$ – периодограммами. Выделим N характерных особенностей функции, описывающей зависимость значений p_j от величин f_j и называемой спектрограммой. В качестве таких особенностей возьмем частоты f_j, которым соответствуют максимумы спектрограммы, а также соответствующие им значения периодограмм. Обозначим выбранные признаки $x_{1k}^{(i,l)}, x_{2k}^{(i,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(i,l)}$. Поскольку объект $s_k^{(l)}$ описывается совокупностью отрезков временных рядов $y^{(i,l)}(t)$, $i=1,\ldots,M$, то в качестве его признаков возьмем вектор

$$x_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)}, x_{2k}^{(1,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(1,l)}, x_{1k}^{(2,l)}, x_{2k}^{(2,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(2,l)}, \ldots, x_{1k}^{(M,l)}, x_{2k}^{(M,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(M,l)}).$$

В зависимости от состояния l исследуемой динамической системы математическое ожидание вектора исходных признаков для первичных объектов будет меняться. Для проверки правильности предлагаемой методики поступим таким образом. Разделим Z первичных объектов векторного временного ряда $Y^{(l)}(t)$, когда система находится в состоянии l, на два множества K и W. Отнесем K первичных объектов к обучающей выборке G_l, т. е. к выборке объектов, для которых известны состояния динамической системы и W первичных объектов – к экзаменационной выборке G_e, т. е. к выборке объектов, для которых требуется определить состояние системы с возможностью проверки правильности такого определения. Легко видеть, что $K+W=Z$. Объектам группы G_l соответствует l-ое состояние динамической системы . Когда l пробегает все свои значения: $l=1,\ldots,L$, получим полную обучающую выборку, которая будет состоять из групп G_l, $l=1,\ldots,L$. Задача состоит в следующем. По замерам временных рядов, снятых со всех датчиков динамической системы определить её состояние, т. е. требуется определить неизвестный параметр l вектора признаков

$$x_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)}, x_{2k}^{(1,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(1,l)}, x_{1k}^{(2,l)}, x_{2k}^{(2,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(2,l)}, \ldots, x_{1k}^{(M,l)}, x_{2k}^{(M,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(M,l)}).$$

Приступим к решению задачи распознавания состояния динамической системы. Вектор $x_k^{(l)}$ исходных признаков первичного объекта $s_k^{(l)}$ из группы G_l является вектором евклидового пространства R_n, где $n = N \cdot M$.

Вектором выборочных средних векторов признаков первичных объектов группы $G_l = \left\{ s_1^{(l)}, s_2^{(l)}, \cdots, s_K^{(l)} \right\}$ является вектор

$$h^{(l)} = (\bar{x}_1^{(1,l)}, \bar{x}_2^{(1,l)}, \cdots, \bar{x}_N^{(1,l)}, \bar{x}_1^{(2,l)}, \bar{x}_{2k}^{(2,l)}, \cdots, \bar{x}_N^{(2,l)}, \ldots, \bar{x}_1^{(M,l)}, \bar{x}_2^{(M,l)}, \cdots, \bar{x}_N^{(M,l)}),$$

координаты которого равны покомпонентным средним значениям векторов признаков $x_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)}, x_{2k}^{(1,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(1,l)}, x_{1k}^{(2,l)}, x_{2k}^{(2,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(2,l)}, \ldots, x_{1k}^{(M,l)}, x_{2k}^{(M,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(M,l)})$ всех первичных объектов, входящих в данную группу:

$$\bar{x}_1^{(1,l)} = \frac{1}{K} \sum_{\nu=1}^{K} x_{1\nu}^{(1,l)}, \quad \bar{x}_2^{(1,l)} = \frac{1}{K} \sum_{\nu=1}^{K} x_{2\nu}^{(1,l)}, \ \ldots, \ \bar{x}_N^{(M,l)} = \frac{1}{K} \sum_{\nu=1}^{K} x_{N\nu}^{(M,l)}.$$

Центром группы $G_l = \left\{ s_1^{(l)}, s_2^{(l)}, \cdots, s_K^{(l)} \right\}$ назовем первичный объект, признаки которого равны компонентам вектора выборочных средних $h^{(l)}$.

