

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  $\xi_2$  уменьшается, а  $\xi_3$  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-

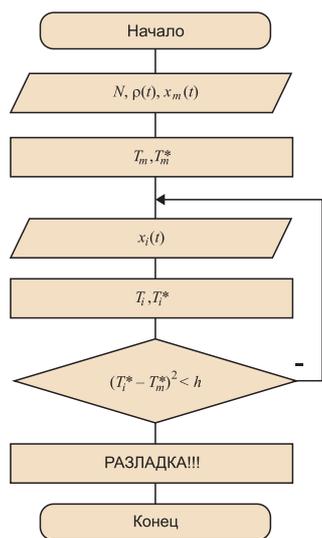


Рис. 1. Блок-схема алгоритма предлагаемого детектора разладки

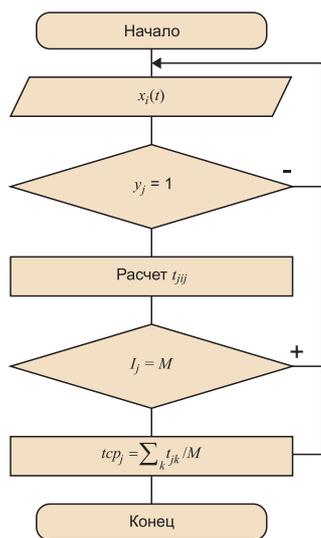


Рис. 2. Блок-схема алгоритма классификации разладки и определения параметров качества системы

тому пространстве функций  $L^2$ , так что вейвлет-преобразование можно рассматривать как представление сигнала в виде обобщенного ряда или интеграла по базису этой системы. Для целей обнаружения разладки наиболее удобно с технической точки зрения вейвлет-пакетное разложение сигнала. Кроме того вейвлет-пакеты обладают лучшей частотной локализацией по сравнению с другими методами. Разладка заключается в значительном изменении спектра сигнала, начиная с какого-либо момента времени. Блок-схема алгоритма предлагаемого детектора представлена на рис. 1. Основными входными параметрами являются временное окно  $N$ , базис разложения, представленный материнским вейвлетом  $\rho(t)$  и образцовая реализация "нормального" хода процесса  $x_m(t)$ . В начале осуществляется вейвлет-пакетное разложение  $N$  отчетов временного ряда модельного сигнала до уровня  $M = \log_2 - 1$ , в результате которого получается бинарное дерево  $T_m$  с вейвлет-вершинами. С помощью критерия энтропии осуществляется отсечение части ветвей дерева. Получается оптимальное дерево разложения модельного сигнала  $T_m^*$ . Эта процедура в некотором смысле аналогична этапу идентификации модели "до разладки" классических алгоритмов обнаружения. По мере поступления очередного измерения процесса  $x_i$  осуществляется аналогичная рассмотренной выше процедура вейвлет-пакетного разложения  $N$  последних отчетов его временного ряда, в результате которой получается "оптимальное" дерево разложения  $T_i^*$ . Значительная разница в структуре деревьев  $T_i^*$  и  $T_m^*$  свидетельствует о существенном различии в спектрах модельного и наблюдаемого сигнала, то есть о разладке. В качестве решающего правила подачи сигнала о разладке используется превышение суммой квадратов отклонений соответствующих вейвлет-коэффициентов заранее заданного порогового значения.

Предлагаемый алгоритм уступает алгоритму с детектором Пейджа-Хинкли [3] в обнаружении модельной разладки в виде скачка среднего гауссового белого шума в условиях полной информации о разладке (в этих условиях детектор Пейджа-Хинкли является асимптотически оптимальным), но превосходит его в обнаружении разладки, отличной от модельной, то есть является менее чувствительным к адекватности модели разладки.

