УДК 004.67 629.7.036.3

А. Э. КАШАНОВ[1], В. П. МАЛАЙЧУК[2], А. И. ФЕДОРОВИЧ[2]

[1] ***КБ «Южное» им. М. К. Янгеля, Украина***
[2] ***Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,Украина***

ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДЕФЕКТОСКОПИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Исследование эффективности использования энтропийных преобразований многопараметрических измерений в задачах дефектоскопии. Статистическая обработка измерений и вычислительные эксперименты. Разработаны математические модели для проведения вычислительных экспериментов и оценки влияния каждого параметра на эффективность принятия решений о состоянии контролируемого объекта. При изготовлении и выпуске самой первой партии изделий возникает задача оценки технологии их производства путём выявления изделий, параметры которых не удовлетворяют заданным требованиям к их сдвигам и масштабам. Использование энтропийных преобразований в задачах дефектоскопии позволяет устанавливать причинно-следственные связи между состоянием объектов контроля и измеряемыми параметрами, оценивать их информативность и эффективность контроля. Показаны основные этапы формирования данных для поддержки принятия решений о состоянии объекта контроля в условиях ограничения на объём измерений. Впервые предложено использовать энтропийные преобразования экспериментальных измерений в задачах дефектоскопии многопараметрических объектов в условиях отсутствия знаний об их статистических закономерностях и ограничениях на объем измерений. Обработка энтропийных преобразований позволяет готовить данные для визуального анализа и поддержки принятия решений о состоянии контролируемых объектов, оценить информативность параметров и их относительную эффективность.

Ключевые слова: *энтропийное преобразование, статистические методы, неразрушающий контроль, дефектоскопия, вычислительный эксперимент.*

Цель статьи

Оценка эффективности использования энтропийных преобразований в задачах дефектоскопии путём проведения вычислительных экспериментов.

Введение

В настоящее время научная деятельность в физике, технике, информатике и других областях тесно связана с обработкой и анализом массивов данных. В ходе анализа таких данных, например, в исследованиях и диагностике сложных технических систем, исследователю приходится решать типовые задачи выявления структурных особенностей в данных, которые несут информацию о состояниях систем. Усилия многих исследователей направлены на автоматизацию решения этих задач путем создания эффективных математических методов и их реализации в алгоритмах классификации, называемых «распознаванием с учителем», и алгоритмах автоматической классификации, называемых «распознаванием без учителя» или кластеризации [1]. Разработка таких методов представляет собой для исследователей серьезную проблему, называемую «проблемой построения процедуры классификации» или «проблемой машинного обучения», центральным вопросом которой является выбор (построение) меры различий (однородности) характеристик элементов исследуемого множества (выборок) [2]. За последние годы вопросами обработки данных при помощи энтропийных преобразований занимались В. П. Бабак, Н. И. Куренков, Б. Д. Лебедев, С. Н. Ананьев. Однако их работы не предусматривали использование энтропийных преобразований в задачах распознавания состояния контролируемого объекта, как это предлагается делать в дефектоскопии.

Постановка задачи исследования

Статистическая теория распознавания состояния объектов по результатам многопараметрических выборок измерений предусматривает решение этой задачи при априорных знаниях их статистических закономерностей – условных многомерных законов распределения вероятностей. При отсутствии этих знаний известно решение задачи дефектоскопии по экспериментальным многопараметрическим измерениям путем их нормирования и разложения функций отношения правдоподобия в ряд Колмогорова-Габора и оценки его коэффициентов методом группового учета аргументов, используя экспериментальные выборки измерений контролируемых параметров [3]. Эффективность метода в основном зависит от различия их математических ожиданий параметров, дисперсий и корреляционных связей выборок измерений параметров контролируемых объектов в состоянии нормы или при наличии дефектов. Причин дефектности может быть одна или несколько, которые, так или иначе, влияют на контролируемые параметры. Многие параметрические измерения содержат информацию о причинно-следственных связях, и их обработка и оценка позволяют решать также и задачи технической диагностики. Как известно, информативность случайных процессов оценивается энтропией – математическим ожиданием логарифма их законов распределения вероятностей. Ее измерения характеризуют различия информативности выборок измерений и могут использоваться для распознавания и оценки дефектности объектов неразрушающего контроля по экспериментальным данным. Энтропию одного измерения в выборке случайных независимых нормальных параметров можно определить по формуле

$$L\ (x) = \ln\left(\sqrt{2\pi D}\right) + \frac{(x-a)^2}{2D}, \tag{1}$$

где a , D – математическое ожидание и дисперсия измеряемого параметра.

