

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ СВЯЗИ

Ануфренко А.В.¹, Гойденко В.К.¹, Гончаренко В.И.^{2,3}, Журавлева Н.Г.²

¹Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский

университет)

fvo@mai.ru

Аннотация: Предложена методика распознавания вида аномального состояния электронных модулей программно-аппаратных комплексов связи больших интегрированных систем на основе вейвлет-преобразования. Разработан алгоритм формирования базы аномальных состояний интегрированных систем и комплексов связи. Проведено моделирование тепловых процессов программно-аппаратных комплексов связи с помощью систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: диагностика технического состояния, программно-аппаратный комплекс связи, вейвлет-анализ.

Введение

При эксплуатации авиационно-космических крупномасштабных организационно-технических комплексов [1], включающих роботизированные комплексы, автономные космические и подводные аппараты, автоматизированные узлы связи и радиоцентры, возрастает актуальность создания методического аппарата диагностики и неразрушающего контроля их технического состояния [2]. В состав современных авиационно-космических крупномасштабных организационно-технических комплексов входит разнообразное радиоэлектронное оборудование, работоспособность которого всегда характеризуется большим числом параметров, контроль которых целесообразно осуществлять в несколько этапов. Для осуществления диагностики и контроля радиоэлектронного оборудования сбор измерительной информации необходимо осуществлять в режиме реального времени, не допуская перехода предаварийного технического состояния радиоэлектронного оборудования в аварию. Целью работы является разработка методики реализации вейвлет-анализа при диагностике состояния интегрированных систем и комплексов связи. Решение задачи контроля и диагностики основано на проведении мониторинга изменения температурных значений элементов. Проведенный анализ существующих способов диагностики и контроля технического

состояния, применяемых в различных отраслях промышленной электроники и электротехники, показал относительно высокую вероятность ошибки при измерении малых отклонений параметров контролируемых объектов от нормы, низкую достоверность результатов идентификации состояний контролируемого объекта, избыточность измерительной информации, относительно большое время поиска неисправности и высокую вероятность отказа в обслуживании [3-10].

1 Постановка задачи

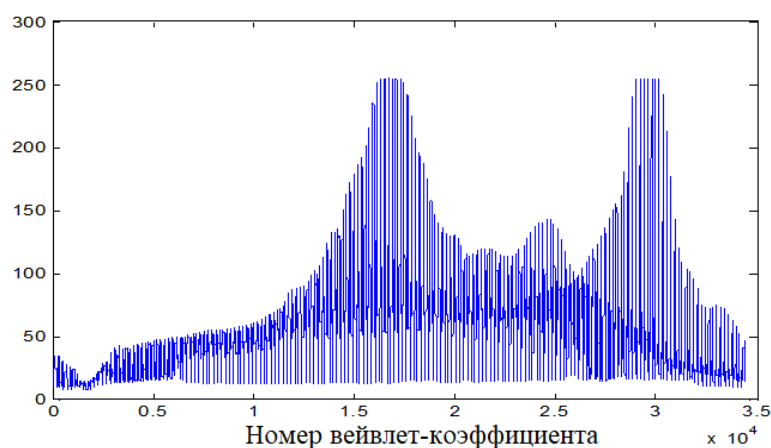
При тепловом контроле технического состояния электронных модулей (ЭМ) программно-аппаратных комплексов связи (ПАКС) больших интегрированных систем текущее состояние будет характеризоваться матрицей большого размера. Так как платы находятся в разных положениях необходимо сегментировать ЭМ ПАКС в тепловых изображениях геометрическим преобразованием и стандартизировать изображения фактического соотношения сторон аффинным преобразованием. Полученные прямоугольные изображения называются *термограммами ЭМ ПАКС* [11]. Пример термограммы ЭМ ПАКС иллюстрируется на рис. 1.

Запись данной термограммы в виде вектор-строки занимает 19200×1 , для создания базы состояний из 100 таких состояний необходима матрица 19200×100 . При распознавании такого количества состояний методом сравнения необходимо значительное количество времени, поэтому необходимо сокращение пространства признаков. И так как после определения выхода температуры за допусковый интервал, определяющим событием изменения технического состояния является не величина превышения порога, а сам факт наличия отклонения, необходимо переходить к анализу частотных параметров термограммы.

