

решение задачи, и обеспечивает желаемую точность получаемого результата.

Созданием программы "ММ-аппроксимация" НПП "ПОРА-USWO" завершает разработку инструментального комплекса для специалистов, связанных с практикой внедрения систем автоуправления параметрами объектов промышленного, транспортного и бытового назначения.

Бажанов Владимир Леонидович — канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте" Самарского государственного университета путей сообщения.

Контактный телефон (927) 760-28-84.

E-mail: uswo@samtel.ru; tklinkov@mail.ru Http://www.uswo.lgg.ru

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

С.Н. Довбань, О.В. Веселов (Владимирский государственный университет)

Для оценки технического состояния электромеханической системы используется сигнал прямоугольной формы, подаваемый на ее вход. При прохождении через систему сигнал претерпевает изменения, связанные с изменением состояния объекта. В качестве алгоритма оценки изменения состояния используется энергия сигнала на выходе объекта. Отклонение энергии от эталонного значения оценивается на основе метрического метода.

Ключевые слова: техническое состояние, сигнал, измерение, импульсная функция, деформация сигнала, энергия, метрический метод.

Поддержание любой системы в работоспособном и исправном состоянии должно ориентироваться не на отыскание неисправности, как обычно это делается, а на предсказании ее возникновения. В идеале, на основе измерения параметров, хотелось бы установить, каков остаточный ресурс системы. Однако такая задача трудно разрешима. С другой стороны, можно решить задачу непрерывного контроля состояния системы, для чего необходимо использовать специализированные технические средства и быстрые алгоритмы, выполняемые в темпе работы оборудования. В этом случае оценка технического состояния электромеханических систем (ЭМС) может быть основана на диагностике, выполняемой в РВ с использованием микропроцессорных систем.

Среди множества методов оценки технического состояния ЭМС можно выделить алгоритмы диагностирования на основе анализа в частотной области. В этом случае используют либо методы фильтрации, либо спектральный анализ, каждый из которых трудоемок или с точки зрения аппаратной реализации, или с точки зрения сложности и протяженности алгоритма. Упрощение этих методов может быть достигнуто с помощью применения информационного подхода, то есть представления диагностируемой системы в виде канала передачи данных, состояние которого влияет на характеристики выходного сигнала и может приводить последний к искажениям. В результате деформации сигнала изменяются его параметры, что связано с потерей доли энергии. Иными словами суть предлагаемого подхода заключается в оценке энергии выходного сигнала. Этот метод дает возможность выявлять неисправности в конкретных устройствах диагностируемой системы на ос-

Список литературы

1. *Бажанов В.Л.* Метод масштабирования — эффективный инструмент для практической настройки регуляторов в замкнутых САР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6.
2. *Бажанов В.Л.* Функция самонастройки по методу масштабирования для цифровых ПИД-регуляторов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 12.

нове анализа потери энергии не только во всем диапазоне частот, но и по отдельным ее составляющим.

Удачным решением можно было бы считать установление работоспособности системы по одному выходному сигналу, но, учитывая, что распознать в одном выходном сигнале множество возможных состояний сложно, необходимо использовать сигналы с выходов промежуточных узлов, тем самым обеспечивая больший объем информации, способствующий более точному принятию решения о состоянии объекта.

Свяжем оценку технического состояния ЭМС с подачей на вход системы сигналов с известными характеристиками, измерением характеристик выходных сигналов и проверкой условий работоспособности для полученных результатов измерений [1].

Условие работоспособности можно представить в следующем виде

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{im} c_i - \sum_{i=1}^n a_{im} c_{im} \right| \leq \delta, \quad (1)$$

где a_{im} — коэффициенты, c_i, c_{im} — эталонные и измеряемые параметры, δ — допустимое отклонение.

Для обеспечения требуемой полноты контроля общее число измеряемых значений $R_9 (9 = 1, 2, \dots, n_1)$ должно быть не меньше числа существенных параметров n .

Так как при каждом измерении входной сигнал и алгоритм преобразования чаще всего являются известными, то измеряемые характеристики R_9 , составляющие вектора R , также являются известными функциями параметров ЭМС:

$$R = F(c), \quad (2)$$

где $c (c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$ — вектор параметров.