Центрированным вектором признаков $\tilde{x}_k^{(l)}$ первичного объекта $s_k^{(l)}$, принадлежащего группе $G_l = \left\{ s_1^{(l)}, s_2^{(l)}, \cdots, s_K^{(l)} \right\}$, назовем вектор, координаты которого равны отклонениям значений признаков $s_k^{(l)}$ от усредненных значений признаков группы $h^{(l)}$:

$$\tilde{x}_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)} - \bar{x}_1^{(1,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(1,l)} - \bar{x}_N^{(1,l)}, \ldots, x_{1k}^{(M,l)} - \bar{x}_1^{(M,l)}, \cdots, x_{Nk}^{(M,l)} - \bar{x}_N^{(M,l)}).$$

Вектора признаков первичных объектов разных групп G_l, $l = 1, \ldots, L$, отобразятся в евклидовом пространстве R_n некоторыми совокупностями векторов, которые каким-то образом будут в нем расположены. Систему распознавания состояния динамической системы будем проектировать для работы в двух режимах – обычном и оптимизированном.

В обычном режиме распознавание осуществляется таким образом: находятся евклидовые расстояния между вектором признаков для неизвестного состояния динамической системы и векторами признаков всех центров групп; выбирается группа, к которой это расстояние оказывается наименьшим; делается вывод по аналогии, что неизвестное состояние совпадает с характерным состоянием первичных объектов данной группы.

В оптимизированном режиме решается оптимизационная задача требующая найти некоторое линейное преобразование векторов признаков первичных объектов, чтобы для первичных объектов с новыми значениями признаков оказались выполненными два условия:

- центры групп, были бы максимально удалены друг от друга;

- точки, соответствующие одной и той же группе первичных объектов как можно ближе были бы сконцентрированы вокруг своих центров.

Этот режим позволяет с максимальной вероятностью правильно распознать неизвестное состояние динамической системы. Приведем схему решения задачи оптимизации. Евклидовое расстояние между вектором признаков объекта $s_k^{(l)}$ и вектором признаков центра группы G_l определяется по формуле:

$$d_{kl} = \sqrt{(x_{1,k}^{(1,l)} - \bar{x}_1^{(1,l)})^2 + \ldots + (x_{N,k}^{(1,l)} - \bar{x}_N^{(1,l)})^2 + \cdots + (x_{N,k}^{(M,l)} - \bar{x}_N^{(M,l)})^2}\,. \qquad (1)$$

С точки зрения условий оптимизации, желательно, чтобы это расстояние было как можно меньше. Евклидовое расстояние между векторами признаков центров групп G_k и G_l определяется по формуле:

$$\bar{d}_{kl} = \sqrt{(\bar{x}_1^{(1,k)} - \bar{x}_1^{(1,l)})^2 + \ldots + (\bar{x}_N^{(1,k)} - \bar{x}_N^{(1,l)})^2 + \cdots + (\bar{x}_N^{(M,k)} - \bar{x}_N^{(M,l)})^2}\,. \qquad (2)$$

С точки зрения условий оптимизации, желательно, чтобы это расстояние было как можно больше. Вектора признаков первичных объектов вначале подвергаются некоторому линейному преобразованию. Затем с помощью множителей Лагранжа ищутся неизвестные коэффициенты преобразования из условия максимума суммы квадратов расстояний между преобразованными векторами признаков центров групп, при этом фиксируется значение суммы квадратов расстояний от преобразованных векторов признаков первичных объектов групп до соответствующих центров. Коэффициенты искомого преобразования выражаются через матрицы ковариаций исходных признаков. Это вытекает из формулы (1). Действительно, для того, чтобы расстояние между вектором признаков объекта $s_k^{(l)}$ и вектором признаков центра группы G_l было, как можно меньше, произведения значений признаков этого объекта и признаков центра, другими словами, их коэффициенты ковариации, должны быть как можно больше. Из формулы (2) вытекает, что для обеспечения максимальной суммы расстояний между преобразованными векторами признаков центров групп нужно как можно меньше сделать коэффициенты ковариации между признаками центров групп. В связи с чем введем в рассмотрение матрицы ковариаций признаков. Обозначим $A^{(1)}, \ldots, A^{(L)}$ матрицы, столбцы которых состоят из компонентов центрированных векторов признаков первичных объектов для соответствующих групп G_l, $l = 1, \ldots, L$.