Эффективным способом сокращения признакового пространства и сжатия информации является метод вейвлет-преобразований [12]. Поэтому в настоящей работе предлагается использовать вейвлет-преобразования для сжатия и выделения информационных признаков при тепловом контроле технического состояния электронных модулей ПАКС больших интегрированных систем. Иллюстрация термограммы ЭМ ПАКС с полученными примерами вейвлет-коэффициентов представлена на рис. 2.



а) изображение в градациях серого



б) запись в виде вектор-строки

Рис. 1. Термограмма ЭМ ПАКС:

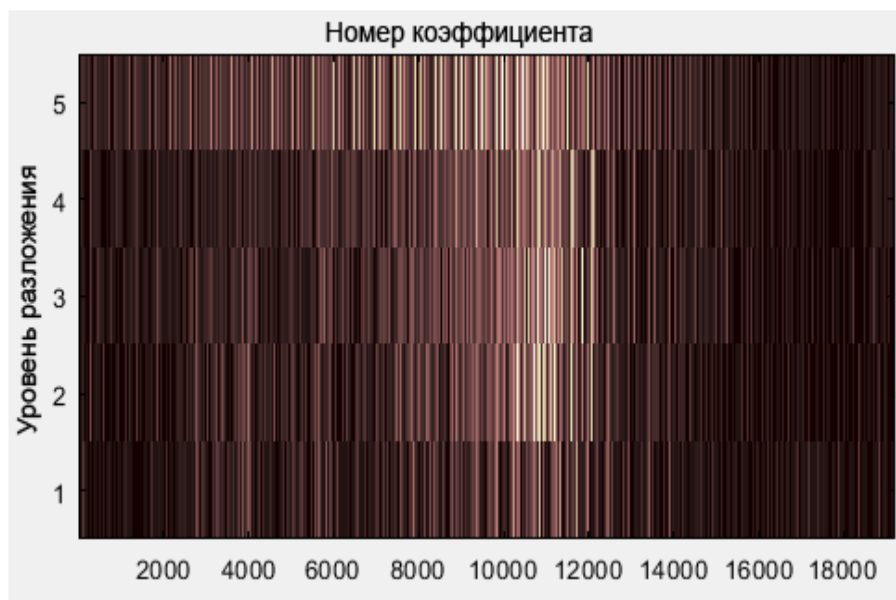


Рис. 2. Вейвлет-коэффициенты термограммы ЭМ ПАКС

Предыдущими исследованиями особенностей применения двухмерного непрерывного и дискретного вейвлет-преобразований сигналов ЦНА [3-10, 13-18] была доказана его эффективность в отношении выявления характера изменения частоты и амплитуды анализируемых частотных составляющих, выраженных изменением интенсивности цвета по длине полос, периодическим возбуждением и затуханием колебаний компонентов совокупного сигнала.

Изучение свойств и особенностей непрерывного и дискретного вейвлет-анализа позволило определить направления дальнейшего исследования методов анализа сигналов [6]. После вейвлет-преобразования производится сжатие признакового пространства с целью выделения информативных признаков из термограммы путем определения порога фильтрации. Полученные после сжатия вейвлет-коэффициенты термограммы приведены на рис. 3.

