

УДК 519.24:621.3.04

О ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ КАЧЕСТВА ДИОДНЫХ МАТРИЦ

© В. И. Орлов¹, Н. А. Сергеева², Е. А. Чжан²*Статья поступила 8 августа 2014 г.*

Рассмотрена задача диагностики качества электрорадиоизделий по результатам испытаний неразрушающего контроля. Приведен пример группировки диодных матриц по данным испытаний электротермотренировки. Установлено, что диоды одной матрицы могут быть отнесены к двум группам. Данное заключение позволило оптимизировать ведение технологического процесса изготовления диодов в рамках технологического регламента.

Ключевые слова: диагностика; электрорадиоизделия; диодная матрица; группировка; испытания электротермотренировки; технологический регламент.

Современные космические аппараты содержат до 200 тыс. изделий электронной компонентной базы — различные транзисторы, диоды, диодные матрицы и др. Нарушение работы одного из них может вывести из строя канал или блок космического аппарата. При диагностике электрорадиоизделий (ЭРИ) необходимо учитывать область их применения — космическое или наземное. При использовании ЭРИ в астродатчиках, гироскопах и бортовых компьютерах космических аппаратов особенно важна точная оценка их надежности, поскольку исключена возможность их замены или ремонта во время эксплуатации. Поэтому задачи опре-

деления качества, а следовательно, и срока службы изделия особенно актуальны на сегодняшний день [1].

В большинстве случаев отказ ЭРИ происходит под воздействием внешних возмущающих воздействий, таких как вибрация, резкие перепады температур, радиация и т.д. Испытания электротермотренировки (ЭТТ) являются эффективным средством выявления дефектов ЭРИ. ЭТТ — испытание воздействием температуры в сочетании с электрической нагрузкой, проводимое с целью выявления изделия со скрытыми дефектами [2].

В качестве примера диагностики ЭРИ рассмотрим результаты дополнительных отбраковочных испытаний ЭТТ диодных матриц 2ДС627А.

Технические характеристики диодных матриц. Диодные матрицы 2ДС627А состоят из восьми крем-

¹ ОАО «Испытательный технический центр — НПО ПМ», г. Железногорск, Красноярский край, Россия.

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия; e-mail: ekach@list.ru

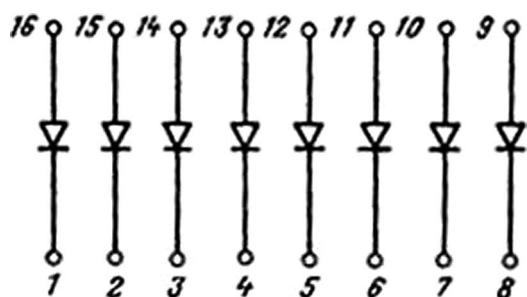


Рис. 1. Электрическая схема диодной матрицы 2ДС627А

ниевых эпитаксиально-планарных диодов с отдельными выводами; диапазон их рабочих температур — от -60 до $+125$ °С. Матрицы предназначены для использования в коммутаторах тока и других импульсных схемах, аппаратуре специального назначения. Электрическая принципиальная схема диодной матрицы 2ДС627А приведена на рис. 1: аноды диодов соединены с выводами 1–8, катоды — с выводами 9–16. Нумерация соединения выводов с электродами показана условно.

Для партии диодных матриц 2ДС627А до и после испытаний ЭТТ определялся ряд показателей (табл. 1). Постоянное прямое напряжение измерялось в одном режиме (обозначен «звездочкой»), прямая вольтамперная характеристика — в восьми разных режимах (№ 1–8).

Поскольку каждая матрица состоит из восьми диодов с отдельными выводами, то каждая характеристика измерялась восемь раз, т.е. для каждого диода в отдельности. Например, x_1 — значение постоянного прямого напряжения, измеренного в режиме *, диода № 1.

