

В. Я. Гальченко, А. В. Велигура, А. К. Павлов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Изложена методика решения обратных задач измерения геометрических размеров и классификации дефектов с использованием математического аппарата теории принятия решений при контроле изделий. Приведен пример расчета с использованием предлагаемой методики. Рис. 2, Табл. 2, Ист. 9.

В современном производстве при контроле качества выпускаемой продукции особое значение приобретает не только факт обнаружения дефектности изделия, но и установление степени "опасности" выявленного дефекта для дальнейшей эксплуатации изделия. Такие задачи выделяют в теории электромагнитного контроля в особый класс обратных задач, которые и составляют основу теории дефектометрии. Обычно достаточными условиями установления опасности дефекта для изделия являются определение его геометрических размеров, а также места расположения. Важным также является тот факт, что решение задачи дефектометрии требуется осуществить в реальном масштабе времени непосредственно в процессе контроля.

Указанные требования в значительной мере предопределяют возможные пути решения поставленной задачи. В основе решения обратных задач теории контроля всегда лежит решение соответствующей исходной прямой задачи, т. е. задачи определения формы и величины сигнала преобразователя от геометрических и электрофизических параметров объекта и дефекта. Для трехмерных объектов с дефектами конечных размеров даже решение прямой задачи представляет сложную математическую проблему, которую удается разрешить в полной мере лишь в результате использования численных методов исследований.

Применительно к задачам электромагнитного контроля примерами такого подхода могут рассматриваться: для двумерных моделей дефектов в магнитной дефектоскопии - работа [1]; для трехмерных моделей дефектов в магнитной дефектоскопии - статьи [2, 3]; для трехмерной модели дефектов в вихретоковой дефектоскопии - исследования [4, 5]. Существенные затраты времени, необходимые для подготовки исходных данных для численных расчетов, выполнения собственно вычислений, делают практически невозможными решения обратных задач в реальном масштабе времени.

В то же время средствами теории распознавания образов данная задача может быть решена, причем с учетом трехмерного характера распределения информационного электромагнитного поля в зоне контроля. Для определенности рассмотрим случай контроля объектов, когда для его сканирования электромагнитным полем требуется перемещение преобразователя дефектоскопа лишь в одном направлении. Область применения рассматриваемого подхода ограничивается в данном случае использованием проходных вихретоковых преобразователей при контроле длинномерных объектов, когда пространственное распределение модуляционного сигнала преобразователя зависит от одной координаты либо является функцией времени для временного представления сигнала.

Алгоритм решения таких задач достаточно хорошо известен и включает в себя следующие этапы: выбор обобщенной формы дефекта на поверхности либо внутри объекта контроля, дискретное измерение геометрических размеров обобщенного дефекта и решение ряда прямых задач дефектоскопии для заданной геометрии с целью формирования библиотеки эталонных сигналов; выделение информационных признаков, в полной мере характеризующих каждый библиотечный компонент и значительно уменьшающих объем хранимой о компоненте информации; проведение процесса обучения, итогом которого является построение ряда дискриминантных функций; и, наконец, собственно этап классификации считанного в процессе контроля сигнала и принятия решения о его соответствии ближайшему эталонному [6].

Этап 1. В качестве обобщенного дефекта выбираем нарушение сплошности материала объекта в виде параллелепипеда конечных размеров с габаритами $b_p \times l_p \times t_p$, который расположен на поверхности изделия. Для определенности и проведения последующих численных экспериментов введем в рассмотрение ограниченное множество дефектов, отличающихся друг от друга глубиной несплошности. При $l_p=0,6$ мм и $b_p=0,5$ мм глубина несплошности изменялась от 0,3 мм до 1,1 мм с шагом 0,2 мм, что является достаточно высокой разрешающей способностью в случае распознавания. Опознаваемые дефекты, сигналы от которых использовались в дальнейшем для классификации, характеризовались следующими геометрическими параметрами: а) $0,5 \times 0,6 \times 0,35$ мм; б) $0,5 \times 0,6 \times 0,45$ мм; в) $0,5 \times 0,6 \times 0,4$ мм. Для эталонного и опознаваемого множеств дефектов проводилась серия численных расчетов с использованием соответствующих программных комплексов [4, 5, 3].

Результатом каждого модельного расчета является дискретизированный модуляционный сигнал преобразователя дефектоскопа, полученный в результате сканирования объекта в 4096 контрольных точках, который может рассматриваться в качестве временного ряда.