Для энтропийных преобразований статистически зависимых нормальных измерений двух параметров формула запишется в виде

$$L(x_1x_2) = \ln\left(2\pi\sqrt{D_1D_2(1-r^2)}\right) + \frac{1}{2(1-r^2)} \times \left[\left(\frac{x_1-a_1}{\sqrt{D_1}}\right)^2 - \frac{2r(x_1-a_1)(x_2-a_2)}{\sqrt{D_1D_2}} + \left(\frac{x_2-a_2}{\sqrt{D_2}}\right)^2\right], \tag{2}$$

где r – коэффициент корреляции измерений x_1, x_2.

Выражения (1) и (2) можно рассматривать как математические модели одномерного и двумерного энтропийных преобразователей, а для исследования трёхпараметрических объектов можно сформировать три модели вида

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_1) + L(x_2x_3),$$

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_2) + L(x_1x_3),$$

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_3) + L(x_1x_2).$$

В их выборках содержится информация о причинно-следственных корреляционных связях между параметрами объектов контроля, при этом многопараметрические выборки измерений превращаются в однопараметрические без потери информации о состоянии объектов. На основе их обработки и статистического анализа представляется возможность готовить визуально-аналитические данные для поддержки принятия решений об информативности измерений и дефектности контролируемых объектов.

Факторный анализ энтропийных преобразований

Если энтропийные преобразователи (1) и (2) используются для преобразований одномерных и двумерных случайных величин с теми же сдвигами, масштабами и коэффициентами корреляции, как и у эталонных выборок, то математические ожидания их преобразований равны

$$M[L(x)] = \ln\left[\sqrt{2\pi D}\right] + \frac{1}{2},$$

$$M[L(x_1x_2)] = \ln\left[2\pi\sqrt{D_1D_2(1-r^2)}\right] + 1$$

и не зависят от математических ожиданий выборок.

Если ими преобразуются независимые выборки с такими же математическими ожиданиями, но другими дисперсиями D_3 и D_4, то математическое ожидание $L(x)$ и $L(x_3x_4)$ равны

$$M[(x_1)] = \ln\left[\sqrt{2\pi D}\right] + \frac{1}{2}\frac{D_1}{D},$$

$$M[L(x_3x_4)] = \ln\left(2\pi\sqrt{D_1D_2(1-r^2)}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{D_3}{D_1} + \frac{D_4}{D_2}\right)\left(\frac{1}{1-r^2}\right).$$

Если преобразуются выборки двух независимых случайных величин ($r_{34} = 0$) таким же сдвигом и масштабом, то

$$M\left[L(x_3x_4)\right] = \ln\left(2\pi\sqrt{D_1D_2\left(1-r^2\right)}\right) + \frac{1}{1-r^2}.$$

Если преобразуется выборка двух независимых случайных величин со своими сдвигами Δa_1, Δa_{31} и Δa_{42}, то

$$M[x)] = \ln\left[\sqrt{2\pi D}\right] + \frac{1}{2}\left(\frac{D_1 + \Delta a_1^2}{D}\right),$$

$$M\left[L(x_3x_4)\right] = \ln\left(2\pi\sqrt{D_1D_2\left(1-r^2\right)}\right) + \frac{1}{2\left(1-r^2\right)}\left[\frac{D_3 + \Delta a_{31}^2}{D_1} - 2r\frac{\Delta a_{31}\Delta a_{42}}{\sqrt{D_1D_2}} + \frac{D_4 + \Delta a_{42}^2}{D_2}\right].$$

Из проведенного теоретического факторного анализа следует вывод о высокой чувствительности энтропийных преобразователей к изменениям статистических параметров исследуемых выборок, изменения их сдвигов, масштабов, коэффициентов корреляции и о пригодности их для решения задач дефектоскопии контролируемых объектов по экспериментальным данным.

Статистический анализ энтропийных преобразований

Для исследования статистических закономерностей преобразованных выборок был проведен вычислительный эксперимент с целью оценки гистограмм и влияния на преобразование измерений двух видов законов распределения вероятностей (симметричных и асимметричных); нормального и экспоненциального с заданными эталонными математическими ожиданиями, дисперсии и коэффициентами корреляции: $a_1 = \lambda_1$, $a_2 = \lambda_2$, $D_1 = \lambda_1^2$, $D_2 = \lambda_2^2$, r .

1. Первый вычислительный эксперимент. Используя программы моделирования выборок коррелированных двумерных случайных величин, были сформулированы две выборки гауссовых и экспоненциальных измерений и исследованы статистические закономерности их энтропийных преобразований, если $L(k) = L\left(x_1(k), x_2(k)\right)$, $a_1 = 0,5$, $a_2 = 1$, $D_1 = 0,25$, $D_2 = 1$, $\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_2 = 1$, $r = 0,8$. На рисунке 1 представлены их гистограммы и в таблице 1 оценки математических ожиданий и выборочных дисперсий.

