


APPLICATION OF STATISTICAL PHASE METER IN NON-DESTRUCTIVE TESTING
**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФАЗОМЕТРИИ
В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ**

 Проф. д-р. техн. наук Куц Ю.В.¹, Лисенко Ю.Ю.¹, Дергунов А.В.²

 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»¹, Национальный авиационный университет² – Киев, Украина,

E-mail: y.kuts@ukr.net, j.lysenko@kpi.ua

Abstract: The article summarizes the authors' experience on the application of statistical phase meter methods in NDT. The general methodological basis of these methods is the Hilbert transformation in conjunction with statistical analysis of signal's phase characteristic. Examples of the use of a discrete signal phase characteristics and based on them sample circular mean, sample circular variance, sample circular median and etc in acoustic and eddy current NDT are discussed. This allows you to expand the possibilities of the known NDT methods through the use of new information parameters and characteristics of cyclic signals.

KEY WORDS: HILBERT TRANSFORM, PHASE SIGNAL CHARACTERISTICS, SAMPLE CIRCULAR STATISTICS

1. Введение

В условиях интенсивного создания новых конструкционных материалов, технологий их изготовления, усложнения технических объектов необходимым условием их безопасной эксплуатации является усовершенствование существующих и разработка новых систем контроля и технической диагностики. Важной составляющей этой задачи является усовершенствование и развитие методов обработки измерительных сигналов, направленных на получение более полной информации о свойствах объекта контроля (ОК).

Значительное количество методов неразрушающего контроля (НК), например, акустические и электромагнитные [1], связано с использованием циклических процессов и сигналов, что позволяет применить фазовый метод преобразования и выделения информации о характеристиках ОК. Свойство цикличности проявляется в повторяемости определенных стадий или состояний процессов и сигналов.

Реализация фазового метода в детерминированной постановке на одной рабочей частоте предполагает преобразование исследуемого параметра p ОК в фазовый сдвиг $\varphi \in [0, 2\pi)$ гармонических сигналов этой частоты. Чаще всего такое преобразование является линейным, поэтому $\varphi = Kp$, где K – размерный коэффициент, а диапазон измерения параметра p ограничен интервалом $[0, 2\pi/K)$.

Реализация детерминированного многочастотного варианта фазового метода чаще всего направлена либо на определение фазочастотной характеристики $\varphi(\omega)$, где ω – круговая частота, сигналов НК (а значит и соответствующей характеристики среды их передачи) так и на расширение диапазона однозначного измерения фазового сдвига до величины $2\pi t$, где t – количество целых фазовых циклов [2]. Тогда диапазон однозначного измерения параметра p увеличивается до интервала $[0, 2\pi t/K)$. Метод предполагает измерение фазовых сдвигов гармонических сигналов на ряде частот с последующим их пересчетом на высокую частоту.

Более широкие возможности имеют методы статистической фазометрии [3], основанные на использовании функциональных или корреляционных связей различных круговых статистик C_φ фазовых сдвигов сигналов НК с параметрами ОК. Эти методы предполагают определение оценок \hat{C}_φ по выборкам фазовых сдвигов сигналов $(\varphi_1, \dots, \varphi_N)$ объема N . В качестве \hat{C}_φ могут использоваться выборочные тригонометрические моменты, выборочное круговое среднее, выборочные дисперсия, медиана и др. [4, 5].

Применение методов статистической фазометрии в НК обусловлено следующим. Во-первых, значение контролируемого параметра или характеристики ОК изменяется под влиянием множества факторов и может рассматриваться как реализация случайной величины при взаимодействии преобразователя с ОК в одной точке, или как реализация случайного процесса в случае сканирования ОК. Во-вторых, информационные сигналы в системах НК наблюдаются на фоне шумов, причем в силу различных причин не всегда удается улучшить отношение сигнал/шум за счет увеличения мощности сигнала. В-третьих, сканирование ОК преобразователем приводит к модуляции амплитудных и фазовых характеристик сигналов НК. Учитывая вероятностный характер как процессов формирования циклических сигналов НК, так и процессов определения их характеристик, анализ таких сигналов не может быть выполнен без привлечения методов теории вероятности и математической статистики.