Этап 2. С целью сжатия информации, полученной в результате проведения контроля, в большинстве случаев используют разложение модуляционной кривой в ряд Фурье по ортогональным функциям. Обычно используемые для этих целей классические методы спектрального оценивания [7] конечных последовательностей данных обладают существенными недостатками, среди которых искажающее воздействие просачивания по боковым лепесткам из-за неизбежного взвешивания в них ограниченного набора данных, низкое спектральное разрешение, необходимость принятия определенных компромиссов относительно разрешения статистической устойчивости спектральных оценок и подавления просачивания. Применение при обработке сигналов функций окна, псевдоусреднения по ансамблю за счет сегментации данных приводит наряду с положительными эффектами к снижению разрешения, что затрудняет автоматическое решение задачи.

Более перспективным является использование параметрических методов спектрального оценивания на основе комбинированной модели авторегрессии - скользящего среднего (АРСС) [8]. Ориентация на современные методы спектрального анализа обусловлена возможностью получения более точных оценок спектральной плотности мощности (СПМ) и более высокого спектрального разрешения. Степень улучшения разрешения и повышение достоверности спектральных оценок определяется в этом случае соответствием выбранной модели анализируемому сигналу и возможностью аппроксимации измеренных данных с помощью нескольких параметров модели. Заметим также, что применение АР-модели временного ряда требует значительно меньших вычислительных затрат, необходимых для оценивания параметров, что является особенно привлекательным для решения поставленной задачи в реальном масштабе времени.

Суть метода заключается в следующем. Конечная последовательность из N отсчетов $x(nT)$, $x((n-1)T)$, ..., $x((n-N+1)T)$ представляется в виде суммы детерминированных и случайных последовательностей. Этой последовательности ставится в соответствие Q параметров $a_{Q1}, a_{Q2}, \dots, a_{QQ}$. Выбор параметров осуществляется так, чтобы ошибка линейного предсказания $E_Q(a_{Q1}, a_{Q2}, \dots, a_{QQ})$ была минимальной. Значение E_Q определяется в зависимости от трех факторов: структуры модели, ее порядка (числа коэффициентов $a_{Qi}, i = \overline{1, Q}$) Q и значений параметров модели a_{Qi} . Различают линейное предсказание "вперед", когда оценка $\hat{x}(nT)$ очередного отсчета $x(nT)$ рассчитывается как линейная комбинация предыдущих отсчетов последовательности:

$$\hat{x}(nT) = -\sum_{j=1}^Q a_{Qj}^B \cdot x((n-j) \cdot T), \quad (1)$$

а текущая ошибка имеет вид

$$e_{Qb}(nT) = x(nT) - \hat{x}(nT) = x(nT) + \sum_{j=1}^Q a_{Qj}^B \cdot x((n-j) \cdot T) \quad (2)$$

Коэффициенты $a_{Q1}^B, a_{Q2}^B, \dots, a_{QQ}^B$ определяются из условия минимума общей ошибки предсказания "вперед"

$$E_{Qb} = \sum_n e_{Qb}^2(nT) = \sum_n \left(x(nT) + \sum_{j=1}^Q a_{Qj}^B x((n-j)T) \right)^2 \quad (3)$$

Оценка $\hat{x}((n-Q)T)$ отсчета $x((n-Q)T)$ может производиться в соответствии с линейным предсказанием "назад", т.е. как линейная комбинация последующих отсчетов последовательности

$$\hat{x}((n-Q)T) = -\sum_{j=1}^Q a_{Qj}^H \cdot x((n-Q+j)T) \quad (4)$$

Текущая ошибка в этом случае имеет вид

$$e_{Qh}(nT) = x((n-Q)T) + \sum_{j=1}^Q a_{Qj}^H \cdot x((n-Q+j)T) \quad (5)$$

Параметры $a_{Q1}^H, a_{Q2}^H, \dots, a_{QQ}^H$ определяются из условия минимума общей ошибки предсказания "назад"

$$E_{QH} = \sum_n e_{QH}^2(nT) = \sum_n \left(x((n-Q)T) + \sum_{j=1}^Q a_{Qj}^H \cdot x((n-Q+j)T) \right)^2 \quad (6)$$

Наиболее точные результаты оценивания соответствуют случаю линейного предсказания "вперед" и "назад". При этом искомые параметры определяются из условия минимума общей ошибки предсказания

$$E_{QВН} = E_{QВ} + E_{QH}, \quad (7)$$

где $E_{QВ}, E_{QH}$ - рассчитываются соответственно по формулам (3) и (6).

От выбора порядка Q модели зависит компромисс между разрешением и дисперсией получаемой спектральной оценки (степенью гладкости оценки). Автоматический выбор порядка модели целесообразно производить в соответствии с критерием длины минимального описания (ДМО)

$$\text{ДМО}[Q] = N \cdot \ln(\hat{p}) + Q \ln(N) \quad (8)$$

где $\hat{p}$ - оценочное значение дисперсии белого шума, которое будет использоваться в качестве ошибки линейного предсказания.