Возникает задача разделения диодных матриц на группы со сходными значениями признаков — тестов по результатам испытаний до и после ЭТТ. Каждый тест — это результаты измерения определенного параметра в заданном режиме. Необходимо отметить, что согласно требованиям стандарта все матрицы являются годными. В результате испытаний диодных матриц мы располагаем матрицей наблюдений соответствующих переменных $x_1, x_1, \dots, x_{72}$. В этой связи рас-

смотрим задачи непараметрического оценивания кривой регрессии и плотности вероятности по результатам наблюдений, которые возникают при разработке компьютерной системы диагностики изделий электронной техники.

Непараметрические оценки функции регрессии и плотности распределения вероятности. Пусть $\{u_i, x_i, i = 1, s\}$ — выборка из s статистически независимых наблюдений многомерной случайной величины $(U^j, X), j = 1, m$ [3]. На первом этапе для восстановления $x(u) \forall u \in \Omega(u)$, где $\Omega(u)$ — область определения случайной величины U , примем статистику

$$\hat{x}(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)]}{\prod_{j=1}^m \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)]}, \quad (1)$$

где s — объем выборки; параметр размытости ядра c_s и колоколообразная функция $\Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)]$ удовлетворяют следующим условиям сходимости:

$$\begin{aligned} c_s > 0; \lim_{s \rightarrow \infty} c_s &= 0; \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)] \geq 0; \\ c_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)] du^j &= 1; \lim_{s \rightarrow \infty} s c_s^m = \infty; \\ \lim_{s \rightarrow \infty} c_s^{-1} \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)] &= \delta(u^j - u_i^j). \end{aligned} \quad (2)$$

В качестве колоколообразной функции $\Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)]$ может быть использовано параболическое ядро

$$\Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)] = \begin{cases} 0,75\{1 - [c_s^{-1}(u^j - u_i^j)]^2\}, & \text{если } |c_s^{-1}(u^j - u_i^j)| \leq 1, \\ 0, & \text{если } |c_s^{-1}(u^j - u_i^j)| > 1. \end{cases} \quad (3)$$

О качестве полученной модели (1) будем судить по ошибке аппроксимации

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_s^i - x_i)^2}. \quad (4)$$

Таблица 1. Режимы измерения характеристик

Контролируемые параметры	Номер режима	Режимы измерения	Нормы контролируемых параметров		Обозначение переменных
			не менее	не более	
Постоянное прямое напряжение	*	200 мА	0,85 В	1,15 В	$x_1, x_2, \dots, x_8$
Прямая вольтамперная характеристика	1	100 нА	100 мВ	250 мВ	$x_9, x_{10}, \dots, x_{16}$
	2	1 мкА	200 мВ	350 мВ	$x_{17}, x_{18}, \dots, x_{24}$
	3	10 мкА	300 мВ	450 мВ	$x_{25}, x_{26}, \dots, x_{32}$
	4	100 мкА	400 мВ	550 мВ	$x_{33}, x_{34}, \dots, x_{40}$
	5	1 мА	500 мВ	650 мВ	$x_{41}, x_{42}, \dots, x_{48}$
	6	10 мА	650 мВ	750 мВ	$x_{49}, x_{50}, \dots, x_{56}$
	7	100 мА	800 мВ	1,00 В	$x_{57}, x_{58}, \dots, x_{64}$
	8	200 мА	850 мВ	1,15 В	$x_{65}, x_{66}, \dots, x_{72}$

Использование непараметрических оценок позволяет избежать этапа выбора параметрической структуры зависимостей, что на предварительном этапе значительно сокращает время исследования.

В большинстве практических задач плотность распределения случайной величины неизвестна, поэтому будем ее оценивать с помощью средств непараметрической статистики:

$$p(x) = \frac{1}{s c_s^m} \sum_{i=1}^s \Phi[c_s^{-1}(x - x_i)] \prod_{j=1}^m \Phi[c_s^{-1}(u^j - u_i^j)], \quad (5)$$

где параметр размытости ядра c_s и колоколообразная функция $\Phi[c_s^{-1}(x - x_i)]$ удовлетворяют условиям сходимости (2).