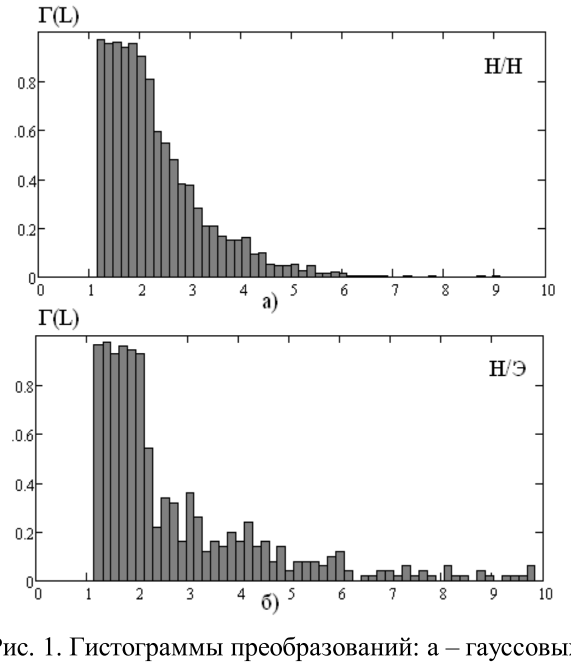

Рис. 1. Гистограммы преобразований: а – гауссовых измерений; б – экспоненциальных измерений

Из результатов этого эксперимента следует вывод, что сдвиги энтропийных преобразований не чувствительны к виду закона распределения вероятностей исходных данных. Это расширяет возможности использования энтропийных преобразований в задачах дефектоскопии объектов с неизвестными законами распределения, если решение принимать путём сравнения средних значений, разброс которых тем меньше, чем больше размеры выборок измерений.

Таблица 1

Статистические показатели энтропийных преобразований

Н/Н		Н/Э	
$\overline{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\overline{L}$	$\sqrt{D^*}$
1,647	1,006	1,669	2,249

2. Второй вычислительный эксперимент – это исследование влияния на статистические закономерности энтропийных преобразований, если изменяются только математические ожидания исследуемых нормальных выборок по сравнению с эталонными выборкам в два раза $a_3 = 1$ $a_4 = 2$ или только масштабы тоже в два раза $D_3 = 0,5$ и $D_4 = 2$. Результаты вычислительного эксперимента представлены в виде гистограмм, оценок математических ожиданий и значений среднеквадратических разбросов. На рисунке 2 представлены гистограммы энтропийных преобразований с математическим ожиданием $\Delta a_3 = 1$ и $\Delta a_4 = 2$ (рисунок 2, а) и $\Delta D_3 = 0,25$ $\Delta D_4 = 2$ (рисунок 2, б).

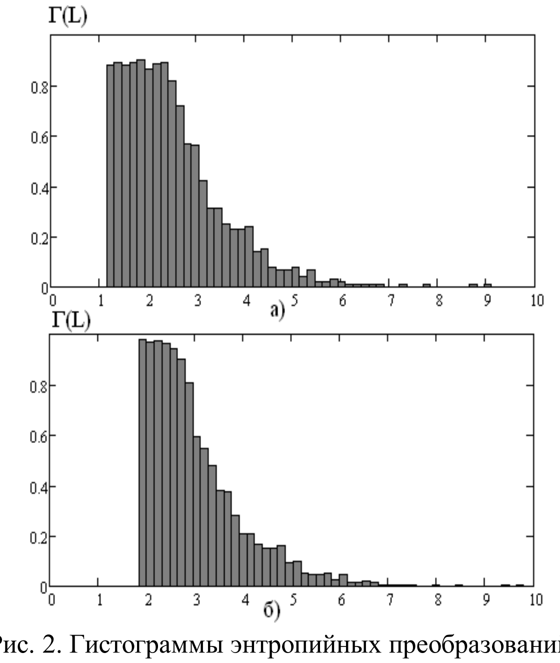

Рис. 2. Гистограммы энтропийных преобразований: а – изменение только сдвигов; б – изменение только масштабов

В таблице 2 представлены изменения средних значений и изменения масштабов (выборочных дисперсий).

