

РАДИОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.39

Абрамович А. А.¹, Каширский И. С.², Поддубный В. А.³

¹Аспирант кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

²Канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

³Канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

МЕТОД ОБРАБОТКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Актуальность. Рассмотрена задача обработки сигналов вихретоковых преобразователей (ВТП), отраженных от металлических неоднородностей, находящихся в диэлектрической среде (грунте). Объектом исследования являлся метод обработки отраженных сигналов.

Цель работы – создание метода, удобного для цифровой обработки сигналов, позволяющего расширить возможности ВТП путем анализа типа металла в подмножестве немагнитных (медь, золото, серебро и других) и магнитных (сталь, никель) материалов.

Метод. Предложен метод обработки отраженных от металлических неоднородностей сигналов вихретоковых преобразователей во временной области, который позволяет идентифицировать тип металла в пределах подмножества немагнитных и магнитных материалов, что позволяет повысить эффективность обнаружения объектов, выполненных из цветных и драгоценных металлов, скрытых в диэлектрической среде.

Временной сигнал, полученный ВТП, оцифровывается и превращается программным обеспечением в графический образ, в котором непрерывное изменение сигнала заменяется характерными линиями (графическим образом). Графические образы имеют большую информационную насыщенность, потому что их характерные линии отличаются координатами, высотой и полярностью. Фиксируются также точки перехода сигнала через нуль.

Такая форма сигнала наглядна и удобна для сравнения сигналов.

Результаты. Предложенный метод реализован программно и экспериментально подтверждена возможность его использования для решения задачи идентификации типа металла в рамках подмножества немагнитных и магнитных материалов.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного метода обработки сигналов вихретоковых преобразователей и программного обеспечения его реализующего. Они позволяют рекомендовать метод для решения задач идентификации металла, из которого изготовлен объект, находящийся в диэлектрической среде (грунте). Перспективы дальнейших исследований заключаются в адаптации математического и программного обеспечения для идентификации сигналов серийных вихретоковых преобразователей, что позволит расширить их функциональные возможности.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, металлические неоднородности, идентификация металлов.

НОМЕНКЛАТУРА

x – дискретные отсчеты;

m – количество отсчетов у выборке;

n – степень полинома;

A – матрица коэффициентов;

F_0 – вектор численных значений полинома в дискретных точках;

Z – вектор неизвестных коэффициентов полинома;

A^T – транспонированная матрица;

$P(x)$ – полином аппроксимации участка из дискретных отсчетов;

$a_1 \dots a_{n-1}$ – коэффициенты полинома аппроксимации;
 $[1 \ x_{1,1} \ x_{1,1}^2 \ \dots x_{1,1}^n]$ – дискретные отсчеты первого участка первой точки с возрастанием степени от 0 до n ;

$[1 \ x_{1,m} \ x_{1,m}^2 \ \dots x_{1,m}^n]$ – дискретные отсчеты первого участка m -й точки с возрастанием степени от 0 до n ;

$a_1^I \dots a_{n-1}^I$ – коэффициенты полинома аппроксимации для первого участка;

$a_1^I \dots a_{n-1}^I$ – коэффициенты полинома аппроксимации для второго участка;

Z_I – вектор неизвестных коэффициентов полинома для первого участка;

Z_{II} – вектор неизвестных коэффициентов полинома для второго участка;

$P_I(x)$ – полином аппроксимации первого участка из дискретных отсчетов;

$P_{II}(x)$ – полином аппроксимации второго участка из дискретных отсчетов;

$\frac{dP_I(x)}{dx}$ – производная полинома аппроксимации первого участка из дискретных отсчетов;

$\frac{dP_{II}(x)}{dx}$ – производная полинома аппроксимации второго участка из дискретных отсчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Современные радиолокационные системы [1] позволяют обнаруживать цель (объект), определять ее координаты в пространстве и сопровождать ее, если она движется. Кроме того, они позволяют определить тип цели, т.е. идентифицировать ее по заранее заложенным в базе данных образцам. Большинство радиолокационных станций работают в импульсном режиме, используя наносекундные зондирующие импульсы. В этом случае информации о типе цели лежит в форме отраженного от нее сигнала. Известные типы РЛС определяют спектр отраженного от цели сигнала, анализируют его, выделяют из него с помощью фильтрующих систем определенные частоты спектра и сравнивают их с информацией, имеющейся в базе данных. Это позволяет с некоторой вероятностью определить тип цели.

Однако такой метод не всегда применим. Например, при работе вихретоковых импульсных преобразователей

[2], спектр отраженного сигнала которых, не имеет четко выраженных частот, что не позволяет использовать известные методы радиолокации для идентификации металлических целей, находящихся в диэлектрической среде (грунте).