Параметры модели вычисляются при $Q = 1, 2, \dots$, и для каждого значения Q определяется $\text{ДМО}[Q]$. За искомое Q принимается наименьшее значение Q , для которого одновременно верны отношения $\text{ДМО}[Q] < \text{ДМО}[Q-1]$ и $\text{ДМО}[Q+1] > \text{ДМО}[Q]$.

Параметры построенной таким образом АР-модели временного ряда могут с успехом использоваться в качестве информационных признаков при классификации дефектов. Для вычисления коэффициентов модели разработаны эффективные быстрые алгоритмы с рекурсивной структурой обновления порядка и модификации во времени, которые позволяют практически на порядок уменьшить объем вычислений по сравнению с прямыми методами определения коэффициентов. Соответствующие программы написаны на языке Borland C++ V 5.0. На рисунках 1, 2 представлены результаты расчетов, выполненных по этим программам, где содержатся спектральные АР-оценки сигналов от эталонных и распознаваемых дефектов, а также соответствующие им параметры модели. На графиках изображены АР-оценки СПМ, где интенсивность сигнала вдоль оси ординат выражена в децибелах относительно максимальной спектральной интенсивности для всех частот и вычисляется в соответствии с выражением $10 \cdot \lg \left[\frac{P}{P_{\max}} \right]$, а по оси абсцисс отложены доли частоты отсчетов, т.е. истинная частота в герцах нормирована посредством деления на частоту отсчетов $f_s = 1/T$.

Этап 3. Классификация сигналов от дефектов производилась с использованием двух методов в детерминистской постановке задачи. Для этих целей использовались наиболее разработанные и математически обоснованные методы распознавания нескольких классов, а именно метод потенциальных функций и метод потенциалов [9], в которых на этапе обучения производится построение дискриминантных функций путем показа эталонов из обучающей последовательности. Такое обучение может быть проведено заранее, а в памяти компьютера достаточно хранить структуру дискриминантных функций. Тогда на этапе классификации достаточным является вычисление значений дискриминантных функций, что не требует больших затрат процессорного времени.

Для распознавания n классов дефектов $D_1, D_2, \dots, D_n$ используется n дискриминантных функций $f_i(\bar{x})$, причем

$$f_i(\bar{x}) > f_j(\bar{x}) \text{ при } \bar{x} \in D_i \ (j = 1, 2, \dots, n; j \neq i; \bar{x} = \{a_{Q1}, a_{Q2}, \dots, a_{QQ}\}) \quad (9)$$

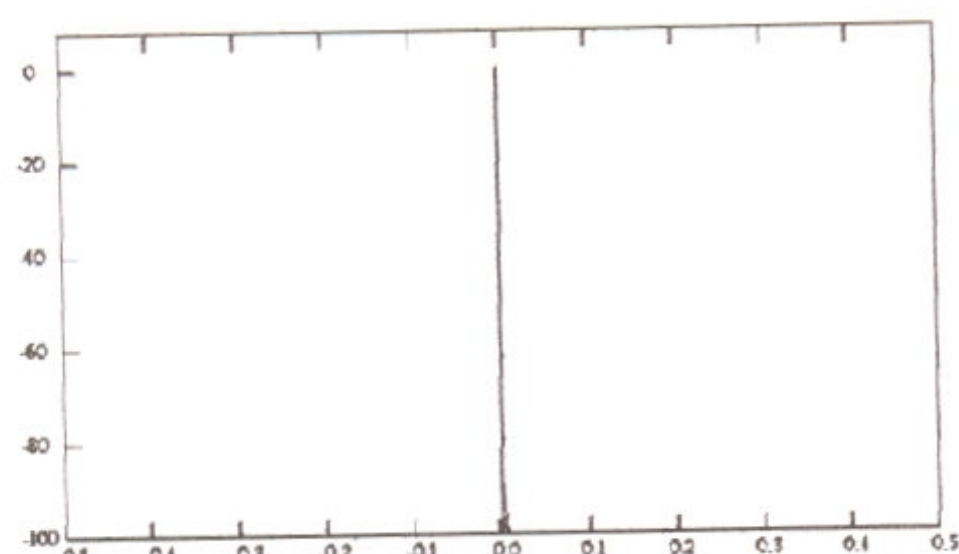
Алгоритм построения дискриминантных функций строится на основе использования потенциальной функции $K(\bar{x}, \bar{y})$. Предположим, что на k -м приближении определены все функции $f_{i(k)}(\bar{x})$ и предъявляется $(k+1)$ -й эталонный сигнал от дефекта, принадлежащий классу D_i . Если для $\bar{x}_{(k+1)}$ выполняется условие

$$f_{i(k)}(\bar{x}_{(k+1)}) > f_{j(k)}(\bar{x}_{(k+1)}) \ (j = 1, 2, \dots, n; j \neq i), \quad (10)$$