Таблица 2

Изменения статистических показателей

$a_1 = 0,5$ $a_2 = 1$ $D_1 = 0,25$ $D_2 = 1$ $r = 0,8$		$a_3 = 1$ $a_4 = 2$ $D_1 = 0,25$ $D_2 = 1$ $r = 0,8$		$a_1 = 0,5$ $a_2 = 1$ $D_3 = 0,5$ $D_4 = 2$ $r = 0,8$	
$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$
1,653	1,027	2,359	0,938	2,323	0,967

Из анализа результатов этого эксперимента следует, что изменения сдвигов и масштабов исследуемых выборок приводит к изменению сдвигов энтропийных преобразований и смещению гистограмм. При изменении параметров измерений вдвое средние значения сдвигов энтропийных преобразований изменяются в 1,5 раза.

3. В третьем вычислительном эксперименте исследовано влияние декорреляции($r = 0$) изменений математических ожиданий, дисперсий и корреляции($r \neq 0$). На рисунке 3 представлены гистограммы энтропийных преобразований при корреляции (рисунок 3, а) и декорреляции исходных данных (рисунок 3, б).

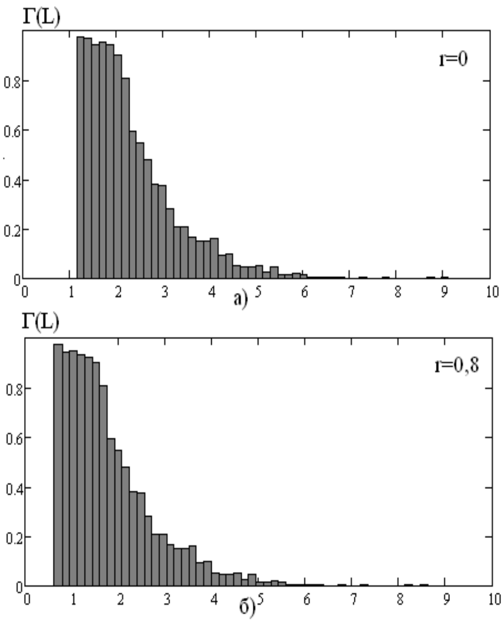

Рис. 3 Гистограммы энтропийных преобразований

В таблице 3 приведены статистические показатели энтропийных преобразований выборок с различной корреляцией ($r = 0,8$ и $r = 0$).

Из данных таблицы 3 и рисунка 3 следует, что разрушение корреляции измерений ведёт к изменениям сдвигов энтропийных преобразований, к их возрастанию тоже в 1,5 раза.

Таблица 3

Статистические показатели при различной корреляции

$a_1 = 0,5$ $a_2 = 1$ $D_1 = 0,5$ $D_2 = 1$ $r = 0,8$		$a_1 = 0,5$ $a_2 = 1$ $D_1 = 0,5$ $D_2 = 1$ $r = 0$	
$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$
1,636	1,069	2,146	1,039

Дефектоскопия трёхпараметрических объектов по экспериментальным данным

Полагая известными параметры измерений объектов контроля в состоянии нормы и брака a_{1i}, D_{1i}, r_{1i}, $i = 1,2,3$ и a_{2i}, D_{2i}, r_{2i} и математические модели энтропийных преобразователей $L_H(x_i)$, $L_H(x_i x_j)$, и $L_Б(x_i)$, $L_Б(x_i x_j)$ $i = 1,2,3$, $i \neq j$ сформируем два обобщённых энтропийных преобразователя нормы и брака

$$L_H(x_1 x_2 x_3) = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} L_H(x_i) + \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\sum_{j>i}^{3} L_H(x_i x_j), \quad (3)$$

$$L_Б(x_1 x_2 x_3) = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} L_Б(x_i) + \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\sum_{j>i}^{3} L_Б(x_i x_j). \quad (4)$$

Проведём вычислительный эксперимент при следующих параметрах измерений эталонных объектов (данные приведены в таблице 4).

Таблица 4

Данные для вычислительного эксперимента

	a_1	a_2	a_3	D_1	D_2	D_3	r_{12}	r_{13}	r_{23}
Н	0	1	2	1	0,25	0,64	0	0,8	0,5
Б	1	2	3	0,5	0,5	0,36	0,8	0,5	0

Используя энтропийные преобразователи $L_H(x_1 x_2 x_3)$ и $L_Б(x_1 x_2 x_3)$ и шесть выборок измерений, характеризующих объекты в состоянии нормы $x_1\left(k/_H\right)$ и $x_2 x_3\left(k/_H\right)$, $x_2\left(k/_H\right)$ и $x_1 x_3\left(k/_H\right)$, $x_3\left(k/_H\right)$ и $x_1 x_3\left(k/_H\right)$, такие же шесть выборок измерений объектов в состоянии брака, сформулируем выборки их энтропийных преобразований $L_H\left(k/_1\right)$, $L_H\left(k/_{23}\right)$, $L_H\left(k/_2\right)$ $L_H\left(k/_{31}\right)$, $L_H\left(k/_3\right)$, $L_H\left(k/_{12}\right)$ и $L_Б\left(k/_1\right)$, $L_Б\left(k/_{23}\right)$, $L_Б\left(k/_2\right)$ $L_Б\left(k/_{31}\right)$, $L_Б\left(k/_3\right)$,

$L_Б\left(k/_{12}\right)$, $N = 1, 2, ..., 10000$ и определим их средние значения и среднеквадратические значения разбросов. Их значения для двух энтропийных преобразователей $L_H(x_1x_2x_3)$ и $L_Б(x_1x_2x_3)$ представлены в таблице 5.