Ранее одним из авторов был предложен метод определения металлических предметов в диэлектрической среде импульсным вихретоковым методом с помощью спектрального анализа. Однако такой метод достаточно неудобен в работе и не позволяет идентифицировать два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг с другом (на расстоянии меньшем половины диаметра излучающей антенны).

Объектом исследования является метод обработки отраженных сигналов, лишенный указанных недостатков.

Предметом исследования являлись форма сигнала ВТП и метод сравнения параметров этого сигнала.

Промышленные металлоискатели, построенные на вихретоковом методе обнаружения [1], решают задачу дихотомической идентификации исследуемых объектов, которая состоит в разбиении их множества на два подмножества: цветных (немагнитных) и черных (магнитных). Однако важной остается задача идентификации металлов внутри подмножества.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отраженные от целей (объектов) сигналы вихретокового преобразователя, полученные в результате взаимодействия зондирующего импульса с объектами [3], выполненными из разных металлов (например, меди, стали) показаны на рис. 1. Объекты имеют одинаковые размеры и геометрическую форму. Сигналы нормированы по амплитуде и длительности.

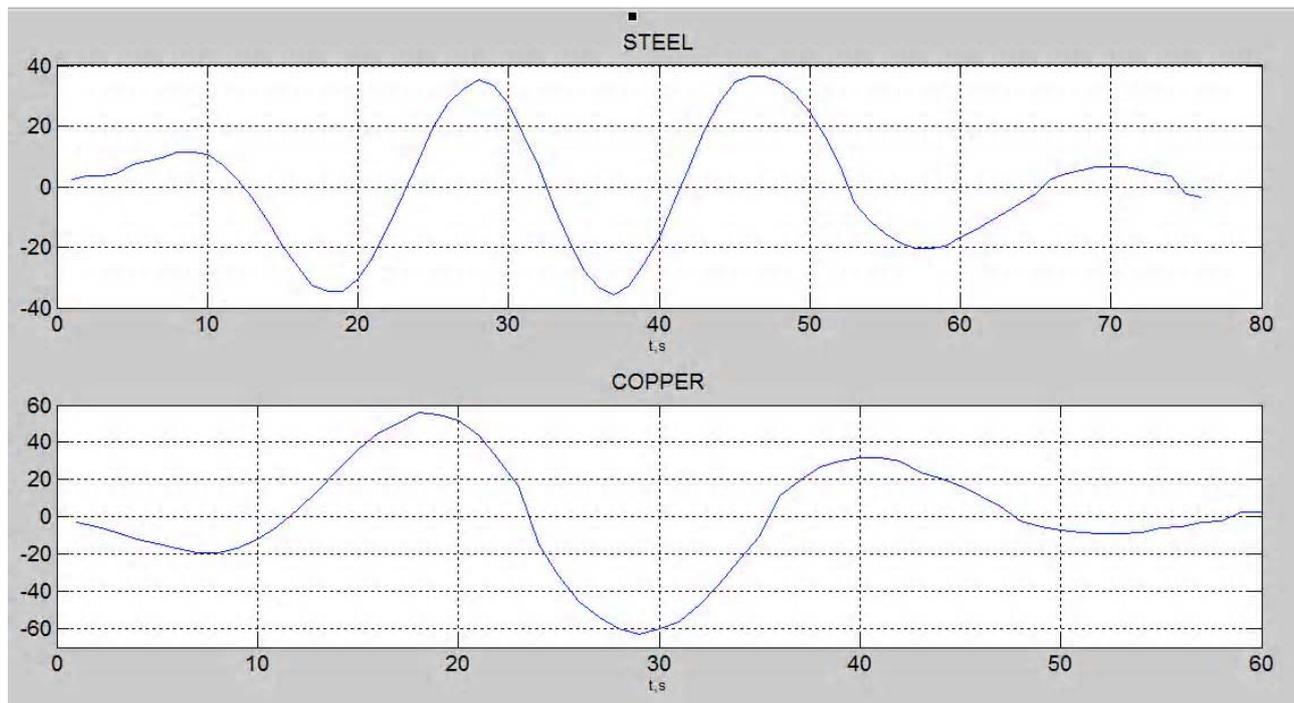


Рисунок 1 – Форма сигналов вихретокового преобразователя для целей, выполненных из стали и меди

Как видно на рис. 1, временные сигналы, полученные от разных целей, имеют различную форму и количество экстремумов.