Задача распознавания образов при диагностике ЭРИ. Пусть имеется выборка изделий $\{u_1^i, \dots, u_m^i, i = \overline{1, s}\}$ объемом s , каждое из которых характеризуется значениями вектора признаков $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)$, полученных в результате испытаний. Рассмотрим задачу распознавания образов без учителя (таксономии), т.е. когда отсутствуют указания относительно количества классов или принадлежности изделия к тому или иному классу. Выборку изделий необходимо разделить на группы таким образом, чтобы элементы одной группы имели схожие значения признаков, а элементы разных групп отличались друг от друга [4].

При эксплуатации ЭРИ в космических аппаратах нет возможности получить информацию о конкретном изделии, возникновении неисправности, выходе из строя, дефектах, возникших в процессе эксплуатации. При разработке алгоритмов для компьютерной системы диагностики изделий электронной техники целесообразно использовать алгоритмы решения задачи таксономии.

Алгоритм решения задачи таксономии. На первоначальном этапе целесообразно провести нормирование и центрирование данных, чтобы привести все значения признаков $u_1, \dots, u_m$ к единому интервалу, так как их шкалы измерения могут иметь различные значения. Затем следует вычислить все расстояния между элементами выборки с помощью выбранной метрики. В данном случае было выбрано Евклидово расстояние. Формула многомерного расстояния $d(u^i, u^j)$ между точками u_i и u_j имеет вид

$$d(u^i, u^j) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (u_i^i - u_i^j)^2}. \quad (6)$$

На следующем этапе необходимо построить гистограмму распределения полученных расстояний. На гистограмме можно увидеть значения минимального и максимального расстояний между объектами.

Приведем алгоритм группировки ЭРИ.

1. Из общего объема выборки s выделяем 20 % точек, расстояния между которыми наименьшие. Такую выборку будем называть «малой». Объем «ма-

лой» выборки определяется исследователем. Если расстояние $d(u^i, u^j)$ между точками u^i и u^j достаточно мало по сравнению с остальными, т.е. $d(u^i, u^j) < \Delta_1$, то такие точки отнесем к одной группе. Таким образом будем находить центры групп; если в выборке их существует несколько, то соответствующее количество центров будет выделено. В результате в данную «малую» выборку могут попасть точки из нескольких групп.

2. Выделяем группы в «малой» выборке. Для произвольной точки находим все точки из «малой» выборки, расстояния до которых меньше Δ_1 , т.е. $d(u^i, u^j) < \Delta_1$. Затем продельваем данную процедуру относительно всех найденных точек. После того как нашли все точки, расстояния между которыми меньше Δ_1 , объединяем их в группу. Изымаем эти точки из «малой» выборки и исключаем их из рассмотрения. С помощью данного алгоритма группируем все оставшиеся точки «малой» выборки. Таким образом, получим группы, для каждой из которых вычисляем координаты центра как среднее арифметическое значений по каждому признаку всех точек группы.

3. Рассмотрим оставшуюся выборку (80 % точек от общего числа). Если расстояние от центра группы до точки выборки меньше Δ_2 , то считаем, что точка принадлежит данной группе. Такую операцию проводим относительно каждого центра группы.

После деления на группы могут остаться точки, которые не принадлежат ни одной из групп.

Таким образом, для решения задачи распознавания с помощью предлагаемого алгоритма необходимо настроить два параметра группировки — Δ_1 и Δ_2 . От значения параметра Δ_1 зависит число групп, от параметра Δ_2 — «радиус» групп. Параметры алгоритма Δ_1 и Δ_2 должны удовлетворять следующему условию:

$$d_{\min} < \Delta_1 < \Delta_2 < d_{\max}, \quad (7)$$

где $d_{\min}$ и $d_{\max}$ — минимальное и максимальное значения расстояний. Значение минимального и максимального расстояний между точками можно увидеть на гистограмме распределения.