В отличие от статистического анализа амплитудных характеристик, методы статистического анализа фазовых характеристик циклических сигналов еще не нашли широкого практического применения в НК. На наш взгляд их внедрение в практику НК позволит расширить информационные возможности методов НК за счет учета большего объема экспериментальных данных и определения дополнительных статистических характеристик циклических сигналов.

В статье обобщен опыт авторов по использованию методов статистической фазометрии в НК, что позволяет расширить сферу применения известных методов НК за счет новых для этой области

информационных параметров и характеристик циклических сигналов и получения более полной информации об ОК.

2. Предпосылки и средства решения задачи

Методология решения задач получения и статистического анализа фазовых характеристик циклических сигналов НК базируется на совокупности двух составляющих: дискретном преобразовании Гильберта [3, 6], позволяющем получать выборки фазовых характеристик сигналов, и статистическом анализе результатов угловых данных [4, 5, 7]. Ниже кратко изложены основные сведения, необходимые для уяснения полученных практических результатов.

2.1. Получение выборки значений фазовой характеристики сигнала

Пусть существующий во временной области сигнал $u(t)$, $t \in [0, T_n]$, где T_n – время наблюдения сигнала, представляет аддитивную смесь циклического сигнала и гауссова шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . После аналого-цифрового преобразования этот сигнал представляется выборкой $u[j]$, $j = \overline{1, N}$, где $N = [T_n/T_d]^+$ – объем выборки, T_d – период дискретизации сигнала, $T_d \ll 2\pi/\omega$, $[]^+$ – операция выделения целой части числа, ω – круговая частота сигнала.

К выборке $u[j]$ применимо дискретное преобразование Гильберта, которое реализуется оператором \mathbf{H}_d , в результате чего формируется гильберт-образ выборки

$$(1) \quad \hat{u}[j] = \mathbf{H}_d [u[j]], \quad j = \overline{1, N}.$$

Дискретные амплитудная, фазовая и частотная характеристики для выборки $u[j]$ определяются соответственно как [3]:

$$(2) \quad A[j] = \sqrt{u^2[j] + \hat{u}^2[j]}, \quad j = \overline{1, N},$$

$$(3) \quad \Phi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \mathbf{L}[\hat{u}[j], u[j]], \quad j = \overline{1, N},$$

$$(4) \quad \psi[j] = \frac{\Phi[j] - \Phi[j-1]}{2\pi T_d}, \quad j = \overline{2, N}.$$

где \mathbf{L} – оператор развертывания фазовой характеристики сигнала за границы интервала $[-0, 5\pi; 0, 5\pi]$.

Круговые статистики вычисляются для разности характеристики (3) и фазы гармонического сигнала частотой ω

$$(5) \quad \varphi[j] = \Phi[j] - \omega T_d j, \quad j = \overline{1, N}.$$

Выборка (5) допускает удобное графическое отображение в виде точек на окружности единичного радиуса.

2.2. Оценивание выборочных круговых статистик выборки $\varphi[j]$

Для выборки $\varphi[j]$, $j = \overline{1, N}$ доступны вычислению все известные в статистическом анализе угловых наблюдений выборочные круговые статистики [4, 5, 7], из которых наибольшую практическую ценность для НК имеют следующие.

Выборочное круговое среднее направление (фазовый сдвиг сигналов)

$$(6) \quad \varphi_c = \arctg \frac{S}{C} + \frac{\pi}{2} \{2 - (\text{sign}S) \cdot (1 + \text{sign}C)\},$$

$$\text{где } C = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \cos \varphi[j], \quad S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sin \varphi[j],$$

sign – знаковая функция.

Характеристика (6) удовлетворяет условию аддитивности.

Выборочная длина результирующего вектора

$$(7) \quad r = \sqrt{C^2 + S^2}$$

и связанная с ней выборочная круговая дисперсия

$$(8) \quad V = 1 - r.$$

Характеристики (7) и (8) имеют свойство инвариантности относительно начала отсчета углов.

Выборочная круговая медиана выборки $\varphi[j]$ – это угол, которому соответствует такая точка P на окружности единичного радиуса, для которой диаметр PQ делит число элементов выборки пополам, и в окрестности P наблюдается максимальная концентрация ее значений.