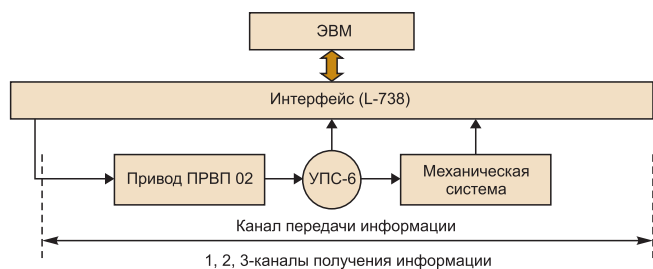


Рис. 1. Функциональная схема системы диагностирования

Для определения условий работоспособности по измеряемым характеристикам следует решить систему (2) относительно параметров c , и подставить полученные значения в выражение (1).

Если допустимы небольшие отклонения параметров (2...5%), изменения действительной характеристики относительно номинальной величины R_{0g} можно выразить в виде:

$$\Delta R_g = R_g - R_{0g} \sum_{j=1}^n S_{gj} \Delta c_j, \quad g = 1, 2, 3, \dots, n_1, \quad (3)$$

$$\Delta c = G \Delta R,$$

где $S_{gj} = \left. \frac{\partial F}{\partial c_j} \right|_{c=c_0}$ – функция чувствительности в номинальной точке, $\Delta R = (\Delta R_g)$ – вектор отклонений

измеряемых характеристик от их номинальных значений R_{0g} , соответствующих номинальным значениям параметров c_{0j} , Δc – вектор отклонений параметров от их номинальных значений, $G = \|g_{ij}\|$ – матрица размерности $n \times n$, обратная матрице $Q = \|q_{ij}\|$, составленная из функций чувствительности и

$$q_{ij} = \sum_{g=1}^n S_{gi} S_{gj}.$$

Выполнив некоторые преобразования с учетом (1) и выражения (3), получим условие работоспособности в пространстве измеряемых характеристик:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \sum_{g=1}^n g_{i0} \Delta R_g \leq b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \Delta c_{0j}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Коэффициенты неравенств находятся при проектировании ЭМС, в результате чего достигается значительное упрощение алгоритма диагностирования, состоящего в проверке выполнения неравенств для измеренных значений ΔR_g .

Исходными данными для построения областей работоспособности по указанным характеристикам является область работоспособности по параметрам. Переход от области работоспособности по параметрам к области работоспособности по характеристикам состоит в построении характеристик, соответствующих значениям параметров, которые лежат в области работоспособности.

Таковыми характеристиками могут быть временные (переходная и импульсная переходная функция) и частотные характеристики.

Воспользуемся временными характеристиками и представим техническую реализацию процесса диагно-

стирования схемой, включающей ПК, выполняющий функции формирователя тестовых сигналов и приема информации с контрольных точек. В качестве исследуемой системы используется привод ПРВП02 с двигателем УПС-6, который через зубчато-ременную передачу соединен с исполнительным механизмом, представляющим собой однокоординатную ЭМС. Связь ПК с объектом исследований реализуется с использованием стандартной платы L-738, имеющей 16 каналов для ввода информации и два канала управления (рис. 1).

В реальных условиях требуется быстрое оценивание состояния системы при минимальном уровне измеряемой информации и простоте реализации средств диагностирования, что может быть достигнуто за счет подачи на вход ЭМС сигнала прямоугольной формы и последующего определения энергии выходного сигнала.

Параметры сигнала таковы, что позволяют для формирования использовать простейшее устройство регулирования амплитуды и длительности. Длительность импульса задается программно с использованием, например, интервального таймера, являющегося обязательным элементом любой микропроцессорной системы, а амплитуда регулируется с использованием ЦАП. Заметим, что воспроизведение теоретического тестового сигнала в виде единичного импульса практически неосуществимо, поскольку импульс должен быть бесконечно коротким, а амплитуда бесконечно большой. Поэтому в практических целях импульсную переходную характеристику обычно получают, подавая на вход системы импульс длительностью, не более одной четверти минимальной из существенных постоянных времени системы, или формируют импульс, площадь которого равна единице.