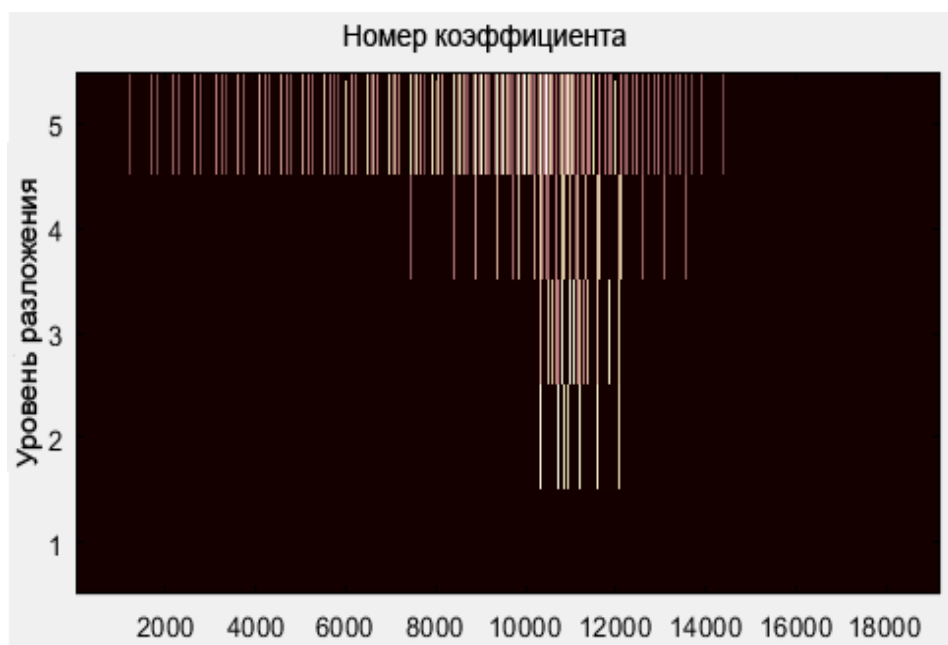


Рис. 3. Вейвлет-коэффициенты термограммы ЭМ ПАКС после сжатия по общему порогу

Анализ различных подходов к решению задачи распознавания вида аномального состояния при анализе тепловых режимов ПАКС на основе вейвлет-преобразования показывает, что задача решается в следующей постановке. **Исходными данными** для решения задачи являются:

- 1) информация о штатном тепловом поведении ПАКС (значения внутренних параметров для различных внешних условий);

- 2) информация, характеризующая основные типы состояний ПАКС при анализе тепловых режимов ПАКС (допусковые интервалы в различных режимах);
- 3) исследуемая измерительная информация, полученная при анализе тепловых режимов ПАКС (различные виды дефектов и отказов);
- 4) частота получения температурных значений элементов ЭМ ПАКС;
- 5) набор ортогональных базисных вейвлет-функций: добеши, симлеты, койфлеты [12].

Необходимо по результатам оценки теплового поведения ПАКС определить принадлежность к типу аномального состояния из библиотеки аномальных состояний. Под *аномальным состоянием* понимается отклонение от номинального режима функционирования, связанное с изменением внешних и внутренних факторов.

2 Использование вейвлет-преобразований для формирования базы состояний

Применение вейвлет-преобразования в данной работе рассматривается с позиций использования его как инструмента, с помощью которого можно получить признаковое пространство для последующего распознавания. Выбор инструмента дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) для решения задач распознавания и классификации обусловлен универсальностью математического аппарата вейвлет-анализа, способностью его адаптироваться к форме сигнала [12].

Результаты проведенных исследований показали, что выбор анализирующего вейвлета во многом определяется тем, какую информацию необходимо извлечь из сигнала. С учетом характерных особенностей различных вейвлетов во временном и в частотном пространстве, можно выявлять в анализируемых сигналах те или иные свойства и особенности, которые незаметны при наличии шумов.

При анализе любого сигнала надо, прежде всего, выбрать соответствующий базис, т. е. систему функций, которые будут играть роль «функциональных координат». Однако выбор анализирующего вейвлета не определен заранее. Его следует выбирать в соответствии с решаемой задачей. Простота оперирования с вейвлетом и представления результатов (минимизация используемых параметров) играет важную роль. Неудачный выбор конкретной формы вейвлета может привести к невозможности решения задачи или высокой погрешности, а, следовательно, к неверному определению вида технического состояния ПАКС.

Выбор типа базисной функции из числа применяемых базисов в общем случае зависит от степени адекватности функции и выборки. Количественно, степень оптимальности выбора можно определить по критерию энтропии [12, 16].

В качестве критерия выбора оптимального базиса разложения примем критерий энтропии Шеннона, который количественно характеризует достоверность передаваемого сигнала и используется для расчета количества информации. Энтропия, определенная по формуле Шеннона, дает критерий того, сколько эффективных компонент необходимо, чтобы представить сигнал в определенном базисе.

В качестве критерия выбора оптимального базиса разложения примем критерий энтропии Шеннона, который количественно характеризует достоверность передаваемого сигнала и используется для расчета количества информации. Энтропия, определенная по формуле Шеннона (1), является критерием того, сколько эффективных компонент необходимо, чтобы представить сигнал в определенном базисе [12, 16]:

$$(1) \quad El = \exp\left(-\sum_{mk} |d_{m,k}|^2 \log_2 |d_{m,k}|^2\right),$$

где $d_{j,k}$ – k -й коэффициент вейвлет-разложения уровня j , j_{max} – максимальный уровень разложения, L_j – количество коэффициентов разложения на j -м уровне.

Для задач распознавания и классификации вида аномального состояния, обоснование оптимальности выбора затруднено ввиду отсутствия моделей сигналов, поэтому для анализа выбран базис Хаара [16], имеющий хорошую локализацию во временной области и наименьшую длину фильтров h_m и g_m .