Выборочная мода выборки $\varphi[j]$ – это угол, которому соответствует точка на окружности единичного радиуса, в окрестности которой наблюдается максимальная концентрация элементов выборки.

Выборочный тригонометрический момент порядка u относительно направления α (u – целое число)

$$(9) \quad T_u(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{iu(\varphi_j - \alpha)} = a_u(\alpha) + ib_u(\alpha) = r_u(\alpha) e^{im_u(\alpha)},$$

$$\text{где } r_u(\alpha) = \sqrt{a_u^2(\alpha) + b_u^2(\alpha)} = \sqrt{a_u^2(0) + b_u^2(0)} = r_u(0).$$

Из последнего выражения следует, что статистика r_u имеет свойство инвариантности к выбранному направлению α .

3. Применение круговых статистик в задачах НК

Ниже даны примеры применения методов статистической фазометрии для решения задач обнаружения радиоимпульсных сигналов ультразвуковой толщинометрии (УЗТ), оценки их положения во времени, оценки параметров ОК в импульсном вихретоковом контроле и некоторые другие.

3.1. Применение фазовой характеристики сигналов для ультразвукового контроля многослойных материалов

В эхо-импульсной УЗТ используют импульсные сигналы с высокочастотной (в диапазоне 1...10 МГц) несущей. Если слои в многослойном материале имеют отличающиеся акустические импедансы и небольшую толщину, отраженные от границы слоев ультразвуковые колебания частично совпадают во времени и не могут быть селектированы методами частотной фильтрации. Однако существует возможность определить моменты их прихода по скачкам значений фазовой характеристики (3) высокочастотной несущей донных сигналов, что позволяет по известной скорости распространения ультразвуковых сигналов в различных слоях ОК вычислить их толщины. Эта идея реализована в патенте Украины №18441 «Способ ультразвукового измерения толщины многослойных материалов и изделий».

3.2. Применение выборочной круговой дисперсии для обнаружения сигналов УЗТ

Одной из наиболее часто встречающихся задач ультразвукового НК является задача определения толщины объектов и изделий разного назначения. Известным решением этой задачи является эхо-импульсный метод УЗТ.

Свойство инвариантности выборочной круговой дисперсии (8), определенной для разницы (5) фазовых характеристик донных сигналов и ее несущей, позволяет использовать эту статистику для обнаружения донных сигналов на фоне значительных аддитивных шумов. Текущие значения статистики (8) $V[j]$ определяют путем скользящей оконной обработки выборки (5). Интервал времени между двумя

смежными минимумами $V[j]$ соответствует времени распространения колебаний в ОК, что позволяет рассчитать толщину ОК по известной скорости ультразвуковых колебаний в материале ОК. Идея реализована в патенте Украины №35057 «Способ ультразвукового измерения толщины изделий».

3.3. Применение в УЗТ r-статистики

С точки зрения удобства обработки в УЗК выгоднее интервалы времени определять не по минимумам $V[j]$, а по максимумам линейно связанной с ней выборочной длины результирующего вектора (7): $r[j] = 1 - V[j]$. Для последовательности $r[j]$, имеющей в случае эхо-импульсной УЗТ импульсную форму, предложено повышение отношения сигнал/шум за счет адаптивной медианной фильтрации $r[j]$ (патент Украины №103513) и ее взвешенной обработки.

3.4. Использование фазовой характеристики сигналов для определения текущей частоты сигналов НК