Таблица 5

Статистические закономерности энтропийных преобразований

Н/Н		Н/Б	
$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$
4,376	1,155	8,027	3,074

Из данных таблицы 5 следует, что при преобразовании измерений объектов в норме энтропийными преобразователями нормы и брака их сдвиги и масштабы существенно отличаются – сдвиги в два раза, а разбросы в три раза.

Аналогично преобразуем выборки объектов в состоянии брака и оценим их средние значения и разброс. Их значения представлены в таблице 6.

Таблица 6

Статистические закономерности энтропийных преобразований

Б/Б		Б/Н	
$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$	$\bar{L}$	$\sqrt{D^*}$
3,398	1,163	14,697	8,325

В рассматриваемом случае различия между выборками энтропийных преобразований увеличилось по сравнению с предыдущим экспериментом. Эти результаты вычислительных экспериментов подтверждают предварительный вывод о возможности использования энтропийных преобразований в задачи дефектоскопии по экспериментальным измерениям.

Эффективность энтропийного метода обработки измерений неразрушающего контроля можно оценить, располагая выборками измерений $L_H\left(k/_H\right)$, $L_Б\left(k/_H\right)$ и $L_H\left(k/_Б\right)$, $L_Б\left(k/_Б\right)$. Так как первая пара получена путём энтропийного преобразования измерений $x_1\left(k/_H\right)\ x_2\left(k/_H\right)\ x_3\left(k/_H\right)$, а вторая по измерениям $x_1\left(k/_Б\right)\ x_2\left(k/_Б\right)\ x_3\left(k/_Б\right)$, то при их принадлежности к классу объектов Н должно выполнятся неравенство $L_H\left(k/_H\right) < L_Б\left(k/_H\right)$, а принадлежность к классу Б будет иметь место при выполнении неравенства $L_Б\left(k/_Б\right) < L_H\left(k/_Б\right)$. Вероятности этих событий можно оценить по формулам

$$P^*\left(H/_H\right) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \operatorname{sgn}\left[L_Б\left(k/_H\right) - L_H\left(k/_H\right)\right],$$

$$P^*\left(Б/_Б\right) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \operatorname{sgn}\left[L_H\left(k/_Б\right) - L_Б\left(k/_Б\right)\right],$$

где sgn(x) - функция единичного скачка, равная единице, если переменная x равна или больше нуля и равна нулю, если x меньше нуля.

В таблица 7 представлены по результатам проведённого эксперимента оценки вероятности принятия объектов нормы за норму $P^*\left(H/_H\right)$ и вероятность перебраковки $P^*\left(Б/_H\right)$, вероятность принятия аномальных изделий – за брак $P^*\left(Б/_Б\right)$ и вероятность пропуска брака $P^*\left(H/_Б\right)$.

Таблица 7

Вероятности принятия верных решений и ошибки первого рода

Состояние объекта контроля			
Норма		Брак	
$P^*\left(H/_H\right)$	$P^*\left(Б/_H\right)$	$P^*\left(Б/_Б\right)$	$P^*\left(H/_Б\right)$
0,987	0,013	0,976	0,024

Это оценка потенциальных возможностей обнаружения бракованных и нормальных объектов контроля методом энтропийной обработки измерений и принятия решений по трем статистически зависимым измерениям $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$, использованных в проведенном вычислительном эксперименте.

В реальных условиях контроля решения должны приниматься по выборкам измерений ограниченного размера $|x_1(k)|, |x_2(k)|, |x_3(k)|$, $k = 1, 2, ..., n$. Они могут принадлежать или объектам класса Н, или объектам класса Б. Используя их, можно сформировать две выборки энтропийных преобразований $L_H^*\left(x_1(k), x_2(k), x_3(k)\right)$ и $L_Б^*\left(x_1(k), x_2(k), x_3(k)\right)$, вычислить их суммы и сравнить между собой. Если имеет место неравенство

$$L_H^* = \sum_{k=1}^{n} L_H^*\left(x_1(k), x_2(k), x_3(k)\right) <$$

$$< L_Б^* = \sum_{k=1}^{n} L_Б^*\left(x_1(k), x_2(k), x_3(k)\right),$$

то выборка должна быть отнесена к объектам класса Н, а при противоположном неравенстве – к объектам класса Б. Можно также оценить уверенность принятия этих решений, вычислив их условные вероятности по

$$P^*\left(Н/_Н\right)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[L_Б^*(k)-L_Н^*(k)\right],$$

$$P^*\left(Б/_Б\right)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[L_Н^*(k)-L_Б^*(k)\right].$$