При использовании в качестве базовой функции ортогонального вейвлета выбор множества масштабов ограничен фиксированным дискретным набором шкал, и в этом случае можно применить правило квантования масштабирующей переменной [11, 16].

Оценить требуемый масштаб вейвлет-функции по имеющимся данным можно, используя геометрические свойства объекта контроля. Используя центр $\langle \omega \rangle$ и радиус частотного окна Δ_ψ

базового вейвлета, частоту получения температурной информации f_d , максимальную частоту изменения параметра f_p получено выражение для расчета максимального уровня разложения, который использовался для фильтрации измерений

$$j_{\max} = \text{int} \left(\log_{a_0} \frac{\langle \omega \rangle f_d}{f_p} \right)$$

В случае использования дискретного вейвлет-преобразования моноимпульсного сигнала, размер выборки которого мал, а также с учетом малого числа коэффициентов фильтра, значение максимального уровня разложения целесообразно выбрать максимально возможным, при условии, что размер выборки максимального уровня больше длины фильтра (базис Хаара представлен двумя коэффициентами) [16].

Ввиду малого объема выборки импульсного сигнала интегральная оценка коэффициентов уровней разложения оказывается малоэффективной, и не несет информации об общности свойств видов аномального состояния. Поэтому для построения признакового пространства используется анализ одноименных коэффициентов для каждого уровня каждого вида аномального состояния. При этом коэффициенты разложения каждого сигнала формируются в матрицу:

$$(2) \quad C_{\omega} = \begin{bmatrix} cA_{1,1} & cA_{2,1} & \dots & cA_{n,1} & \dots & cA_{M,1} & cD_{1,1} & cD_{2,1} & \dots & cD_{n,1} & \dots & cD_{M,1} \\ cA_{1,2} & cA_{2,2} & \dots & cA_{n,2} & \dots & cA_{M,2} & cD_{1,2} & cD_{2,2} & \dots & cD_{n,2} & \dots & cD_{M,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ cA_{1,j} & cA_{2,j} & \dots & cA_{n,j} & \dots & cA_{M,j} & cD_{1,j} & cD_{2,j} & \dots & cD_{n,j} & \dots & cD_{M,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ cA_{1,k} & cA_{2,k} & \dots & cA_{n,k} & \dots & cA_{M,k} & cD_{1,k} & cD_{2,k} & \dots & cD_{n,k} & \dots & cD_{M,k} \end{bmatrix},$$

где каждая строка представлена совокупностью векторов коэффициентов всех уровней разложения, включая аппроксимирующие ($cA_{i,j}$) и детализирующие $cD_{i,j}$ векторы коэффициентов.

При этом размерность матрицы $m \times k$ определяется количеством коэффициентов разложения

$$m = N_s + \sum_{i=1}^{M-1} \frac{N_s}{2^i},$$

где N_s - размер исходной выборки, и количеством объектов k , входящих в класс.

В этом случае избыточность преобразования возникает из-за наличия коэффициентов промежуточных уровней разложения $cA_{i,j}$. Векторы-столбцы матрицы (2) представляют собой вариации значений одноименных коэффициентов, которые необходимо рассматривать как случайные величины.

Для использования одноименных коэффициентов как элементов априорного словаря, необходимо решить следующие, в общем случае, связанные задачи: понижение размерности признакового пространства; нахождение информативных признаков, отражающих общность свойств типов аварийной ситуации; нахождению среди информативных признаков тех, которые обеспечивают наибольшую контрастность типов. Для оценки информативности коэффициентов использовались следующие статистические характеристики:

$$\text{выборочное среднее } \overline{C}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k c_{n,i},$$

где n - порядковый номер коэффициента;

приведенная выборочная дисперсия

$$\overline{\sigma}_{m,n}^2 = \frac{1}{(k-1)C_n} \sum_{j=1}^k (c_{n,j} - \overline{C}_n)^2;$$

диапазон максимальных и минимальных значений

$$C_{\max,n} = \max(C_n), \quad C_{\min,n} = \min(C_n);$$

оценка доверительного интервала t-распределения

$$\bar{C}_n - t_{k-1} \frac{\sigma_n}{\sqrt{k}} \leq \mu_n \leq \bar{C}_n + t_{k-1} \frac{\sigma_n}{\sqrt{k}};$$

значение параметра принадлежности, определяемого по правилу

$$(3) \quad P_n = \begin{cases} 1, C_{\max,n} > 0 \cap C_{\min,n} > 0, \\ -1, C_{\max,n} < 0 \cap C_{\min,n} < 0, \\ 0, C_{\max,n} > 0 \cap C_{\min,n} < 0, \end{cases}$$

и значение параметра принадлежности с учетом доверительного интервала, рассчитываемого по формуле (3), с заменой величин C_{\max} , C_{\min} на соответствующие границы доверительного интервала.