В методах НК, предполагающих преобразование контролируемых параметров ОК в частоту сигналов НК выполняется модуляция последней во время сканирования ОК. В этом случае актуальной является задача прецизионного определения текущей частоты модулированных гармонических сигналов. Реализованный в патенте Украины №65208 способ измерений частоты сигнала заключается в определении его фазовой характеристики (3), ее сканировании скользящим окном прямоугольной формы с апертурой 2π , определении пары индексов j и $j+k$, для которых выполняется условие

$$(10) \quad \Phi[j+k] - \Phi[j] \leq 2\pi < \Phi[j+k+1] - \Phi[j]$$

и вычислении текущих значений частоты сигнала

$$(11) \quad \omega[j] = (\Phi[j+k] - \Phi[j]) / kT_d$$

3.5. Определение частоты гармонических сигналов на фоне аддитивного белого шума

В системах ультразвукового контроля, использующих эффект Доплера, важной задачей является прецизионное определение частоты гармонической несущей принятых в шумах импульсных сигналов НК. В предложенном техническом решении повышение точности определения частоты достигается тем, что частота несущей определяется по фазовой характеристике (3), определенной для автокорреляционной функции исследуемого сигнала. Эта идея реализована в патенте Украины №53662 «Способ определения частоты гармонических сигналов в присутствии помехи».

3.6. Использование фазовой характеристики фазоманипулированного сигнала в УЗТ

Фазовая манипуляция несущей эхо-импульсных сигналов УЗТ позволяет сформировать точку разрыва их фазовой характеристики, что обеспечивает возможность прецизионного измерения времени распространения сигналов НК в ОК и, следовательно, его толщины. Эта идея реализована в патенте Украины №79972 «Способ ультразвукового измерения толщины материалов и изделий».

Повышение помехоустойчивости данного способа возможно за счет использования при определении фазовой характеристики (3) круговой медианной фильтрации данных, которая реализуется во время движения скользящего прямоугольного окна вдоль выборки текущих значений фазовых данных сигналов УЗТ путем замены значения элемента ряда в центре апертуры выборочной круговой медианой отобранных окном значений ряда. Такие фильтры отличаются способностью передачи скачков фазы фазоманипулированных сигналов с одновременным существенным подавлением шумовой составляющей.

3.7. Применение амплитудных и фазовых характеристик сигналов в импульсном вихретоковом контроле

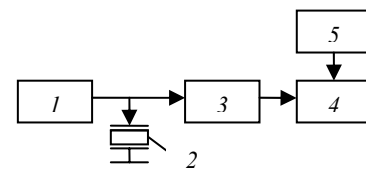
В случае импульсного возбуждения вихретоковых преобразователей их выходные сигналы имеют вид затухающих по экспоненте гармонических колебаний. Частота и декремент последних могут быть определены соответственно по фазовой и амплитудной характеристикам сигналов преобразователей, а их значения могут быть связаны с определенными параметрами и характеристиками ОК. Идея реализована в патенте Украины №79972 «Способ импульсного вихретокового контроля объектов цилиндрической формы».

3.8. Применение выборочных тригонометрических моментов для определения отношения сигнал/шум

В работе [8] предложен и проанализирован способ определения отношения сигнал/шум для аддитивной смеси гармонического сигнала и гауссова шума, основанный на вычислении модулей последовательности выборочных тригонометрических моментов (9) различных порядков, определенных для разности (5) фазовых характеристик сигналов.

4. Экспериментальная проверка и обсуждение полученных результатов

Структура экспериментальной установки [9] для ультразвуковых исследований приведена на фиг.1. Зондирующий сигнал поступал на совмещенный пьезоэлектрический преобразователь 2 (типа Parametrics C-309 с рабочей частотой 5,0 МГц) и вводился в ОК. Принятый после распространения в ОК сигнал подавался на одноплатный дефектоскоп 3 типа Socomate USPC 3100 LA (полоса пропускания приемника 0,35 – 30 МГц; динамический диапазон – 105 дБ; частота дискретизации и разрядность АЦП соответственно 100 МГц и 10 бит). Дефектоскоп 3 формировал выборки зондирующего и отраженного сигналов и передавал их для анализа и обработки в ПК (4) в соответствии с программным обеспечением (5).

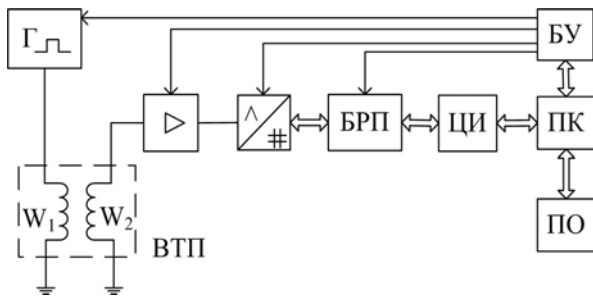


Фиг.1 Структура установки для ультразвукового НК

Тестирование установки выполнялось на стандартном образце СО-2А (согласно ГОСТ 17482–86).