то дискриминантные функции остаются без изменений $f_{j(k+1)}(\bar{x}) = f_{j(k)}(\bar{x})$.

lp= 0.6; bp= 0.5; tp=0.3

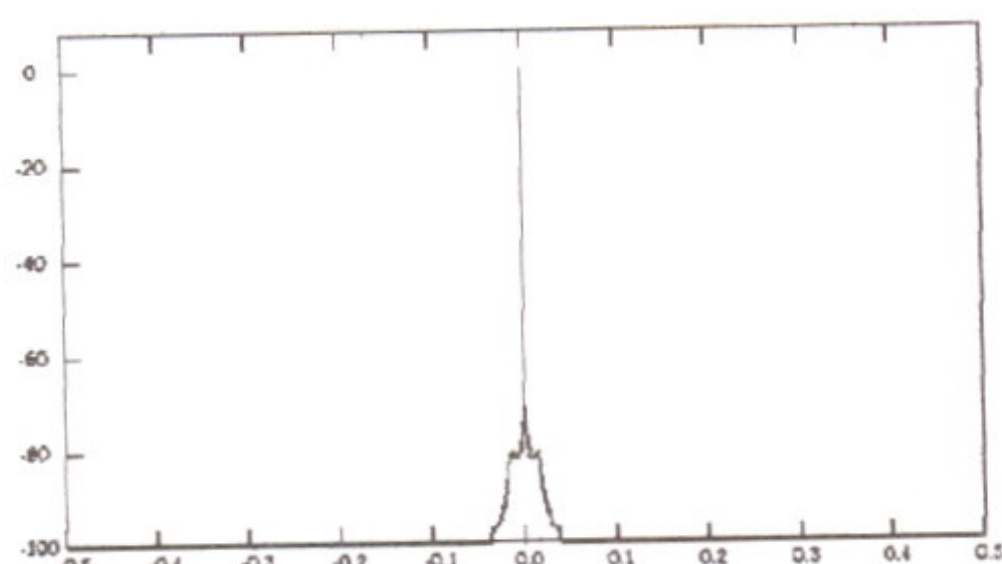
AP- параметры



af(1)=(-3.984533152,0.019863216)
af(2)=(5.521169133,-0.096422084)
af(3)=(-1.994006153,0.189617263)
af(4)=(-2.280062015,-0.188860549)
af(5)=(2.383155417,0.095277257)
af(6)=(-0.645723231,-0.019475102)

lp= 0.6; bp= 0.5; tp=0.5

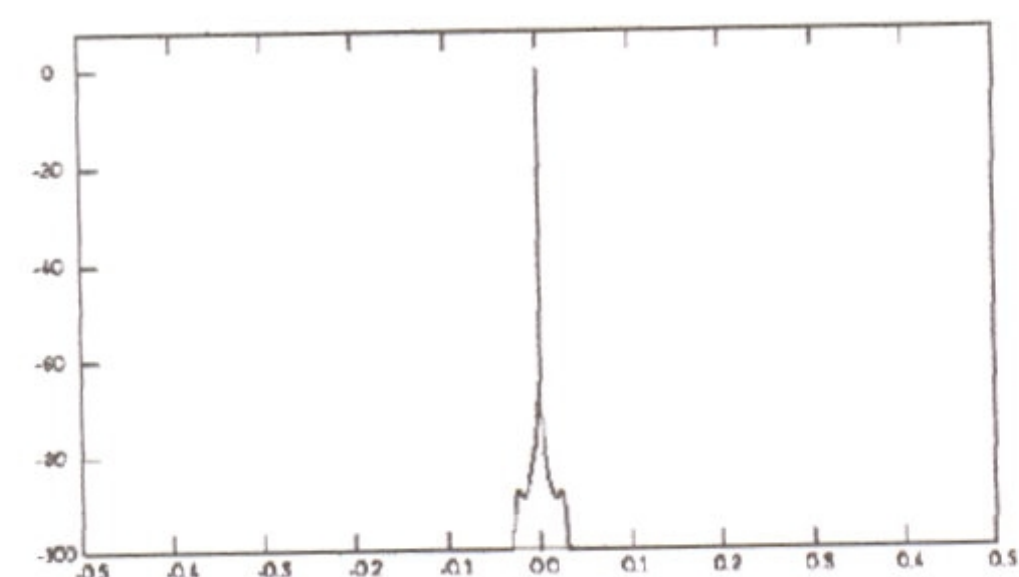
AP- параметры



af(1)=(-4.114263895,0.000954162)
af(2)=(5.928237458,-0.004478270)
af(3)=(-2.439029280,0.008441882)
af(4)=(-2.101880853,-0.007989024)
af(5)=(2.380272826,0.003795264)
af(6)=(-0.653336254,-0.000724016)