Информативность вейвлет-коэффициентов будет выше при высоких значениях выборочного среднего, минимальной приведенной выборочной дисперсии, малым диапазоном $C_{\max} \div C_{\min}$, а также отличным от нуля параметра принадлежности. При этом каждый приведенный показатель случайной величины представляет собой степень свободы в оценке информативности, так как показатели в общем случае могут быть независимыми. Это несколько усложняет процесс отбора, заставляя применять различные стратегии.

Для упрощения оценок целесообразно произвести учет взаимовлияния показателей, с целью выбора минимума критериев информативности. Значение доверительного интервала в оценке информативности можно использовать в том случае, когда коэффициенты, прошедшие отбор, не обеспечивают необходимой контрастности классов. В общем случае это повышает вероятность ошибки классификации, однако позволяет внести коррективы в оценку диапазона $C_{\max} \div C_{\min}$, что в конечном итоге увеличивает расстояние между типами аномальной ситуации.

Для решения задачи разработки решающего правила при определении вида технического состояния объекта контроля (ПАКС) необходимо найти такие коэффициенты в выбранном множестве, которые обеспечивали бы наибольшую контрастность между образами априорного множества типов аномальной ситуации [2].

При этом возможны два подхода к решению: если контрастность типов достаточна для нахождения линейных границ d_1, d_2, \dots, d_w для каждого из типов по отношению к остальным, либо такая граница находится только для двух соседних типов в виде $d_{1,2}, d_{2,3}, d_{1,3}, \dots, d_{i,j}, i \neq j$. В этом случае можно утверждать, что типы линейно разделимы. Если же граница между типами аварийной ситуации нелинейна, то это в общем случае говорит о невозможности классификации, либо о неэффективности ДВП в частном случае.

3 Алгоритм формирования базы состояний

Для реализации возможности распознавания технического состояния ПАКС при выходе температурных значений за пределы допусковых интервалов создается база состояний из множества предполагаемых воздействий внешних факторов и возможных дефектов. При этом условно можно выделить аномальные состояния («предотказное» и «отказ») [2]. База аномальных состояний представляет собой множество вейвлет-коэффициентов термограмм ПАКС, полученных путем моделирования, каждая из которых соответствует аномальному состоянию или дефекту.

Термограмму базы состояний предложено формировать следующим образом: в математическую модель ПАКС отображается изменение, которое соответствует дефекту или аномальному состоянию, далее получают термограмму, которая отражает это состояние. Следовательно, полученная термограмма такой измененной модели будет соответствовать состоянию ПАКС, в котором имеется именно этот дефект, именно в этом элементе. После чего производится вейвлет-преобразование и полученные вейвлет-коэффициенты сохраняются. Таким способом получают вейвлет-коэффициенты для всех дефектов, свойственных данному ПАКС. Моделирование тепловых процессов ПАКС предложено выполнять с помощью систем автоматизированного проектирования, подавая на вход модель ПАКС, а на выходе, получая термограмму или значения температур элементов [19]. Затем производится вейвлет-преобразование полученной термограммы для сохранения вейвлет-коэффициентов. Разработанный алгоритм формирования базы аномальных состояний приведен на рис. 4.

Шаг 1. Начало работы.

Шаг 2. Учитывая условия эксплуатации и воздействие внешних факторов, составляют список параметров для различных состояний.

Шаг 3. На основе статистики отказов определяют параметры для состояний с различными видами дефектов.

Шаг 4. На основе сформированных параметров проводится моделирование термограмм состояний ПАКС.

Шаг 5. Выполняется вейвлет-преобразование смоделированной термограммы технического состояния, сокращения признакового пространства.

Шаг 6. Полученные вейвлет-коэффициенты для смоделированного аномального состояния сохраняются в базу состояний.

Шаг 7. Если все данные согласно списку аномальных состояний и дефектов сохранены, то переход к шагу 8.

Шаг 8. Вывод информации о том, что моделирование аномальных состояний завершено.