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили возможность неискаженной передачи скачков значений фазовой характеристики фазоманипулированных сигналов в электроакустическом тракте толщиномера и эффективность использования круговых статистик в рассмотренных задачах ультразвукового контроля.

В работах [10, 11] методы статистической фазометрии использованы для решения задач импульсного вихретокового контроля. На фиг.2 приведена структура экспериментальной установки, которая состоит из накладного трансформаторного вихретокового преобразователя (ВТП), генератора прямоугольных импульсов (Г), усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, аналого-цифрового преобразователя, буферного регистра памяти (БРП), цифрового интерфейса (ЦИ), персонального компьютера (ПК) с программным обеспечением (ПО), и блока управления (БУ). Разработанное ПО предусматривало реализацию алгоритма обработки внесенных сигналов ВТП во временной области на основе преобразования Гильберта для получения и последующего анализа амплитудных и фазовых характеристик сигналов.



Фиг. 2 Структура установки для вихрекового НК

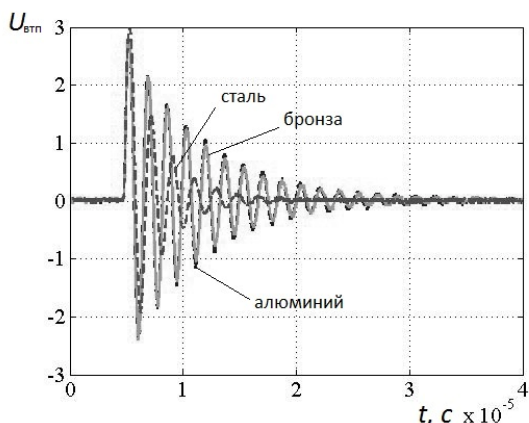
На первичную катушку (с числом витков $W_1 = 80$) накладного ВТП поступал возбуждающий импульсный сигнал от генератора тока (сила тока $I = 5 \text{ mA}$, период повторения $T_n = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, длительность импульса $\tau = 62.4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$):

$$(12) \quad i(t) = \begin{cases} 5 \text{ mA}, & t_1 + kT_n < t < t_1 + \tau + kT_n \\ 0 \text{ A}, & t_1 + \tau + kT_n < t < t_1 + T_n(k+1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

Сигнал измерительной катушки ($W_2 = 420$) ВТП усиливался и оцифровывался АЦП, в результате чего получались выборки сигнала $u[j]$, $j = \overline{1, \dots, 10000}$.

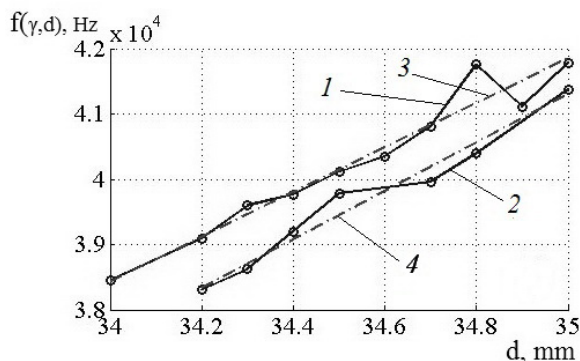
Дискретизация сигнала проходила с периодом $T_D = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}$. Полученные данные записывались в БРП и через ЦИ передавались в ПК для дальнейшей обработки и анализа. Синхронизация работы элементов системы обеспечивалась БУ.

На фиг. 3 приведены фрагменты сигналов накладного ВТП в задаче исследования ОК из различных материалов.