Оценим влияние ограничения объема измерений на эффективность принятия решений контроля. Для этого сформируем по данным вычислительного эксперимента таблицу аналогичную таблице 7. Результаты, приведённые в таблице 8, получены по разовым экспериментам с объёмом выборок $n = 25$, $n = 50$, $n = 100$.

Таблица 8

Вероятности принятия правильных решений о состоянии объекта контроля

$P^*\left(Н/_Н\right)$			$P^*\left(Б/_Б\right)$		
25	50	100	25	50	100
0,87	0,9	0,96	0,6	0,86	0,94

Формирование данных для анализа и поддержки принятия решений

Эффективность дефектоскопии многопараметрических объектов зависит от информативности измеряемых параметров и их причинно-следственных связей. Информативность можно оценить путём сравнительной оценки эффективности различных вариантов обработки измерений параметров контролируемых объектов. Исследуем эту задачу на примере контроля трёхпараметрических объектов путём проведения вычислительных экспериментов.

Сформируем раздельные функции энтропийных преобразований выборок измерений:

1) функции преобразования измерений объектов в состоянии нормы $L_Н(x_1)$, $L_Н(x_2)$, $L_Н(x_3)$, $L_Н(x_1x_2)$, $L_Н(x_1x_3)$, $L_Н(x_2x_3)$;

2) функции преобразования объектов в аномальном состоянии (брака) $L_Б(x_1)$, $L_Б(x_2)$, $L_Б(x_3)$, $L_Б(x_1x_2)$, $L_Б(x_1x_3)$, $L_Б(x_2x_3)$.

Располагая тремя выборками измерений проконтролированного объекта неизвестного класса, можно сформировать выборки энтропийного преобразования $L_Н\left(k/_{x_i}\right)$, $L_Н\left(k/_{x_ix_j}\right)$, $L_Б\left(k/_{x_i}\right)$, $L_Б\left(k/_{x_ix_j}\right)$ и использовать их для сравнительного анализа информативности измеряемых параметров и оценки принимаемых решений. Для этих целей необходимо определить вероятность того, что измерения относятся к классу объектов в состоянии нормы при различных вариантах принятия решений, начиная с одной выборки i-ого параметра

$$P_{1(i)}^*(Н)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[L_Б\left(k/_{x_i}\right)-L_Н\left(k/_{x_i}\right)\right]=$$

$$=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\,\Delta L\left(k/_{x_i}\right),$$

где $\Delta L\left(k/_{x_i}\right)$ – обозначение разности энтропийных преобразований.

Если $\Delta L\left(k/_{x_i}\right)>0$, то измерение x_i характеризуют принадлежность его к объекту класса (Н), а вероятность этих событий $P_{1(i)}^*(Н)$ – это оценка информативности i-ого параметра. Таких оценок три ($i = 1, 2, 3$).

Рассмотрим теперь варианты принятия решений по разностям двух параметров $\Delta L\left(k/_{x_i}\right)+\Delta L\left(k/_{x_j}\right)>0$. Их оценки информативности вычислим по формулам

$$P_{1(ij)}^*(Н)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[\Delta L\left(k/_{x_i}\right)+\Delta L\left(k/_{x_j}\right)\right],$$

$$i \neq j = 1, 2, 3.$$

Здесь тоже три оценки. Еще одна оценка может быть получена, если используются все три измеряемые параметра

$$P_1^*(Н)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[\Delta L\left(k/_{x_1}\right)+\Delta L\left(k/_{x_2}\right)+\Delta L\left(k/_{x_3}\right)\right].$$

В этих семи оценках не учитываются корреляционные связи между выборками различных параметров. Следовательно, необходим анализ информативности разностей двумерных энтропийных преобразований, рассчитанных по формуле

$$P_{2(ij)}^*(Н)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[\Delta L\left(k/_{x_ix_j}\right)\right],\ i \neq j = 1, 2, 3.$$

Их, как и одномерных, также семь. Вероятность

$$P_2^*(Н)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left[\Delta L\left(k/_{x_1x_2}\right)+\right.$$

$$\left.+\Delta L\left(k/_{x_1x_3}\right)+\Delta L\left(k/_{x_2x_3}\right)\right].$$