Съем информации осуществляется либо с выхода МС (линия 1 со стрелкой), если имеется соответствующий измерительный преобразователь, либо с тахогенератора электродвигателя (линия 2 со стрелкой), или с любой точки схемы системы управления электродвигателем (линия 3 со стрелкой).

В основу процесса диагностирования положим разложение исходного сигнала по ортогональной системе функций [2]. Запишем неравенство Бесселя с учетом полноты ортогональной системы

$$\sum_{n=0}^{\infty} \mathcal{E}^2 \|\phi_n\|^2 = \|f\|^2. \quad (4)$$

Применительно к сигналам, являющимся функциями времени справедливо равенство

$$S(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \phi_n(t).$$

Тогда соотношение (4) приобретает энергетический смысл, то есть при соответствующей замене $f(x)$ на $s(t)$ величину $\|f\|^2$ можно записать

$$\|S\|^2 = \int_{t_2}^{t_1} S^2(t) dt = \mathcal{E}$$

и тогда
$$\Theta = \sum_{n=0}^{\infty} C^2 \|\phi\|^2.$$

Зададим на вход ЭМС простейшее колебание, определяемое выражением:

$$S(t) = \begin{cases} U, & \text{при } |t| < \frac{\tau_u}{2}, \\ 0, & \text{при } |t| > \frac{\tau_u}{2}, \end{cases}$$

и имеющее вид, представленный на рис. 2 (сигнал на входе).

Если считать, что параметры входного воздействия заранее известны, что задается изначально, то при прохождении через ЭМС оно претерпевает изменения и требует оценивания.

Сигнал, снимаемый с датчика скорости (выходной сигнал) и заносимый в память ЭВМ, также представлен на рис. 2. Выделив произвольный промежуток времени T , включающий интервал времени t_1, t_2 и представив заданное колебание в виде ряда Фурье, найдем спектральную плотность

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt = U \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega t} dt = \frac{2U}{\omega} \sin \frac{\omega t_H}{2}. \quad (5)$$

Выполнив преобразования в последней формуле, окончательно имеем:

$$S(\omega) = U\tau_H \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)}{\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)} \right]. \quad (6)$$

Заметим, что произведение $U\tau_H$ равно площади импульса, определяет значение спектральной плотности импульса при $\omega = 0$, т. е. $S(0) = U\tau_H$. Этот вывод можно распространить и на импульс произвольной формы.

Действительно, из выражения (5) следует, что

$$S(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i0t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) dt.$$

Правая часть этого выражения есть площадь импульса $S(t)$. Таким образом, выражение (6) можно записать в форме

$$S(\omega) = S(0) \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)}{\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)} \right] = S(0) \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega t_H}{2}\right).$$

При удлинении (растягивании) импульса расстояние между нулями функции $S(\omega)$ сокращается, что равносильно сужению спектра. Значение $S(0)$ при этом возрастает. При укорочении (сжатии) импульса, наоборот, расстояние между нулями функции $S(\omega)$ увеличивается (расширение спектра), а значение $S(0)$ уменьшается. Учитывая это обстоятельство, будем задавать тестовый сигнал $S(t)$ всегда с одними и теми же параметрами. Указанные свойства позволяют доста-