В этих сигналах надо выделить характерные свойства, которые можно объективно сравнивать. Для сравнения наилучшей будет аналогия со спектрометром, выделяющим спектральные линии различных металлов. В данной задаче спектральные линии должны быть заменены характерными линиями, определяющими положение экстремумов сигнала и точек перехода сигнала через нулевой уровень. Тогда временной сигнал преобразуется в другую графическую форму, удобную для сравнения.

Преобразование должно удовлетворять следующим критериям:

- реальное время работы. Быстродействие техники и выполнение программы должно согласовываться с физическими возможностями оператора и не создавать задержек;

- высокая надежность программного обеспечения. Допускаются сбои в работе техники, но в работе программного обеспечения они исключаются. Исключаются также аварийные остановки, перезагрузка, закливание и неоднозначные ответы;

- соответствие классу прибора. Технические устройства, реализующие работу программного обеспечения, должны иметь возможность интеграции в реальный прибор и быть соизмеримы с его размерами и весом.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время существует большое количество ВТП, работающих на разных принципах. На современном рынке это металлоискатели зарубежных фирм Minelab, Fisher, Garret [5]. Все их множество можно разделить на два класса: тональные и импульсные. К тональным относятся приборы типа VLF (Very Low Frequency (VLF) detectors), которые для индикации наличия объекта используют звуковую (разносную) частоту между опорным и перестраиваемым под воздействием выявляемого объекта генераторами. Они позволяют оператору на слух по изменению тона сигнала определить наличие объекта. Квалифицированный оператор может отличить черный металл от цветного.

Способ выделения небольшой по величине разностной частоты, который лежит в основе работы тональных ВТП, ограничивает технические возможности приборов из-за взаимной синхронизации генераторов, работающих на близких частотах. Как показывает практика, если не применять специальные методы развязки генераторов, то получить разносную частоту ниже 10 кГц достаточно проблематично, а это ограничивает чувствительность металлоискателя.

Избирательность по типу металла проявляется слабо. Кроме того, по сдвигу разностной частоты определить фазу отраженного сигнала практически невозможно. Поэтому тоновые ВТП могут осуществлять только дихотомическую оценку объекта. Т.е. определить из черного или цветного он металла. Селективность у тональных металлоискателей отсутствует.

Преобразователи типа PI (pulse induction) работают с импульсными сигналами [1] и по своей сути являются низкочастотными радиолокационными станциями ближ-

него обнаружения [1, 3, 4]. Информация об исследуемом объекте лежит в амплитуде и форме отраженного от объекта сигнала. Обычно один из этих параметров является информативным, а два других мешающими.

Для определения и анализа информативного параметра в современных металлоискателях используют амплитудный, фазовый или частотный методы обработки сигнала.

Амплитудный метод [6] широко используется для анализа сигнала в случае, когда информативным фактором есть амплитуда сигнала, а мешающими фазы или частота принятого сигнала. Для этого в состав ВТП вводят амплитудный детектор, который определяет уровень входного сигнала. Он сравнивается с пороговым уровнем, который задает чувствительность металлоискателя. И при достижении порогового значения входного сигнала подается информация на индикаторное устройство о наличии металлического объекта. При необходимости селективными устройствами можно определить, из какого металла изготовлен объект (черного или цветного). В этом случае изменение фазы или частоты сигнала на результат измерения не влияют. Большинство современных металлоискателей как раз и используют идентификацию наличия металла по пороговому уровню, что позволяет выполнять только дихотомический анализ.

Фазовый и частотный методы применяются при существенном влиянии мешающего фактора на амплитуду сигнала. В структурной схеме ВТП, который реализует указанные методы, вместо амплитудного детектора используют фазовый или частотный. Эти два метода используются, как правило, в приборах неразрушающего контроля дефектов металлических объектов.

Амплитудный подход к определению информативного параметра приводит к большому количеству ложных срабатываний при поисковых работах на участках с большим количеством мусора (металлическая стружка, гвозди, пробки и т.д.). Для устранения влияния мусора искусственно снижают чувствительность прибора, а это приводит к потере информации о металлических предметах малых размеров. Поэтому металлоискатели, построенные на вихретоковом методе обнаружения, не позволяют определить тип металла, если два предмета из разных металлов лежат в непосредственной близости один от другого. Минимальное расстояние, на котором можно различить предметы, равно половине диаметра приемной антенны.

Ранее одним из авторов [10] был предложен метод определения металлических предметов в диэлектрической среде импульсным вихретоковым методом с помощью спектрального анализа сигнала, отраженного от исследуемого объекта. Применение спектрального анализа позволяет легко произвести дихотомическую классификацию металла, а также при наличии высокоточных спектроанализаторов (погрешность измерения не хуже 0,5...1%), различение материалов в подгруппе цветных. Это позволяет отличить, например, медь от золота или серебра. Однако такой метод достаточно неудобен в работе и не позволяет идентифицировать два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг с другом (на расстоянии меньшем половины диаметра излучающей антенны).