lp= 0.6; bp= 0.5; tp=0.7

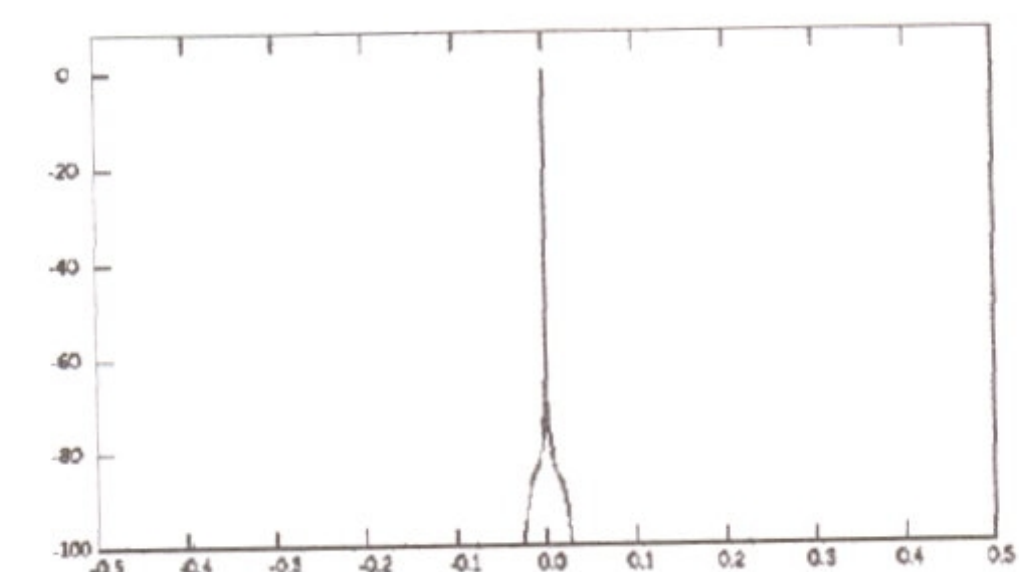
AP- параметры



af(1)=(-3.892752319,-0.001634165)
af(2)=(5.707346593,0.004892104)
af(3)=(-3.735379589,-0.004903620)
af(4)=(0.920785319,0.001645686)

lp= 0.6; bp= 0.5; tp=0.9

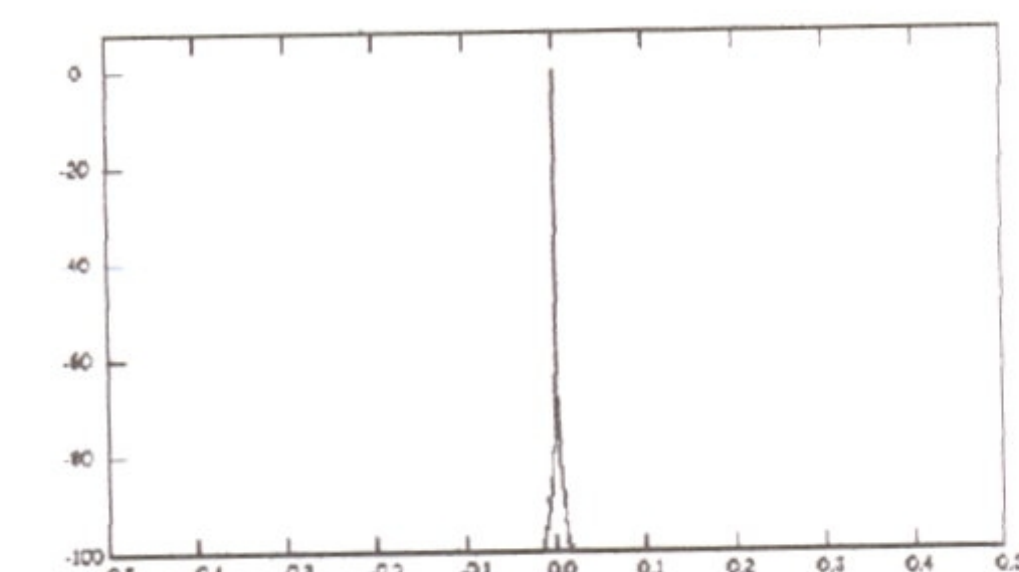
AP-параметры



af(1)=(-3.679815488,-0.028822303)
af(2)=(4.257626362,0.088027873)
af(3)=(-0.348621518,0.004522366)
af(4)=(-1.998165938,-0.319549441)
af(5)=(-0.243059869,0.428552204)
af(6)=(1.318077376,-0.075412892)
af(7)=(0.373332259,-0.259810716)
af(8)=(-1.008894236,0.216679238)
af(9)=(0.329521058,-0.054186329)