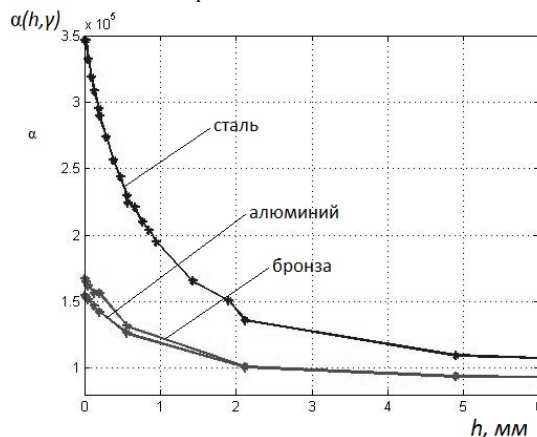
Фиг.3 Фрагменты сигналов ВТП

На фиг. 4 представлен график зависимости частоты сигнала ВТП от диаметра алюминиевых (кривая 1) и бронзовых (кривая 2) образцов, а также приведены их линейные тренды (кривая 3 и 4). Анализ этих графиков показывает, что изменение диаметра образцов приводит к изменению частоты сигнала ВТП, которая имеет близкий к линейному характер функциональной зависимости.



Фиг.4. Зависимость частоты сигнала ВТП от диаметра ОК

График полученной зависимости $\alpha = F(h)$, приведенный на фиг. 5, указывает на увеличение декремента сигнала ВТП при уменьшении толщины диэлектрического покрытия в пределах одного материала.



Фиг.5. Зависимость декремента сигналов ВТП от толщины покрытия

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что декремент и частота собственных колебаний вихрекового преобразователя в режиме импульсного возбуждения могут быть использованы для определения диаметра и удельной электропроводности ОК цилиндрической формы, толщины диэлектрических покрытий на проводящем материале и др.

5. Выводы

В статье обобщен опыт авторов по применению методов статистической фазометрии в неразрушающем контроле. Общей методологической основой этих методов является дискретное преобразование Гильберта и статистический анализ угловых (фазовых) данных, которые в теоретическом плане хорошо изучены. На наш взгляд новизна результатов и их ценность заключаются в том, что объединение составляющих разработанной методологии ведет к достижению нового качества обработки циклических сигналов НК.

Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований по применению дискретных фазовых характеристик сигналов и полученных на их основе выборочных характеристик – кругового среднего, круговой дисперсии, круговой медианы и т.п. в акустическом и вихрековом НК.

Использование методов статистической фазометрии позволяет включить в технологию НК новые информационные параметры и расширить возможности НК за счет круговых статистик, а также за счет повышения точности определения информационных параметров и характеристик сигналов.

6. Список литературы

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева – М.: Машиностроение, 2004.
2. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний /Маевский С.М., Баженов В.Г., Батуревич Е.К., Куц Ю.В – К.: Выща школа, изд-во при Киев. университете, 1983.– 84с.
3. Куц Ю.В. Статистична фазометрія / Куц Ю.В., Щербак Л.М. // Наукова монографія. – Тернопіль: Тернопільський державний університет ім. І. Пулюя, 2009. – 383 с.
4. N.I. Fisher. Statistical Analysis of Circular Data. Cambridge University Press, 2000.– 277 p.
5. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посібник / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В./ К.: НАУ, 2015. – 321 с.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. -540 с.– 471 с.

7. Kuts Y., Shengur S. Scherbak L. Circular Measurement Data Modeling and Statistical Processing in LabView / 2011 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium: Зб. наук. праць. – К.: НВФ «Славутич-Дельфін». – Р. 317-320
8. Куц Ю.В. Застосування методу тригонометричних моментів в аналізі даних фазових вимірювань / Ю.В. Куц, І.А. Купрійчук, А.А. Рижкова // Системи обробки інформації. – 2013. – №6 (113). – С. 98-102.
9. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики. / Бабак В.П., Бабак С.В., Берегун В.С. та ін. За редакцією В.П. Бабака/ – К.: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2015. – 512 с.
10. Kuts Y., Protasov A., Lysenko U., Dugin O. Pulsed eddy current non-destructive testing of the coating thickness / Book of abstracts: 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10. – Prague, Czech Republic. – С. 187 – 195.
11. Куц Ю.В., Лисенко Ю.Ю. Імпульсний вихрострумний контроль товщини діелектричного покриття на магнітній основі / Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування.– 2015.– Вип. 49(1). С.68-74.