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых методов обработки отраженных сигналов в вихретоковом методе обнаружения металлов, позволяющих анализировать тип металла в подгруппах цветных или черных металлов.

В работе предлагается метод анализа сигналов вихретоковой системы обнаружения объектов по временному отклику (метод графических образов). При использовании предложенного метода с помощью соответствующего программного обеспечения отраженный от объекта сигнал превращается в цифровые коды и графические образы, что позволяет их легко сравнивать, с имеющимися в базе данных ранее набранными эталонами, что позволяет идентифицировать объект, в случае медленного изменения спектра сигнала, который не имеет выраженных несущих.

Целью данной работы является создание метода обработки сигнала ВТП, который удобен для накопления базы данных известных материалов и сравнения сигнала от неизвестного объекта с имеющимися в базе эталонов, что позволяет расширить функциональные возможности вихретокового метода. Метод позволяет определить из подмножеств немагнитных (медь, золото, серебро и других) и магнитных (сталь, никель) материалов тип металла, из которого выполнен объект.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Временные сигналы, отраженные от объектов, изготовленных из разных материалов (рис. 1), имеют вид осциллирующих кривых с различным периодом и количеством экстремумов. Они в разных точках переходят через ноль.

Сложность рассматриваемых временных сигналов не позволяет использовать для их аппроксимации одну группу функций и требует кусочной аппроксимации отдельных временных участков сигнала. Использование стандартных методов кусочно-линейной, кусочно-квадратичной, кусочно-кубической аппроксимаций затруднительно ввиду больших массивов обработки информации. Наименьший объем массивов имеет кусочно-полиномиальная аппроксимация.

Степень полинома аппроксимации и количество участков полной аппроксимации изменяется в зависимости от сложности сигнала и необходимой точности аппроксимации. На каждом участке задаем количество дискретных точек $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,m}$, полученных в эксперименте, и записываем полином аппроксимации участка [4, 5]

$$P(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n-1}x^n. \quad (1)$$

Расчеты полинома (1) в дискретных точках представим в виде прямоугольной матрицы

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,1}^2 & \dots & x_{1,1}^n \\ 1 & x_{1,2} & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,2}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1,m} & x_{1,m}^2 & \dots & x_{1,m}^n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В работе поставлена вычислительная задача кусочно-полиномиальной аппроксимации заданного сигнала при минимальном количестве участков аппроксимации или максимальном значении m на каждом участке. Наиболее простая реализация получается в случае $n = m - 1$. Для расчета коэффициентов полинома (1) необходимо решить систему линейных уравнений

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,1}^2 & \dots & x_{1,1}^{m-1} \\ 1 & x_{1,2} & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,2}^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1,m} & x_{1,m}^2 & \dots & x_{1,m}^{m-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(x_{1,1}) \\ P(x_{1,2}) \\ \vdots \\ P(x_{1,m}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Однако для значений $m \geq 25$ система линейных уравнений (3) оказывается плохо обусловленной (некорректной) и не может быть решена известными методами [6, 7].

В работе применен другой способ решения поставленной задачи, заключающийся в уменьшении степени аппроксимирующего полинома, вследствие чего система линейных уравнений оказывается несовместной, и в матрице (2) количество строк значительно превышает количества столбцов ($m \gg n$). Введем вектор F_0 численных значений полинома (1) в дискретных точках и вектор Z неизвестных коэффициентов полинома (1)

$$F_0 = \begin{bmatrix} P(x_{1,1}) \\ P(x_{1,2}) \\ \vdots \\ P(x_{1,m}) \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тогда из выражений (1) и (2) следует система линейных уравнений в матричной форме

$$A \cdot Z = F_0. \quad (5)$$

Система уравнений (5) является несовместной [7] и для ее решения применяем матричный алгоритм использования псевдоматриц

$$A^T \cdot A \cdot Z = A^T \cdot F_0. \quad (6)$$

где A^T – транспонированная матрица (2). Матричное уравнение (6) имеет решение

$$Z = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F_0 \quad (7)$$

Для любых дискретных точек матрица $A^T \cdot A$ остается положительно определенной, что обеспечивает единственность решения (6) и минимум квадратичной ошибки аппроксимации. Однако это не гарантирует точности решения. Поэтому для полной надежности решение (6) подставляется в выражение (5), и в случае приемлемой точности уравнений (5), задача считается решенной. Для случаев существенных ошибок в уравнениях (5) результаты (6) ликвидируются, уменьшается размер участка аппроксимации и расчет по формулам (5)–(7) повторяется.