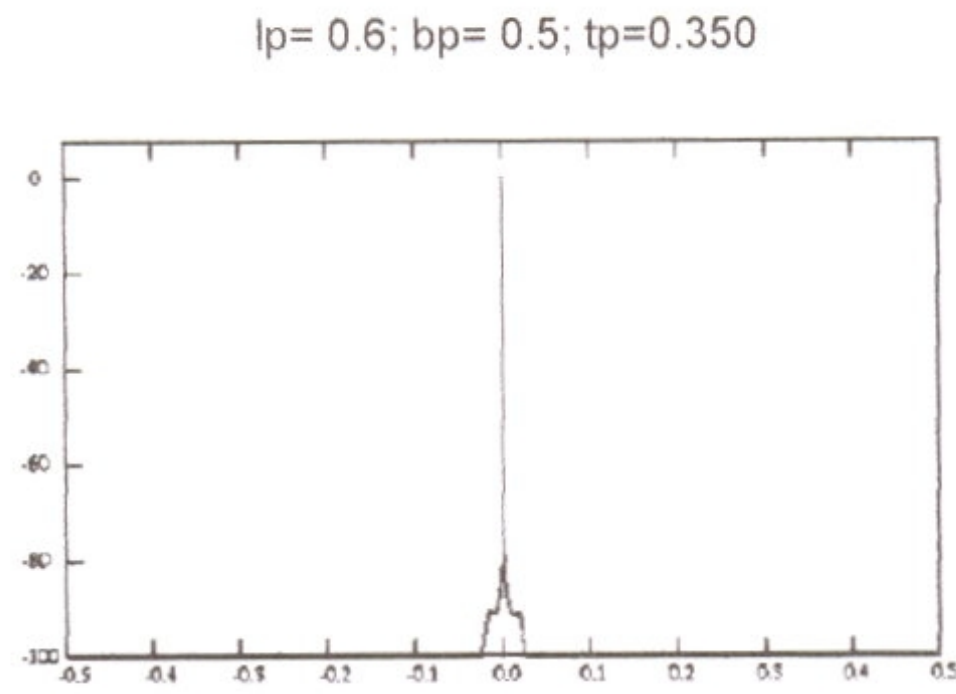
lp= 0.6; bp= 0.5; tp=1.1

AP-параметры



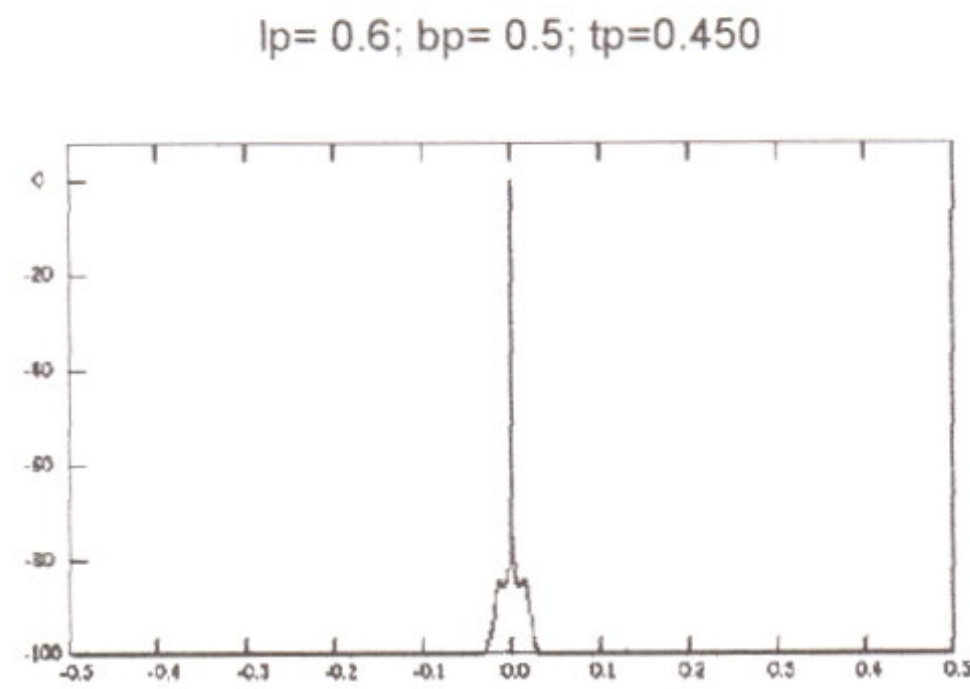
af(1)=(-3.809178123,0.001132356)
af(2)=(5.529014423,-0.003415102)
af(3)=(-3.628448080,0.003463382)
af(4)=(0.908611790,-0.001180637)