Таким образом, перебирая список аномальных состояний (*шаг 4-7*), свойственных данному ПАКС, получают множество вейвлет-коэффициентов для каждого состояния [20]. Элемент списка состояний (4) q^F_j состоит из:

- а) порядкового номера элемента в ПАКС,
- б) параметров, отражающих дефект и необходимость их изменения:

$$(4) \quad Q^F = (q^F_1 \dots q^F_j \dots q^F_n),$$

где Q^F – множество дефектов контролируемого ПАКС (список дефектов), q^F_j – определенный дефект заданного элемента ПАКС.

В результате получается множество вейвлет-коэффициентов термограмм $C(R_M)$ ПАКС, каждые из которых соответствует одному из аномальных состояний:

$$(5) \quad C(R_M) = (C(R_M^1), \dots, C(R_M^n), C(R_M^{\text{норм}})),$$

где $C(R_M^n)$ – вейвлет-коэффициенты термограммы, полученные при моделировании тепловых процессов ПАКС, которые соответствует аномальному состоянию с параметрами q^F_j .

При использовании базы состояний для распознавания состояния ПАКС вейвлет-коэффициенты из базы состояний сравниваются с вейвлет-коэффициентами полученной термограммы ПАКС в текущий момент.

В общем случае базу состояний ПАКС получают путем экспериментальных исследований (на основе проведения производственных испытаний объекта контроля (опытного образца изделия)) на заводе-изготовителе. Выбирается один образец с самыми близкими показателями к идеальному или несколько образцов. Далее в образец вносят дефект из списка дефектов Q^F (4) и проводят измерение температур в стационарном режиме. Пример термограммы ЭМ ПАКС с отказом иллюстрируется на рис. 5.

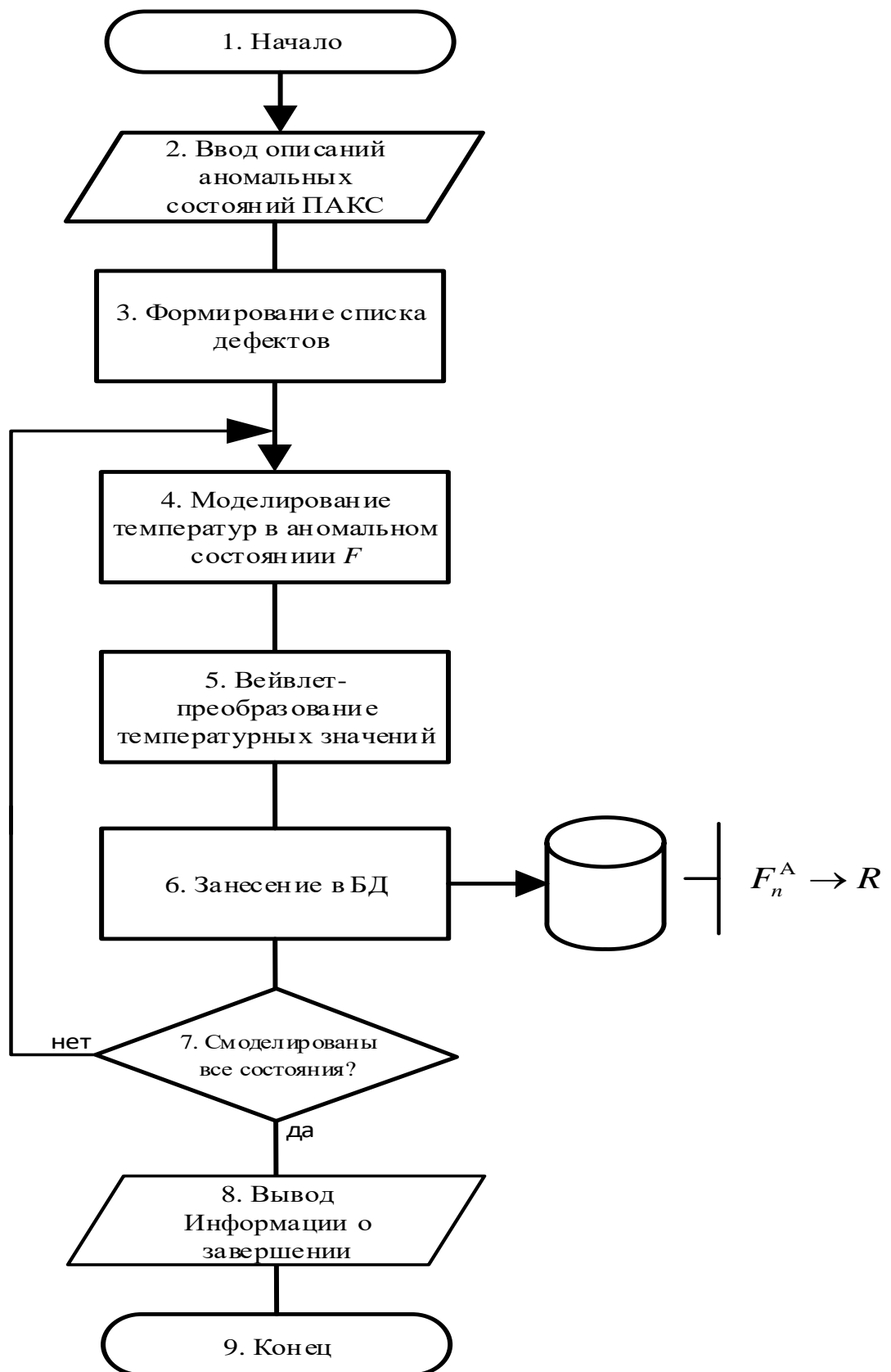
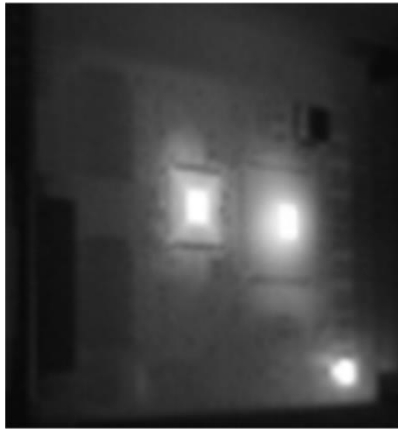
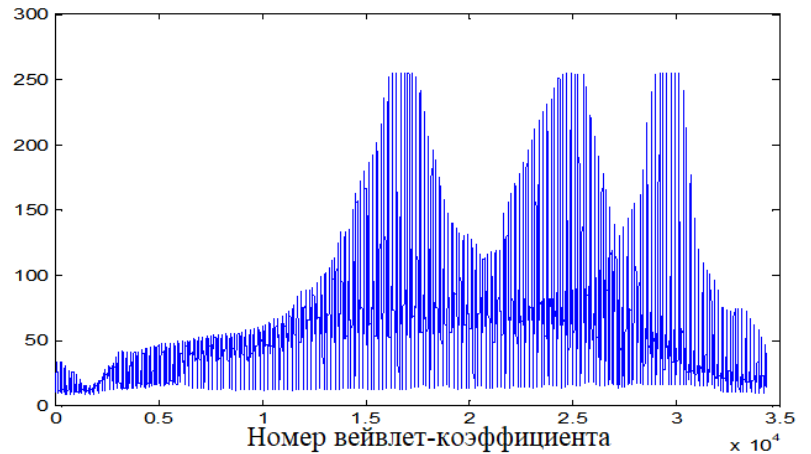