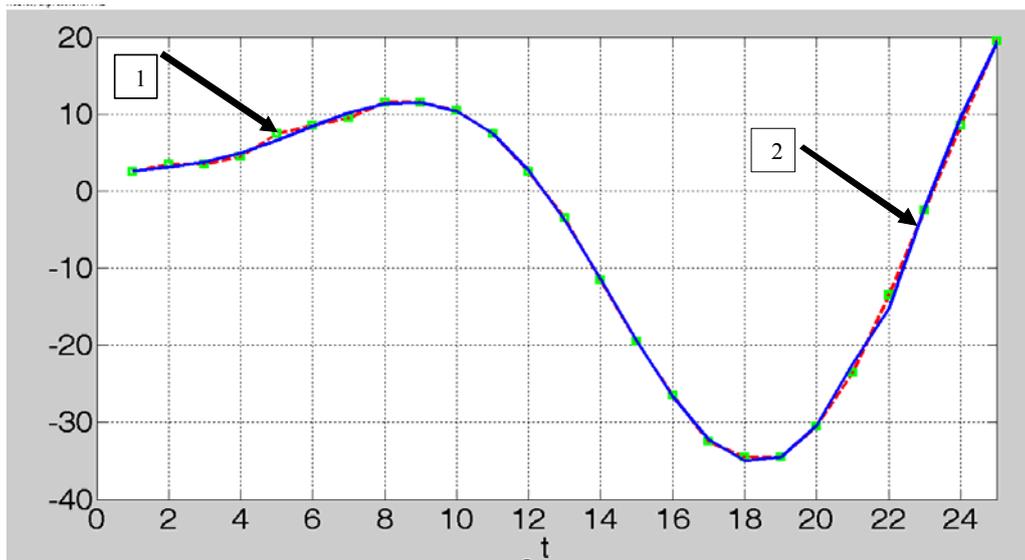


Рисунок 2 – Сопоставление сигнала и функции аппроксимации:
 1 – аппроксимированная кривая, 2 – дискретные значения временного сигнала

На рис. 2 (кривая 1) представлены результаты решения задачи аппроксимации сигнала. На первом участке для $m = 25$; $n = 6$ имеем хорошее совпадение заданных и вычисленных дискретных значений сигнала. Заданные дискретные значения временного сигнала соединены на рисунке штриховыми линиями (кривая 1), а вычисленные значения изображены сплошными линиями (кривая 2).

После успешного расчета на всех участках получаем векторы решений

$$Z_I = \begin{bmatrix} a_1^I \\ a_2^I \\ \vdots \\ a_{n1-1}^I \end{bmatrix}; \quad Z_{II} = \begin{bmatrix} a_1^{II} \\ a_2^{II} \\ \vdots \\ a_{n2-1}^{II} \end{bmatrix}; \dots \quad (8)$$

Расчет по всем векторам Z_I, Z_{II}, \dots обеспечивает совпадение полной аппроксимирующей кривой с заданной кривой временного сигнала.

На следующем этапе анализируются аппроксимирующие полиномы участков

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + \dots + a_{n1-1}^I x^{n1}; \\ P_{II}(x) &= a_1^{II} + a_2^{II} x + a_3^{II} x^2 + \dots + a_{n2-1}^{II} x^{n2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Каждый полином пересекает вещественную ось в нескольких точках (корни, нули) и имеет несколько экстремумов (минимумов, максимумов), и все эти характерные точки необходимо преобразовать в характерные линии.

Для поиска корней полиномов (9) существуют стандартные программы. Однако эксперимент показывает, что полиномы на отдельных участках оказываются сложным для стандартных программ.

Для примера на первом участке определен полином степени $n = 6$, аппроксимирующий дискретные значения на рис. 2

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + a_4^I x^3 + a_5^I x^4 + a_6^I x^5 + a_7^I x^6 = \\ &= -2,736789505196347e-5 + 1,824844329574749e-3 \cdot x - \\ &- 0,04135468883812621 \cdot x^2 + 0,3657651088735747 \cdot x^3 - \\ &- 1,161814528086325 \cdot x^4 + 1,709377375918848 \cdot x^5 + \\ &+ 0,903306791777141 \cdot x^6. \end{aligned}$$

Как видно на рис. 2, кривая переходит через нулевой уровень в точках (вещественные корни полинома)

$$\bar{x}_1 = 12,3; \quad \bar{x}_2 = 23,2.$$

В среде Matlab найдены корни полинома:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= -1,427660473208311; \quad \bar{x}_2 = 0,0368029116621054; \\ \bar{x}_3 &= 0,0431838328398604; \quad \bar{x}_4 = 0,08105909387906636; \\ \bar{x}_{5,6} &= 0,1842527080086087 \pm 0,21031447719915121 i \end{aligned}$$

Кроме ошибочных результатов, проведенные вычисления определяют еще одну важную проблему – комплексно-сопряженные корни полинома, которые для вещественного временного сигнала не содержат полезной информации и засоряют информационное поле. Для устранения этих недостатков предусмотрено сканирование дискретных точек участка и выбор малых интервалов, в которых временной сигнал меняет полярность. Выделенные интервалы сокращаются методом секущих до определения корней полинома с требуемой точностью.