Предлагаемый алгоритм обнаружения разладки может быть легко подстроен под систему классификации типов разладки, например, под хорошо зарекомендовавшую себя нейросетевую систему классификации [4]. В этом случае выявление "значительного" изменения спектра сигнала и его классификация могут быть отнесены к проблеме распознавания образов: классификация структурного вектора (вейвлет-пакетного преобразования сигнала) по шести классам:

1. "случайный выброс" – представляет собой единичное изменение математического ожидания определенного сечения процесса. Имитирует действие какого-либо кратковременного возмущающего фактора, сбившего центр настройки ТП, например, ударное действие на технологическое оборудование;
2. "сдвиг среднего" – представляет собой изменение математического ожидания случайных величин на определенном временном интервале случайного процесса, имитирует нежелательный сбой настройки ТП или, например, изменения уровня подачи сырья;
3. "сдвиг дисперсии" – представляет собой изменение дисперсии на определенном временном интервале процесса. Это может быть вызвано сменой оператора, выходом из строя измерительного прибора и т.п.;
4. медленная флуктуация – "тренд". Представляет собой изменение математического ожидания на определенном временном интервале процесса по линейному закону во времени. Это систематическое "сползание" центра настройки ТП. Такая разладка может быть связана, например, с постепенным износом оборудования;
5. быстрая флуктуация – "колебания". Представляет собой колебания математического ожидания на определенном временном интервале процесса по синусоидальному закону. Подобная разладка может быть вызвана каким-либо периодически действующим фактором, например, намоткой грязи на крутящийся вал;
6. "нет разладки" – процесс находится в статистически управляемом состоянии.

Обучающая выборка представляет собой набор структурных векторов процесса в "неразлаженном" состоянии.

В системе MATLAB проведено исследование предлагаемой системы статистического регулирования. Основными параметрами качества системы статистического регулирования процесса являются средние значения время запаздывания обнаружения  $\tau$  и интервал времени между ложными тревогами  $T$ .

Так как эти параметры противоречивы, интересен компромиссный критерий качества:

$$I = \log_{\tau} T = \frac{\log_{10} T}{\log_{10} \tau},$$

где  $T$  – средний интервал времени между ложными тревогами;  $\tau$  – среднее время запаздывания обнаружения.

Исследование проводилось путем экспериментального определения  $\tau$  и  $T$ .

Блок-схема алгоритма классификации разрядки и определения параметров качества системы приведена на рис. 2. На каждой итерации осуществляется генерация очередного сечения случайного процесса с известными параметрами, и определяется наличие разрядки на каждом из пяти выходов сети (соответствующим типам разрядки). Если разрядки нет (все значения выходных нейронов сети равны нулю), то осуществляется генерация нового сечения случайного процесса. Если же детектор определяет наличие разрядки на  $j$ -ом выходе сети ( $y_j = 1$ ), то фиксируется время  $t_{ji}$  (число отчетов) от момента предыдущей разрядки по данному выходу. После появления  $M$  разрядок по каждому выходу рассчитывается среднее значение между разрядками для  $j$ -ого выхода  $tcp_j$ . Если подаваемый на вход случайный процесс представляет собой модельный сигнал без разрядки, то  $tcp_j$  служат оценкой  $T_j$  для соответствующих типов разрядок, если подаваемый случайный процесс содержит разрядку  $j$ -го типа, то  $tcp_j$  представляет собой оценку  $\tau_j$ , а  $tcp_j$  при  $k \neq j$  представляют собой  $\tau_j$  для "немодельной" разрядки (факт разрядки зафиксирован верно, но классификация ее неверна). Значение  $M = 10000$  выбиралось из соображений точности оценивания параметров качества системы при разумных вычислительных затратах.

Пакетное вейвлет-разложение осуществлялось с помощью функции *wrdec*, дерево разложения наилучшего уровня – с помощью функции *bestlevt*. В качестве материнского вейвлета был использован вейвлет Добеши *db1*. В качестве нейросети была выбрана двухслойная сеть прямого распространения с числом входных нейронов  $n = 25$ , числом нейронов в скрытом слое  $n_1 = 45$  и пятью выходными нейронами. Обучающая выборка состояла из  $N_0 = 1000$  реализаций процесса "без разрядки" и  $N_{j1} = 20$  с разрядкой  $j$ -го типа. При предъявлении использовалась процедура случайного перемешивания. При обучении был использован алгоритм обратного распространения. Ширина окна для вейвлет-пакетного разложения  $N$  была равна числу нейронов во входном слое. В качестве "неразлаженного" процесса использован стандартный гауссовый шум.

Результаты проведенного исследования – зависимости времени запаздывания обнаружения  $\tau$  и компромиссного показателя качества  $I_j$  от величины разрядки  $j$ -го типа  $\tau$  при фиксированном среднем интервале времени между ложными тревогами  $T = 500$  представлены на рис. 3.