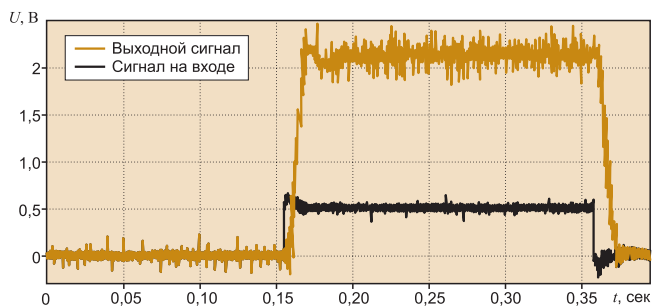


Рис. 2. Сигнал на входе и выходе диагностируемой системы

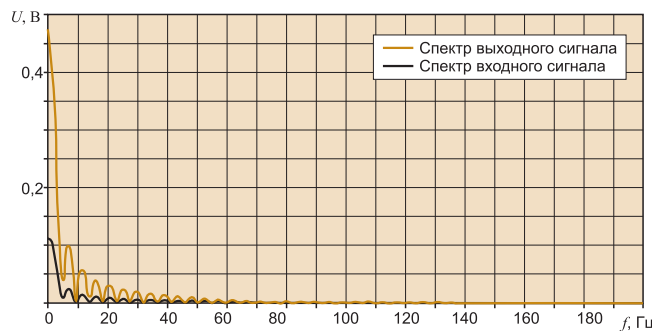


Рис. 3. Спектр сигналов

точно просто оценить изменение состояния ЭМС. Результат работы алгоритма представлен на рис. 3.

Рассмотрим распределение энергии в спектре импульса. Спектральная плотность энергии прямоугольного импульса равна:

$$S^2(\omega) = S^2(0) \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)}{\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)^2} \right] = S^2(0) \left[\operatorname{sinc}\left(\frac{\omega t_H}{2}\right) \right]^2.$$

Используя равенство Парсеваля, вычислим энергию в заданной полосе частот:

$$\begin{aligned} \Theta_{\Delta\omega} &= \frac{1}{\pi} S^2(\omega) d\omega \\ &= U^2 \tau_H^2 \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} \frac{\sin^2\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)}{\left(\frac{\omega t_H}{2}\right)^2} d\omega = U^2 \tau_H \eta \left(\frac{\omega \tau_H}{2}\right), \end{aligned}$$

где $U^2 \tau_H$ – полная энергия импульса, а функция определяет относительную долю энергии в полосе частот от 0 до ω .

Далее задача сводится к оценке состояния системы. В рассматриваемом случае регулятор скорости подвергался изменениям в части коэффициента усиления и постоянной времени. Паспортному значению энергии соответствует кривая 3. При изменении сопротивления на входе усилителя регулятора скорости в сторону увеличения энергия уменьшалась (кривые 1 и 2), а при изменении емкости в цепи обратной связи в сторону увеличения энергия увеличивалась (кривая 4), увеличивалась и постоянная времени.

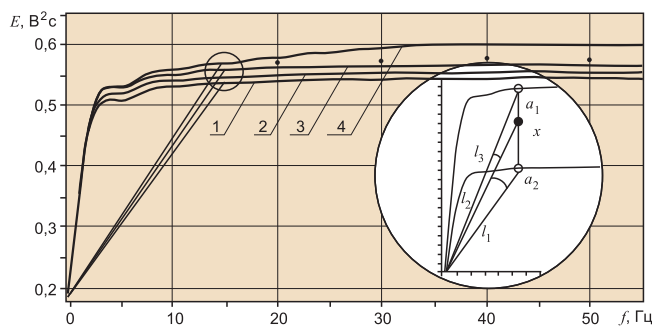


Рис. 4. Распределение энергии, 1, 2 – при изменении коэффициента усиления, 3 – исходное состояние, 4 – при изменении постоянной времени

Необходимо установить относится ли представленный признак к одной из рассматриваемых кривых и какова величина отклонения от паспортных значений. Иными словами попадает ли точка в пространство работоспособного состояния, ограниченного величиной δ , и, если не попадает, распознать возможную неисправность.

Вспользуемся метрическим методом распознавания [3]. В пространстве признаков объект характеризуется N -мерным вектором $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$. Информация о координатах пространства x_j задается дискретными величинами. Тогда x_j представляет признак k_j , имеющий несколько диагностических разрядов. В микропроцессорной системе эта информация представляется в двоичном коде, и тогда координата x выражается двоичным числом, а величины x_j могут принимать значения 0 или 1.