На рис. 2 показан случай для двумерного вектора признаков $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$. Здесь по оси абсцисс отложены значения параметра u_1 , а по оси ординат — u_2 . В данном случае задача таксономии решается в двумерном пространстве, поэтому визуально легко поверить правильность работы алгоритма. В результаты были выделены три группы (показаны разными цветами), а также точки, не принадлежащие ни одной из групп (отмечены квадратами). Такие точки будем называть пограничными.

В нашем случае выборку электрорадиоизделий необходимо разделить на группы по результатам испытания электротермотренировки. Все изделия отвечают требованиям стандарта, поэтому следует разделить имеющиеся матрицы на классы «высокого» и «среднего» качества. Число классов может быть раз-

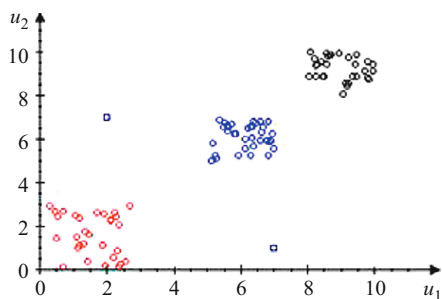


Рис. 2. Пример работы алгоритма

личным, однако всегда будут присутствовать точки, которые сложно отнести к какому-либо классу. Они могут возникнуть вследствие ошибки измерения, отличающейся технологией изготовления ЭРИ в рамках технологического регламента. Результаты диагностики позволяют и далее решать проблемы по оптимизации технологического процесса производства ЭРИ заданного качества «внутри» технологического регламента.

Анализ результатов испытаний ЭТТ для диодных матриц 2ДС627А. На предварительном этапе оценивалось наличие линейных зависимостей между различными переменными с помощью коэффициента корреляции [5]. Судя по значениям коэффициентов корреляции, рассчитанных попарно для каждого теста, можно сделать вывод, что между некоторыми переменными существует тесная линейная связь, например, между переменными $x_1, x_2, \dots, x_8$ (значениями постоянного прямого напряжения для диодов № 1 – 8 матрицы), x_1 и $x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}$ — переменными постоянного тока (диод № 1) и прямой вольтамперной характеристики (режим 1, диоды № 5 – 8). При этом результаты измерений тех же характеристик в том же режиме для других диодов (№ 1 – 4) оказались линейно независимы — x_1 и $x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}$.

Теперь восстановим зависимости между переменными с помощью непараметрической оценки регрессии (1): если значение ошибки (4) будет мало, то можно сделать вывод, что между переменными существует нелинейная связь. Естественно, если значение коэффициента корреляции близко к единице, то ошибка (4) будет близка к нулю. Так, при восстановлении зависимости $\hat{x}_{15} = f(x_1)$ ошибка аппроксимации и коэффициент корреляции приняли следующие значения: $\sigma = 0,027$, $r_{x_1 x_{15}} = 0,998$. При коэффициенте корреляции, близком к единице, зависимость линейна, график такой зависимости можно аппроксимировать прямой.

При проведении анализа данных наличие нелинейных зависимостей между характеристиками обнаружено не было. Например, ошибка восстановления зависимостей $\hat{x}_9 = f(x_{11})$ составила 0,997.

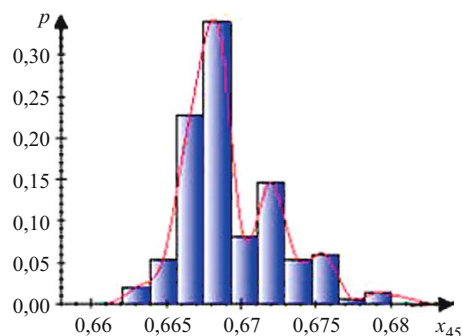
Как уже говорилось выше, диодная матрица состоит из восьми диодов, тем не менее испытания проводились для каждого диода в отдельности. Если