Трёхмерных разностей преобразований тоже семь.

$$\Delta L_{1(23)}(Н)=\Delta L\left(k/_{x_1}\right)+\Delta L\left(k/_{x_2x_3}\right),$$

$$\Delta L_{2(13)}(Н)=\Delta L\left(k/_{x_2}\right)+\Delta L\left(k/_{x_1x_3}\right),$$

$$\Delta L_{3(12)}(H) = \Delta L\left(k/_{x_3}\right) + \Delta L\left(k/_{x_1 x_2}\right).$$

Запишем выражение для первых трёх вариантов двойных сумм

$$\Delta L_{(12)}(H) = \Delta L_{1(23)}(H) + \Delta L_{2(13)}(H),$$

$$\Delta L_{(13)}(H) = \Delta L_{1(23)}(H) + \Delta L_{3(12)}(H),$$

$$\Delta L_{(23)}(H) = \Delta L_{3(12)}(H) + \Delta L_{2(13)}(H).$$

Седьмой вариант – это сумма всех трех вариантов трёхмерных сумм

$$\Delta L_3(k) = \sum_{i=1}^{3} \Delta L\left(k/_{x_i}\right) + \sum_{i=1}^{2}\sum_{j>i}^{3} \Delta L\left(k/_{x_i x_j}\right).$$

По ним рассчитываются вероятности всех семи вариантов. Все данные для проведения факторного анализа сводятся в три таблицы. В первой – интегральные оценки их энтропийных преобразований (средние значения $\bar{L}\left(k/_{H}\right)$, $\bar{L}\left(k/_{Б}\right)$ и их вариантов) и значение вероятностей при принадлежности измерений к классам Н и Б ($P^*(H)$ и $P^*(Б)$) при контроле по одномерным преобразованиям.

Данные для проведения вычислительных экспериментов и факторного анализа информативности измерений приведены в таблице 9.

Таблица 9

Параметры объектов поступающих на контроль

	a_1	a_2	a_3	D_1	D_2	D_3	r_{12}	r_{13}	r_{23}
O_1	0	1	2	1	0,25	0,64	0	0,8	0,5
O_2	1	2	3	0,5	0,5	0,36	0,8	0,5	0
O_3	1	2	3	1	0,25	0,64	0	0,8	0,5
O_4	0	1	2	0,5	0,5	0,36	0	0,8	0,5
O_5	0	1	2	1	0,25	0,64	0,8	0	0
O_6	1	1	2	2	0,25	0,64	0,8	0	0,5

По результатам вычислительных экспериментов оценивается информативность параметров и эффективность их использования в задачах дефектоскопии. Результаты экспериментов представляются в виде таблиц.

Таблицы содержат оценки информативности измеряемых параметров для визуального анализа и подготовки данных для поддержки принятия решений. Значения оценки $P^*\left(x/_{O_i}\right)$ характеризуют уверенность в том, что объект относится к классу нормы, а $P^*\left(Б/_{O_i}\right) = 1 - P^*\left(H/_{O_i}\right)$ - к классу Брака. Если показатель порядка 0,5 – 0,6, то это свидетельствует о малой информативности этого параметра. Таким объектом из рассмотренных является O_3. Вероятность того, что он находится в норме, не превышает значения 0,6. Сомнительна информативность параметра x_1: его использование ухудшает вероятность принятия решения «объект в норме».

Рассмотренный метод предполагается использовать при решении задач классификации множества многопараметрических объектов по экспериментальным измерениям в условиях полной статистической неопределённости.

Заключение

Энтропийное преобразование измерений параметров различной физической, химической и биологической природы – это способ представления их в одних и тех же единицах в задачах неразрушающего контроля и технической диагностики при обработке, анализе и подготовке данных для поддержки принятия решений по экспериментальным выборкам измерений с неизвестными статистическими закономерностями.

Математические модели двух энтропийных многомерных преобразователей формируются по эталонным выборкам измерений объектов, находящихся в состоянии нормы или брака, отличаются своими сдвигами, масштабами и корреляционными связями. Многопараметрические измерения каждого контролируемого объекта преобразуются в две одномерные выборки энтропийных преобразований, разность которых содержит информацию о его состоянии, и оцениваются вероятностью принадлежности к классу бездефектных объектов.

Для визуального анализа формируются оценки принадлежности множества вариантов выборок энтропийных преобразований одномерных и двумерных измерений, на основе которых делаются выводы об информативности измеряемых параметров, их причинно-следственные связи, эффективность принятия решений о состоянии проконтролированного объекта.

Литература

1. Куренков, Н. И. Энтропийный подход к решению задач классификации многомерных данных [Текст] / Н. И. Куренков, С. Н. Ананьев // Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Информационные технологии». – М. : «Новые технологии», 2006. – № 8. – С. 50-55.