Рисунок 1 - Спектральные портреты и AP-параметры эталонных дефектов



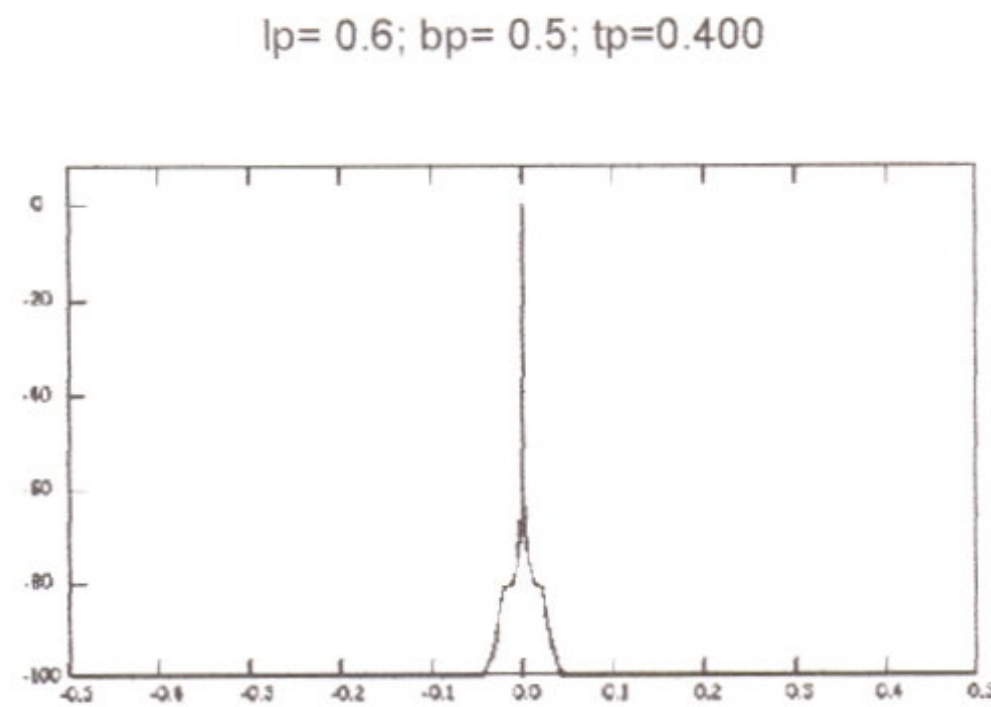
AP- параметры

af(1)=(-3.998215536,0.097340541)
 af(2)=(5.547714956,-0.477747739)
 af(3)=(-2.020147911,0.947029035)
 af(4)=(-2.228522902,-0.947813468)
 af(5)=(2.319565183,0.478931229)
 af(6)=(-0.620393788,-0.097739599)



AP- параметры

af(1)=(-4.162532941,0.004286601)
 af(2)=(6.175508553,-0.018122020)
 af(3)=(-2.944949851,0.029903172)
 af(4)=(-1.584671444,-0.023740482)
 af(5)=(2.115908026,0.008827237)
 af(6)=(-0.599262340,-0.001154509)



AP- параметры

af(1)=(-4.373549306,0.009898455)
 af(2)=(6.725490226,-0.038926035)
 af(3)=(-3.089773708,0.036262050)
 af(4)=(-1.894636129,0.059699406)
 af(5)=(1.106524042,-0.168832949)
 af(6)=(1.915899754,0.161762580)
 af(7)=(-1.861656184,-0.072864291)
 af(8)=(0.471701307,0.013000781)

Рисунок 2 - Спектральные портреты и AP-параметры распознаваемых дефектов

В случае, если одна или несколько дискриминантных функций не удовлетворяют условию (9), например

$$f_{s(k)}(\bar{x}_{(k+1)}) > f_{i(k)}(\bar{x}_{(k+1)}) \text{ при } \bar{x}_{(k+1)} \in D_i, \quad (11)$$

производится корректировка функций

$$\begin{aligned} f_{i(k+1)}(\bar{x}) &= f_{i(k)}(\bar{x}) + K(\bar{x}, \bar{x}_{(k+1)}); \\ f_{s(k+1)}(\bar{x}) &= f_{s(k)}(\bar{x}) - K(\bar{x}, \bar{x}_{(k+1)}), \end{aligned} \quad (12)$$

В результате модификации усиливается потенциал функции $f_i(\bar{x})$ и ослабляется потенциал функции $f_s(\bar{x})$. Такая корректировка проводится для всех функций, нарушивших условие (9).