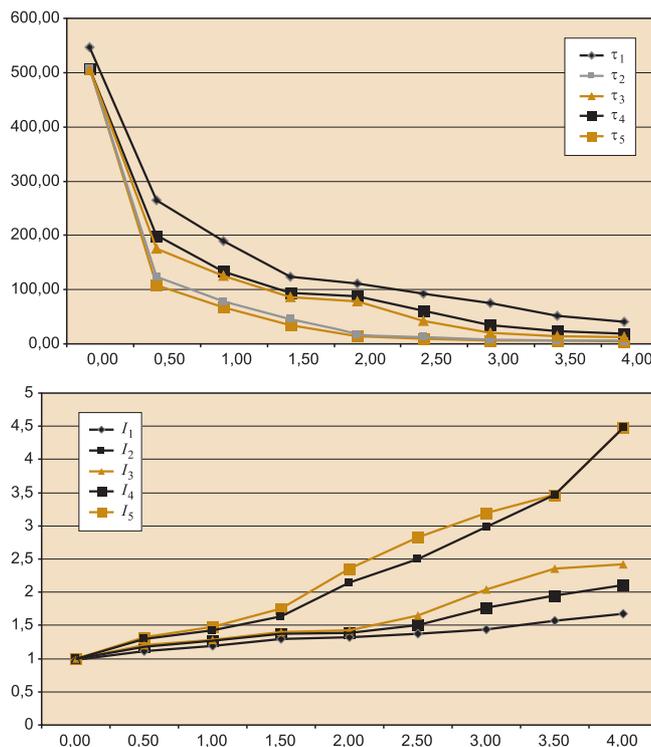


Рис. 3. Зависимости среднего времени запаздывания обнаружения  $\tau_j$  (верхний) и компромиссного показателя качества  $I_j$  (нижний) от величины разрядки  $j$ -го типа  $n$  при  $T = 500$

Из представленных графиков видно, что данная система наиболее качественно обнаруживает и классифицирует разрядки типа "колебания" и "сдвиг среднего". Это объясняется, видимо, тем, что они вносят наиболее существенные изменения в спектр сигнала. Следует отметить проявление корреляций в обнаружении "немодельных" разрядок. Так "немодельная" разрядка "случайный выброс" наиболее часто случалась при предъявлении системе процесса с разрядкой "сдвиг дисперсии". Очевидно, подобные корреляции обусловлены сходством влияния различных типов разрядок на спектр сигнала.

В целом, рассматриваемая система статистического регулирования процессов успешно справляется с обнаружением и классификацией рассмотренных типов разрядок. На рис. 4. представлены результаты сравнения данной системы с популярными на практике X-S картами Шухарта. Видно, что в обнаружении и классификации "скачка среднего" стандартного гауссового шума рассматриваемая система, в целом, уступает контрольным картам Шухарта. Однако эффективность карт Шухарта существенно зависит от адекватности модели разрядки реальному процессу. На рис. 5. представлены результаты сравнения рассматриваемой системы с X-S картами Шухарта, но уже в случае коррелированного гауссового шума. Видно, что уже в данных условиях рассматриваемая система лучше обнаруживает и классифицирует разрядку даже без переобучения. Кроме того, настройка системы на иной процесс будет заключаться лишь в