Для определения координат экстремумов отдельных участков рассматриваются дифференцированные аналитические полиномы (9)

$$\begin{aligned} \frac{dP_I(x)}{dx} &= a_2^I + 2a_3^I x + \dots + (n1)a_{n1}^I - 2x^{n1-1}, \\ \frac{dP_{II}(x)}{dx} &= a_2^{II} + 2a_3^{II} x + \dots + (n2)a_{n2}^{II} - 2x^{n2-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для каждого участка вновь решается задача определения корней полиномов

$$\frac{dP_I(x)}{dx} = 0; \frac{dP_{II}(x)}{dx} = 0; \dots \quad (11)$$

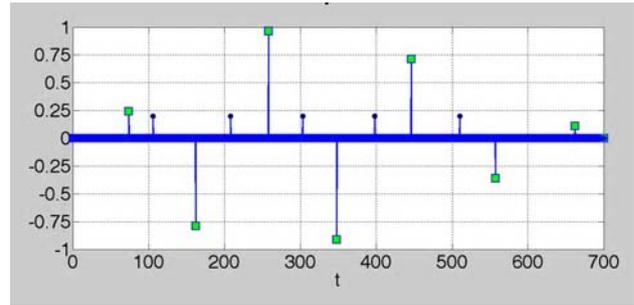
Теперь корни полиномов (10) определяют расположение экстремумов на участке, а временной сигнал – их высоту.

Степени полиномов (10) меньше степени полиномов (9), вследствие чего на стыке участков появляются «мертвые зоны», в которые могут попадать экстремумы. В этом случае при выборе участков надо предусмотреть их перекрытие.

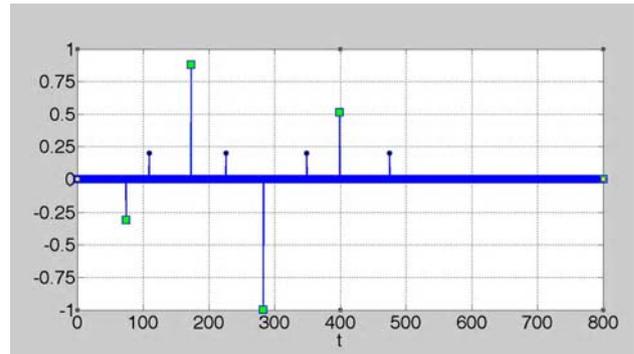
Анализируя этапы работы алгоритма, важно отметить, что численное решение на каждом участке единственное и надежно контролируется по точности. Заданный временной сигнал, полученный системой, преобразуется программой в графический образ, в котором непрерывное изменение сигнала заменяется характерными линиями. Графические образы имеют большую информационную насыщенность, т.к. их характерные линии различаются координатами, высотой и полярностью. Кроме того, образ дополняется точками перехода сигнала через нулевой уровень.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Графические образы имеют большую информационную насыщенность, т.к. их характерные линии различаются координатами, высотой и полярностью. Кроме того, образ дополняется точками перехода сигнала через нулевой уровень. Соответствующие временным сигналам (рис. 1) графические образы представлены на рис. 3.



а



б

Рисунок 3 – Форма сигналов вихретокового преобразователя для объектов выполненных из стали и меди (а – сталь, б – медь)

Временные сигналы, показанные на рис. 1, действительно различны, однако их различие сложно фиксировать визуально, тогда как различие их графических образов является очевидным.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных экспериментов получены графические образы ряда объектов, которые изготовлены из различных металлов. Параметры графических образов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры графических образов исследованных металлов