$$A^{(l)} = \begin{pmatrix} x_{11}^{(1,l)} - \bar{x}_1^{(1,l)} & x_{12}^{(1,l)} - \bar{x}_1^{(1,l)} & \cdots & x_{1K}^{(1,l)} - \bar{x}_1^{(1,l)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1}^{(1,l)} - \bar{x}_N^{(1,l)} & x_{N2}^{(1,l)} - \bar{x}_N^{(1,l)} & \cdots & x_{NK}^{(1,l)} - \bar{x}_N^{(1,l)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{11}^{(M,l)} - \bar{x}_1^{(M,l)} & x_{12}^{(M,l)} - \bar{x}_1^{(M,l)} & \cdots & x_{1K}^{(M,l)} - \bar{x}_1^{(M,l)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1}^{(M,l)} - \bar{x}_N^{(M,l)} & x_{N2}^{(M,l)} - \bar{x}_N^{(M,l)} & \cdots & x_{NK}^{(M,l)} - \bar{x}_N^{(M,l)} \end{pmatrix},$$

где $l = 1, \ldots, L$.

Матрицы ковариаций $B^{(l)}$, $l=1,\dots,L$, между векторами признаков первичных объектов групп G_l, $l=1,\dots,L$, имеют следующий вид:

$$B^{(l)}=\frac{1}{K}\begin{pmatrix} \sum_{\nu=1}^{K}(x_{1\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_1^{(1,l)})^2 & \cdots & \sum_{\nu=1}^{K}(x_{1\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_1^{(1,l)})(x_{N\nu}^{(M,l)}-\bar{x}_N^{(M,l)}) \\ \sum_{\nu=1}^{K}(x_{2\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_2^{(1,l)})(x_{1\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_1^{(1,l)}) & \cdots & \sum_{\nu=1}^{K}(x_{2\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_2^{(1,l)})(x_{N\nu}^{(M,l)}-\bar{x}_N^{(M,l)}) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{\nu=1}^{K}(x_{N\nu}^{(M,l)}-\bar{x}_N^{(M,l)})(x_{1\nu}^{(1,l)}-\bar{x}_1^{(1,l)}) & \cdots & \sum_{\nu=1}^{K}(x_{N\nu}^{(M,l)}-\bar{x}_N^{(M,l)})^2 \end{pmatrix}.$$

Они определяются матрицами $A^{(1)}$, …, $A^{(L)}$ таким образом:

$$B^{(1)}=\frac{1}{K}A^{(1)}A^{(1)^T},\dots,\ B^{(L)}=\frac{1}{K}A^{(L)}A^{(L)^T},$$

где $l=1,\dots,L$; T– индекс, обозначающий операцию транспонирования матрицы.

Искомое линейное преобразование получается путем проектирования векторов признаков первичных объектов на некоторую гиперплоскость в евклидовом пространстве R_n. Направляющие косинусы этой гиперплоскости находятся исходя из условий оптимизации. При их нахождении используются вышеприведенные ковариационные матрицы. Результаты проведения оптимизации можно оформить в виде следующей теоремы.