2. Куренков, Н. И. Энтропийный подход к решению задач классификации многомерных данных [Текст] / Н. И Куренков, С. Н Ананьев // Информационные технологии. Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал. – 2006. – № 8. – С. 50-55.

3. Малайчук, В. П. Математическая дефектоскопия [Текст] : моногр. / В. П. Малайчук, А. В. Мозговой. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 180 с.

4. Jenssen, R. An Information Theoretic Approach to Machine Learning [Text] : Diss. for the Deg. of Dr. Scientiarum / R. Jenssen ; Department of Physics University of Tromso. – Tromso, 2005. – 179 p.

5. Xu Rui. Survey of clustering algorithms [Text] / Rui Xu, D. Wunsch II // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. – V. 16, № 3. – P. 645.

6. Бабак, В. П. Теоретические основы информационно-измерительных систем [Текст] : Учебник / В. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Ерёменко. – К. : ТОВ «Софія-А», 2014. – 832 с.

7. Fedorovich, A. Classification of facilities multi parameters experimental measurements of their parameters [Text] / A. Fedorovich // European science review. – 2015. – № 7-8. – P. 140-142.

Поступила в редакцию 15.11.2015, рассмотрена на редколлегии 15.02.2016

ЕНТРОПІЙНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЗАДАЧАХ ДЕФЕКТОСКОПІЇ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О. Е. Кашанов, В. П. Малайчук, А. І. Федорович

Дослідження ефективності використання ентропійних перетворень багатопараметричних вимірювань в задачах дефектоскопії. Статистична обробка вимірів та обчислювальні експерименти. Розроблено математичні моделі для проведення обчислювальних експериментів та оцінки впливу кожного параметра на ефективність прийняття рішень про стан контрольованого об'єкта. При виготовленні і випуску самої першої партії виробів виникає завдання оцінки технології їх виробництва шляхом виявлення виробів, параметри яких не задовольняють заданим вимогам до їх зрушень та масштабам. Використання ентропійних перетворень в задачах дефектоскопії дозволяє встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між станом об'єктів контролю і вимірюваними параметрами, оцінювати їх інформативність та ефективність контролю. Показано основні етапи формування даних для підтримки прийняття рішень про стан об'єкта контролю в умовах обмежень на обсяг вимірювань. Вперше запропоновано використовувати ентропійні перетворення експериментальних вимірювань в задачах дефектоскопії багатопараметричних об'єктів в умовах відсутності знань про їх статистичні закономірності і обмеження на обсяг вимірювань. Обробка ентропійних перетворень дозволяє готувати дані для візуального аналізу та підтримки прийняття рішень про стан контрольованих об'єктів, оцінити інформативність вимірюваних параметрів і їх відносну ефективність.

Ключові слова: ентропійне перетворення, статистичні методи, неруйнівний контроль, дефектоскопія, обчислювальний експеримент.

ENTROPY METHOD FOR PROCESSING THE EXPERIMENTAL MEASUREMENTS IN PROBLEMS TESTING FACILITIES POLYVALENT NDT

A. E. Kashanov, V. P. Malaychuk, A. I. Fedorovich

Research of efficiency of the use of entropy changes multiparameter measurement inspection tasks. Statistical analysis of the measurements and computational experiments. Mathematical models for computational experiments and evaluate the impact of each parameter on the effectiveness of decision-making on the state of the controlled object. In the manufacture and release of the first batch of products the problem arises of evaluating the technology of their production through the identification of products whose parameters do not meet the specified requirements for their location and scale. Using the entropy changes in the tasks of inspection allows the causal connection between the state of control objects and measurable parameters to evaluate the effectiveness of their information and control. The basic stages of formation of data to support decision-making about the state of the object of control under the limits for the measurements. For the first time proposed to use entropic transformation of experimental measurements in problems multiparameter inspection of objects in the absence of knowledge about their statistical laws and restrictions on the amount of measurements. Processing entropy changes allows you to prepare data for visual analysis and decision support for the state-controlled facilities, to evaluate the information content of the measured parameters and their relative effectiveness.

Keywords: transformation entropy, statistical methods, non-destructive testing, inspection, computing experiment.

Кашанов Александр Эрикович – канд. техн. наук, заместитель Генерального конструктора по научной и учебной работе, ГП КБ «Южное» им. М. К. Янгеля, Днепропетровск, Украина.

Малайчук Валентин Павлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Радиоэлектронной автоматики, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина.

Федорович Анна Игоревна – преподаватель кафедры Радиоэлектронной автоматики, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина, e-mail: kafedraREA@yandex.ru.