№ экстремума	1	2	3	4	5	6	7	К, % *
Сталь								
Амплитуда	0,3055	-0,9471	0,9461	-0,9007	0,9826	-0,5326	0,1844	3,7
Координаты экстремумов	8	18	28	36	46	57	69	
Координаты нулей	12	23	32	41	52	65		
Медь								
Амплитуда	-0,2551	0,8720	-0,9963	0,4949	-0,1403	-	-	43
Координаты экстремумов	7	18	29	41	52	-	-	
Координаты нулей	11	23	36	49	56	-	-	
Серебро								
Амплитуда	-0,2462	0,8406	-0,9917	0,5086	-0,1494	-	-	39,49
Координаты экстремумов	7	17	28	40	50	-	-	
Координаты нулей	10	22	35	47	57	-	-	
Титан								
Амплитуда	0,5026	-0,9139	1,0000	-0,5525	-	-	-	50
Координаты экстремумов	5	14	26	35	-	-	-	
Координаты нулей	8	20	31	41	-	-	-	
Алюминий								
Амплитуда	-0,3073	0,8535	-1,0000	0,4309	-0,1411	0,0240	-0,042	49,5
Координаты экстремумов	7	18	27	38	50	57	60	
Координаты нулей	11	22	34	46	56	58	-	

* – К процентное различие между двумя наибольшими позитивными максимумами

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного метода графических образов и реализующих их программных средств.

Как видно табл. 1, объекты, изготовленные из разных металлов, можно оценить по процентной разнице между двумя наибольшими позитивными максимумами графического образа и временным расположением максимумов и нулей графического образа, что позволяет в конечном счете идентифицировать объекты по типу металла, из которого они изготовлены [8, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена и экспериментально подтверждена методика обработки сигналов вихретокового преобразователя ближней локации с помощью метода графических образов и показана возможность идентификация объектов (целей) по типу металла, из которого они выполнены.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках инициативной научно-исследовательской темы «Исследование возможности применения кепстрального анализа сигналов металлоискателя с целью дихотомического определения типа металла» (номер гос. регистрации 0216U0007428) кафедры радиотехнических устройств и систем радиотехнического факультета Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Научный руководитель доцент, канд.техн.наук. Мрачковский О. Д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Г. Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих ук-рывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / Г. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2005. – № 12. – С. 42–45.
2. Правда В. І. Георадари / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія – Радіоелектроніка та телекомунікації.– 2015. – № 818. – С. 49–54.
3. Промышленная группа Лаборант. Анализаторы металлов и руд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laborant.net/catalog> (дата звернення 21.04.2017) – Назва з екрана.
4. Абрамович А. О. Радиолокационно-вихретоковый георадар / А. О. Абрамович // Вестник НТТУ «КПИ». Сер. Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2014. – Вып. 57. – С. 77–82.
5. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков. – М. : Наука, 1966. – т.1, 632 с.
6. Кунц К. С. Численный анализ / К. С. Кунц. – М. : Техника, 1964. – 389 с.
7. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1967. – 575 с.
8. CRS Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition / Ed. D. R. Lide. – Taylor & Francis : CRC Press, 2007.– P. 9.77.
9. Сайфуллин Р. С. Новая таблица Менделеева / Р. С. Сайфуллин, А. Р. Сайфуллин // Химия и жизнь. – 2003. – № 12. – С. 14–17.
10. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер: Технічні науки. – 2017. – Вип. №1(79). – С. 48–51.

Статья поступила в редакцию 21.06.2017.

После доработки 30.08.2017.

Абрамович А. О.¹, Каширский І. С.², Піддубний В. О.³

¹Аспірант кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³Канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МЕТОД ОБРОБКИ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Актуальність. Розглянуто задачу обробки сигналів вихрострумових перетворювачів (ВСП), відбитих від металевих неоднорідностей, що знаходяться в діелектричному середовищі (грунті). Об'єктом дослідження був метод обробки відбитих сигналів.

Мета роботи – створення зручного методу для цифрової обробки сигналів, що дозволяє розширити можливості ВСП шляхом аналізу типу металу в підмножині немагнітних (мідь, золото, срібло і інших) і магнітних (сталь, нікель) матеріалів.

Метод. Запропоновано метод обробки відбитих від металевих неоднорідностей сигналів вихрострумових перетворювачів в часовій області, який дозволяє ідентифікувати тип металу в межах підмножини немагнітних і магнітних матеріалів, що дозволяє підвищити ефективність виявлення об'єктів, виконаних з кольорових і дорогоцінних металів, прихованих в діелектричному середовищі.

Часовий сигнал, отриманий ВСП, оцифровується і перетворюється програмним забезпеченням в графічний образ, в якому безперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями (графічним чином). Графічні образи мають велику інформаційну насиченість, тому що їх характерні лінії відрізняються координатами, висотою і полярністю. Фіксуються також точки переходу сигналу через нульовий рівень.

Така форма сигналу наочна і зручна для порівняння сигналів.