Теорема. Пусть $B=B^{(1)}+\cdots+B^{(L)}$ – сумма матриц ковариаций отдельных групп первичных объектов G_l, $l=1,\dots,L$, а W – матрица ковариаций для признаков первичных объектов, объединенной обучающей выборки $G=\bigcup_{l=1}^{L}G_l$. Пусть $V=W-B$. Тогда $n-1$ собственных векторов $C_1=(c_{11},\dots,c_{n1})$, $C_2=(c_{12},\dots,c_{n2}),\dots,$ $C_{n-1}=(c_{1,n-1},\dots,c_{n,n-1})$ матрицы $VB^{(-1)}$ определяют гиперплоскость Q, проекции векторов признаков первичных объектов на которую удовлетворяют двум вышесформулированным условиям задачи оптимизации.

Доказательство этой теоремы проводится по вышеприведенной схеме, при этом фигурирующие в ней расстояния выражаются через ковариационные матрицы. Получаемая в результате нахождения экстремума квадратичной формы система линейных уравнений оказывается однородной относительно неизвестных коэффициентов гиперплоскости и имеет решение, когда неопределенные множители Лагранжа равны собственным значениям матрицы $VB^{(-1)}$. Получаемое решение состоит из собственных векторов этой матрицы. Найденное с помощью теоремы линейное преобразование преобразует вектор признаков $x_k^{(l)}$, полученный в результате спектрального анализа временных рядов, в вектор $z_k^{(l)}$, лежащий на гиперплоскости Q.

Процедура распознавания состояния динамической системы в оптимизационном режиме состоит из следующих этапов.

1. Находятся, например, с помощью программы MATLAB, собственные векторы $C_1 = (c_{11},\ldots,c_{n1})$, $C_2 = (c_{12},\ldots,c_{n2}),\ldots$, $C_{n-1} = (c_{1,N-1},\ldots,c_{n,n-1})$ матрицы $VB^{(-1)}$. Эти векторы определяют гиперплоскость Q, на которую будут проектироваться векторы признаков.

2. Находятся проекции на гиперплоскость Q n-мерных векторов признаков центров групп и n-мерного вектора признаков для неизвестного состояния динамической системы. С вычислительной точки зрения эта процедура состоит в следующем. Пусть первичный объект $s_k^{(l)}$, который описывается совокупностью отрезков временных рядов $y^{(i,l)}(t)$, $i = 1,\ldots,M$, имеет следующий вектор признаков: $x_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)}, x_{2k}^{(1,l)},\cdots, x_{Nk}^{(1,l)}, x_{1k}^{(2,l)}, x_{2k}^{(2,l)},\cdots, x_{Nk}^{(2,l)},\ldots, x_{1k}^{(M,l)}, x_{2k}^{(M,l)},\cdots, x_{Nk}^{(M,l)})$.

Тогда проекция $z_k^{(l)}$ вектора $x_k^{(l)}$ на гиперплоскость Q – вектор размерностью $n-1$ со следующими компонентами:

$$z_{pk}^{(l)} = \sum_{j=1}^{N} c_{jp} x_{jk}^{(1,l)} + \sum_{j=N+1}^{2N} c_{jp} x_{j-N,k}^{(2,l)} + \cdots + \sum_{j=N(M-1)+1}^{MN} c_{jp} x_{j-N(M-1),k}^{(M,l)},$$

где $p = 1,\ldots,n-1$, $k = 1,\ldots,K$.

3. Находятся евклидовые расстояния между проекцией на эту гиперплоскость вектора признаков для неизвестного состояния динамической системы и проекциями векторов признаков всех центров групп.

4. Выбирается группа, к которой это расстояние оказывается наименьшим.

5. Делается вывод, что неизвестное состояние совпадает с характерным состоянием первичных объектов данной группы.