Наиболее эффективно в качестве меры расстояния между точками x и a принимать квадрат расстояния:

$$L = l^2(x, a) = \sum_{j=1}^N (x_j - a_j)^2,$$

а для определения углового расстояния использовать соотношение:

$$\cos(\gamma) = \frac{xa_i}{|x||a_i|},$$

$$\text{где } xa_i = x_1a_{i1} + \dots + x_Na_{iN} = \sum_{j=1}^N x_j a_{ij}.$$

Для более точного определения оценочных характеристик примем более строгую форму, введя порог распознавания ε : $L_k + \varepsilon < L_i$, $\gamma_k + \varepsilon < \gamma_i$ ($\varepsilon > 0$ и не более двух бит в самых младших разрядах), то есть при вычислении L необходимо точно представлять величины x и a , так как кривые могут отличаться друг от друга незначительно.

Введем оценку качества распознавания:

$$\xi_i = \frac{1/L_i}{\sum_{s=1}^n 1/L_s}. \quad (7)$$

Чем ближе величина ξ к единице, тем достовернее диагноз. Отсюда следует, что устанавливается диагноз, для которого ξ имеет наибольшее значение. В случае полного несовпадения кодов диагноз считается также состоявшимся.

Действительно, процесс анализа предполагает последовательный просмотр значений от точки к точке, а потому очередная, предъявляемая к опознанию точка должна иметь расстояние большее, чем предыдущее. Пусть текущая точка имеет значение AA_{16} , а предъявляемая 77_{16} или $0F_{16}$, а предъявлена – $F0_{16}$, в которой ни один разряд не совпадает. В первом случае предъявляемая точка относится к ранним значениям и не может рассматриваться как текущая. Для второго случая значение заведомо больше, чем анализируемое, и потому также не может рассматриваться как характеристика текущего состояния.

Вывод – диагностируемый объект работоспособен, так как не существует такой точки, для которой коды не совпадают во всех разрядах в рассматриваемой области.

На основании приведенных рассуждений выполним процесс диагностирования.

Пусть в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния L и предъявлен для диагностики объект x . Для отнесения объекта x к одному из Z_k диагнозов определим расстояния L и $\cos(\gamma)$ до точек a_1, a_2, \dots, a_n , характеризующих объект в предшествующие моменты времени. Если мера расстояния между точками x, a минимальна, $L_i = \min, \cos(\gamma)$ имеет максимальное значение, объект находится в заданном интервале значений $|x - a_j| < \rho_j$, то $x \in E_k$, и тогда объект x относят к диагнозу Z_k , то есть достаточно (с точностью до δ) близок к оцениваемому состоянию из множества E_k . В противном случае он может принадлежать другому k -му состоянию в зависимости от оговоренных ранее величин и иметь другой диагноз Z .

Согласно рис. 4 кривые распределения энергии характеризуют четыре различных состояния, для которых имеем четыре возможных диагноза: система работоспособна, когда множество значений x принадлежат кривой 3, и имеется дефект в системе: изменилась постоянная времени регулятора (кривая 4), изменился коэффициент усиления регулятора (кривая 2), существенно изменился коэффициент усиления (кривая 1).

Каждая из них соответствует одному из множества состояний, а учитывая, что рассматриваемая система непрерывная, то число таких состояний также множественно.

Рассмотрим случай, когда полученная кривая распределения энергии находится между кривой 3 и 4 и обозначена точками на опорных частотах (рис. 4). Возьмем точку, находящуюся на частоте 20 Гц. Ее значение определяется кодом $x = 1000111010$. Для кривых 1, 2, 3 и 4 аналогичные значения равны $a_1 = 1000011100$, $a_2 = 1000110010$, $a_3 = 1000111000$, $a_4 = 1001001100$.

Проанализируем код объекта, выделив в нем разряды, несовпадающие с базовыми кодами. Для этого воспользуемся логической операцией исключение "ИЛИ". Маскирование разрядов дает следующие результаты. В первом случае не совпадают три разряда,

во втором – один, в третьем – один, в четвертом – пять. Соответствующие значения параметра, вычисленные по формуле (7), $\xi_1 = 0,131$, $\xi_2 = 0,394$, $\xi_3 = 0,394$, $\xi_4 = 0,098$. Отсюда следует, что a_2 и a_3 одинаково близки к x , и сделать однозначный вывод о дефекте в системе затруднительно. Поэтому рассматриваем следующее значение для частоты 30 Гц. Для данной частоты ξ_2 уменьшается, а ξ_3 незначительно растет. Такая тенденция сохраняется и для других значений частоты. Просматривая все последующие значения, делаем вывод, что предьявленная кривая с успехом может быть отнесена к кривой 3, что свидетельствует об исправности системы.