Рис. 4. Алгоритм формирования базы аномальных состояний



а) изображение в градациях серого



б) запись в виде вектор-строки

Рис. 5. Термограмма ЭМ ПАКС с отказом

Устраняют дефект, приводя образец в первоначальное состояние, далее, проводят то же самое с другими дефектами из Q^F (4) и т. д. В результате получают (6). Такой способ получения базы состояний очень трудоемкий. Поэтому, предложенный способ с использованием вейвлет-преобразований более предпочтительный.

$$(6) \quad T_M = (T_M^1, \dots, T_M^n, T_M^{\text{норм}}),$$

где T_M^n – состоит из n множеств. Каждому j -ому множеству T_M^{oj} соответствует производственный дефект q_j^F , где $j=1, n+1$.

$$(7) \quad T_M^j = (T_{M1}^j, T_{M2}^j, \dots, T_{Mk}^j),$$

где T_{M2}^j – значение температуры на элементе №2, полученное из моделированной термограммы R_M^j , соответствующей j -ому дефекту списка (4).

$$(8) \quad T_{\text{и}}(t) = (T_1(t), T_2(t), \dots, T_k(t)),$$

где $T_{\text{и}}(t)$ – множество измеренных температур контролируемых ЭМ ПАКС, $T_2(t)$ – значение температуры ПАКС на элементе №2.

Заключение

Результаты исследования показывают, что для осуществления теплового контроля электронных модулей программно-аппаратных комплексов связи больших интегрированных систем использование аппарат вейвлет-преобразования обеспечивает повышение достоверности результатов идентификации и чувствительности к обнаружению аварийных ситуаций.