Методика была апробирована при решении задачи, в которой требовалось распознать режимы работы вертолета. Использовались данные, которые были получены в результате виброметрирования главного редуктора вертолета Ка 32N04. Данные снимались с шести датчиков для разных режимов полета вертолета с нагрузкой 8 и 11 тонн. С каждого из 6 датчиков было получено 48000 замеров. Спектрограммы строились по 2000 замерам временного ряда с каждого из датчиков. Рассматривались различные состояния вертолета, в качестве которых брались различные режимы полета вертолета с различной нагрузкой. Например, нагрузка 8 тонн и вертолет висит – одно его состояние, нагрузка 11 тонн и вертолет висит – другое его состояние. Векторный временной ряд $Y^{(l)}(t)$ состоит из 6-и временных рядов, снимаемых с 6-и датчиков вертолета при некотором фиксированном его состоянии. Для нахождения исходного вектора признаков $x_k^{(l)} = (x_{1k}^{(1,l)}, x_{2k}^{(1,l)},\cdots, x_{Nk}^{(1,l)}, x_{1k}^{(2,l)}, x_{2k}^{(2,l)},\cdots, x_{Nk}^{(2,l)},\ldots, x_{1k}^{(M,l)}, x_{2k}^{(M,l)},\cdots, x_{Nk}^{(M,l)})$

поступали следующим образом. Строили спектрограммы наблюдаемых отрезков временных рядов, снимаемых с 6-ти датчиков за один и тот же интервал времени. Нумеровали спектрограммы в соответствии с номерами датчиков. Находили на всех этих спектрограммах частоты, которым отвечают максимумы спектрограмм. Упорядочивали частоты в порядке их возрастания: $f_{1,l},\ldots f_{N,l}$, где l – номер датчика. Общее число таких частот обозначали N. Задавали допуск определения частоты Δ. Тогда первые N значений вектора признаков $x_k^{(l)}$ равнялись экстремальным значениям 1-ой спектрограммы в интервалах частот ширины Δ с центрами при частотах $f_{1,1},\ldots f_{N,1}$. Следующие N значений вектора признаков $x_k^{(l)}$ равнялись экстремальным значениям 2-ой спектрограммы в интервалах частот ширины Δ с центрами при частотах $f_{1,2},\ldots f_{N,2}$ и т.д. Последние N значений вектора признаков $x_k^{(l)}$ равнялись экстремальным значениям 6-ой спектрограммы в интервалах частот ширины Δ с центрами при частотах $f_{1,6},\ldots f_{N,6}$. Оказалось, что на спектрограммах с 6-го датчика при нагрузке на вертолет 8 тонн в отличие от спектрограмм с 6-го датчика при нагрузке на вертолет 11 тонн в интервале частот 0,1– 0,15 Гц наблюдался максимум, который практически отсутствовал на спектрограммах с 6-го датчика при нагрузке 11 тонн в том же интервале частот. Такая особенность спектрограмм, полученных с 6-го датчика, позволяла практически достоверно распознавать режимы работы вертолета с нагрузками 8 и 11 тонн.

Заключение. Предложен эффективный метод распознавания состояний динамических объектов, характеристики которых случайным образом изменяются во времени и описываются нестационарными временными рядами. В процедуре распознавания применяется спектральное разложение случайного нестационарного процесса в ряд Фурье, а в качестве исходных признаков объекта используется совокупность случайных величин, полученных из описания особенностей спектрограмм. Процедура распознавания основана на измерении евклидовых расстояний между исходными признаками объектов. Рассмотрены два режима распознавания – обычный и оптимизированный. Оптимизированный режим позволяет с максимальной вероятностью правильно распознать неизвестное состояние динамического объекта.

1. *Кук Ю.В., Лаврикова Е.И.* Интеллектуальные системы распознавания состояний динамических объектов с нестационарными характеристиками // Научно-теоретический журнал «Искусственный интеллект». – Донецк: НАН Украины, Ин-т проблем искусственного интеллекта, 2006. – № 4. – С. 763–773.
2. *Koval V.N., Kuk Yu.V.* Distances between predicates in by-analogy reasoning systems // X-th International Conference “Knowledge–Dialogue–Solution” – 2003. Proceedings. Varna, Bulgaria, FOI–Commerce, Sofia. – P. 404 – 411.

Получено 10.04.2007