разность результатов тестов до и после ЭТТ (значение дрейфа) для диода имеет небольшое значение, коэффициент корреляции для таких тестов близок к единице, то можно сказать, что диод устойчив. В рассматриваемом случае пять из восьми диодов оказались устойчивыми к испытаниям ЭТТ, а три диода — неустойчивыми. Это может быть свидетельством того, что диоды принадлежат разным партиям, произведены по одному технологическому регламенту, но в разное время или на разных технологических линиях и др. В данном случае рассматривается задача таксономии диодных матриц, однако на предварительном этапе было выявлено, что диоды матрицы можно разделить на две группы. Для изготовителя электрорадиоизделий, в частности диодов, может представлять интерес задача таксономии диодов с целью повышения их качества. В этом случае необходимо переформировать матрицу наблюдений результатов измерения характеристик (см. табл. 1). Каждый показатель измерялся восемь раз для каждого диода; диоды изолированы, поэтому их группировка проводилась не по 72 показателям, а по девяти: постоянное прямое напряжение, режим *, прямая вольтамперная характеристика, восемь разных режимов (см. табл. 1). Таким образом, объем выборки увеличился в восемь раз, а размерность показателей уменьшилась в восемь раз.

Результаты решения задачи распознавания образов при диагностике диодных матриц. Необходимо выделить классы среди диодных матриц по результатам измерения 72 переменных, объем выборки $s = 150$. На предварительном этапе группировка проводилась с помощью метода k -средних, реализованного в программном продукте IBM SPSS Statistics. Основная идея данного алгоритма состоит в том, что необходимо изначально задать число кластеров, на которое будет разделена вся выборка. Зачастую на практике информация о наличии классов может отсутствовать.

При работе с реальными данными на предварительном этапе обработки результатов измерений были построены гистограммы значений переменных (рис. 3), где по оси абсцисс отложены значения переменной x_{45} (прямая вольтамперная характеристика, режим № 5), по оси ординат — значения частоты попадания точек в подынтервал $p_1, p_2, \dots, p_{10}$.

Большинство гистограмм двумодальны, отсюда следует предположение, что существуют два класса. В результате группировки методом k -средних реальных данных, полученных до ЭТТ, к первой группе было отнесено 53 изделия, ко второй — 97. При этом максимальная разность между центрами кластеров составила 0,015 по переменной x_{16} (прямая вольтамперная характеристика, режим № 1, диод № 8). Кластеризация проводилась по 72 показателям, однако иллюстрация результатов группировки для наглядности приводилась лишь для переменных x_{16} и x_1 . Так, на рис. 4, а и б по оси абсцисс отложены значения переменной x_1 (постоянное прямое напряжение для диода

Рис. 3. Гистограмма значений переменной x_{45}

№ 1), по оси ординат — переменной x_{16} (прямая вольтамперная характеристика, режим № 1, диод № 1). Разными цветами показаны две группы, полученные в результате работы алгоритма. Рассматривая поле корреляции по переменным x_{16} и x_1 , можно заметить, что группы выражены нечетко и пересекаются.

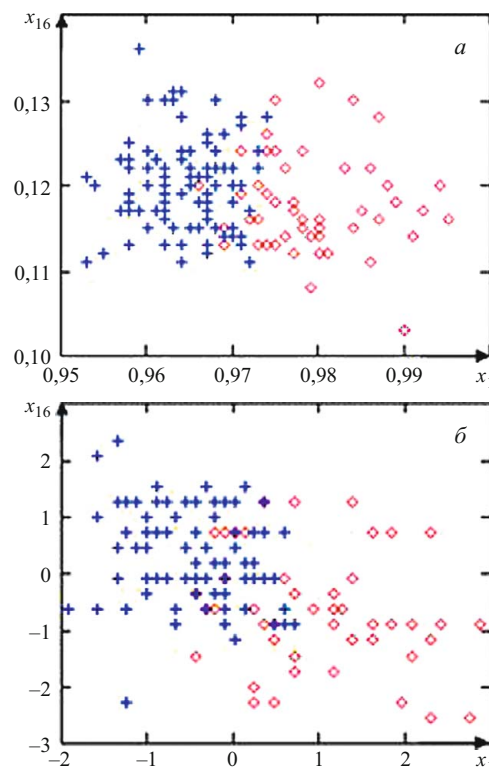
Такие графики не дают объективной картины о наличии или отсутствии групп, так как размерность пространства высока и нет возможности рассмотреть графики по всем переменным.