Литература

1. Vasilyev S., Tsvirkun A. Problems of managing the development of large-scale systems in modern conditions // Proceedings of 2017 10th International Conference Management of Large-Scale System Development, MLSD 2017. 10. 2017. С. 8109703.
2. Будко П.А., Винограденко А.М., Гойденко В.К. Методика теплового диагностирования и контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования // Научные технологии в космических исследованиях земли. 2019. Т. 11. № 1. С. 12-20.
3. Диагностика технических устройств / [Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 615 с.
4. Беляев А. И., Овсянников А. Ю., Лапковский К.А., Дорофеев Е. А. Вейвлет-преобразования как метод диагностики энергетических машин // Инженерный вестник Дона, №4 (2015). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3464.
5. Куликов Г. Б., Семеновых В. Н. Методика диагностики технического состояния систем привода полиграфического оборудования с использованием вейвлет-преобразования //

- Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2012. № 4. С. 32-40.
6. *Закирничная М.М., Корнишин Д.В.* Критерии оценки технического состояния центробежного насосного оборудования с применением трехмерного вейвлет-анализа // *Машины и аппараты*. 2015, т. 13, № 2. С. 151-156.
 7. *Шиндор О.В.* Методика контроля критических режимов работы высокоэнергетических установок на основе вейвлет-анализа их нестационарных флуктуационных и шумовых сигналов: дис. ... канд. техн. наук: Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева. - 2015. - 164 с.
 8. *Синельщиков П. В.* Информационно-измерительная система для диагностирования электроприводной арматуры атомных станций на основе вейвлет-преобразования: автореферат дис. ... канд. техн. наук: Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т. 2011. - 18 с.
 9. *Abramov O.V., Dimitrov B.N.* Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // *Reliability: Theory&Application*. 2017. Vol. 12. No. 4 (47). Pp. 39-48.
 10. *Abramov O.V.* Choosing Optimal Values of Tuning Parameters for Technical Devices and Systems // *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77. No. 4. Pp. 594-603.
 11. *Сулейманов С. П., Долматов А.В., Увайсов С.У.* Характерные дефекты печатных узлов, приводящие к нарушению тепловых режимов комплектующих элементов // *Информационные технологии в проектировании, производстве и образовании: сб. тр. Российской научно-технической конференции*. – Ковров: КГТА, 2002. С. 84-90.
 12. *Воробьев В. И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб.: ВУС, 1999. – 274 с.
 13. *Ryvkin S., Rozhnov A., Lobanov I.* Convergence of technologies of the evolving prototype of an energy efficient large-scale system / *Proceedings of the 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA 2018, Bourgas, Bulgaria)*. Bourgas, Bulgaria: IEEE, 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8447067>.
 14. *Volkov A.G., Nechaev V.V., Goncharenko V.I., Lobanov I.A.* Models and algorithms for a spacecrafts technical state prediction based on information technologies // *Proceedings of the II International scientific conference "Convergent cognitive information technologies" (Convergent'2017)*, Moscow, Russia, November 24-26, 2017. P. 245-254. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper29.pdf>.
 15. *Goncharenko, V.I., Lebedev, G.N., Mikhailin, D.A., Khakhulin, G.F.* Continuous Flight Safety Management Information System for a Group of Converging Aircraft // *Russian Aeronautics*. April 2018, Volume 61, Issue 2, pp 271–278. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068799818020174>. DOI: 10.3103/S1068799818020174.
 16. *Гончаренко В. И., Кучерявенко Д. С., Гойденко В.К., Скорик Н. А.* Распознавание типа аварийной ситуации при испытании беспилотного космического аппарата на основе использования вейвлет-преобразования // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2016. № 1. С. 39-48.
 17. *Волков А. Г., Гончаренко В. И., Журавлева Н. Г., Иконников М. А.* Вероятностная нейронная сеть принятия решения контура структурного управления сложного динамического объекта // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2017. № 7. С. 66-72.
 18. *Волков А. Г., Гончаренко В. И., Горелов С. В.* Оценка параметров технического состояния робототехнического комплекса на основе адаптивной нейронечёткой шкалы / *Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва)*. М.: ИПУ РАН, 2018. Т. 2. С. 280-285.
 19. *Шалумов А.С.* Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 368 с.
 20. *Долматов А.В., Сулейманов С. П., Увайсов С.У., Алкадарский С.У.* Программно-методический инструментарий мониторинга производственных дефектов радиотехнических устройств // *Надежность и качество: труды Международного симпозиума*. 2005. Т. 1. С. 335-336.