Результати. Запропонований метод реалізований програмно і експериментально підтверджена можливість його використання для розв'язання задачі ідентифікації типу металу в рамках підмножини немагнітних і магнітних матеріалів.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність запропонованого методу обробки сигналів вихрострумових перетворювачів і програмного забезпечення, що його реалізує. Вони дозволяють рекомендувати метод для вирішення завдань ідентифікації металу, з якого виготовлений об'єкт, що знаходиться в діелектричному середовищі (грунті). Перспективи подальших досліджень полягають в адаптації математичного і програмного забезпечення для ідентифікації сигналів серійних вихрострумових перетворювачів, що дозволить розширити їх функціональні можливості.

Ключові слова: вихрострумовий перетворювач, металеві неоднорідності, ідентифікація металів.

Abramovych A. A.¹, Kashirsky I. S.², Poddubny V. A.³

¹Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”, Kiev, Ukraine

²PhD., Associate Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”, Kiev, Ukraine

³PhD., Associate Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”, Kiev, Ukraine

METHOD OF PROCESSING THE REFLECTED SIGNALS FROM PULSED EDDY CURRENT CONVERTERS

Context. The problem of processing signals of eddy current converters (ECC) reflected from metal inhomogeneities in a dielectric medium (soil) is considered. The object of the study was the method of processing reflected signals.

Objective. The purpose of the work is to create a method of digital signal processing that is convenient for digital processing, which allows to expand the capabilities of an ECC by analyzing the type of metal in a subset of nonmagnetic (copper, gold, silver, etc.) and magnetic (steel, nickel) materials.

Method. The method of processing reflected from metal inhomogeneities signals of eddy current converters in the time domain is proposed, which allows to identify the type of metal within a subset of non-magnetic and magnetic materials, which makes it possible to increase the detection efficiency of objects made of non-ferrous and precious metals hidden in a dielectric medium.

The time signal obtained by the ECC is digitized and converted into a graphic image by the software, in which the continuous signal change is replaced by the characteristic lines (graphically). Graphic images have a high information saturation, because their characteristic lines differ in coordinates, height and polarity. The crossing points of the signal through zero are also fixed.

This form of signal is clear and convenient for comparing signals.

Results. The proposed method is implemented programmatically and experimentally confirmed the possibility of its use for solving the problem of identifying the type of metal within the subset of non-magnetic and magnetic materials.

Conclusions. The conducted experimental researches have confirmed the efficiency of the proposed method for processing signals of eddy current converters and the software of its implementer. They allow us to recommend a method for solving the problems of identifying the metal from which the object is made, which is located in a dielectric medium (soil). Prospects for further research are the adaptation of mathematical and software to identify the signals of the serial eddy current transducers, which will expand their functionality.

Keywords: eddy current transducer, metal inhomogeneities, metal identification.

REFERENCES

1. Scherbakov G. N. Uvelichenie predelnoy glubiny obnaruzheniya lokalnykh ferromagnitnykh obektov v tolsche provodyaschikh ukryivayuschiykh sred metodom distantsionnogo parametricheskogo podmagnichivaniya, *Radiotekhnika*, 2005, No. 12, pp. 42–45.
2. Pravda V. I., Mrachkovskiy O. D., Abramovych A. O. Georadary, *Visnik natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika». Seriya Radioelektronika ta telekomunikatsiyi*, 2015, No. 818, pp. 49–54.
3. Promyishlennaya gruppa Laborant. Analizatoryi metallov i rud [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <http://www.laborant.net/catalog> (data zvernennya 21.04.2017), Nazva z ekrana.
4. Abramovych A.O. RadIolokatsiyno-vihrostrumoviy radar, *Visnik NTTU «KPI» . Ser. RadIotekhnIka. Radioaparatabuduvannya*, 2014, Vyp. 57, pp. 77–82.
5. Berezin I. S., Zhidkov N. P. *Metodyi vychisleniy*, t.1. Moscow, Nauka, 1966, 632p.
6. Kunts K. S. *Chislennyiy analiz*. Moscow, Tehnika, 1964, 389 p.
7. Gantmaher F. R. *Teoriya matrits*. Moscow, Nauka, 1967, 575 p.
8. *CRS Handbook of Chemistry and Physics*, 87th Edition / Ed. D. R. Lide. Taylor & Francis, CRC Press, 2007, P. 9.77.
9. Sayfullin R. S., Sayfullin A. R. *Novaya tablitsa Mendeleeva, Himiya i zhizn*, 2003, No. 12, pp. 14–17.
10. Abramovych A. O., Mrachkovskiy O. D., Furmanchuk V. Yu (). Dykhotomichne rozrznennya metalu na chornyy-kol'orovyv za dopomohoyu spektral'noho analizu, *Visnyk Zhytomyr's'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Ser: Tekhnichni nauky*, 2017, No. 1(79), pp. 48–51.