Заключение

В результате проведенных исследований собрана база неисправностей, позволившая моделировать их в

Довбань Сергей Николаевич – аспирант, Веселов Олег Вениаминович – д-р техн. наук, проф., заведующий каф. "Безопасность жизнедеятельности" Владимирского государственного университета. Контактный телефон (4922) 479-627. E-mail: ingindsn@yandex.ru / isida48@mail.ru

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ РАЗЛАДКИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.В. Герасимов, Ю.В. Васильков

(Ярославский государственный технический университет)

Представлен робастный алгоритм последовательного обнаружения разладки (детектор изменения свойств) случайных процессов с использованием вейвлет-пакетного преобразования. На базе данного детектора и искусственных нейронных сетей разработана система классификации типов разладки. Проведено сравнение полученной системы с контрольными картами Шухарта. Разработанная система может успешно применяться в области выборочного контроля, а также в иных условиях обнаружения и классификации разладки, связанных с недостаточной информации о характере сигнала до и после изменения.

Ключевые слова: последовательное обнаружение разладки, вейвлет-пакетное преобразование, распознавание образцов и классификация, выборочный контроль.

Под разладкой обычно понимают любые изменения параметров наблюдаемой системы, возникающие мгновенно или хотя бы очень быстро по сравнению с характерным периодом измерений [1]. Проблема обнаружения разладки возникает во многих задачах текущего контроля производства.

Например, в области контроля качества для обнаружения разладки широко используют методы, опирающиеся на теорию статистических решений. Различные статистические подходы позволяют получить ряд инструментов обнаружения разладки. Наиболее эффективным из них являются карты кумулятивных сумм, основанные на идеях последовательного анализа Вальда. Для обнаружения и классификации разладки популярны карты Шухарта, основанные на подходе Неймана-Пирсона. Вместе с тем, как практические инструменты эти детекторы разладки имеют ряд недостатков. Среди них стоит выделить требование, чтобы реальная производственная ситуация вписывалась в заранее заданную концепцию разладки, например, чтобы нормальное состояние процесса адекватно описывалось стационарным гауссовским процессом, а

процессе отладки разработанного алгоритма. Точность распознавания неисправностей в некоторых узлах доведена до элемента, при использовании только контрольных точек, предусмотренных конструкцией привода. Наличие шумов в измерительном тракте при выбранном пороге распознавания на уровне его энергии не повлияли на оценку технического состояния объекта. Значительные трудности представляет распознавание неисправности однотипных узлов, сходных по реализации (например, регуляторов скорости и тока).

Список литературы

1. *Мозгалецкий А.В., Гаспаров Д.В.* Техническая диагностика (непрерывные объекты). М.: Высшая школа. 1975.
2. *Коган И.М.* Прикладная теория информации. М.: Советское радио. 1980.
3. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. М.: Машиностроение. 1978.

разладка заключалась в том или ином нарушении стационарности. Существуют модификации методов для более сложных моделей процессов, например, для процессов авторегрессии-скользящего среднего [2]. Однако это значительно усложняет детекторы. Кроме того, эти детекторы направлены, как правило, на выявление скалярной разладки, то есть на обнаружение изменения лишь одного параметра распределения. Для обнаружения векторной разладки часто приходится использовать несколько детекторов, что еще более усложняет систему обнаружения.

Применение разработанного авторами спектрального детектора разладки позволяет существенно снизить вышеназванные недостатки. Данный детектор основан на представлении сигнала в частотной области с сохранением информации о локальных особенностях сигнала во времени с использованием вейвлет-пакетного преобразования. Вейвлеты представляют собой особые функции в виде коротких волн с нулевым интегральным значением и с локализацией по оси времени, способных к сдвигу по этой оси и масштабированию. Вейвлеты образуют полную ортогональную сис-