Потенциальная функция принимается зависящей от расстояния в пространстве признаков и может иметь вид

$$K(\bar{x}, \bar{y}) = e^{-\alpha \rho^n(\bar{x}, \bar{y})}; \quad (13)$$

$$K(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{1 + \alpha \rho^n(\bar{x}, \bar{y})}, \quad (14)$$

где $\rho(\bar{x}, \bar{y}) = \left[\sum_{i=1}^Q |x_i - y_i|^\gamma \right]^{\frac{1}{\gamma}}$.

Формулы (13), (14) содержат положительные константы α, η, γ , которые выбирают на основании опыта практической реализации алгоритма.

При проведении классификации функция $f_i(\bar{x})$ принимает для точек класса D_i наибольшие значения по сравнению со всеми другими дискриминантными функциями. В случае, если число информационных признаков, участвующих в вычислении значения дискриминантной функции классов, оказывается не одинаковым, то производится дополнение нулями параметров того класса, который имеет меньшее количество признаков.

Метод потенциалов в малой степени отличается от метода потенциальных функций, описанного выше. Алгоритм построения дискриминантных функций для него не является самообучающимся, а строится на основе имеющейся предварительной информации. Для изучения подробностей основ метода рекомендуется воспользоваться работой [6].

Результаты классификации дефектов с применением указанных методов содержатся в таблицах 1 и 2, где демонстрируется вычисление дискриминантных функций, а цветом выделены выбранные классы дефектов, к которым отнесены предъявляемые для распознавания дефекты. Анализ данных свидетельствует о предпочтительном использовании для классификации метода потенциальных функций, что снижает вероятность принятия ошибочных решений из-за существенной разницы значений дискриминантных функций в альтернативных вариантах.

Таблица 1 - Результаты распознавания методом потенциалов

f_p – эталон. f_p – опозн.	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
0.35	0.76337738	0.58411226	0.51395193	0.56288340	0.33666575
0.40	0.06780382	0.12523149	0.04836644	0.03931486	0.01864844
0.45	0.25060009	0.44386599	0.17846578	0.18569356	0.10230460

Таблица 2 - Результаты распознавания методом потенциальных функций

f_p – эталон. f_p – опозн.	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
0.35	1.05589618	0.15957059	-0.19123106	0.05342626	-1.07766197
0.40	0.03965402	0.32679239	-0.05753284	-0.10279073	-0.20612285
0.45	0.09207043	1.05839993	-0.26860113	-0.23246222	-0.64940702

Алгоритмы определения геометрических размеров дефектов реализованы в виде программ, написанных на языке программирования Borland C++ V5.0, что позволяет эффективно решать задачи классификации в реальном масштабе времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кротов Л. Н., Шлеенков А. С., Мельник Р. С., Щербинин С. В. Компьютерное моделирование магнитных полей дефектов. Двухмерная задача. //Дефектоскопия, - 1995. - №9. - С.27-32.
2. Яковенко В. В., Гальченко В. Я., Велигура А. В. Моделирование процессов выявления дефектов в теории магнитного неразрушающего контроля //Вісник Східноукраїнського державного університету - 1998. - №3(13). - С.25-28.
3. Гальченко В. В., Яковенко В. В., Велигура А. В. Верификация информационной модели процессов магнитного контроля ферромагнитных объектов //Вісник Східноукраїнського державного університету - 1998. - №3(13). - С. 109-112.
4. Гальченко В. Я. Информационные модели в теории и практике электромагнитной дефектоскопии. - Луганск: Изд-во Восточноукраинского государственного университета, 1997. - 262 с.
5. Гальченко В. Я. Идентификация несплошностей в модуляционной вихретоковой дефектоскопии по признаку их протяженности вдоль направления контроля //Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - 1998. - №12. - С.165-170.
6. Фор . Восприятие и распознавание образов. - М.: Машиностроение, 1989. - 272 с.
7. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред. Э. Оппенгейма. - М.: Мир, 1980. - 552 с.
8. Кей С. М., Марпл С. Л. Современные методы спектрального анализа //ТИИЭР. - 1981. - Т.69. - №11. - С. 5-51.
9. Айзерман М. А., Браверман Э. М., Розоноэр Л. Т. Метод потенциальных функций в теории обучения машин. - М.: Наука, 1970. - 384 с.