В результате таксономии наблюдений, полученных после испытаний ЭТТ, были выделены группы следующего объема: 50 наблюдений в одной группе и 100 — в другой. Данные до и после ЭТТ имеют небольшое различие, из чего следует, что значения показателей диодов после проведения электротермотренировки изменились незначительно.

Особенность метода k -средних состоит в том, что все точки будут разделены на группы. Если же существуют пограничные точки, то они выявлены не будут. Даже если выборка содержит выбросы, то они попадут в какую-либо группу, и это приведет к смещению центров групп.

Рассмотрим результаты группировки диодных матриц по результатам измерения параметров до ЭТТ с помощью вышеописанного алгоритма. На рис. 5 показана гистограмма распределения расстояний. При обработке реальных данных отсутствует априорная информация о наличии классов, их количестве. Как видно из гистограммы (см. рис. 5), имеет место «гипотеза компактности». Но при этом нельзя сделать вывод о количестве классов. Эти сведения мы можем получить только после проведения группировки.

На данном этапе исследований предполагается ручная настройка параметров алгоритма. Рассмотрим результаты группировки при различных значениях параметров Δ_1 и Δ_2 (табл. 2). Количество групп будет зависеть от величины параметра Δ_1 . При изменении Δ_1 от 3 до 4 произошел резкий скачок количества групп — от 3 до 8, однако до этого при разных параметрах Δ_1 количество групп было равно двум. Из этого следует, что существует не более двух групп в выборке.

Рис. 4. Поле корреляции по переменным x_{16} и x_1 : а и б — до и после ЭТТ

При увеличении параметра Δ_2 уменьшается количество «пограничных» точек. Вместе с тем растет количество точек в первой группе, а во второй — уменьшается. Четких групп нет, группы пересекаются.

На предварительном этапе обработки результатов испытаний ЭТТ для диодных матриц было выявлено, что диоды одной матрицы имеют разные характеристики и эта тенденция характерна для всех матриц. Так, диоды № 1 – 5 матрицы имеют более высокое качество, чем диоды № 6 – 8, т.е. диоды можно разделить на две группы разного качества, в том время как для самих матриц такого четкого деления получить не удалось.

Все исследуемые изделия являются годными, т.е. значения измеренных показателей удовлетворяют технологическому регламенту. Однако даже в случае соблюдения технологического регламента можно получить изделия разного качества. Вследствие этого

Таблица 2. Результаты группировки

Δ_1	Δ_2	Число групп	Количество точек в каждой группе	Количество точек, которые не попали ни в одну группу
7	11	2	121, 15	14
5	11	2	121, 15	14
4	11	3	116, 14, 12	8
3	11	8	91, 12, 13, 8, 3, 11, 2, 5	5
5	13	2	129, 9	11
5	15	2	135, 9	6

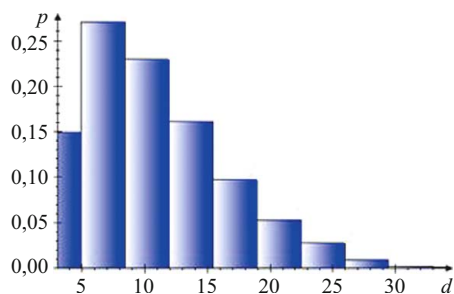


Рис. 5. Гистограмма расстояний

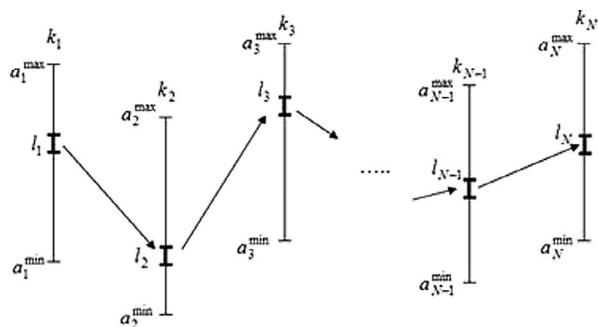


Рис. 6. Диапазоны значений параметров, определяемые технологическим регламентом

предлагается оптимизировать ведение процесса «внутри» технологического регламента.