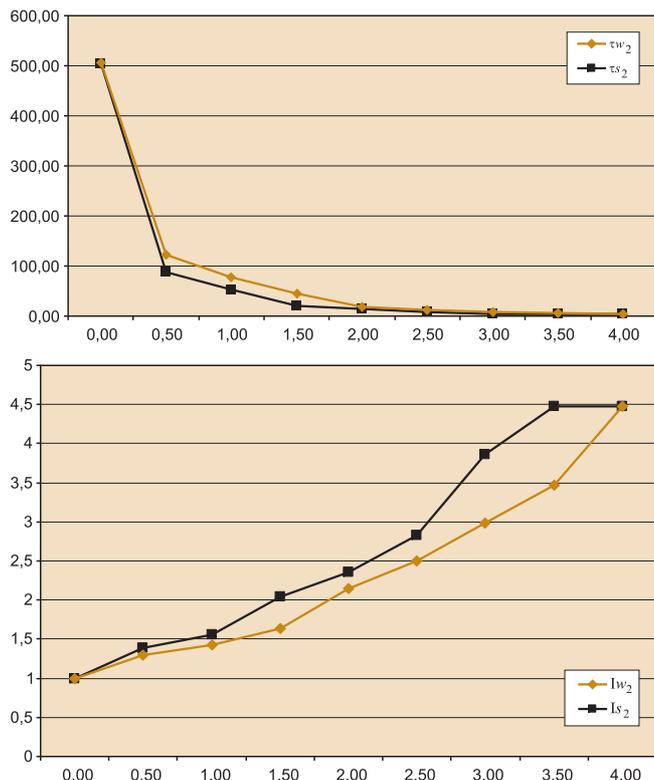


Рис. 4. Зависимости среднего времени запаздывания обнаружения рассматриваемой системы  $\tau_{w_2}$  и X-S карт Шухарта  $\tau_{s_2}$  (верхний) и соответствующих им компромиссных показателей качества (нижний) от величины скачка среднего  $\mu$  при "модельной" разладке

переобучении искусственных нейронных сетей на иных, соответствующих изменившейся ситуации, входных образах, тогда как "переналадка" контрольных карт Шухарта под процесс, отличный от гауссового некоррелированного шума, потребует изменение самого детектора разладки.

Таким образом, предложенная система успешно справляется с обнаружением и классификацией разладки. Немного уступая традиционным методам в обнаружении "модельной" разладки, разработанная система предпочтительнее в тех ситуациях, когда процесс

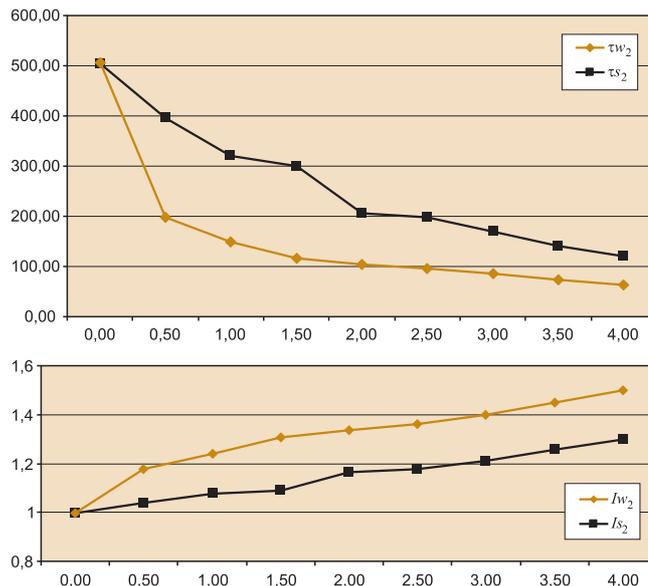


Рис. 5. Зависимости среднего времени запаздывания обнаружения рассматриваемой системы  $\tau_{w_2}$  и X-S карт Шухарта  $\tau_{s_2}$  (верхний) и соответствующих им компромиссных показателей качества (нижний) от величины скачка среднего  $\mu$  при "немодельной" разладке

отличается от заложенной при проектировании модели, что делает ее более робастной и универсальной системой обнаружения и классификации разладки.

**Список литературы**

1. Basseville M., Nikiforov I.V. Detection of Abrupt Changes, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
2. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983.
3. Герасимов А.В., Васильков Ю.В. Обнаружение разладки ТП с использованием аппарата вейвлет-анализа // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20. Сб. трудов XX Международ. науч. конф. Т. 9. Секция 9 / Под общ. ред. В.С. Балакирева. – Ярославль: Яросл. гос. техн. ун-т. 2007.
4. Филаретов Г.Ф., Свириденкова М.А. Применение искусственных нейронных сетей для задач статистического контроля / 42 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, FRG. 1997.

*Герасимов Антон Владимирович – главный специалист департамента информатизации и связи Ярославской области, Васильков Юрий Викторович – д-р техн. наук, проф. Ярославского государственного технического университета.*

*Контактный телефон (4852)72-65-56. E-mail: gerasimovav@yustu.ru myvas@gapm.ru*

*Новогодний калейдоскоп*

*Будь как переливающийся через край фонтан, а не как резервуар, содержащий все одну и ту же воду*

Пауло Коэльо

*Величайшая ошибка, которую люди делают в жизни, это когда они не пытаются жить, делая то, что им больше всего нравится.*

Малькольм С. Форбс