Оптимизация технологического процесса в рамках технологического регламента. При производстве ЭРИ существует технологический регламент, выход за пределы которого означает получение брака. Однако даже соблюдение всех норм может привести к выпуску некачественной продукции. Рассмотрим схему на рис. 6 [6].

Здесь приняты следующие обозначения: $k_i, i = \overline{1, N}$ — контролируемые параметры процесса; $a_i^{\min}, a_i^{\max}, i = \overline{1, N}$ — минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений параметров, определяемые технологическим регламентом; $l_i, i = \overline{1, N}$ — реальная область значения параметра.

Пусть параметр k_1 принял определенное значение из области $l_1 \in [a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. Это значение может определяться качеством продукта, поступившего на обработку. Заметим, что область l_1 много меньше всего интервала $[a_1^{\min}; a_1^{\max}]$. При этом параметр k_2 , статистически зависимый от показателя k_1 , также принимает определенное значение из области $l_2 \in [a_2^{\min}; a_2^{\max}]$. Подобное явление происходит и для всех остальных показателей $k_i, i = \overline{1, N}$.

Можно заключить, что для рационального ведения процесса необходимо для каждого показателя k_i определить область $l_i \in [a_i^{\min}; a_i^{\max}]$ исходя из значений k_{i-1} , где $i = \overline{2, N}$. Область значения показателей k определяется рамками технологического регламента.

При ведении технологического процесса важно соблюдать не только технологический регламент, который имеет весьма широкие допустимые интервалы $[a_i^{\min}; a_i^{\max}]$, $i = \overline{1, N}$, но и интервалы $l_i \in [a_i^{\min}; a_i^{\max}]$, $i = \overline{1, N}$. Полученные результаты открывают широкие возможности для создания компьютерной системы, которая позволит соблюдать данные жесткие диапазоны.

Итак, в ходе предварительного анализа данных было выявлено, что между некоторыми показателями существует тесная линейная связь, нелинейных связей обнаружено не было. Важно отметить тот факт, что диоды матрицы имеют различные значения характеристик и могут быть разделены на две группы. К первой группе можно отнести диоды № 1 – 5, ко второй — № 6 – 8. Причем диоды первой группы имеют более высокое качество, чем диоды второй группы. Предложен алгоритм решения задачи таксономии, позволяющий выделять не только группы в выборке, но и пограничные точки. Методом статистического моделирования подтверждена работоспособность алгоритма. В дальнейшем необходимо реализовать автоматическую настройку параметров предложенного алгоритма.

При рассмотрении разных партий электро-радиоизделий одного и того же типа результаты предварительных исследований и группировки могут значительно отличаться. Этот факт объясняется тем, что технологический процесс в рамках технологического регламента может быть проведен разными способами. От значений параметров технологического процесса зависит качество выпускаемых ЭРИ. Для оптимального ведения технологического процесса изготовления ЭРИ необходимо разрабатывать компьютерные системы, которые позволят выпускать продукцию заданного качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А. И. Математические методы исследования и диагностика материалов (обобщающая статья) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 3. С. 53 – 64.
2. ГОСТ Р 53711–2009. Изделия электронной техники. Правила приемки // Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. — М.: Стандартинформ, 2010.
3. Орлов А. И. Прикладная статистика. — М.: Экзамен, 2006. — 671 с.
4. Новиков Д. А., Орлов А. И. Математические методы классификации / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 4. С. 3.
5. Орлов В. И., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. Техническая диагностика электрорадиоизделий / Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16 – 19 июня, 2014. С. 7676 – 7682.
6. Орлов В. И., Сергеева Н. А. О непараметрической диагностике и управлении процессом изготовления электрорадиоизделий / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М. Ф. Решетнева. 2013. № 2(48). С. 70 – 75.